

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

تلمسان الجزائر

République Algérienne Démocratique et Populaire



**FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE**

Filière : Télécommunications

Projet de Fin d'Etudes

Master : Télécommunications

Option : Réseaux Mobiles et Services

Intitulé :

**MODELISATION NUMERIQUE DES EFFETS THERMIQUES
DANS LE TRANSISTOR HEMT EN THECHNOLOGIE GAN**

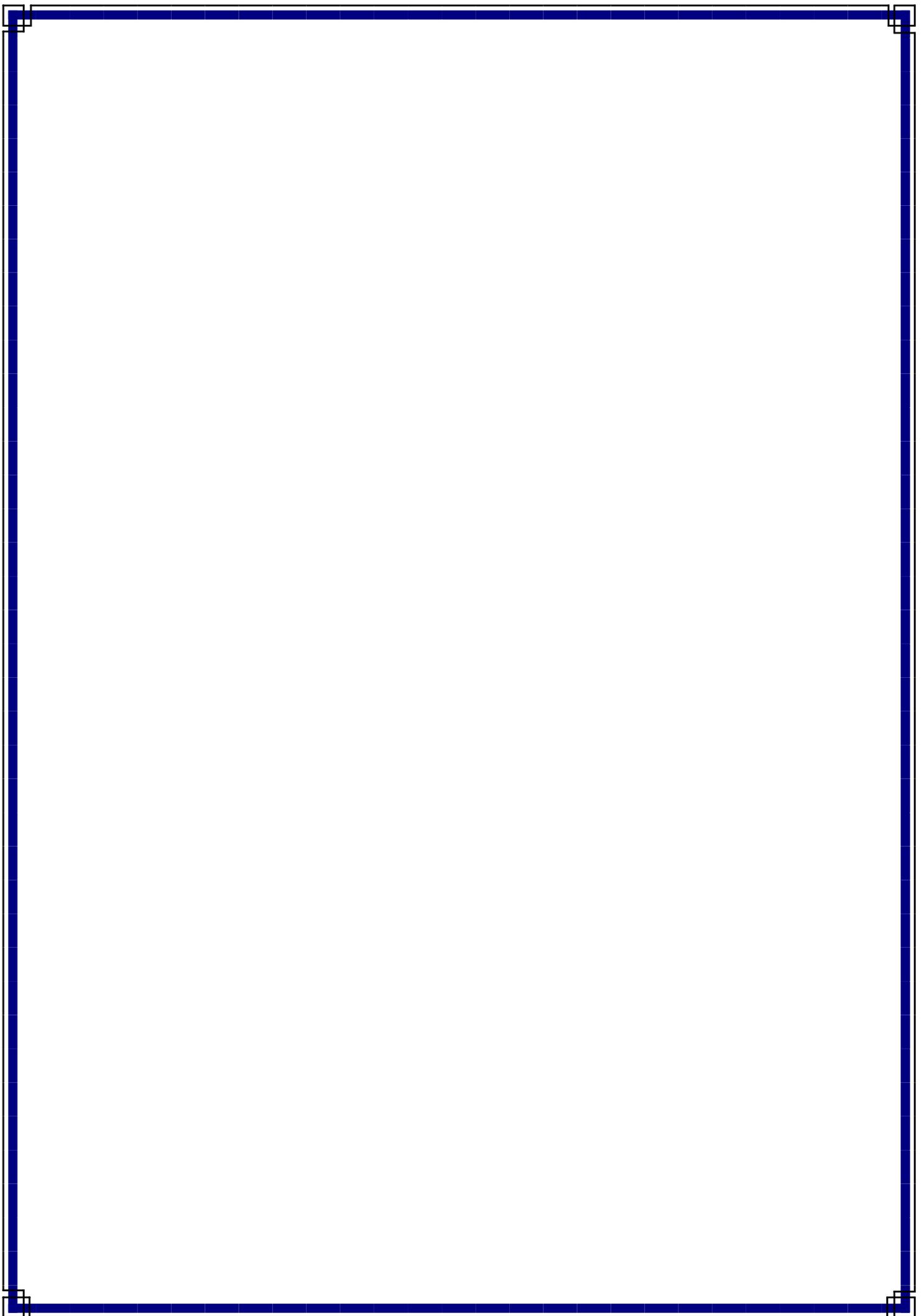
Présenté par :

- FARADJI Mohammed Amine
- SENOUCI Abdelmounaime

Soutenu en juillet 2013 devant le jury composé de

M ^r MERZOUGUI Rachid	Président	M.C.A à l'Université de Tlemcen
M ^{elle} DJELTI Hamida	Encadreur	M.C.B à l'Université de Tlemcen
M ^r ABRI Mehadji	Examineur	M.C.A à l'Université de Tlemcen
M ^{elle} BENMOSTEFA Naima	Examinatrice	M.A.A à l'Université de Tlemcen

Année Universitaire : 2012-2013



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المخلص

في الآونة الأخيرة، الترانزستورات ذات التنقل الإلكتروني المرتفع (HEMTs) بناء على نيتريد الغاليوم (GaN) قادرين على التنافس مع الترانزستورات LDMOS ذات ركيزة السيليكون (Si) و pHEMTs ذات ركيزة أرسنيد الغاليوم (GaAs) على محطات السوق المستخدمة للاتصالات (3G، 4G، WiMAX،...). كما استخدم التقدم التكنولوجي في السنوات الأخيرة بسماع تقديم ترانزستورات سريعة مع ميزات هامة. إن تصميم الدوائر للنظم المعقدة يتطلب كثافة عالية التكاملي، وهذا يطرح بمعالجة التأثيرات الحرارية المرتبطة بتبديد الطاقة العالية والتي تكون مسؤولة عن تدهور أداء هذه الأنظمة. العمل المقدم في هذه الأطروحة يتعلق بدراسة التأثير الحراري على سلوك DC للترانزستور HEMT ذو تكنولوجيا الغاليوم. في هذا السياق، نموذج فيزيو- حراري نابع عن تلازم نموذج إنتقال الشحنات والنموذج الحراري، يعتمد على طريقة العناصر المحدودة قد طور لهذا الترانزستور. هذا النموذج يسمح بالدراسة والتحليل المفصل لتأثير الحرارة على مجمل العناصر الكهربائية والحرارية في أي نقطة من المركبات. كما يصف أدائها الكهربائي والحراري و بالتالي فإنه يأخذ بعين الاعتبار حرارة انصاف النواقل. وقد استخدم هذا النموذج لدراسة تأثير بعض المعلمات التكنولوجية التي تؤثر على أداء الترانزستور مثل طول البوابة، وسمك الحاجز والركيزة. **كلمات البحث:** GaN، HEMT، تبديد الحرارة، العناصر المحدودة.

Résumé

Récemment, les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) à base de nitrure de gallium (GaN) sont capables de concurrencer les transistors LDMOS à base de silicium (Si) et les pHEMTs à base d'arséniure de gallium (GaAs) sur le marché des stations de bases utilisées pour les télécommunications (3G, 4G, WiMAX,...). Les progrès technologiques accomplis ces dernières années permettent de disposer des transistors rapides ayant des caractéristiques intéressantes. La conception des circuits pour les systèmes complexes nécessitent une grande densité d'intégration, ceci impose de traiter les effets thermiques liés aux fortes dissipations de puissances et qui sont responsables de la dégradation des performances de ces systèmes.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de l'effet thermique sur le comportement DC du transistor HEMT en technologie GaN. Dans ce cadre, un modèle physico-thermique issu d'un couplage d'un modèle de dérive-diffusion et d'un modèle thermique est basé sur la méthode des éléments finis a été développé pour ce transistor. Ce modèle prend en compte la température de réseau en tout point du composant. Il permet l'étude et l'analyse détaillée de l'effet de la température sur l'ensemble des paramètres de ce composant. Ce modèle a été exploité pour examiner l'influence de certains paramètres technologiques qui impactent les performances du transistor tels que la longueur de la grille, l'épaisseur de la barrière et du substrat.

Mots clés : HEMT, GaN, Dissipation thermique, Eléments finis.

Abstract

Recently, high electron mobility transistors (HEMTs) based on gallium nitride (GaN) are able to compete the LDMOS transistors based on silicon (Si) and pHEMTs based on gallium arsenide (GaAs) on market base stations used for telecommunications (3G, 4G, WiMAX, ...). Technological advances in recent years have used to fast transistors with interesting features. Circuit design for complex systems require high integration density, this requires treating the thermal effects associated with high power dissipation and are responsible for the degradation of the performance of these systems.

The work presented in this thesis focuses on the study of the thermal effect on the DC behavior of GaN HEMT technology. In this context, a physical model from a thermal coupling of a drift-diffusion model and a thermal and based on the finite element model was developed for this transistor. This model takes into account the temperature at any point of the network component. It allows the study and detailed analysis of the effect of temperature on all the parameters of the component. This model was used to examine the influence of some technological parameters that affect the performance of the transistor such as gate length, the thickness of the gate and the substrate.

Keywords : HEMT, GaN, thermal dissipation, finite elements.

Dédicace



C

'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.

Je le dédie à :

*Ma très chère **mère**, qui a toujours été présente pour moi, dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout*

l'amour qu'elle me porte.

*Mon très cher **père**, pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mise en moi et pour son dévouement pour mon bonheur.*

Que dieu me le garde.

*Mon cher frère : **Kheireddine**.*

*Ma chère sœur : **Asma**.*

Toute la famille : FARADJI, HARCHAOUI, MÉHADJI, KADRINE, HAMMADI, HAFFAF, TABET HELAL et MEDHAR.

Tous mes amis(es), amis de scouts et collègues...

*Mon binôme **SENOUCI Abdelmounaïme** et toute sa famille.*

Tous mes enseignant.

Toute la promotion de génie électrique et électronique 2013 plus particulièrement la promotion « Réseaux Mobiles et Services » chaque un par son nom.

 **FARADJI**
Mohammed
Amine

Dédicace



C

'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail.

Je le dédie à :

*Ma très chère **mère**, qui a toujours été présente pour moi, dans les moments les plus difficiles et qui sans cesse veille sur moi avec ses prières, pour ses grands sacrifices et tout*

l'amour qu'elle me porte.

*Mon très cher **père**, pour tous ses conseils et pour toute la confiance qu'il a mise en moi et pour son dévouement pour mon bonheur.*

Que dieu me le garde.

*Mes chères sœurs : **Kawther et Amel.***

*Toute la famille : **SENOUCI et BAI.***

Tous mes amis(es) et collègues...

*Mon binôme **FARADJI Mohammed Amine** et toute sa famille.*

Tous mes enseignants

Toute la promotion de génie électrique et électronique 2013 plus particulièrement la promotion « Réseaux Mobiles et Services » chacun par son nom.

 **SENOUCI**
Abdelmounaïme

Remerciements



A

travers ce modeste travail, nous remercions ALLAH pour nous avoir donné santé, courage et aide pour la confection de cet ouvrage.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur mademoiselle DJELTI HAMIDA pour ses précieux conseils et son encadrement afin de mener à bien ce modeste travail.

Nos sincères remerciements s'adressent également à monsieur le président de jury MERZOUGUI Rachid et les membres du jury de Mr ABRI Mehadji et Melle BENMOSTEFA Naima pour l'honneur qu'ils nous font pour juger et examiner ce travail de mémoire.

Au terme de ce travail, nous voudrions adresser nous vifs remerciements à tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.

SENOUCIA ET FARADJI.M.A

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Filières technologiques et évolution du HEMT vers une structure à base de GaN

I-1 Introduction	4
I-2 Principales propriétés des matériaux III-N	4
I-2-1 Structure cristalline	4
I-2-2 Structure de bande	5
I-2-3 Effets de polarisation dans le cristal	7
I-2-3-1 Polarisation spontanée	7
I-2-3-2 Polarisation piézoélectrique	10
I-3 Les transistors à effet de champ pour les applications hyperfréquences	12
I-3-1 Généralités	12
I-3-2 Le MESFET	12
I-3-3 Le HEMT	13
I-3-3-1 Historique du transistor HEMT	14
I-3-3-2 Principe de fonctionnement d'un transistor HEMT classique	14
I-3-3-3 Les différentes couches d'un transistor HEMT AlGaAs/GaAs classique	14
I-3-3-4 Origine du fonctionnement d'un transistor HEMT AlGaAs/GaAs	17
I-3-3-5 Les limitations de la technologie à base d'Arséniure de Gallium appliquée à la fabrication de transistor HEMT	18
I-3-4 Le Transistor HEMT en technologie GaN	19
I-3-4-1 Définition de la structure par couche du transistor HEMT GaN	19

I-3-4-2 Diagramme des bandes de la structure HEMT GaN et son fonctionnement ...	21
I-3-4-3 Etat de l'art du transistor HEMT en GaN d'après l'ITRS	23
I-4 Conclusion	25

CHAPITRE II : Modélisation physico-thermique du HEMT GaN

II-1 Introduction	27
II-2 Polarisation dans les HEMTs AlGaIn/GaN	27
II-2-1 Polarisation piézoélectrique	27
II-2-2 Polarisation spontanée	30
II-3 Détermination de la quantité de charge à l'interface AlGaIn/GaN	31
II-4 Détermination de la quantité de charge à l'interface AlGaIn/GaN en GaN contraint en tension	33
II-5 Modèle physico-thermique du HEMT	36
II-5-1 Modèle physico-électrique du HEMT	36
II-5-2 Modèle thermique du HEMT	37
II-6 Résolution numérique par la méthode des éléments finis	38
II-6-1 Couplage physico-thermique	38
II-6-2 Paramètres d'entrée du modèle numérique	39
II-6-3 Configuration de la densité de charges qui constitue le 2DEG	39
II-6-4 Définition de la mobilité en fort champ	41
II-7 Conclusion	42

CHAPITRE III : Résultats et interprétations

III-1 Introduction	45
III-2 Description du logiciel SILVACO	45
III-3 Topologie de la structure étudiée	47
III-3-1 Maillage	48
III-3-2 Diagramme de bandes d'énergie	50
III-4 Résultats et interprétations	51
III-4-1 Résultats statiques	51

III-4-1-1	Caractéristiques de sortie Ids-Vds.....	51
III-4-1-2	Caractéristiques de transfert Ids-Vgs	53
III-4-2	Effet des paramètres géométriques sur les caractéristiques du HEMT en GaN	54
III-4-2-1	Effet de la longueur de la grille.....	54
III-4-2-2	Effet de l'épaisseur de la couche barrière	55
III-4-2-3	Impact de l'épaisseur de substrat	57
III-4-2-4	Impact du matériau de substrat.....	58
III-4-3	Distribution des grandeurs électriques dans le HEMT AlGa _N /Ga _N /4H-SiC	60
III-4-3-1	Carte du potentiel	60
III-4-3-2	Carte de concentration en électron.....	62
III-4-3-3	Carte de la température de réseau	63
III-5	Conclusion	64
	Conclusion générale	67
	Références bibliographiques	70
	Annexe A.....	74

Liste des figures

CHAPITRE I : Filières technologiques et évolution du HEMT vers une structure à base de GaN

Figure I.1: Représentation du réseau cristallin du GaN dans sa structure hexagonale de type wurtzite.....	5
Figure I.2: (a) Structure de bandes et densité d'états du w-GaN et (b) Schématisation de la première zone de Brillouin dans un cristal de w-GaN	5
Figure I.3: Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN.....	8
Figure I.4: (a) Structure GaN wurtzite et (b) Polarisation spontanée dans une structure GaN wurtzite.....	9
Figure I.5: Charges en surface couche GaN wurtzite	9
Figure I.6: Sens de la polarisation piézoélectrique dans le GaN pour deux contraintes données : (a) en tension et (b) en compression	11
Figure I.7: Vue en coupe du MESFET implanté auto-aligné	13
Figure I.8: Schéma de principe du HEMT classique AlGaAs/GaAs.....	15
Figure I.9: Influence de la polarisation de grille sur le diagramme des bandes de l'hétérojonction	18
Figure I.10: structure d'un transistor HEMT $Al_xGa_{1-x}N/GaN$	20
Figure I.11: Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique.....	22
Figure I.12: Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT AlGaAs/GaN l'équilibre thermodynamique.	22

CHAPITRE II : Modélisation physico-thermique du HEMT GaN

- Figure II.1:** Répartition des charges et des polarisations piézoélectrique et spontanée à travers la structure HEMT GaN, création du 2DEG dans le cas idéal 31
- Figure II.2:** Evolution des polarisations piézoélectrique et spontanée et de la densité de charges à l'interface AlGa_N/Ga_N en fonction de la fraction molaire x 32
- Figure II.3:** Visualisation des différentes sortes de polarisations qui agissent au sein de chacune des couches et de la répartition des charges aux interfaces 34
- Figure II.4:** Diagramme énergétique de l'ensemble de la structure du composant 35
- Figure II.5:** Evolution de la vitesse des électrons selon l'amplitude du champ électrique..... 41

CHAPITRE III : Résultats et Interprétations

- Figure III.1:** Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par SILVACO..... 46
- Figure III.2:** Topologie de la structure HEMT Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN simulée 48
- Figure III.3:** Structure maillée du transistor HEMT AlGa_N/Ga_N..... 49
- Figure III.4:** Diagramme de bandes d'énergie du HEMT AlGa_N/Ga_N à l'équilibre thermodynamique..... 50
- Figure III.5:** Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} mesurées pour V_{gs} variant de 0 à -2V avec un pas de 1 V 52
- Figure III.6:** Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} avec (courbes continues) et sans effets thermiques (courbes en symboles) pour V_{gs} variant de 0 à -2 V 52
- Figure III.7:** Caractéristiques de transfert I_{ds} - V_{gs} d'un HEMT Al_{0.3}Ga_{0.7}N/ GaN pour $V_{ds} = 5$ et 8V 53

Figure III.8: Influence de la longueur de grille sur les caractéristiques de sortie Ids-Vds pour $V_{gs} = 0$ et -1 V avec deux longueurs de grille différentes : (a) $L_g = 0.5 \mu\text{m}$ et (b) $L_g = 0.7 \mu\text{m}$	55
Figure III.9: Influence de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques Ids-Vds pour $V_{gs} = 0$ et -1 V avec deux épaisseurs différentes de la couche barrière : (a) $E_p = 0.026 \mu\text{m}$ et (b) $E_p = 0.028 \mu\text{m}$	56
Figure III.10: Influence de l'épaisseur de substrat sur les caractéristiques Ids-Vds, pour $V_{gs} = -1$ V, (a) $E_p = 4.5 \mu\text{m}$ et (b) $E_p = 5 \mu\text{m}$	57
Figure III.11: Influence du substrat (a) 4H-SiC, (b) Sapphire et (c) Silicium sur les caractéristiques de sortie Ids-Vds pour $V_{gs} = 0$ et -1 V.....	60
Figure III.12: Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, sans effet thermique, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V	61
Figure III.13: Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, avec effet thermique, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V	62
Figure III.14: Carte Carte 2D iso-thermique de la concentration en électron pour $V_{ds} = 10$ V, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V	62
Figure III.15: Carte 2D thermique de la concentration en électron pour $V_{ds} = 10$ V, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V	63
Figure III.16: Carte 2D de la température de réseau pour $V_{ds} = 10$ V, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V	63
Figure III.17: Evolution de la température du réseau dans le composant pour $V_{gs} = 0$ et -2 V	64
Figure A.1: Entrées et sorties d'Atlas	74
Figure A.2: Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas	75

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Filières technologiques et évolution du HEMT vers une structure à base de GaN

Tableau I-1: Récapitulatif de quelques propriétés physiques importantes de différents semi-conducteurs AlN, GaN, Si, SiC, et GaAs à température ambiante	6
Tableau I-2: Valeurs de la polarisation spontanée dans le GaN, l'AlN et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	10
Tableau I-3: Coefficients piézoélectriques et élastiques d'AlN, de GaN et d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	11
Tableau I-4: Etat de l'art des transistors HEMTs sur nitrure de gallium III-N	23

CHAPITRE III : Résultats et interprétations

Tableau III-1: Propriétés (à 300K) des principaux matériaux utilisés dans la simulation.....	48
---	----

Introduction générale

Cette dernière décennie a vu apparaître de grandes innovations dans le domaine des télécommunications numériques qui comprend aussi bien la téléphonie mobile, les communications par satellites, les applications Radars, les transmissions de données sans fils... Cet essor technologique ne cesse de progresser et de gagner du terrain. Ainsi, le développement spectaculaire notamment des communications mobiles au cours des dernières années a conduit à une recherche de technologies robustes et fiables, à des coûts relativement raisonnables dans le domaine de l'électronique. Les études développées dans le cadre de nouveaux marchés militaires et civils sont à l'origine d'une évolution importante de tous les secteurs d'activités de l'électronique hyperfréquence.

Cette évolution est essentiellement dirigée vers le choix de nouvelles technologies autorisant en particulier des densités de puissance importantes et l'optimisation des composants actifs, intégrés dans de nombreux systèmes.

Ces dernières années, le transistor HEMT à base d'hétérostructure AlGaIn/GaN fait l'objet d'intenses recherches et investigations. Celles-ci ont montré l'efficacité de ce composant pour des applications hyperfréquences nécessitant des tensions et des puissances élevées. De part ses mobilités électroniques élevées et un fonctionnement aux hautes températures exigé pour certains dispositifs, les transistors HEMTs laissent espérer des applications aussi diverses tels que l'émetteurs-récepteurs radar HF, télécommunications terrestres, communications par satellite. Les performances de ce composant dépendent entre autre de la bonne qualité de sa couche active constituée d'une phase hexagonale de type wurtzite qui présente un champ électrique interne important résultant des propriétés de polarisations spontanée et piézoélectrique du matériau même pour des structures non dopées, permettant ainsi de constituer le gaz bidimensionnel (2-DEG) induit par les effets de polarisation nécessaire au fonctionnement du composant.

Les travaux développés dans ce mémoire portent sur l'étude de l'effet thermique sur les performances statiques du transistor HEMT à hétérostructure AlGaIn/GaN. En effet, la chaleur générée par la puissance dissipée dans la zone active conduit à l'augmentation de sa température qui se propage principalement par conduction via les

contacts ohmiques et/ou via le substrat. L'élévation de la température dans la zone active a un impact non négligeable dans la dégradation de nombreux paramètres physiques du transistor et en particulier la dégradation de leurs propriétés de transport comme par exemple la mobilité des électrons ou encore leurs vitesse de saturation. En conséquence, elle constitue l'un des principaux facteurs limitant les performances physiques et électriques des FETs et son influence sur la fiabilité de ce composant est peu connue.

Ce mémoire se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre est destiné à la description générale des semi-conducteurs III-N, les transistors à effet de champ à grille Schottky et au principe de fonctionnement du HEMT conventionnel. Il établit un état de l'art de la filière HEMT en termes de performances dynamique et électriques pour différentes longueurs de grille.

Le second chapitre, est consacré à l'étude du transistor HEMT AlGaIn/GaN ainsi qu'à la description de l'approche bidimensionnelle physico-thermique utilisée, basée sur la méthode des éléments finis. Dans cette optique, nous présentons les équations différentielles utilisées, le couplage du modèle physique avec le modèle thermique.

Le troisième chapitre, expose les résultats de simulation obtenus concernant les performances électriques et thermiques du HEMT. Cette modélisation permet une caractérisation DC fournissant des informations sur le comportement statique du HEMT à hétérostructure AlGaIn-GaN sur substrat 4H-SiC telles que les caractéristiques courant-tension, les distributions du potentiel, la concentration en électrons et la température du réseau, 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 à la fin de ce mémoire.

I-1 Introduction

Ce chapitre présente les caractéristiques physiques et thermiques des matériaux III-N ainsi que les polarisations dans ces matériaux. Il discute dans le paragraphe I-2 les atouts de ces différents matériaux pour la conception des composants à effet de champ aux applications hyperfréquences.

Ensuite, les différents types des composants à effet de champ c'est-à-dire le MESFET et le HEMT sont présentés dans le paragraphe I-3. En fait, ce paragraphe présente ces composants du point de vue structure et principe physique. Puis, il détaille leur fonctionnement physique et électrique et précise leur performance actuelle.

I-2 Principales propriétés des matériaux III-N

Les matériaux semi-conducteurs III-N sont des bons candidats pour la fabrication de transistors HEMTs. Comme ils présentent plusieurs avantages tels que la large bande interdite, une grande stabilité chimique [1], des propriétés mécaniques exceptionnelles ainsi que d'autres propriétés physiques remarquables. Ces semi-conducteurs possèdent les qualités indispensables pour fabriquer des composants de puissance.

I-2-1 Structure cristalline

Le nitrure de gallium cristallise sous deux formes différentes intéressantes pour la microélectronique, mais également pour l'optoélectronique. La première forme cristalline correspond à la structure hexagonale (structure **wurtzite**) [2]. La seconde est la forme cubique (structure **zinc-blende**) [3]. Nous nous intéresserons principalement à la structure wurtzite qui reste la plus stable et donc la plus utilisable. La structure wurtzite a une maille élémentaire hexagonale de paramètres de maille $a = 0,3188$ nm et $c = 0,5185$ nm [2] à température ambiante (figure I.1). La maille élémentaire contient six atomes de chaque type. Elle est composée de deux sous réseaux hexagonaux imbriqués l'un dans l'autre, où chaque type d'atome est décalé suivant l'axe c de 62 % de la maille élémentaire.

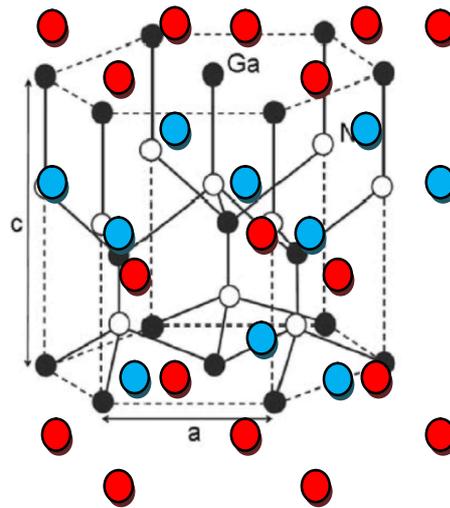


Figure I.1 : Représentation du réseau cristallin du GaN dans sa structure hexagonale de type wurtzite [4].

I-2-2 Structure de bande

Les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons et les trous en fonction de leur vecteur d'onde. Elles se décomposent en bandes de valence et bandes de conduction (figure I.2) [5]. Nous les représentons dans l'espace réciproque pour simplifier suivant des directions de plus hautes symétries. La densité d'états est représentée au centre de la première zone de Brillouin.

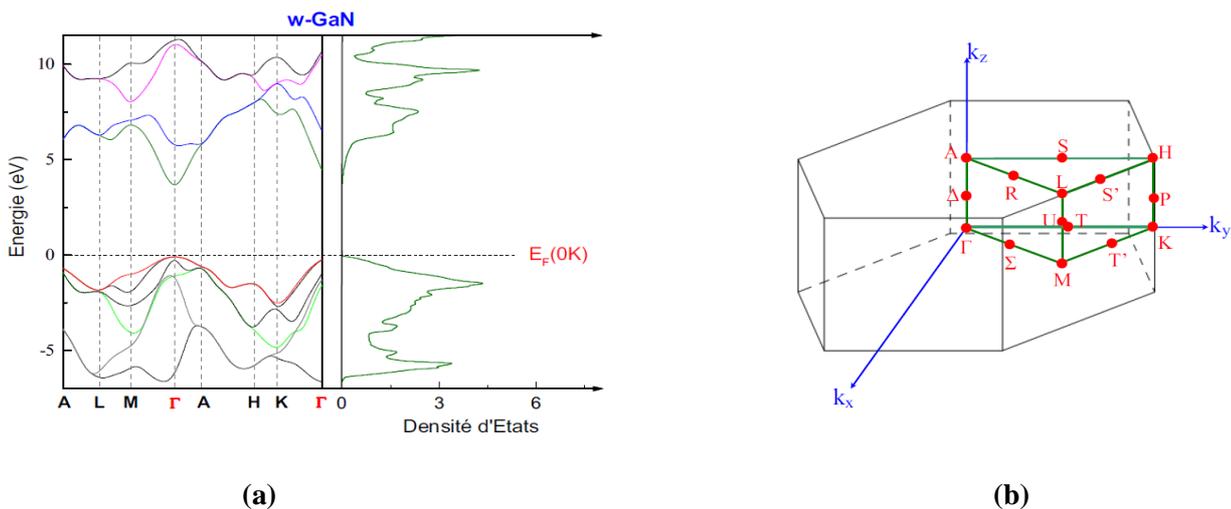


Figure I.2 : (a) Structure de bandes et densité d'états du w-GaN et (b) Schématisation de la première zone de Brillouin dans un cristal de w-GaN.

L'allure générale des bandes est la même pour tous les composés III-N considérés. La structure de bandes est directe, c'est-à-dire que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont situés au centre de la zone de Brillouin ($k = 0$). Le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons ayant une faible masse effective, donc très mobiles. Il existe par ailleurs des minimas secondaires en bordure de la zone de Brillouin dans la direction L-M et K, ces minimas sont beaucoup plus plats. Les électrons y ont une masse effective plus grande et donc une plus faible mobilité.

Les principales propriétés physiques des deux composés binaires c'est-à-dire le nitrure d'aluminium (w-AlN) et le nitrure de gallium (w-GaN), sont regroupés dans le tableau I-1 et comparées à celles du silicium(Si), du carbure de silicium (4H-SiC) et de l'arséniure de gallium (GaAs).

Matériaux	w-AlN	w-GaN	Si	4H-SiC	GaAs
Bande interdite (eV)	6,1	3,4	1,12	3,3	1,43
Champ de claquage (V/cm)	$1,8 \times 10^6$	5×10^6	3×10^5	$2,2 \times 10^6$	4×10^5
Conductivité thermique (W/mK)	285	150	150	490	46
Vitesse de saturation (cm/s)	$1,4 \times 10^7$	$1,8 \times 10^7$	1×10^7	2×10^7	$0,9 \times 10^7$
Permittivité relative	8,5	9	12	9,66	11,5
Masse effective de l'électron (x m_0)	0,4	0,2	1,06	0,29	0,066

Tableau I-1 : Récapitulatif de quelques propriétés physiques importantes de différents semi-conducteurs AlN, GaN, Si, SiC et GaAs à température ambiante [6].

Les matériaux AlN et GaN sont donc des matériaux très prometteurs compte tenu de leurs excellentes propriétés, adéquates pour les applications de télécommunications. À titre indicatif, il semble intéressant de comparer les propriétés électriques de cette famille de matériaux III-N avec celles de la filière GaAs, qui constitue à l'heure actuelle, celle qui est la plus utilisée par les fonderies compte tenu de sa maturité pour le développement de composants et circuits de puissance hyperfréquence (tableau I.1). Il ressort de ces indications que les éléments nitrurés de par leurs gaps importants leurs conductivités thermiques satisfaisantes et leurs champs de claquages élevés, présentent de nombreux avantages pour ce type d'applications. Associées à une vitesse de saturation des porteurs deux fois supérieure à celle du GaAs, leurs potentialités en font des candidats de choix pour les applications de puissance hyperfréquence.

I-2-3 Effets de polarisation dans le cristal

L'une des spécificités des composés d'éléments III-N, comparés aux autres composés III-V tels que l'arséniure (GaAs par exemple), est l'existence d'une polarisation spontanée et d'une polarisation piézoélectrique [7]. M. Asif Khan et al. [8] ont été les premiers à mettre à profit cette propriété pour réaliser le premier transistor AlGaIn/GaN en 1993. Aussi, O. Ambacher et al. [9] ont expliqué quantitativement les effets induits par les polarisations spontanée et piézoélectrique dans une hétérostructure AlGaIn/GaN (dopée ou non-dopée).

I-2-3-1 Polarisation spontanée

Dans une structure cristalline GaN de type wurtzite, les électrons de la bande de valence sont plus attirés par l'azote que par le gallium à cause de sa forte électronégativité, on peut constater en considérant la figure I.3. Cette attraction entraîne la déformation de la structure tétraédrique et le rapport des paramètres de maille (c/a) devient plus faible que la valeur attendue ($c/a = 1,633$). La non-concordance des barycentres des charges positives et négatives entraîne donc la création d'une polarisation appelée polarisation spontanée.

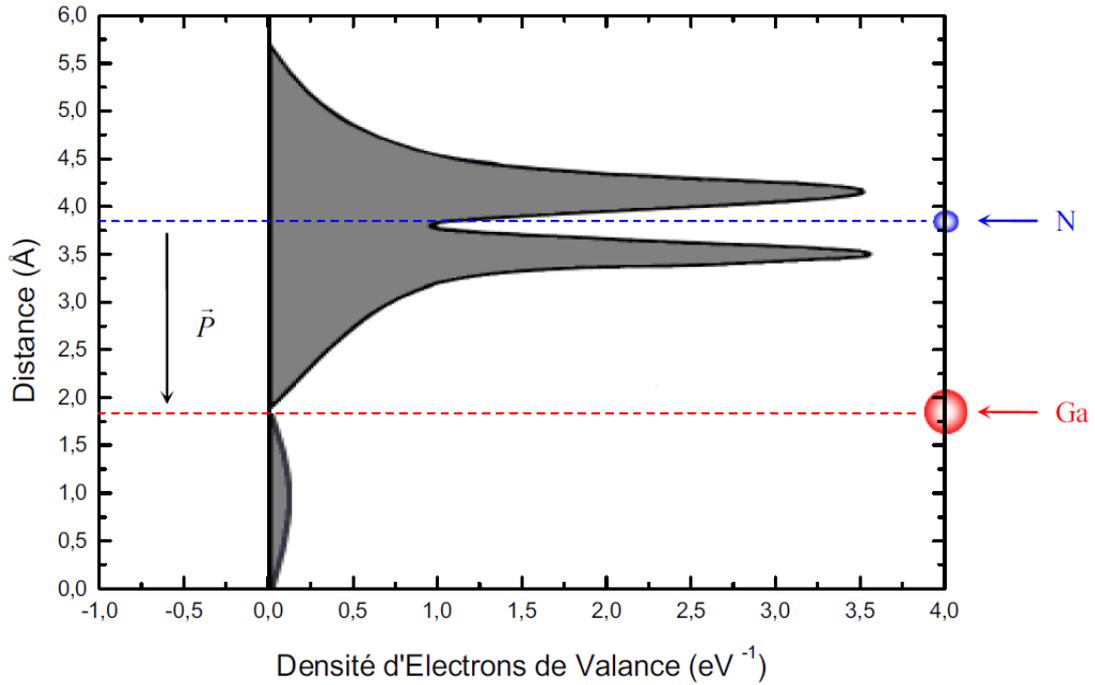


Figure I.3 : Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN.

Plus précisément, l'atome de gallium possède quatre atomes d'azote voisins. Parmi ces quatre atomes, trois se trouvent être dans le même plan cristallographique perpendiculaire à l'axe c et le quatrième se situe quant à lui, sur l'axe c . Un atome de gallium associé aux quatre atomes d'azote voisins forme un dipôle tel que :

$$\sum_{i=1}^4 \vec{P}_i = \vec{P}_{SP} \quad (I-1)$$

La figure I.4 (a) montre la contribution des moments dipolaires autour d'un atome de gallium. La somme vectorielle des moments dipolaires \vec{P}_2 , \vec{P}_3 et \vec{P}_4 , forme un moment dipolaire \vec{P}_R parallèle à l'axe c , c'est-à-dire, parallèle au moment dipolaire \vec{P}_1 mais de sens opposé (Fig.I.4 (b)). Pour une structure GaN wurzite relaxée, le moment dipolaire $|\vec{P}_1| > |\vec{P}_R|$ entraîne un vecteur de polarisation spontanée $|\vec{P}_{SP}| = |\vec{P}_1| - |\vec{P}_R|$ qui est non nul et dirigé suivant l'axe de croissance du matériau (0001).

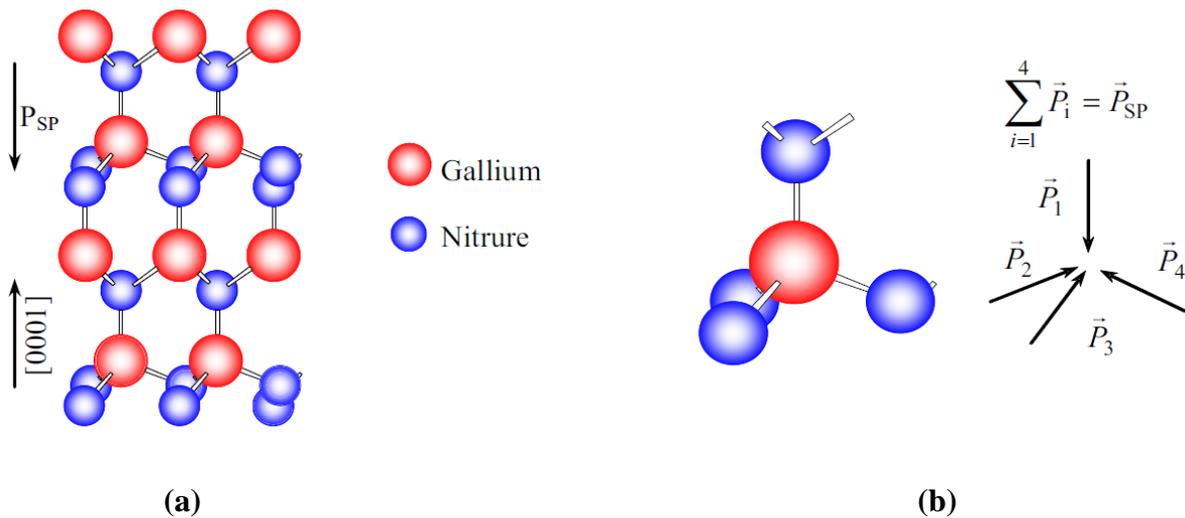


Figure I.4 : (a) Structure GaN wurtzite et (b) Polarisation spontanée dans une structure GaN wurtzite.

L'effet de cette polarisation spontanée dans le GaN de type wurtzite en volume se traduit par la création d'une succession de dipôles électriques qui sont à l'origine du champ électrique interne \vec{E} (figure I.5) orienté dans la direction opposée à l'axe de croissance (0001) et ceci sans excitation extérieure.

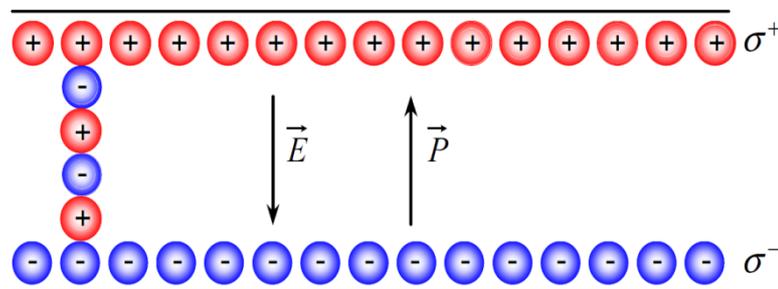


Figure I.5 : Charges en surface d'une couche GaN wurtzite.

Le GaN cristallin possède une symétrie suivant l'axe optique \mathbf{c} tel que le gradient de polarisation ($\nabla \vec{P} = -\rho = 0$) et la densité de charges en volume soient nuls. La densité de charges associée en surface est déterminée en écrivant l'équation de continuité du vecteur déplacement à l'interface, soit : $\vec{D}_{int} = \vec{D}_{ext}$ où \vec{D}_{int} et \vec{D}_{ext} sont respectivement le vecteur de déplacement dans le semi-conducteur et à l'extérieur de ce dernier à l'interface semi-conducteur/air. Comme la densité de charge en volume est nulle, la relation de continuité s'écrit :

$$\sigma^+ = |\vec{P}| = \varepsilon_0 \varepsilon_r |\vec{E}_{int}| - \varepsilon_r |\vec{E}_{ext}| \quad (I-2)$$

Si le champ extérieur appliqué et/ou ambiant est nul ($\vec{E}_{ext} = 0$), alors l'équation (I-2) se réduit à :

$$\sigma^+ = |\vec{P}| = \varepsilon_0 \varepsilon_r |\vec{E}_{int}| \quad (I-3)$$

Les valeurs de la polarisation spontanée (\vec{P}_{SP}) pour le GaN, l'AlN et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sont regroupées dans le tableau I-2 [10].

Matériaux	w-GaN	w-AlN	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$
c_0 / a_0	1,6259	1,6010	-0,0249x-1,6259
\vec{P}_{SP} (C/m ²)	-0,029	-0,081	-0,052x-0,029

Tableau I-2 : Valeurs de la polarisation spontanée dans le GaN, l'AlN et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

En conclusion, un échantillon de GaN wurtzite épitaxié suivant l'axe c , présente sur chacune de ses deux faces, des densités de charge fixes identiques mais de signes opposés, valeur de polarisation spontanée dans le GaN, l'AlN et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

I-2-3-2 Polarisation piézoélectrique

Tous les composés III-V non centro-symétriques sont piézoélectriques. En ce qui concerne la filière nitrure de gallium, cette piézoélectricité est très importante car la liaison III-N est fortement polaire. Les électrons sont essentiellement localisés sur l'atome d'azote. La piézoélectricité est l'aptitude à produire une charge électrique proportionnelle à une contrainte élastique (en tension ou en compression). Ce phénomène est réversible. Son origine résulte de la brisure de la symétrie du cristal. En effet, l'existence de dipôles électriques internes provient de la séparation à l'échelle de la maille, du centre de gravité des charges positives et négatives sous l'action d'une contrainte extérieure.

Le tableau I-3 présente les paramètres de polarisation piézoélectrique pour les matériaux à base de semi-conducteur III-N à large bande interdite [11].

Matériaux	AlN	GaN	Al _x Ga _{1-x} N
e_{31} (C/m ²)	-0,60	-0,49	-0,11x - 0,49
e_{33} (C/m ²)	1,46	0,73	0,73x + 0,73
c_{11} (C/m ²)	396	367	29x + 367
c_{12} (C/m ²)	137	135	2x + 135
c_{13} (C/m ²)	108	103	5x + 103
c_{33} (C/m ²)	373	405	-32x + 405

Tableau I-3 : Coefficients piézoélectriques et élastiques d'AlN, de GaN et d'Al_xGa_{1-x}N.

Dans le cas où la couche de GaN est soumise à une contrainte biaxiale en tension ($a > a_0$). Le rapport c/a décroît créant une polarisation piézoélectrique dans le même sens que la polarisation spontanée (figure I.6 (a)). Au contraire, si elle est soumise à une contrainte compressive ($a < a_0$): le rapport c/a augmente créant une polarisation opposée à la polarisation spontanée (figure I.6 (b)).

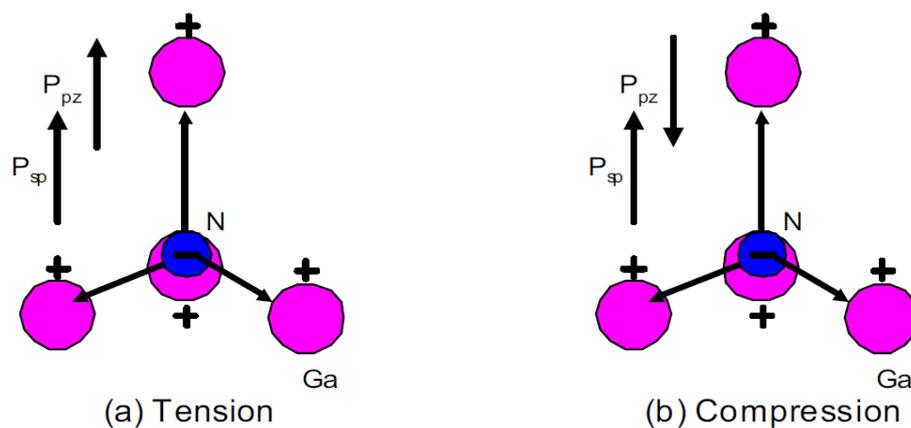


Figure I.6 : Sens de la polarisation piézoélectrique dans le GaN pour deux contraintes données : (a) en tension et (b) en compression.

I-3-1 Généralités

Le transistor à effet de champ dénommé FET (**F**ield **E**ffect **T**ransistors) ou TEC a été inventé à la fin des années 1920 par J. E. Lilienfeld [12], mais n'a pu être réalisé

avant la fin des années 1950, celui-ci repose sur le fonctionnement d'un dispositif semi-conducteur unipolaire c'est-à-dire qu'il y a un seul type de porteur qui intervient dans le fonctionnement du composant.

Donc pour une utilisation aux hautes fréquences, il est préférable que le type de porteur soit celui qui présente les meilleures propriétés de transport (mobilité, vitesse et coefficient de diffusion), les électrons ayant des propriétés plus intéressantes que les trous. Les FET sont essentiellement élaborés sur des matériaux de type N. Les divers types de transistors à effet de champ diffèrent par la nature du contact de grille élaboré, dont nous citons.

- J-FET : grille à jonction PN.
- MOSFET : grille métallique isolée de la couche active par un oxyde.
- MESFET : grille métallique Schottky.
- HEMT : grille métallique Schottky.

I-3-2 Le MESFET : «TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A CONTACT SCHOTTKY»

Le *MESFET* (MEtal Semi-conducteur Field Effect Transistor) fut le premier composant à être fabriqué à partir d'un composé III-V. En 1966 Carver Mead [13] proposa en premier lieu de remplacer le Silicium des premiers FET par un semi-conducteur III-V tel que l'Arséniure de Gallium (GaAs), puis réalisé par Hoop [14]. Cette évolution au niveau matériau a permis l'utilisation des *MESFETs* aux fréquences micro-ondes, et depuis cette date de nombreux travaux ont été effectués pour réaliser des transistors de plus en plus performants à base de matériau à grand gap. Les premiers résultats obtenus avec un *MESFET* au carbure de silicium (4H-SiC) datent de 1994.

La structure du Transistor à effet de champ à contact Schottky repose sur une couche active (**canal**) directement implantée dans le substrat semi-isolant. Ensuite, la **grille** en métal réfractaire est déposée pour matérialiser le **contact Schottky**. Puis les zones N^+ sont implantées en se servant du métal comme d'un masque pour obtenir deux zones d'accès auto alignées sur la grille.

La figure I.7 présente une coupe schématique d'un MESFET. La structure présentée met en évidence les différentes couches utilisées pour sa réalisation. La couche active est généralement une couche du type N qui repose sur un substrat semi-isolant. Les contacts de source et de drain sont des contacts ohmiques contrairement au contact Schottky de grille.

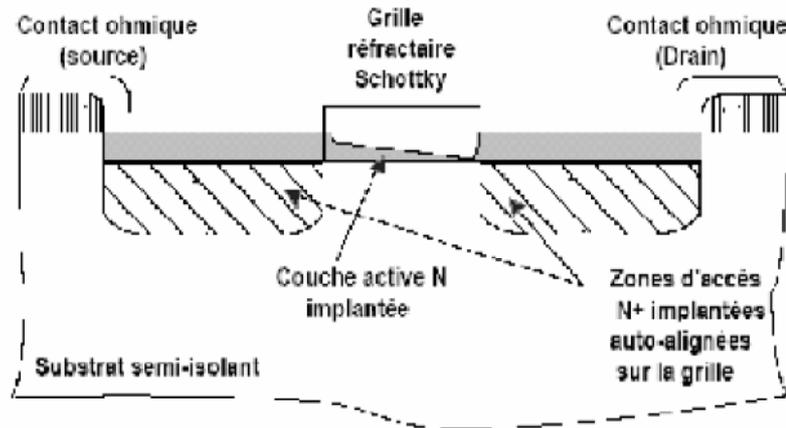


Figure I.7 : Vue en coupe du MESFET implanté auto-aligné.

I-3-3 Le HEMT : « *HIGHT ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR* »

Le transistor HEMT apparaît comme une évolution majeure du MESFET. La différence est que le HEMT utilise une hétérojonction, c'est à dire une jonction entre des matériaux ayant des bandes d'énergie différentes, de manière à faire passer les électrons constituant le courant drain-source dans un semi-conducteur non-dopé, afin de diminuer le temps de transit et donc augmenter les performances en fréquence. La vitesse des électrons est en effet d'autant plus grande que le dopage du semi-conducteur est faible, car la dispersion d'impuretés ionisées est réduite [15].

I-3-3-1 Historique du transistor HEMT

Le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) encore appelé dans la littérature TEGFET (Two Electron Gas Field Effect Transistor) ou MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor), ou encore SDHT (Selectively Doped Heterojunction Transistor), a été conçu et réalisé simultanément au sein de deux laboratoires, par Thomson en France et par Fujitsu au Japon en 1980.

En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique ayant les plus faibles caractéristiques en bruit au monde. Initialement, ce transistor était utilisé dans un radiotélescope à Nobeyama, Japon, qui présente un diamètre de 45 mètres. En refroidissant le composant à la température de l'hélium liquide, il est possible de capter un signal provenant d'une molécule interstellaire située à mille années lumières de la Terre. Plus tard, le HEMT sera implanté dans des récepteurs de télévision pour capter les signaux des satellites géostationnaires (36000 km d'altitude). Puis petit à petit, ce composant se fera une place dans notre quotidien. Le HEMT constitue une évolution majeure du MESFET (Fet à jonction métal/semi-conducteur) et a pris le pas sur ce dernier depuis le début des années 1990.

I-3-3-2 Principe de fonctionnement du transistor HEMT classique

L'idée de base à l'origine de ce composant est d'utiliser comme canal conducteur d'un transistor à effet de champ, un gaz bidimensionnel (gaz-2D) d'électrons circulant dans un matériau peu dopé et résultant de l'occupation des niveaux d'énergie du puits de potentiel caractéristique d'une hétérojonction.

I-3-3-3 Les différentes couches d'un transistor HEMT AlGaAs /GaAs classique

Dans sa forme la plus classique, le HEMT est réalisé par dépôt sur un substrat de GaAs, de couches de matériaux dont les paramètres de maille sont compatibles. L'épitaxie par jet moléculaire (MBE) et l'épitaxie en phase gazeuse par la méthode des organométalliques (MOCVD), sont les techniques les plus utilisées pour le dépôt des couches [16].

On fait croître les couches les unes sur les autres dans l'ordre exposé au niveau de la structure présentée dans la figure I.8. On dépose donc, sur un substrat semi-isolant en GaAs, une couche de GaAs non intentionnellement dopée (NID) ou légèrement dopée « P⁻ », d'épaisseur inférieure à 1µm. Un buffer doit être placé entre le substrat et le canal, afin de passer graduellement d'un paramètre de maille à l'autre. On dépose ensuite une couche de AlGaAs fortement dopée « N⁺ » et dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines d'angströms. C'est sur cette couche que l'on réalise les électrodes

métalliques de source et drain à base d'un alliage Nickel-Germanium-Or. L'électrode de grille est réalisée à l'aide d'un alliage Titane-Platine-Or.

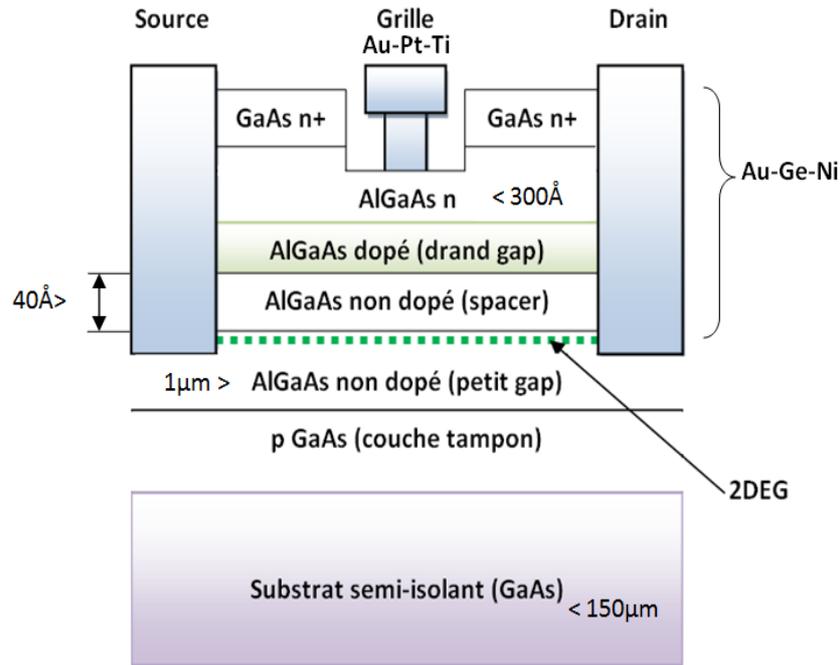


Figure I.8: Schéma de principe du HEMT classique AlGaAs/GaAs.

Le HEMT classique AlGaAs/GaAs se compose, comme le montre la figure I.8 d'un empilement de plusieurs couches semi-conductrices :

- **La couche GaAs $n+$** : c'est une couche superficielle "cap Layer" et elle n'existe pas sous la grille ; elle est formée par un matériau de faible bande interdite pour permettre la réalisation des contacts ohmiques de source et de drain. Cette couche est généralement fortement dopée afin de diminuer la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès.
- **La couche AlGaAs** : La couche à grand gap non dopée est destinée à la réalisation du contact Schottky de grille, qui est déposé après gravure de la couche superficielle (fossé de grille ou "recess"). Le "recess" de grille consiste à réduire l'épaisseur de la couche barrière sous la grille. Dans des conditions de fonctionnement optimal, cette couche doit être complètement désertée et aucun courant parasite à celui du canal ne doit y circuler.
- **La couche donneuse AlGaAs dopée** : Cette couche de matériau à grand gap dopée a pour rôle de fournir les électrons libres à la structure. Les progrès technologiques en matière d'épitaxie par jet moléculaire permettent d'avoir des dopages planaires (δ)

généralement réalisé par un plan de dopage silicium (Si). Ces dopages (δ) ont l'avantage de positionner les atomes donneurs près de l'interface qui permet d'avoir une plus forte concentration d'électrons dans le gaz bidimensionnel, cette technique permet de réduire la distance grille-canal (d) et d'améliorer le contrôle des porteurs sous la grille [17].

- **Espaceur:** "spacer" en anglais, est une couche de matériau non intentionnellement dopée ($\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$) insérée entre le puits quantique et la barrière de telle sorte d'avoir un empilement de ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$), cette couche assure l'isolation spatiale entre les atomes donneurs dans la couche barrière (charges positives fixes dans AlGaAs) et les électrons (charges négatives dans le GaAs) dans le puits quantique susceptibles de participer à la conduction dans le canal, pour réduire l'interaction coulombienne entre eux, et ainsi améliorer les propriétés de transport des électrons. Plus cette couche n'est épaisse, meilleure sera la mobilité des électrons dans le canal. Donc il faut que l'épaisseur de cette couche soit choisie de telle sorte que la mobilité soit optimale tout en ayant une densité relativement importante de porteurs.
- **La couche AlGaAs non dopée et le canal :** le canal est situé à l'interface de la couche de matériau à petit gap non intentionnellement dopé. Cette couche, importante dans la mesure où elle reçoit le gaz bidimensionnel d'électrons qui constitue le canal, détermine les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons qui la composent. Elle est séparée du substrat par une couche tampon non intentionnellement dopée.
- **La couche tampon:** couramment appelée "buffer", elle permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat. Cette couche permet également d'éliminer les imperfections du substrat, afin d'avoir un matériau de bonne qualité cristallographique nécessaire à la croissance des couches supérieures. En effet, le paramètre essentiel qui conditionne une épitaxie de qualité est la différence de maille entre le substrat et le cristal de GaAs .
- **Le substrat semi-isolant (GaAs):** les couches citées ci-dessus peuvent potentiellement fonctionner à des températures bien supérieures à leur limite pratique. L'insuffisance de la valeur de la résistivité du substrat entraîne l'existence d'un courant de fuite important ce qui augmente inutilement à haute température la consommation énergétique des circuits intégrés. L'utilisation d'un substrat plus isolant permet donc de réduire ce problème. Le choix du substrat doit se faire sur la base d'un compromis entre le niveau de performances, le coût et la fiabilité du dispositif.



I-3-3-4 Origine de fonctionnement d'un transistor HEMT AlGaAs /GaAs

La structure des couches du HEMT 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 MESFETs et les HEMTs 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.

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.9 présente 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. Le HEMT 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.

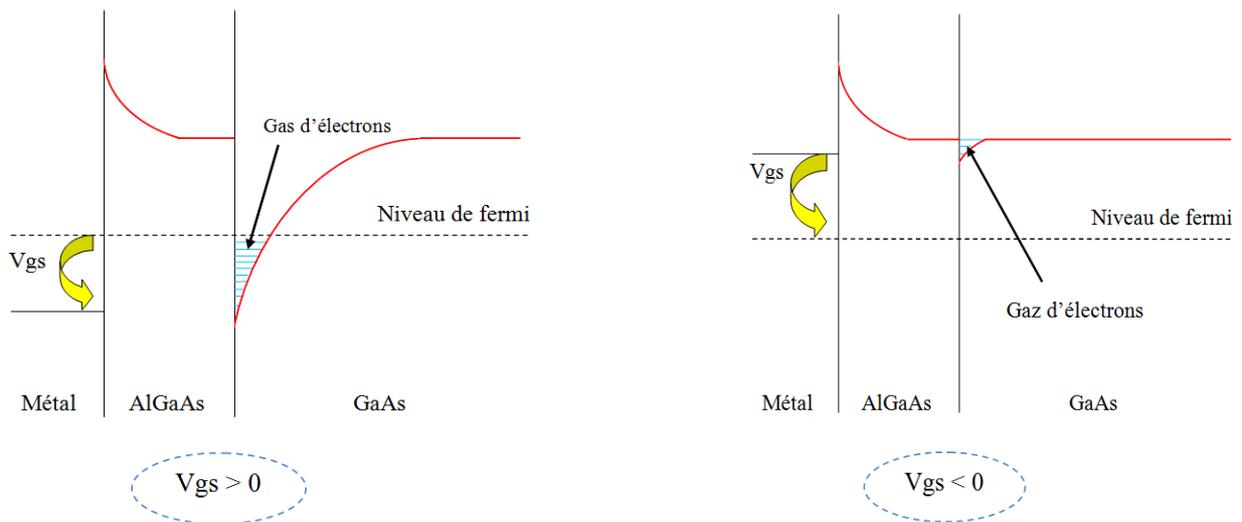


Figure I.9 : Influence de la polarisation de grille sur le diagramme des bandes de l'hétérojonction.

I-3-3-5 Les limitations de la technologie à base d'Arséniure de Gallium appliqués à la fabrication de transistor HEMT

On observe plusieurs sortes de limitations liées directement à la structure du transistor. Elles ont un impact direct sur les performances du transistor aussi bien du point de vue statique que dynamique. Dans un premier temps, les HEMTs en GaAs semblent avoir atteint leurs limites concernant les performances en puissance, et une énergie de bande interdite faible. Toutefois, le GaAs et d'autres matériaux comme le silicium sont utilisés beaucoup trop près de leurs limites physiques ultimes, en particulier aux niveaux des densités de puissances fournies.

Dans un second temps, la limitation qui est sans doute la plus connue est l'effet MESFET parasite. Ce nom fait référence du fait que la conduction dans un MESFET s'opère directement dans la couche située sous la grille. C'est de cette manière que l'effet MESFET parasite se manifeste dans un transistor HEMT.

Au vu de ces inconvénients, il a été nécessaire de tourner vers une technologie plus efficace afin de pallier tous les problèmes qui limitent très fortement les performances du transistor. Ainsi, les propriétés intéressantes des matériaux de types Nitrures ont attiré l'attention des chercheurs vers une perspective nouvelle, celle de changer de matériau voire de structure afin de reproduire le fonctionnement de l'HEMT

tout en se désolidarisant des désagréments physiques provoqués par la structure du transistor en Arséniure de Gallium.

I-3-4 Le Transistor HEMT en technologie GaN

Les transistors HEMTs en Nitrure de Gallium possèdent de nombreux avantages. Très utilisés dans le domaine de télécommunications. Le HEMT GaN est très apprécié pour ses propriétés semi-conductrices et aussi pour les applications de forte puissance

Les principaux avantages du HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{GaN}$ par rapport à ses concurrents sont:

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

Le but de la structure d'un HEMT est de séparer les électrons libres de la couche de semi-conducteur contenant des impuretés afin d'augmenter la mobilité des électrons. Pour cela un matériau GaN à gap relativement faible est mis en contact avec le matériau ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ à grand gap.

I-3-4-1 Définition de la structure par couche du transistor HEMT GaN

La structure d'un transistor HEMT en Nitrure de Gallium est très semblable à celle d'un transistor dont le matériau semi-conducteur est l'Arséniure de Gallium malgré plusieurs différences nettes. On présente une structure typique de transistor HEMT AlGaIn/GaN à la figure I.10.

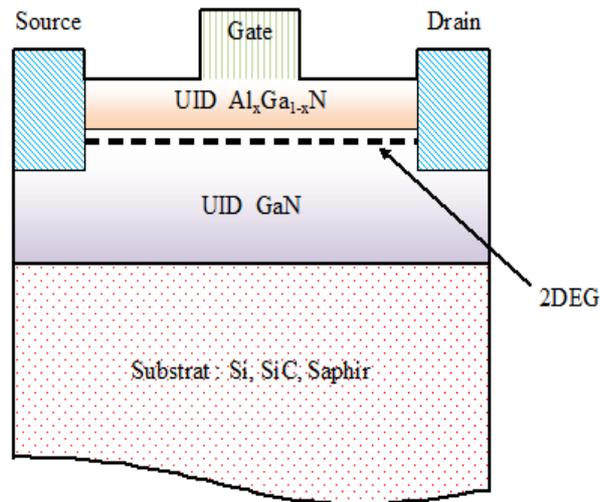


Figure I.10 : structure d'un transistor HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$.

Ce transistor est constitué de trois électrodes : la grille, la source et le drain. Le contact lié au dépôt de l'électrode de grille est un contact de type Schottky. Quant aux électrodes de source et de drain, il s'agit de contacts ohmiques.

C'est un transistor dont la structure est horizontale. Chacune des couches le constituant n'est pas dopée ou ne l'est pas intentionnellement. C'est pourquoi il faudra quand même tenir compte d'un dopage résiduel présent dans chacune des couches semi-conductrices du transistor HEMT GaN [18].

À la lumière de la figure I.10, on note principalement trois couches principales :

- Les électrodes de source et de drain ne sont pas en surface. Elles sont directement encastrées dans la structure pour être en contact avec le canal d'électrons.
- La barrière $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ fait quelques dizaines de nanomètres. x représente la fraction molaire ou pourcentage en Aluminium du composé ternaire. La différence de gaps entre ce composé ternaire et le matériau en Nitrure de Gallium crée une hétérojonction dans laquelle les électrons seront confinés afin de constituer le gaz bidimensionnel d'électrons plus connu sous le nom de 2DEG.
- La couche de nitrure de gallium est placée juste au dessous de la couche ternaire. Elle contient le 2DEG d'électrons dans sa partie supérieure, répartis sur une épaisseur de quelques nanomètres.

- Afin de constituer le substrat, un support en silicium peut être utilisé. C'est sur celui-ci que sera réalisé le composant.
- L'utilisation d'un buffer en nitrure d'Aluminium placé entre le substrat et la couche de GaN sera requise de manière à passer graduellement de l'accord de maille du GaN vers celui du Si et inversement (cela n'est pas précisé sur la figure I.10 mais c'est une étape très importante dans la réalisation du composant).
- Enfin, on pourra avoir recours à l'utilisation d'une couche supplémentaire dite de passivation afin d'isoler la barrière de l'extérieur. En effet, le matériau ternaire possède de l'aluminium fortement oxydable quand il est en contact avec l'air. Afin d'éviter cela et conférer au composant un fonctionnement optimal, on dépose une couche semi-conductrice composée de GaN ne possédant pas d'Aluminium. cela n'est pas indiqué sur la figure I.10. Ce n'est pas une étape systématique mais elle est fortement conseillée.

Avant d'expliquer la manière dont le gaz bidimensionnel s'est formé, il est nécessaire d'expliquer clairement le mode de conduction du transistor HEMT GaN. Et pour cela, il faut analyser précisément le diagramme des bandes d'énergie associé à cette structure.

I-3-4-2 Diagramme des bandes de la structure HEMT AlGa_xN/GaN et fonctionnement de celui-ci

On dépose une couche de matériau ternaire Al_xGa_{1-x}N sur une couche de GaN. Ces deux matériaux ont des largeurs de bande interdite différentes. Dans notre structure, le matériau ternaire possède le plus grand gap, il est de 3.96 eV pour Al_{0,3}Ga_{0,7}N. Le GaN, quant à lui, possède un gap plus faible : 3,39 eV. C'est la juxtaposition de ces deux couches qui crée la discontinuité des bandes de conduction et de valence au niveau du diagramme des bandes. Elle est présentée aux figures I.11 et I.12 ci-dessous.

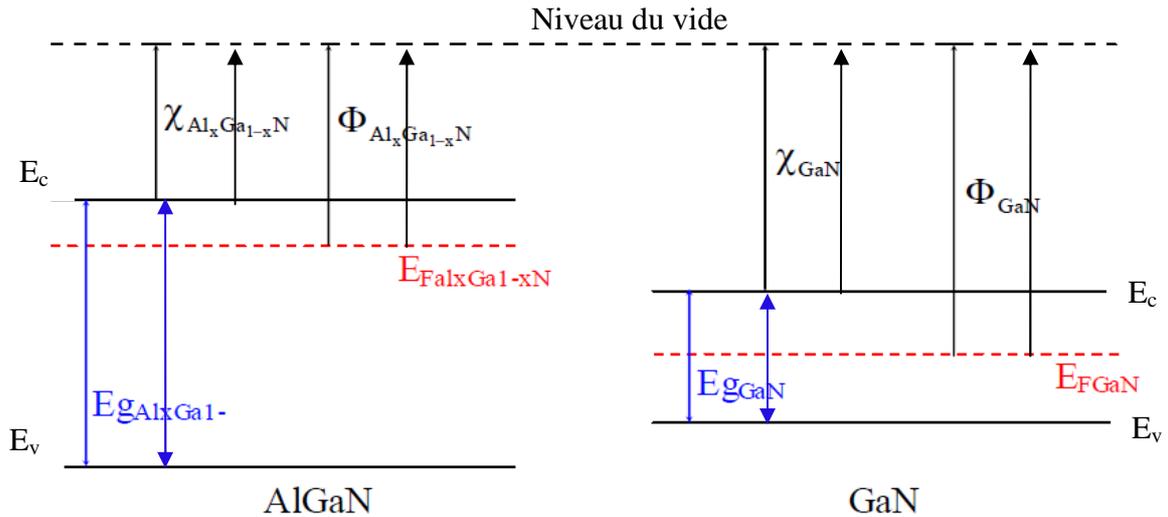


Figure I.11 : Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique.

La différence de gaps est ici flagrante, le puits de potentiel sera donc situé du côté du matériau à faible gap comme nous le montre la figure I.11.

D'après les règles développées en 1960 par R.L. Anderson [19] et qui permettent de construire les diagrammes énergétiques associés aux structures à hétérojonctions, les niveaux de Fermi des matériaux doivent s'aligner. Cela occasionne une discontinuité des bandes de valence et de conduction étant donné que le niveau de référence (niveau du vide) doit rester rigoureusement continu. Aussi, les bandes de conduction, de valence et du vide doivent rester parallèle entre elles tout en respectant les règles décrites ci-dessus. On obtient alors le diagramme des bandes ci-dessous.

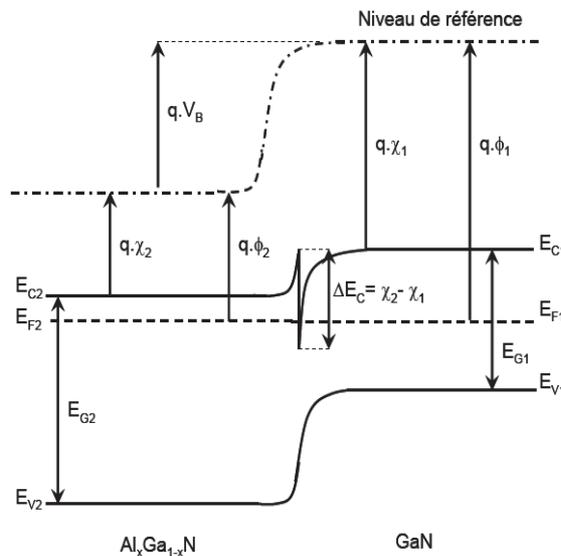


Figure I.12 : Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT AlGaN/GaN à l'équilibre thermodynamique.

I-3-4-3 Etat de l’art du transistor HEMT en GaN d’après l’ITRS

La technologie sur Nitrure de Gallium est encore jeune et en constant développement. Beaucoup des travaux de recherches ont été publiés, des transistors de plus en plus performants sont réalisés.

Aujourd'hui, la technologie HEMT III-N est un domaine de recherche très actif et a récemment été intégrée à la feuille de route de l’ITRS (International Technology Roadmap for Semi-conductors) [20]. Le Tableau I-4 recense l’état de l’art des transistors HEMTs sur nitrure de gallium portés à ce jour.

Year of production	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
“ GaN HEMT ”											
Gate length (nm)	150	100	100	100	70	70	70	50	50	50	50
Low Noise											
Ft (GHz)	120	160	160	160	200	200	200	240	240	240	240
Operating voltage(V)	5	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3
Gm (S/mm)	0,4	0,55	0,55	0,55	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,7	0,7
Fmin(dB) at 10 GHz	1	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Associated Gain at 10 GHz	15	16	16	16	17	17	17	18	18	18	18
Fmin(dB) at 24 GHz	1,2	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
Associated Gain at 24 GHz	13	14	14	14	15	15	15	16	16	16	16
Fmin(dB) at 60 GHz	2	1,7	1,7	1,7	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,3
Associated Gain at 60 GHz	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12	12
Fmin(dB) at 94 GHz	2,8	2,5	2,5	2,5	2,2	2,2	2,2	2	2	2	2
Associated Gain at 94 GHz	8	9	9	9	10	10	10	11	11	11	11
Power											

F max (GHz)	200	250	250	250	320	320	320	350	350	350	350
Breakdown(volts)@Vd= 1mA/mm	45	40	40	40	35	35	35	30	30	30	30
I max (ma/mm)	1200	1350	1350	1350	1450	1450	1450	1500	1500	1500	1500
Gm (S/mm)	0,36	0,5	0,5	0,5	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,7	0,7
P _{out} at 10 GHz and peak Efficiency (mW/mm)	5000										
Peak efficiency at 10GHz (%)	65										
Gain at 10 GHz, at P _{1dB} (dB)	14										
P _{out} at 24 GHz and peak Efficiency (mW/mm)	4500	5000	5000	5000							
Peak efficiency at 24GHz (%)	55	55	55	55							
Gain at 24 GHz, at P _{1dB} (dB)	12	13	13	13							
P _{out} at 60 GHz and peak Efficiency (mW/mm)	3500	3500	3500	3500	3750	3750	3750	3750	3750	3750	3750
Peak efficiency at 60GHz (%)	32	38	38	38	40	40	40	40	40	40	40
Gain at 60 GHz, at P _{1dB} (dB)	8	9	9	9	10	10	10	11	11	11	11
P _{out} at 94 GHz and peak Efficiency (mW/mm)	2000	2200	2200	2200	2500	2500	2500	3000	3000	3000	3000
Peak efficiency at 94GHz (%)	25	28	28	28	30	30	30	35	35	35	35
Gain at 94 GHz, at P _{1dB} (dB)	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10	10
P _{out} at 220 GHz and peak Efficiency (mW/mm)				1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Peak efficiency at 220GHz (%)				20	24	24	24	28	28	28	28
Gain at 220GHz, at P _{1dB} (dB)				6	7	7	7	8	8	8	8

Tableau I-4 : État de l'art des transistors HEMTs sur nitrure de gallium III-N.

- Manufacturable solutions exist, and are being optimized
- Manufacturable solutions are NOT known
- Manufacturable solutions are known



I-4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux matériaux semi-conducteurs comme par exemple le silicium et les matériaux III-N, utilisés dans la fabrication des composants micro-ondes tout en précisant leurs caractéristiques physiques et leurs propriétés électroniques. Les polarisations spontanée et piézoélectrique dans les matériaux III-N ont été aussi présentées. Ensuite, nous avons résumé les caractéristiques générales du HEMT conventionnel sur GaAs. En outre, nous avons insisté sur le choix de la technologie Nitrure de Gallium qui intervient dans la réalisation du transistor HEMT, ainsi que les différentes couches constituant le transistor HEMT AlGaN/GaN en mettant à profit les propriétés des matériaux de la filière Nitrure de Gallium.

II-1 Introduction

L'augmentation de la densité d'intégration et la fabrication des fonctions électroniques intégrées sur substrat de taille réduite augmentent la dissipation d'énergie et amplifient les problèmes de dissipation thermique. Cette dérive en température peut avoir un impact important sur les performances physiques et électriques des composants, circuits et systèmes électroniques. Elle constitue donc l'un des principaux thermique limitant leurs performances. En effet l'élévation de la température dans la zone active a un impact non négligeable dans la dégradation de nombreux paramètres physiques des transistors et en particulier la dégradation de leurs propriétés de transport.

Ce chapitre propose un modèle physico-thermique développé pour le transistor HEMT en GaN pour comprendre la distribution de la température de réseau dans ce composant et analyser les effets liés à l'augmentation de la température sur leurs performances statiques.

Le paragraphe II-2 présente les polarisations dans le transistor HEMT à hétérostructure AlGaN/GaN. La quantité de charge à l'interface AlGaN/GaN est présentée dans les paragraphes II-3 et II-4, ainsi qu'un modèle physico-thermique développé pour ce transistor est traité dans le paragraphe II-5.

II-2 Polarisation dans les HEMTs AlGaN/GaN

Les transistors HEMTs GaN typiques peuvent posséder une densité de charge dans le canal atteignant plus de 1.10^{13} charges.cm⁻² 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⁻³.

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.

II-2-1 Polarisation piézoélectrique

La piézoélectricité est une propriété qui possède certains matériaux. Elle a été découverte par Pierre et Paul-Jacques Curie en 1880. Elle se traduit par la polarisation de ces matériaux sous l'effet d'une force ou d'une contrainte mécanique, c'est l'effet

direct. L'effet inverse peut, par ailleurs, se produire. En effet, lorsque l'on applique un champ électrique à un matériau de nature piézoélectrique, il se déforme ce qui souligne la réversibilité de cet effet. Il est donc nécessaire d'analyser et de caractériser cet effet.

Lorsqu'une couche de matériau $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est déposée sur une couche de Nitrure de Gallium, la couche du matériau ternaire est contrainte à cause de la différence du paramètre de maille a_0 ce qui la soumet à la polarisation piézoélectrique. Cette contrainte sur le matériau est d'autant plus forte que le pourcentage en aluminium est fort.

Quand on fait croître une couche d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sur un revêtement en nitrure de gallium face Gallium, le champ électrique dans le matériau ternaire, généré par la polarisation piézoélectrique, est orienté vers le GaN. Afin de calculer cette polarisation dans le matériau $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, on se basera sur les travaux de E. T. Yu et al. [19]. On peut exprimer cette polarisation selon la manière suivante :

$$p^{p,AlGaN} = 2e_{31}^{AlGaN} \epsilon_1^{AlGaN} + e_{33}^{AlGaN} \epsilon_3^{AlGaN} \quad (\text{II-1})$$

Où :

$$\epsilon_1^{AlGaN} = \frac{a^{GaN} - a^{AlGaN}}{a^{AlGaN}} \quad (\text{II-2})$$

Et

$$\epsilon_3^{AlGaN} = -2 \frac{c_{14}^{AlGaN}}{c_{33}^{AlGaN}} \epsilon_1^{AlGaN} \quad (\text{II-3})$$

Notation :

c_{31} et c_{33} : constantes d'élasticité (paramètres dépendant du pourcentage d'Aluminium).

a^{GaN} : Paramètre de maille du nitrure de gallium.

a^{AlGaN} : Paramètre de maille du matériau ternaire (dépendant du pourcentage d'aluminium).

e_{31} et e_{33} : composantes piézoélectriques et tensorielles des matériaux piézoélectriques dont les structures cristallographiques correspondent à des cristaux de type Wurtzite. Tout comme les constantes d'élasticité, ces composantes tensorielles sont dépendantes de la fraction molaire x .

On donne ainsi l'expression analytique de cette polarisation en fonction de x d'après les travaux extraits de la thèse de N.Vellas en 2003 [21] :

$$P_{PZAlGaN}(x) = 2 \frac{a-a_0(x)}{a_0(x)} \left[e_{31}(x) - e_{33}(x) \frac{c_{13}(x)}{c_{33}(x)} \right] \text{ C/m}^2 \quad (\text{II-4})$$

Avec :

a : Paramètre de maille de Nitrure de Gallium (relaxé : 0% de pourcentage en aluminium).

$a_0(x)$: Paramètre de maille de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ contraint.

$$a_0(x) = (-0,077 \cdot x + 3,189) \text{ \AA}$$

$$e_{31}(x) = (-0,11 \cdot x - 0,49) \text{ C}_b/\text{m}^2$$

$$e_{33}(x) = (0,73 \cdot x + 0,73) \text{ C}_b/\text{m}^2$$

$$c_{13}(x) = (5 \cdot x + 103) \text{ GPa}$$

$$c_{33}(x) = (-32 \cdot x + 405) \text{ GPa}$$

Ces relations linéaires donnent l'évolution des composantes piézoélectriques et d'élasticité dans le composé ternaire en fonction de la fraction molaire. Elles sont tirées de la même thèse de N.Vellas qui s'est appuyé sur les travaux de Bernardini et al. [22].

Cette polarisation est donc largement dépendante de la quantité d'aluminium présente dans le matériau ternaire ce qui est normal car c'est ce composé qui contraint mécaniquement le matériau par rapport au matériau adjacent en GaN.

Ainsi, lorsque l'on connaît le pourcentage d'aluminium, il suffit d'effectuer le calcul pour déterminer la valeur de cette polarisation.

Toutefois, la piézoélectricité n'est pas la seule polarisation qu'il faut prendre en compte pour déterminer la quantité de charge qui viendra constituer le gaz bidimensionnel. En effet, la polarisation spontanée soumet les matériaux de type Nitrure III-V à ses effets.

II-2-2 Polarisation spontanée

La liaison entre l'atome de Gallium et l'atome d'Azote composant la paire Ga-N de nature non-centrosymétrique. Plus précisément, cela signifie que la plupart des électrons de valence se regroupent autour de l'atome d'Azote. Seule une faible partie de ces électrons se groupent autour du Ga.

La polarisation spontanée est donc la polarisation résultant de la dissymétrie des atomes de valence au sein des paires Ga-N qui composent le nitrure de gallium de type Hexagonal. Elle intervient systématiquement, que l matériau soit relaxé ou non.

Si le matériau est soumis aussi à une force mécanique qui génère la polarisation piézoélectrique, alors les deux polarisations se superposent (sans pour autant avoir la même direction) et doivent être prises en compte ensembles.

Selon Bernardini, la relation entre la polarisation spontanée au sein des éléments de type Nitrure III-V et la fraction molaire x qui donne le pourcentage en Aluminium est une relation linéaire en fonction de x [8]. Elle est donnée par l'équation suivante (valable pour tout x) :

$$P_{SP_{AlGaN}}(x) = (-0,052 \cdot x - 0,029) \text{ C/m}^2 \quad (\text{II-5})$$

On en déduit la valeur de la polarisation spontanée dans le matériau GaN :

$$P_{SP_{GaN}}(x) = -0,029 \text{ C/m}^2 \quad (\text{II-6})$$

Remarques importantes

On s'intéressera à des matériaux Al_xGa_{1-x} et GaN avec une polarité Gallium (ou face Ga) c'est-à-dire que la polarisation spontanée (le vecteur polarisation spontanée) sera orientée vers le substrat ou plus précisément vers le bas si l'on considère la structure de couche horizontale du transistor HEMT GaN.

Quand à la polarisation piézoélectrique, elle sera orientée suivant le type de contrainte auquel le matériau est soumis. Cela signifie que cette polarisation sera orientée vers le substrat si l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ subit une extension de maille et vers la grille si l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ subit une compression de maille.

II-3 Détermination de la quantité de charge à l'interface AlGaN/GaN

Le but de ce paragraphe est de déterminer la quantité de charges σ à l'interface AlGaN/GaN qui constituera le gaz bidimensionnel d'électrons et ce, à partir de la superposition de tous les champs occasionnés par les deux polarisations présentes au sein des deux couches. D'une part, il faudra considérer que ces couches sont polarisées Gallium (polarisation piézoélectrique orientée vers le substrat). D'autre part, on se placera dans le cas idéal c'est-à-dire que l'on considérera le matériau GaN comme non contraint.

La couche d'AlGaN présente des charges positives au niveau de sa partie inférieure et des charges négatives dans sa partie supérieure. Leur présence résulte de l'addition des deux polarisations spontanée et piézoélectrique orientées vers la même direction (vers le substrat). Le nitrure de gallium, quand à lui, possède aussi des charges positives et négatives à ses extrémités mais en quantités moindres ce qui peut s'expliquer par le fait que le matériau GaN n'est pas contraint. Il subit juste l'effet de la polarisation spontanée. Par conséquent, seules les charges positives et négatives sont représentées à la figure II.1 ci-dessous :

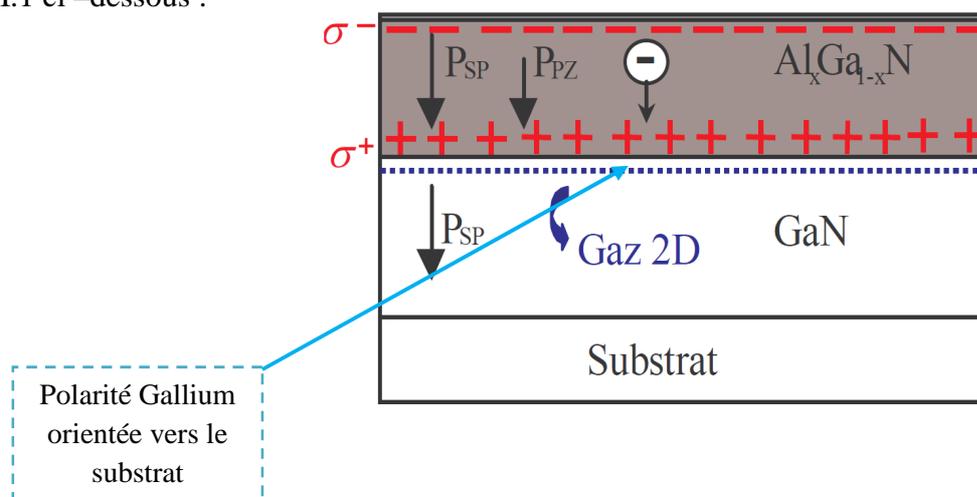


Figure II.1 : Répartition des charges et des polarisations piézoélectrique et spontanée à travers la structure HEMT GaN, création du 2DEG dans le cas idéal.

Comme on peut le constater sur la figure II.1, lorsque le matériau GaN est relaxé et que l'on fait croître l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sur le GaN, il se forme une accumulation de charges positives au niveau de la partie inférieure du matériau ternaire. La quantité de charge σ^+ n'est que le résultat des combinaisons des deux polarisations agissant dans ces deux matériaux. On donne ci-dessous l'expression analytique de cette quantité de charges :

$$|\sigma| = |P_{SP_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}}(x) + P_{PZ_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}}(x) - P_{SP_{\text{GaN}}}(x)| \quad \text{C/m}^2 \quad (\text{II-7})$$

Les expressions littérales des trois polarisations ci-dessus sont données dans les équations décrites plus haut.

Par ailleurs, la connaissance de ces mêmes expressions nous permettrait de tracer l'évolution de ces polarisations en fonction de la fraction molaire x afin de déduire graphiquement l'évolution de $|\sigma|$ en fonction de x (toujours dans le cas où le matériau GaN est relaxé).

Par conséquent, on donne à la figure II.2, l'évolution de $|\sigma|$. Ces résultats sont tirés des travaux de thèse de N. Vellas qui a étudié les propriétés de la filière GaN et ses applications à la réalisation de transistors HEMT [21].

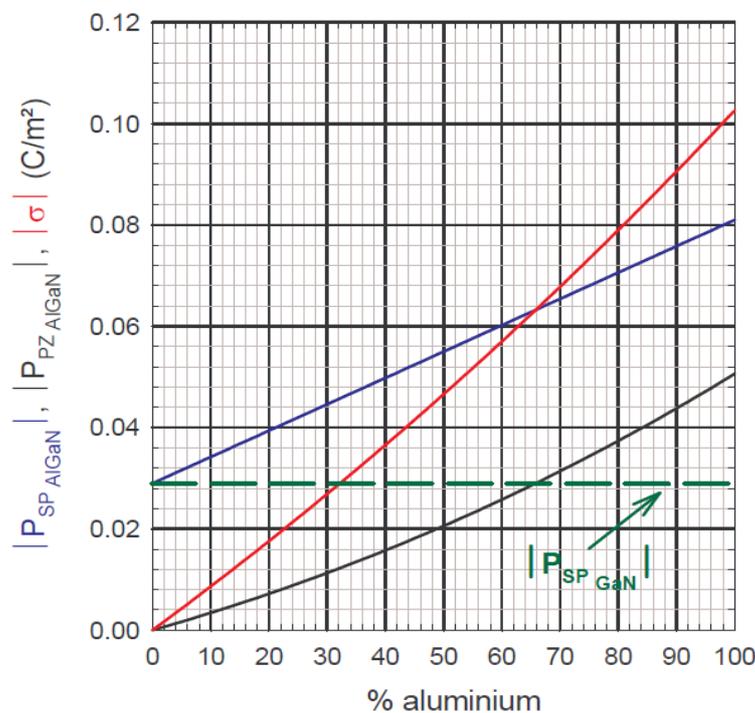


Figure II.2 : Evolution des polarisations piézoélectrique et spontanée et de la densité de charges à l'interface AlGaN/GaN en fonction de la fraction molaire x .

Comme on l'attendait, cette quantité augmente avec le taux d'aluminium. Cela peut s'expliquer par deux raisons fondamentales :

- ✓ Le fait d'augmenter ce taux augmente par ailleurs l'extension de maille du matériau ternaire. Sa contrainte en tension est donc d'autant plus importante que x croît.
- ✓ La polarisation spontanée de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ augmente avec le taux d'aluminium (relation linéaire).

Par combinaison de ces deux effets, l'augmentation de x ne peut qu'accroître la quantité de charges à l'interface en question.

L'accumulation de charges positives ainsi calculée doit fondamentalement être compensée par une quantité de charges opposée pour garantir le respect de la neutralité électronique. Cela se traduit donc par la formation de charges négatives de l'autre côté de l'interface côté GaN comme nous le montre la figure II.2 plus haut. C'est ainsi qu'est formé le gaz bidimensionnel d'électrons obtenu sans dopage intentionnel ce qui souligne l'indéniable avantage de la filière GaN.

On parlait de cas idéal car le matériau GaN, quand il est relaxé, ne subit ni contrainte en compression, ni contrainte en tension qui pourraient être responsables de la dégradation de la structure cristalline du matériau en provoquant la formation de cassures ou de dislocations dans le réseau cristallin. De plus, cette configuration est idéale pour générer une grande quantité de charges à l'interface.

Cependant ce cas est très rare car l'épitaxie parfaite d'une telle couche est très difficile à réaliser. Il n'est donc pas facile d'éviter la contrainte. Il nous faut donc étudier le cas non idéal afin de se rapprocher de la réalité.

II-4 Détermination de la quantité de charge à l'interface AlGa_xN/GaN en GaN contraint en tension

On sait que l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ avec une polarité Gallium possède un désaccord de maille avec le GaN. Il s'avère que la maille du nitrure de gallium est plus importante que celle de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ quelque-soit x supérieur à 0. Le matériau ternaire est donc contraint en tension ce qui, par conséquent, impose le fait que les polarisations spontanée et

piézoélectrique de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sont toutes les deux orientées vers le bas. Quand au désaccord de maille entre le GaN (situé juste en dessous du 2DEG) et le buffer en Nitrure d'aluminium (AlN), il est de nature différente. En effet, l'AlN possède une maille moins grande que le nitrure de gallium, le GaN (face Ga) subit donc une contrainte en compression. C'est pour cela que la polarisation piézoélectrique qui l'habite est orientée vers le haut du transistor comme nous le montre la figure II.3 du composant entier.

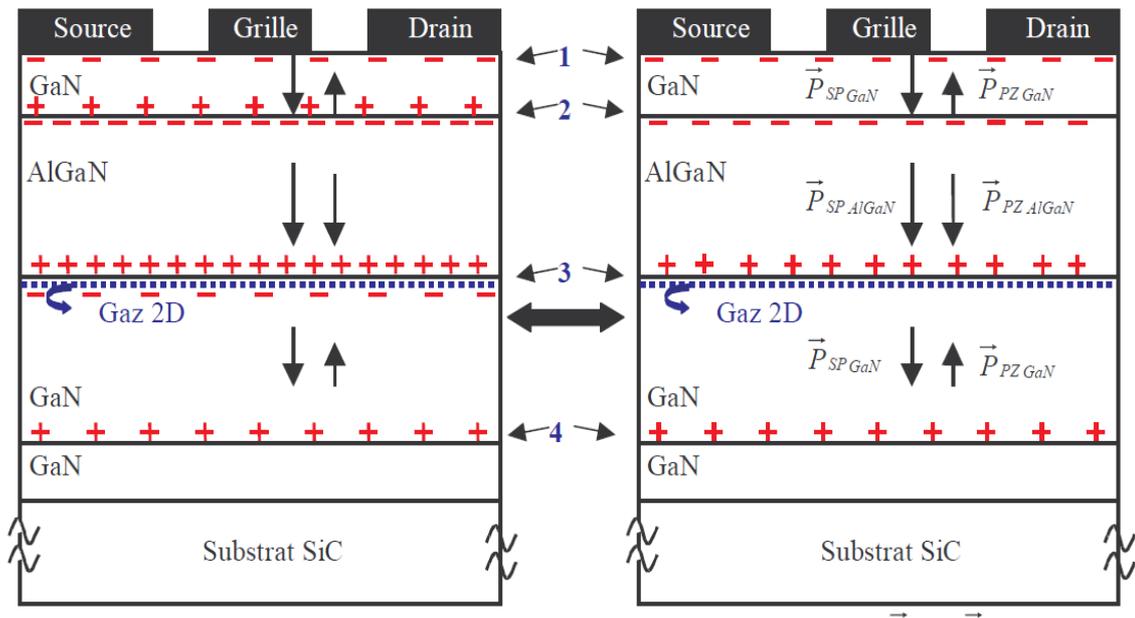


Figure II.3 : Visualisation des différentes sortes de polarisations qui agissent au sein de chacune des couches et de la répartition des charges aux interfaces.

Par conséquent, on note la présence de quatre interfaces au niveau desquelles les charges se répartissent. Ces charges résultent des polarisations présentes au sein des couches de GaN et d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ qui viennent constituer successivement la couche de passivation, la barrière et le canal du composant. La figure de gauche montre la répartition des charges positives et négatives générées par chacune des couches. La figure de droite (équivalente à celle de gauche) montre la répartition de ces quantités par l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ce qui explique pourquoi on représente que les charges positives et négatives de la couche du matériau ternaire. Cela nous permet de déterminer la densité

de charge $|\sigma^+|$ à l'interface 3 coté AlGaN qui sera l'origine de la formation du 2DEG par électro-neutralité.

Ainsi, lorsque l'on considère les orientations de chacune des polarisations agissant au sein du GaN et de l'AlGaN, on peut déterminer l'expression littérale de la densité de charges $|\sigma^+|$ à l'interface 3:

$$|\sigma^+| = |P_{SP_{AlxGa_{1-x}N}}(x) + P_{PZ_{AlxGa_{1-x}N}}(x) + P_{PZ_{GaN}}(x) - P_{SP_{GaN}}(x)| \quad C/m^2 \quad (II-8)$$

Le principe de fonctionnement du transistor HEMT AlGaN/GaN est le même. Donc, après la formation du gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface AlGaN/GaN coté GaN. Les électrons du 2DEG occupent les niveaux d'énergie de puits triangulaire quantique coté GaN et la modulation du niveau de Fermi par l'action électrostatique de la grille peuple ou dépeuple la population en charges négatives selon le signe de la polarisation de grille V_{gs} . On donne la forme définitive du diagramme énergétique de la structure HEMT AlGaN/GaN, à la figure II.4 ci-dessous.

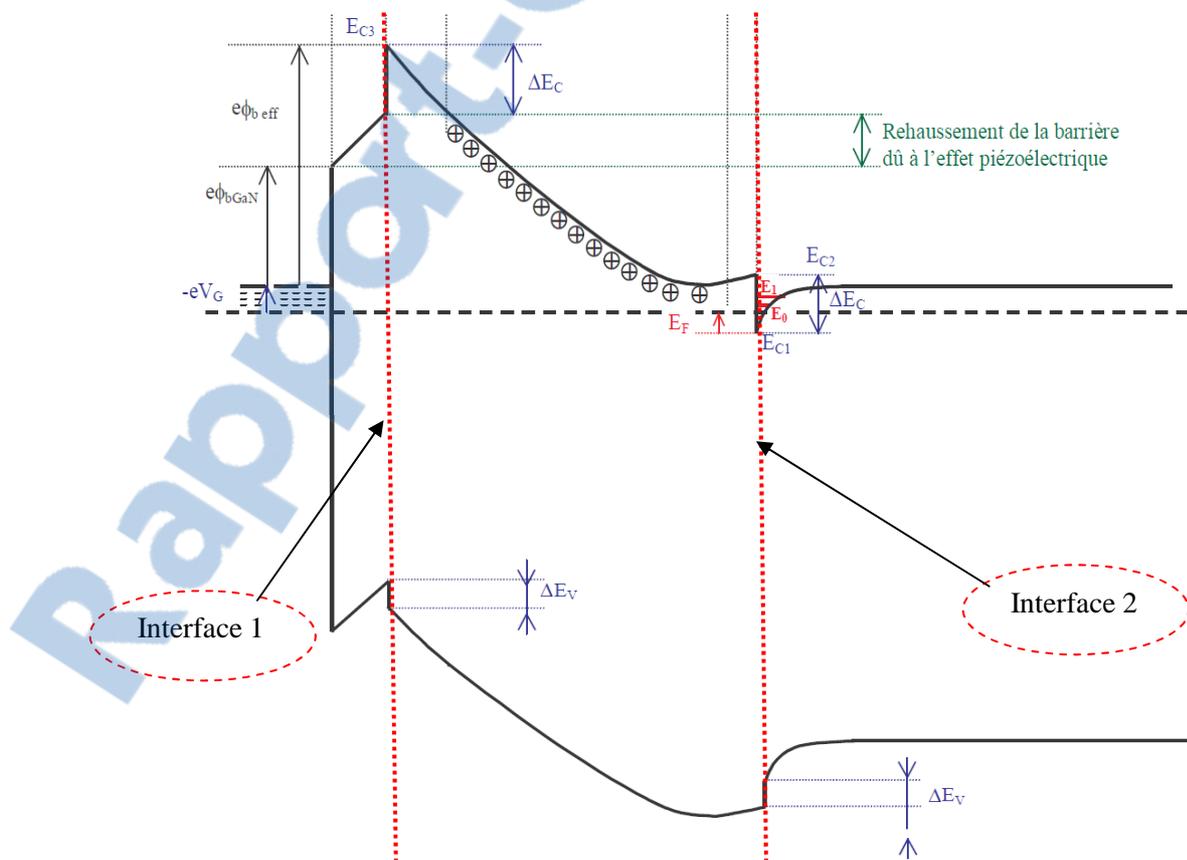


Figure II.4 : Diagramme énergétique de l'ensemble de la structure du composant.

Il est possible d'établir un lien entre le diagramme des bandes présenté à la figure II.4 et les charges apparaissant au niveau de la structure présentée à droite de la figure II.3. En effet, les charges développées par les polarisations à l'intérieur des matériaux de la structure sont à l'origine des courbures des bandes de conduction et de valence de ce diagramme énergétique :

- ✓ L'accumulation de charges négatives à l'interface 1 coté barrière pourrait correspondre à un dopage de type N. Or le dopage de type N fait décroître en énergie le diagramme des bandes ce qui peut rigoureusement expliquer le fait que les bandes de conduction et de valence sont en décroissance dans cette zone.
- ✓ L'accumulation de charges positives à l'interface 2 coté barrière, quant à elle, pourrait correspondre à un dopage de type P. C'est ce dopage qui fait croître en énergie le diagramme des bandes. Cela justifie le fait que les bandes de conduction et de valence augmentent au niveau de cette interface.
- ✓ On note, par ailleurs, que la bande de conduction augmente de part et d'autre de la frontière barrière/canal (AlGa_N/Ga_N) au niveau de la discontinuité qui marque l'hétérojonction. Cela s'explique par le fait que le champ électrique est continu.
- ✓ Finalement, on retrouve bien la cassure approximativement triangulaire à l'intérieur de laquelle est confiné le 2DEG dense dans le canal.

II-5 Modèle physico-thermique du HEMT

II-5-1 Modèle physico-électrique du HEMT

La simulation physico-électrique du transistor HEMT 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.

La loi de continuité du courant :

Les équations de continuités des densités de porteurs libres, électrons (eq. II-9) et trous (eq.II-10) [23], représentent la continuité des flux de porteurs :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{II-9})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{II-10})$$

\vec{J}_n et \vec{J}_p : représentent respectivement la densité de courant d'électrons et de trous.

R_n et R_p : représentent respectivement le taux de génération-recombinaison d'électrons et de trous.

p et n : représentent respectivement la densité de trous et d'électrons libres.

G_n et G_p : les taux de génération pour des électrons et des trous.

La loi de Poisson :

Cette loi (eq.II-11) relie la densité de charges au potentiel électrostatique [24].

$$\operatorname{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (\text{II-11})$$

ϵ représente la permittivité électrique, ψ le potentiel électrostatique, et ρ la densité de charges spatiales locale.

II-5-2 Modèle thermique du HEMT

Le principe de la modélisation thermique repose sur la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur (II.12) [25].

$$\rho C_p \frac{\partial T_L}{\partial t} - \operatorname{div} \left(k_L \vec{\nabla}(T_L) \right) = H \quad (\text{II-12})$$

Dans l'expression (II-12), ρ est la masse volumique du matériau en Kg/m³, C_p est la capacité calorifique massique en J/Kg.K, k_L est la conductivité thermique du matériau en W/m.K.

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

Un modèle simplifié pour obtenir le taux de génération calorifique pour un volume donné est couramment admis pour les technologies HEMTs [26].

$$H = \vec{J} \cdot \vec{E} + (R - G)(E_g + 3k_B T) \quad (\text{II-13})$$

Le premier terme de l'expression (II-13) 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 de Boltzmann et T est la température ambiante [23].

Ainsi, une étude thermodynamique rigoureuse sur la génération de chaleur dans les composants à semi-conducteurs a été développée par Wachutka [23]. D'où la génération de la chaleur dans ces composants tels que les HEMTs est due principalement à l'effet Joule. Ce dernier correspond au premier terme de l'équation II-13.

II-6 Résolution numérique par la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est très largement utilisée pour l'étude des effets thermiques. 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 et thermique 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 [27].

II-6-1 Couplage physico-thermique

Notre modèle du transistor HEMT a été développé et conçu à l'aide du module ATLAS du simulateur SILVACO. Ce dernier est adapté pour la résolution des équations

différentielles couplées par la méthode des éléments finis. Le modèle de dérive diffusion est alors couplé aux équations de transfert de la chaleur.

A l'instant initial, la température de réseau est uniforme est égale à la température ambiante ($T = 300$ K). On résout le modèle physique pour déterminer la distribution du potentiel et la densité d'électrons dans le composant et plus précisément dans la couche active. En même temps le terme de génération de chaleur H est calculé et la température du réseau en tout point du composant est déterminée par la résolution de l'équation de diffusion thermique. Le modèle physique est ensuite résolu à nouveau en utilisant les paramètres de mobilité et vitesse de saturation mis à jour en fonction de la température du réseau. Ainsi, les deux modèles sont résolus alternativement jusqu'à la convergence de toutes les grandeurs électriques et thermiques.

II-6-2 Paramètres d'entrée du modèle numérique

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

Les principaux paramètres d'entrées du modèle sont:

- 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 en fonction de la température.
- La tension de seuil en fonction de la température.
- La conductivité thermique des matériaux en fonction de la température.
- La densité de donneurs ionisés.
- Les capacités calorifiques massiques.
- La masse volumique du matériau semi-conducteur.

II-6-3 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 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$.

x N. 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 [28], nous avons deux manières de paramétrer ces charges occasionnées par les deux sortes de polarisations. Elles sont toutes les deux exposées dans le paragraphe II-2.

- Configuration utilisant les instructions MATERIAL et REGION:

D'après le tutorial d'ATLAS [28], 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:

$$P_{PZAlGaN}(x) = 2 \frac{a-a_0(x)}{a_0(x)} \left[e_{31}(x) - e_{33}(x) \frac{c_{13}(x)}{c_{33}(x)} \right] \quad C/m^2 \quad (\text{II-14})$$

- 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 $Al_xGa_{1-x}N/GaN$. 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 (II-15):

$$|\sigma^+| = |PSP Al_xGa_{1-x}N(x) + PPZ Al_xGa_{1-x}N(x) + PPZ GaN - PSP GaN| \quad C/m^2 \quad (\text{II-15})$$

Les expressions de PSP $Al_xGa_{1-x}N(x)$, PPZ $Al_xGa_{1-x}N(x)$, 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 cm^{-2} .

De cette façon, avec un x fixé (par exemple à 30%), 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 logiciel **TONYPLOT** en lançant la fenêtre graphique qui fait apparaître la structure du composant.

II-6-4 Définition de la mobilité en fort champ

Lorsque le champ électrique augmente, les électrons voient leur vitesse qui commence à saturer pour ensuite stagner littéralement. Or, on rappelle que la vitesse des électrons correspond au produit de leur mobilité avec le champ électrique. De ce fait, la mobilité diminue quand le champ augmente de manière à maintenir la vitesse des porteurs constants lorsqu'ils atteignent leur vitesse de saturation (figure II.5).

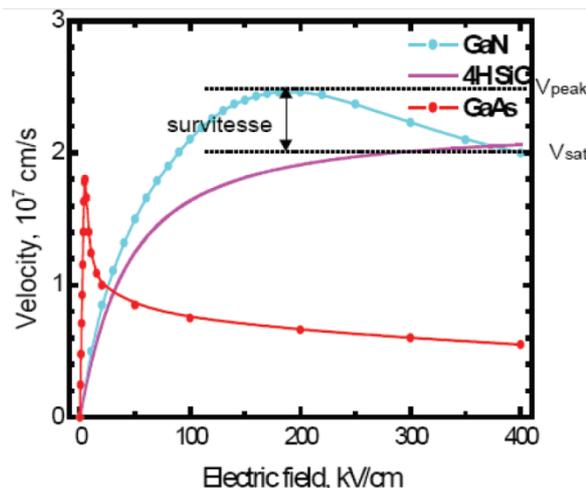


Figure II.5 : Évolution de la vitesse des électrons selon l'amplitude du champ électrique.

Il s'agit alors de trouver un modèle qui permettra de configurer deux paramètres physiques importants : la mobilité des électrons et des trous (même si 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 »).

NB : pour activer le modèle du champ électrique parallèle faisant saturer les électrons dans le canal, il faut préciser le paramètre **FLDMOB** (Field Dependent Mobility) au niveau de l'instruction **MODEL** (voir l'annexe).

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.

Ce modèle est basé sur l'expression analytique suivante (expression de la mobilité dépendant de **E** selon Caughey et Thomas) [28]:

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{V_{SATN}} \right)^{BETAN}} \right]^{\frac{1}{BETAN}} \quad (\text{II-16})$$

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{V_{SATP}} \right)^{BETAP}} \right]^{\frac{1}{BETAP}} \quad (\text{II-17})$$

Avec ;

E représente le champ électrique, μ_{n0} et μ_{p0} représentent respectivement les mobilités des électrons et des trous à faible champ, V_{SATN} et V_{SATP} sont respectivement la vitesse de saturation des électrons et des trous. Les paramètres $BETAN$ et $BETAP$ sont des paramètres d'ajustement.

II-7 Conclusion

Dans ce second chapitre, nous avons présenté les différentes couches constituant le transistor HEMT AlGaIn/GaN mettant à profit les propriétés des matériaux de la filière

Nitride de Gallium. Les polarisations spontanée et piézoélectrique dans le HEMT AlGaN/GaN ont été exposées. Aussi, un modèle physico-thermique pour le transistor HEMT a été proposé. C'est un modèle numérique qui inclut les lois physiques régissant le fonctionnement du transistor et un modèle thermique avec un couplage physico-thermique. Le modèle est implanté dans le simulateur SILVACO. Le modèle physico-thermique est utilisé dans le chapitres suivant pour l'analyse par simulations des effets thermiques sur les caractéristiques DC du ce transistors.

III-1 Introduction

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. Ce dernier provient d'un article IEEE publié par l'université de California-Santa Barbara à l'USA [29]. La même technologie a été étudiée par la société CrossLight [29, 30].

Dans ce chapitre, nous présenterons l'outil de simulation SILVACO que nous avons utilisé pour l'étude de ce composant. Ensuite, nous étudierons le comportement électrique et thermique du HEMT. Nous analyserons, la source de chaleur, les distributions de la température de réseau, l'influence de la température sur les caractéristiques statiques, sur le potentiel, sur la concentration en électron...etc.

III-2 Description du logiciel SILVACO

Le terme SILVACO est l'acronyme de « Silicon Valley Corporation » est une société américaine leader dans la vente de logiciels de TCAD (Technology Computer Assisted 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. Les modules de TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour :

-  La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.
-  La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFETs, les HEMTs, les TBHs,..., réalisés par le module ATLAS.

- ✚ Virtual Wafer Fab pour automatiser la simulation de fabrication des Wafers.

Dans ce travail, les simulations sont effectuées par le module ATLAS.

Le logiciel de simulation **ATLAS** est un simulateur de modélisation de composants capable de prédire les caractéristiques électriques et thermiques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. Il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, la température de réseau, etc, autant de données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques.

Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson, les équations de continuité de courant pour les électrons et les trous ainsi que l'équation de diffusion de la chaleur en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.

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.

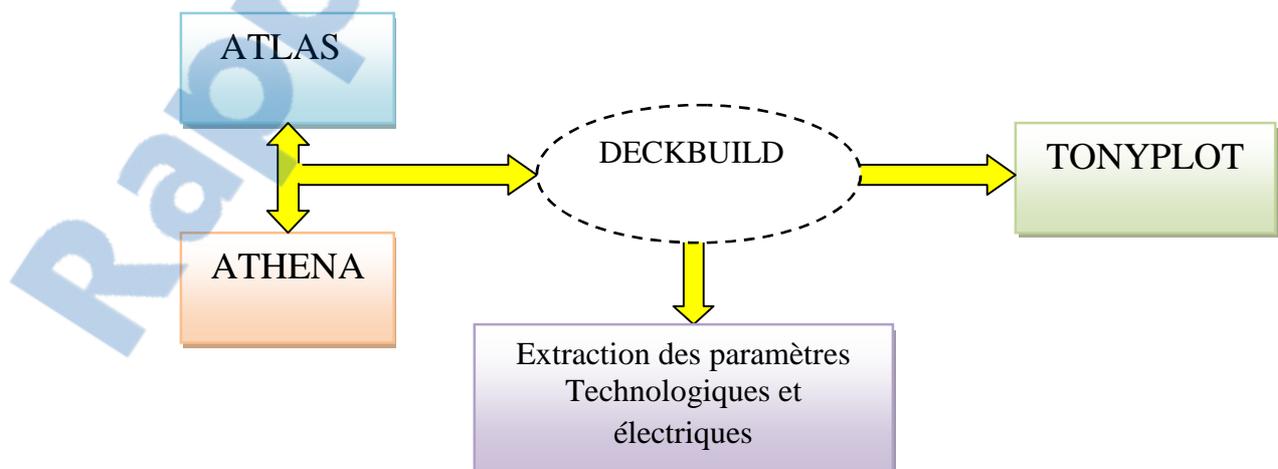


Figure III.1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par SILVACO.

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**.
- ⇒ 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,...).

L'ensemble du script (ou deck) est donné en annexe.

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.2.

La topologie de la structure étudiée est celle d'un HEMT $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ épitaxiée sur un substrat 4H-SiC (poly type 4H du Carbure de Silicium). 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 $0,6 \mu\text{m}$ d'une couche de GaN 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 : $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ son épaisseur est de $0,027 \mu\text{m}$. Les longueurs des contacts de source, grille et drain sont de $1 \mu\text{m}/0,6 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$ respectivement. Les distances source-grille et grille-drain sont de $1,4 \mu\text{m}$. La densité de charge à l'interface $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ est fixée à $6,43 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

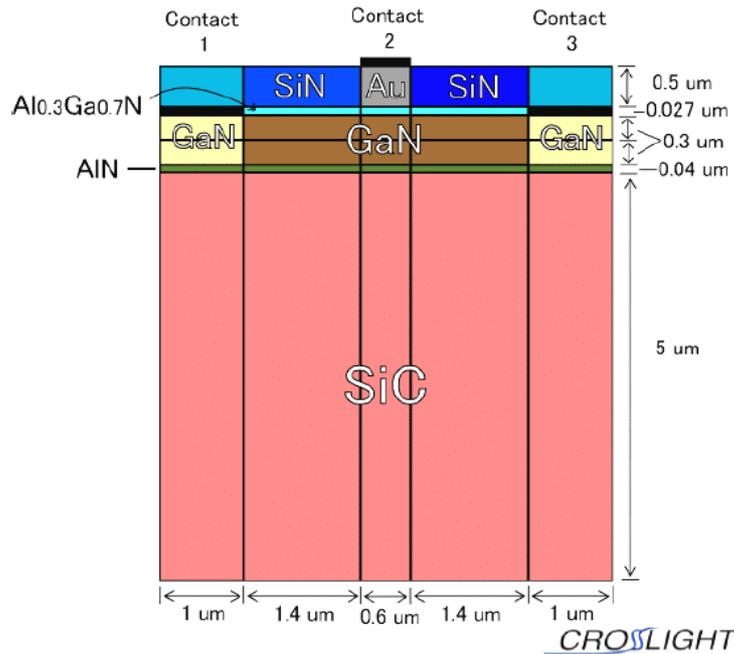


Figure III.2 : Topologie de la structure HEMT Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN simulée.

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 _{0.3} Ga _{0.7} N	w-GaN	SiN	AlN	4H-SiC	Si	Al ₂ O ₃
Bande interdite (eV)	3,96	3,39	1,12	6,2	3,23	1,12	8,8
Conductivité thermique (W/k.cm)	0,25	1,3	0,35	2,85	3,3	1,3	33
Permittivité relative	9,55	10	7,5	8,5	9,7	11,8	8,6
Affinité des électrons (eV)	3.169	4,1	1,02	1.9	4,05	4,05	4,05
Mobilité des électrons (cm ² /Vs)	985,5	1350	-	135	460	1500	-
Mobilité des trous (cm ² /Vs)	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.3 ci-dessous.

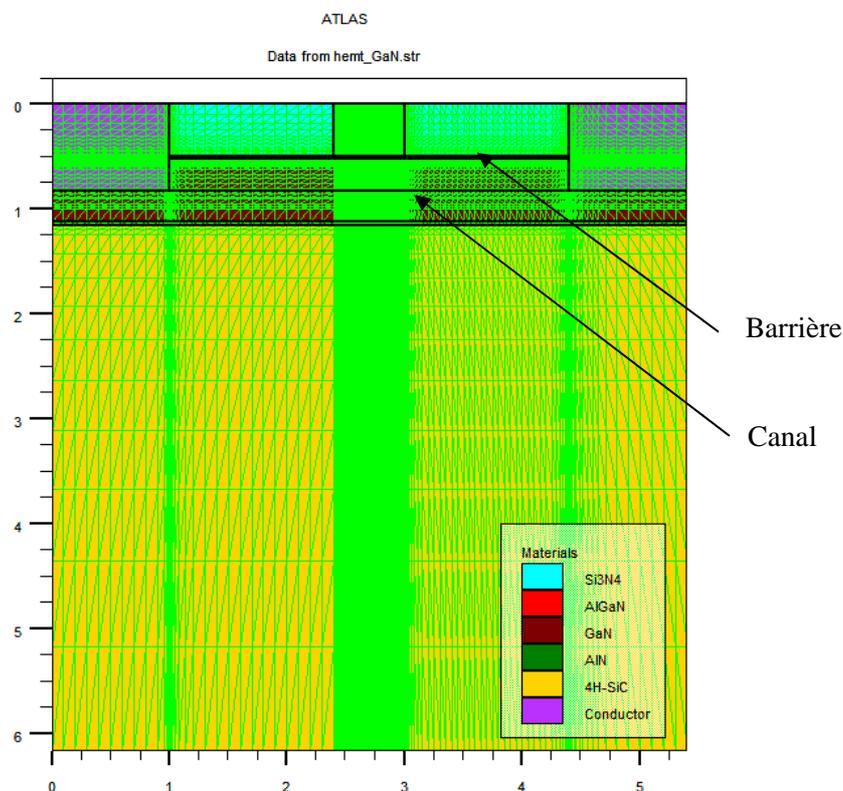


Figure III.3 : Structure maillée du transistor HEMT AlGaIn/GaN.

III-3-2 Diagramme de bandes d'énergie

On connaît la relation qui lie la hauteur de barrière ϕ_{Bn} , l'affinité électronique du semi-conducteur se situant sous le contact (χ) et le travail de sortie du métal ϕ_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 χ du matériau $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$, elle est d'environ 3,169 eV (tableau III.1) et on connaît aussi la valeur du travail de sortie du métal 5,15 eV (correspond au travail de sortie de l'Or (Au)). Il est donc facile de déduire théoriquement la hauteur barrière qui sera alors de 1,981 eV. Cela a permis de caractériser entièrement le composant du point de vue de son diagramme des bandes.

Nous traçons sur la figure III.4 le diagramme des bandes d'énergie de notre structure étudiée à l'équilibre thermodynamique.

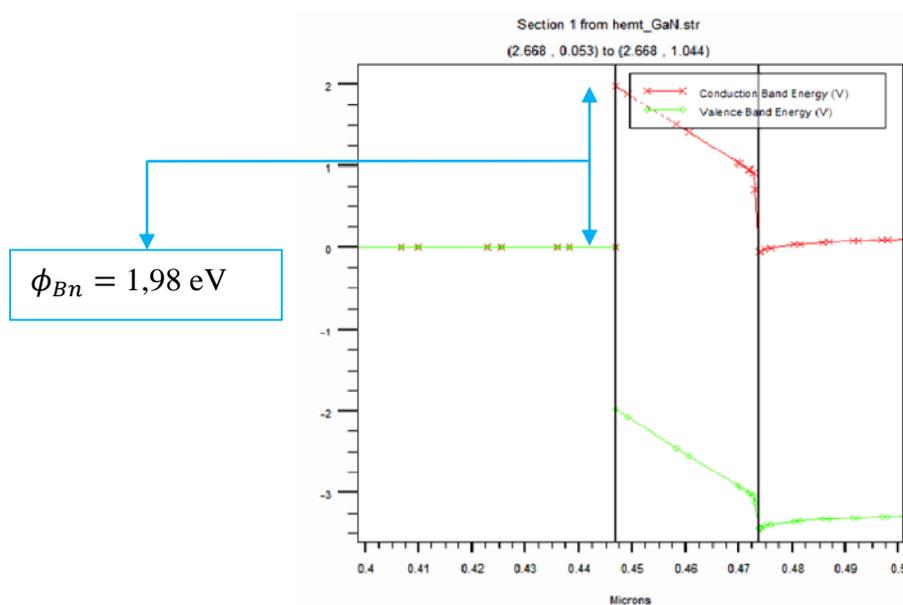


Figure III.4 : Diagramme de bandes d'énergie du HEMT AlGaIn/GaN à l'équilibre thermodynamique.

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 1,98 eV. De plus, les courbures des bandes semblent bonnes 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.

III-4 Résultats et interprétation

III-4-1 Résultats statiques

L'intérêt premier de notre travail est de pouvoir valider nos résultats de simulations avec ceux mesurés.

III-4-1-1 Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds}

Nous avons représenté sur les figures III.5 et III.6 les caractéristiques de sortie donnant l'évolution du courant I_{ds} 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 et -2). 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.5) apparaissent en accord avec les caractéristiques de la référence [29].

La figure III-6 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 (courbes 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 (courbes en symboles).

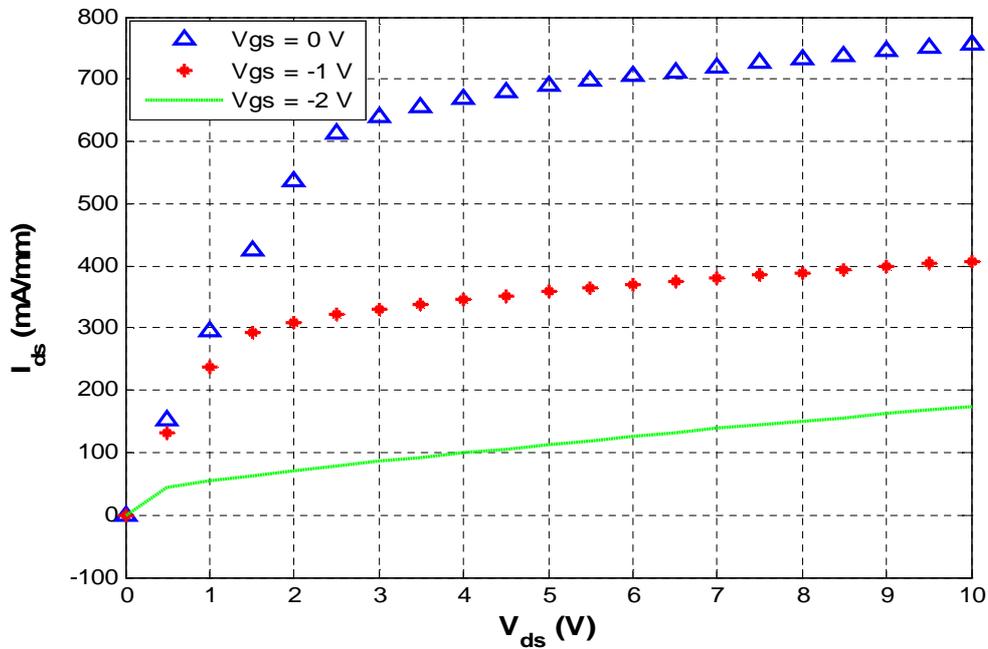


Figure III.5 : Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} mesurées pour V_{gs} variant de 0 à -2 V avec un pas de 1 V.

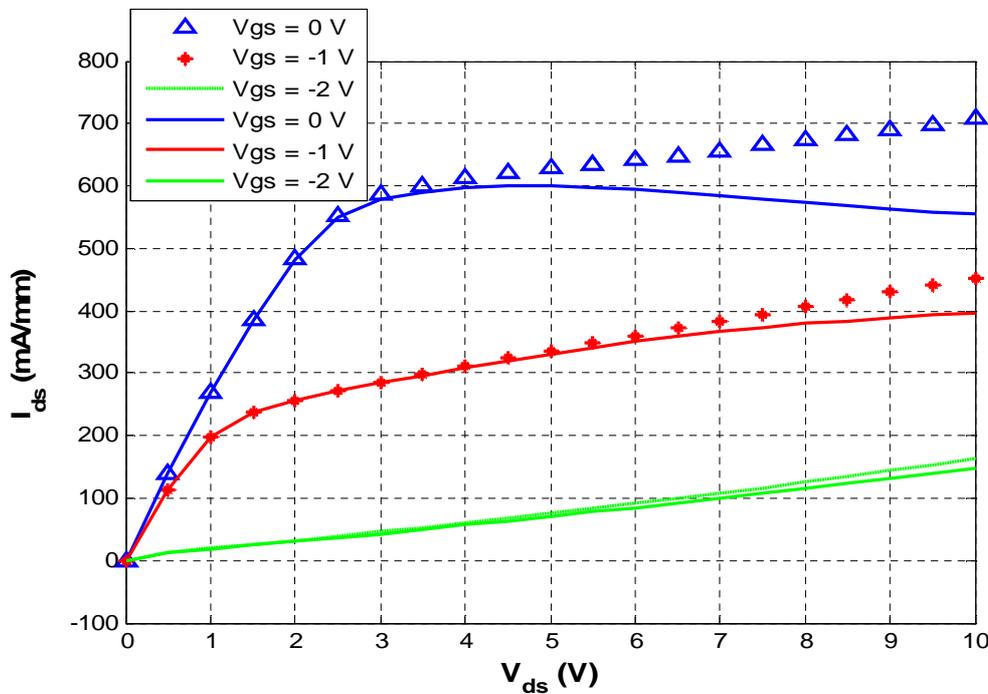


Figure III.6 : Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} avec (courbes continues) et sans effets thermiques (courbes en symboles) pour V_{gs} variant de 0 à -2 V.

III-4-1-2 Caractéristiques de transfert Ids-Vgs

La figure III-7 illustre une comparaison entre les caractéristiques de transfert Ids(Vgs) simulées (avec et sans effet thermique) à la température ambiante. Ces caractéristiques sont obtenues pour Vds égale 5 et 8 V. Là encore, le courant simulé diminue avec l'effet de conduction de la chaleur. On note que le courant de saturation maximum vaut 700 mA/mm et se dégrade à environ 600 mA/mm pour Vds = 5 V.

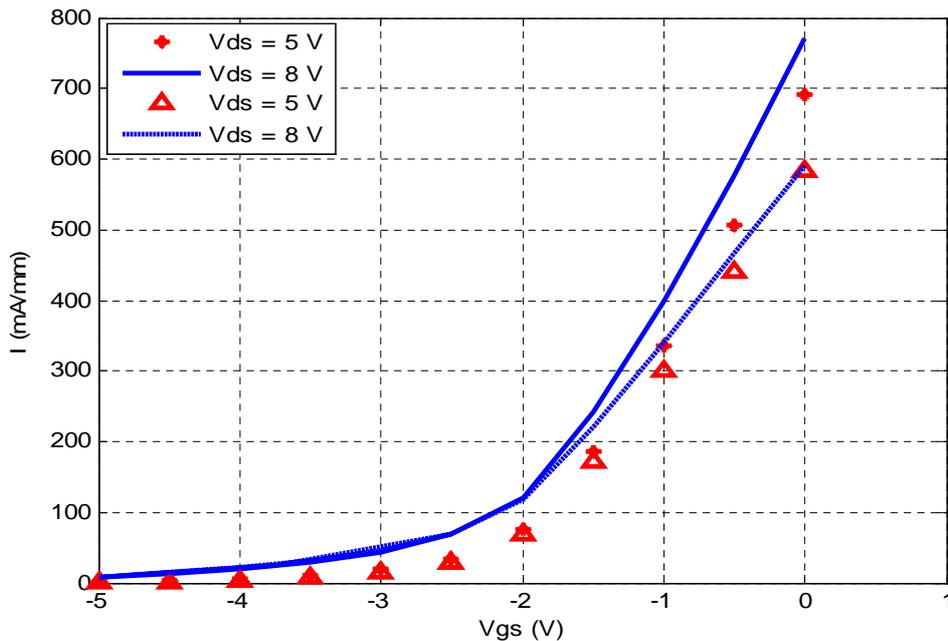


Figure III.7 : Caractéristiques de transfert Ids-Vgs d'un HEMT Al_{0,3}Ga_{0,7}N /GaN pour Vds = 5 V et 8 V.

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 délaiter 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.

b) 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 :

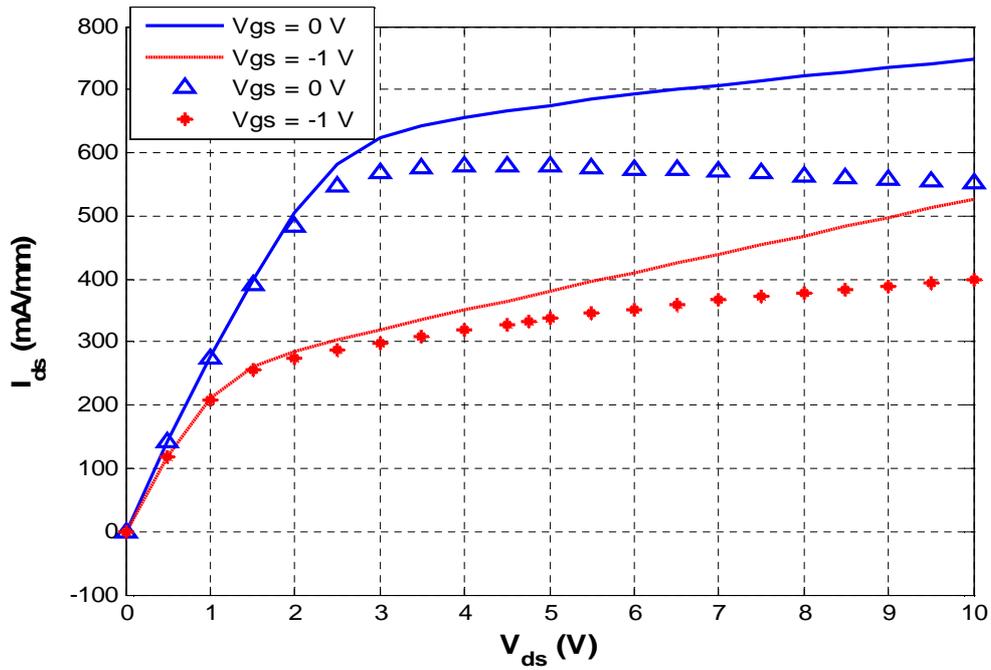
$$G_m = \left. \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} \right|_{V_{ds}=cste} \quad (\text{III-2})$$

III-4-2 Effet des paramètres géométriques sur les caractéristiques du HEMT en GaN

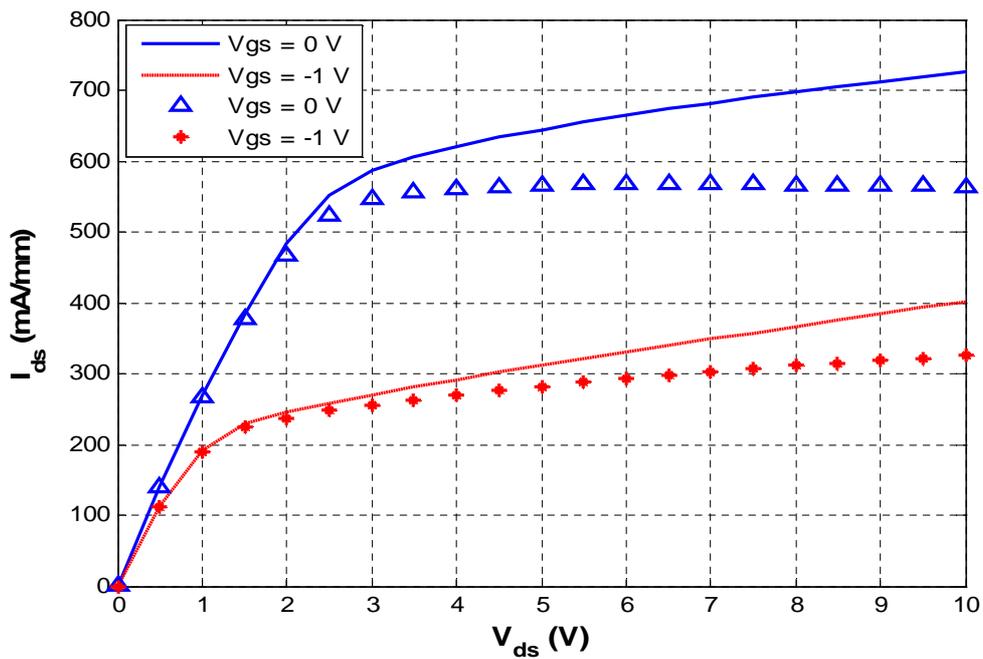
III-4-2-1 Effet de la longueur de la grille

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.

Les figures III.8-a et III.8-b représentent la variation du courant drain source en fonction de la tension drain-source V_{ds} pour différentes longueurs des grilles L_g (0.5 μm et 0.7 μm) dans le HEMT AlGaIn/GaN, et ceci sans (courbes continues) et avec (courbes en symboles) effet thermique. 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).



(a)



(b)

Figure III.8 : Influence de la longueur de grille sur les caractéristiques de sortie Ids-Vds pour V_{gs} = 0 et -1 V avec deux longueurs de grille différentes : (a) L_g = 0.5 μm et (b) L_g = 0.7 μm.

III-4-2-2 Effet de l'épaisseur de la couche barrière

Nous représentons dans cette partie de simulation l'effet de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques de sortie Ids-Vds. Les figures III.9-a et III.9-b montrent

ces caractéristiques avec (courbes en symboles) et sans effets thermiques (courbes continues) paramétrées en épaisseur de la couche barrière, cette dernière est fixée à $0,026 \mu\text{m}$ et à $0,028 \mu\text{m}$. Les polarisations de grille appliquées sont de 0 et -1 V. On observe que l'augmentation de l'épaisseur de la couche barrière (figure III.9.b) engendre une augmentation du courant drain-source I_{ds} .

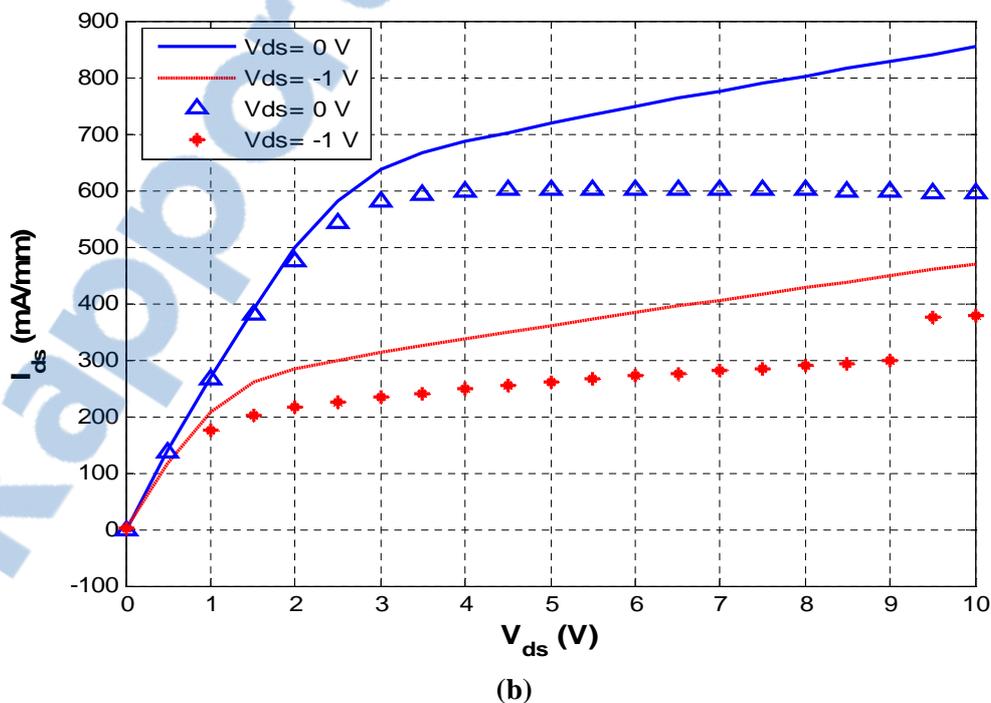
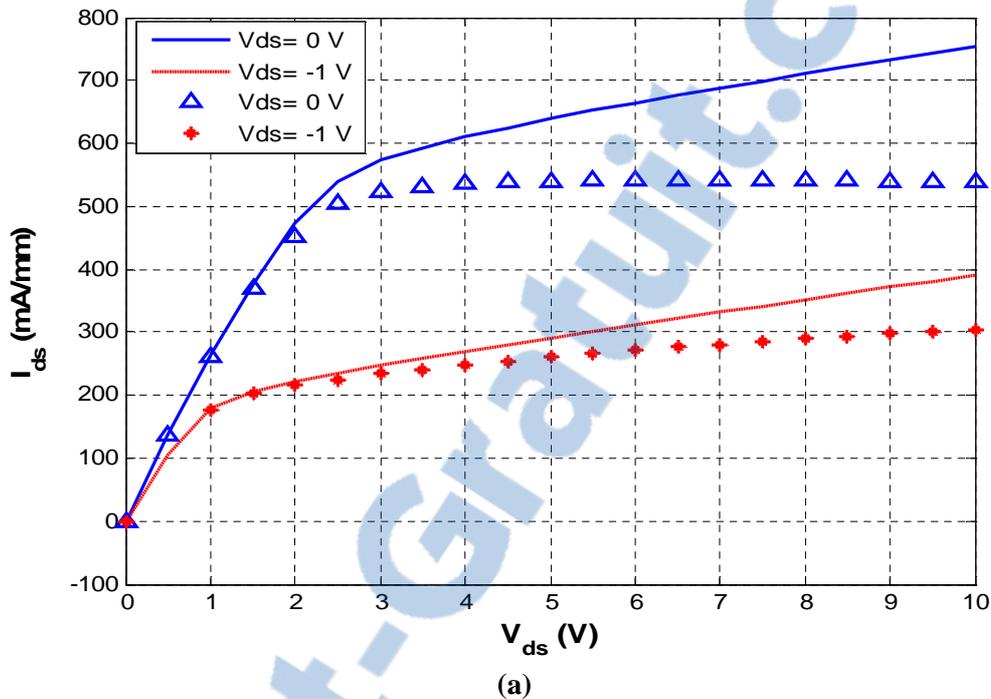
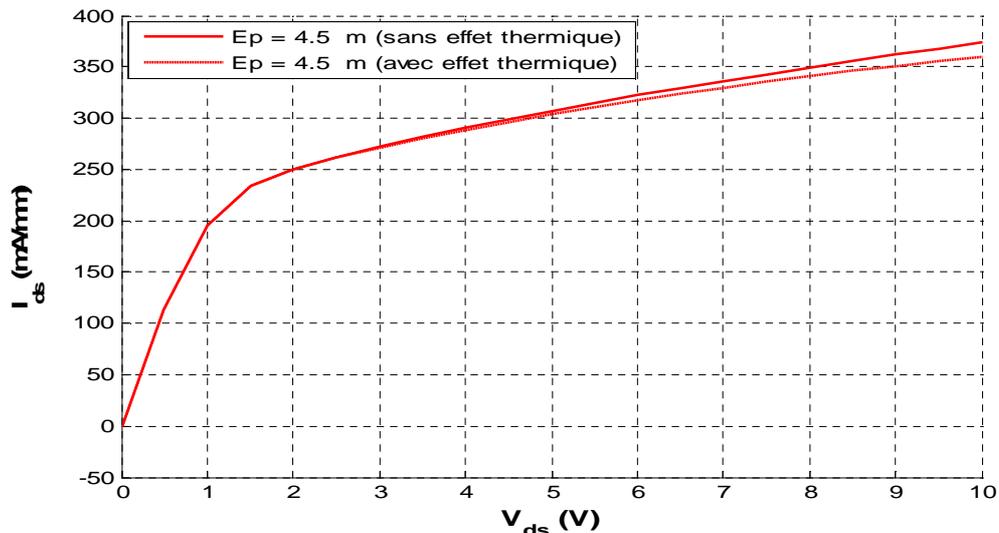


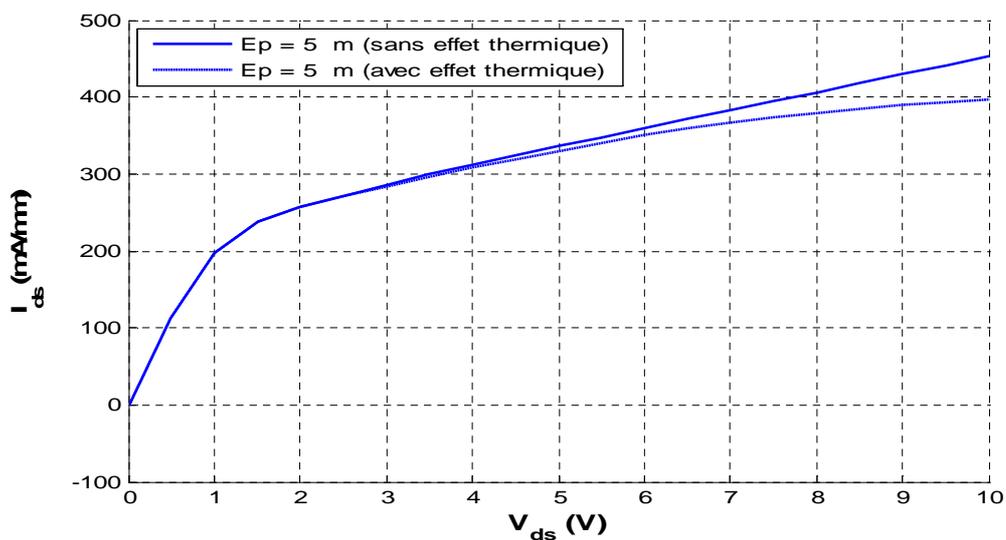
Figure III.9 : Influence de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0$ et -1 V avec deux épaisseurs différentes de la couche barrière : (a) $E_p = 0.026 \mu\text{m}$ et (b) $E_p = 0.028 \mu\text{m}$.

III-4-2-3 Impact de l'épaisseur de substrat

Les figures III.10-a et III-10-b illustrent l'effet de l'épaisseur du substrat avec (courbes en symboles) et sans effet thermique (courbes continues) sur le courant drain source. L'étude par simulation est effectuée pour deux épaisseurs de substrat : 4.5 μm et 5 μm . La polarisation de grille appliquée est de -1 V. Nous pouvons noter que la diminution de l'épaisseur du substrat agit dans le sens d'une diminution du courant drain source et par conséquent d'une diminution de la température du réseau. En effet, l'amincissement du substrat permet d'accélérer le transit de la chaleur.



(a)



(b)

Figure III.10 : Influence de l'épaisseur de substrat sur les caractéristiques Ids-Vds, pour V_{gs} = -1 V, (a) Ep = 4.5 μm et (b) Ep = 5 μm .

III-4-2-4 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 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 cristalline 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 [31]. 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.

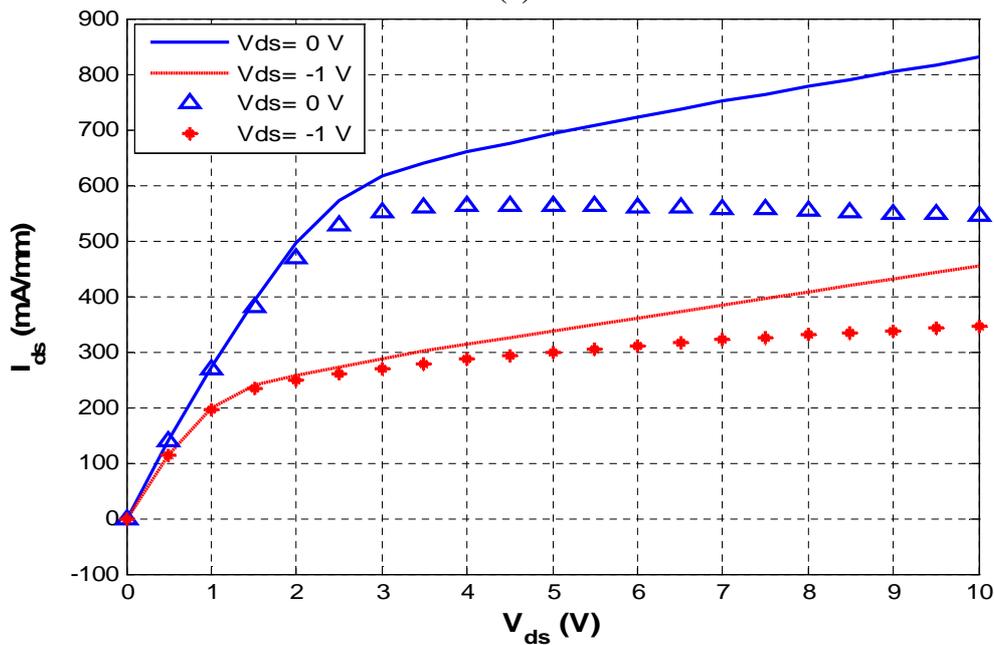
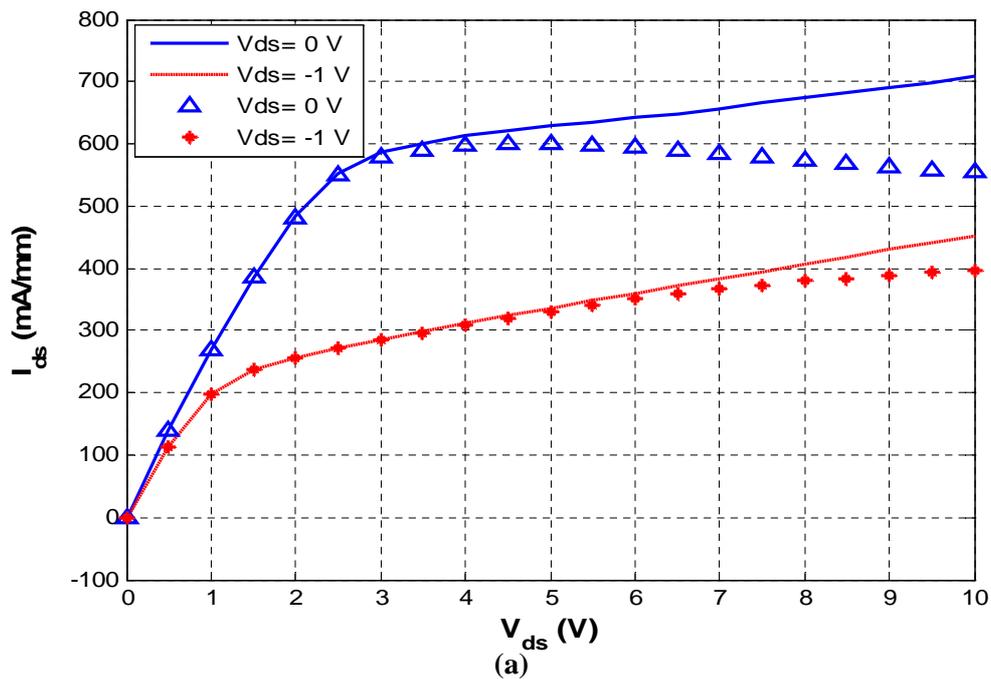
➤ Le Saphir – Al_2O_3

Le Saphir est le matériau présentant le plus désaccord de maille avec le GaN. Ce désaccord, certes amélioré, reste extrêmement pénalisant mais partiellement résorbé par l'utilisation de super-réseaux de nucléation. L'inconvénient majeur de ce matériau est indubitablement sa médiocre conductivité thermique, qui en fait un réservoir de calories très astreignant, notamment lors d'application où la chaleur doit être évacuée efficacement. Insistons par ailleurs sur le fait que le saphir demeure un substrat commun et très bon marché, ce qui lui confère un certain attrait.

➤ 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 [32]. 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.11-a, III-11-b et III-11-c l'effet du substrat (4H-SiC, Sapphire Al_2O_3 et Silicium) sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour les points de polarisation $V_{gs} = 0$ et -1V .



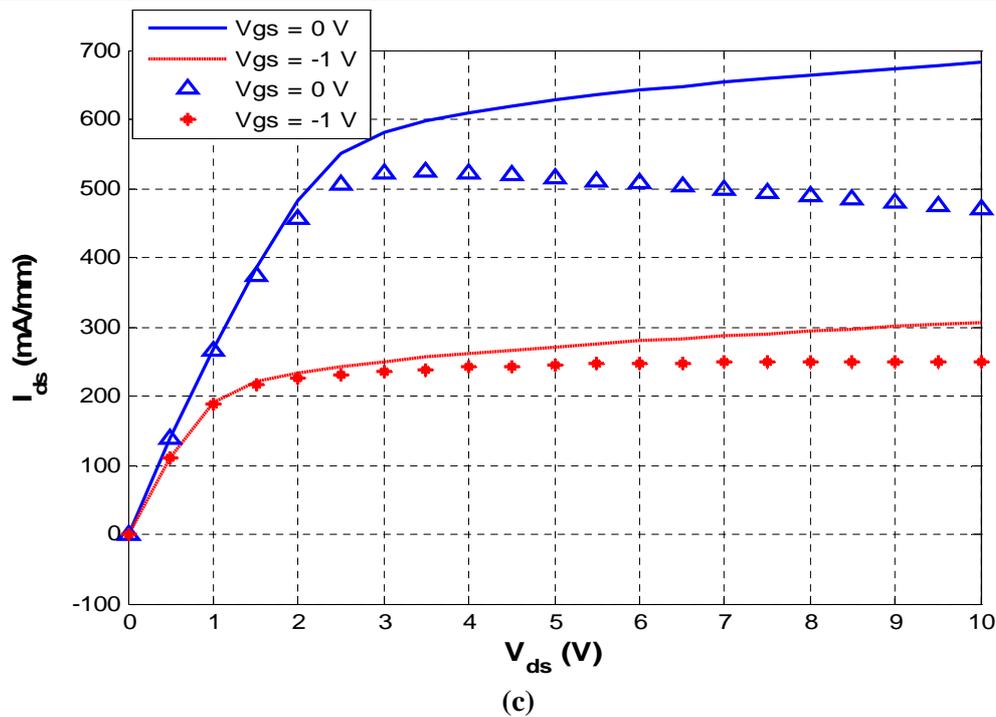


Figure III.11 : Influence du substrat (a) 4H-SiC, (b) Saphire et (c) Silicium sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0$ et -1 V.

Cette étude fait état d'une comparaison avec et sans effet thermique de transistors de type HEMT réalisés sur trois substrats différents (silicium (Si), saphire (Al_2O_3) et carbure de silicium (4H-SiC)). La technologie la plus récente sur substrat 4H-SiC fait état d'une meilleure maîtrise technologique, (meilleures performances statiques en puissance).

On remarque que le composant sur substrat saphire possède un courant important par rapport au composant sur deux autre substrat, et ceci avec et sans effet thermique.

III-4-3 Distribution des grandeurs électriques dans le HEMT AlGaN/GaN/4H-SiC

III-4-3-1 Carte du potentiel

Pour mieux comprendre le profil de distribution du potentiel dans la région de la barrière, nous avons tracé les cartes 2D (figures III.12 et III.13) de potentiel dans le HEMT AlGaN/GaN/4H-SiC.

La polarisation du composant électronique en régime statique se fait par une tension de grille $V_{gs} = 0$ V (figure III.12) et $V_{gs} = -2$ V (figure III.13) et pour une tension de drain $V_{ds} = 10$ V.

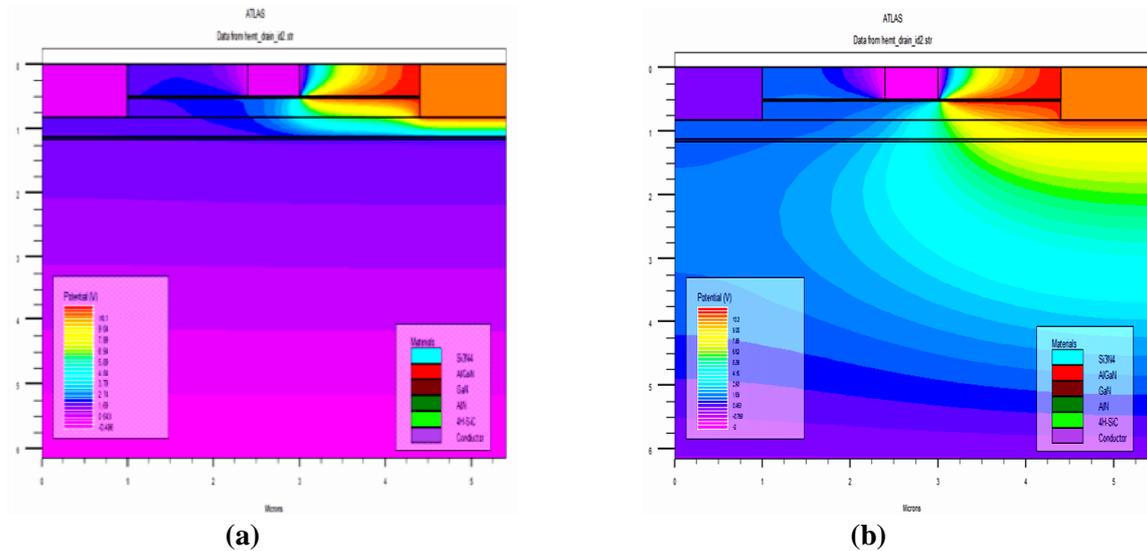


Figure III.12 : Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, sans effet thermique, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V.

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 grille.

A l'interface Si₃N₄/grille, la valeur du potentiel est d'environ 1.69 V, puisqu'elle fluctue légèrement. Puis le potentiel diminue progressivement jusqu'à -0.125 V en profondeur. On remarque aussi 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 élevée 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 observe aussi que suivant les tensions de polarisation, la distribution du potentiel pour $V_{gs} = 0 \text{ V}$ a le même comportement que celui de $V_{gs} = -2 \text{ V}$, 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 croit jusqu'à des valeurs positives pour atteindre la tension de polarisation du drain.

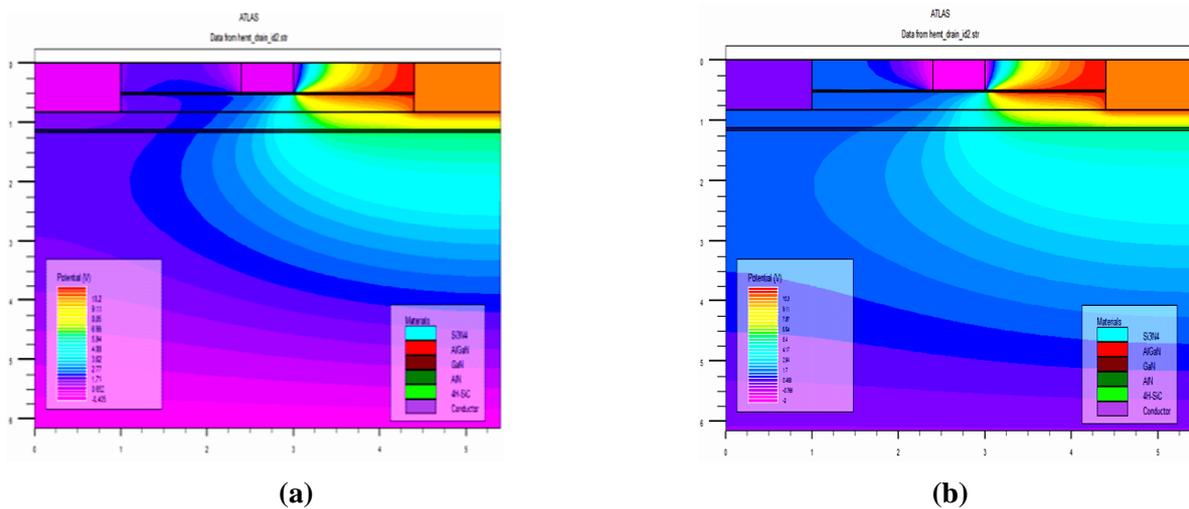


Figure III.13 : Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, avec effet thermique, (a) $V_{gs} = 0 \text{ V}$ et (b) $V_{gs} = -2 \text{ V}$.

III-4-3-2 Carte de concentration en électron

Pour mieux connaître le profil de distribution de la concentration en électron dans le composant, nous avons tracé les cartes 2D (figures III.14 et III.15) de la concentration en électron dans le HEMT AlGaIn/GaN/4H-SiC. Les polarisations du composant se font par une tension de grille $V_{gs} = 0 \text{ V}$ et $V_{gs} = -2 \text{ V}$, sans effet thermique (figures III.14), et une tension de grille $V_{gs} = 0 \text{ V}$ et $V_{gs} = -2 \text{ V}$, avec effet thermique (figures III.15). La tension de drain appliquée est de 10 V.

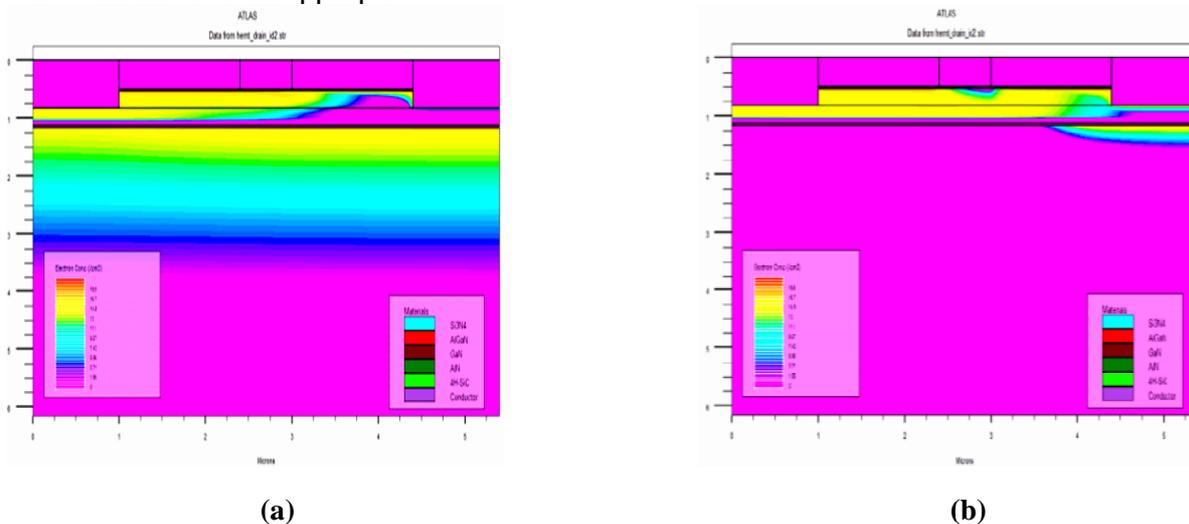


Figure III.14 : Carte 2D iso-thermique de la concentration en électron pour $V_{ds} = 10 \text{ V}$, (a) $V_{gs} = 0 \text{ V}$ et (b) $V_{gs} = -2 \text{ V}$.

On peut remarquer une augmentation de la concentration en électron de la région canal vers la région barrière, pour les deux valeurs de V_{gs} . Ces cartes montrent aussi que la concentration en électron augmente avec la polarisation de grille. En effet, pour une polarisation de grille donnée, cette concentration est importante sans la prise en compte des effets thermiques (figure III.14).

On remarque aussi que la distribution de la concentration sur les régions drain, grille, Si_3N_4 et source est stable. En effet, cette concentration en électron diminue d'une manière très rapide quand on va du canal vers le bas du substrat.

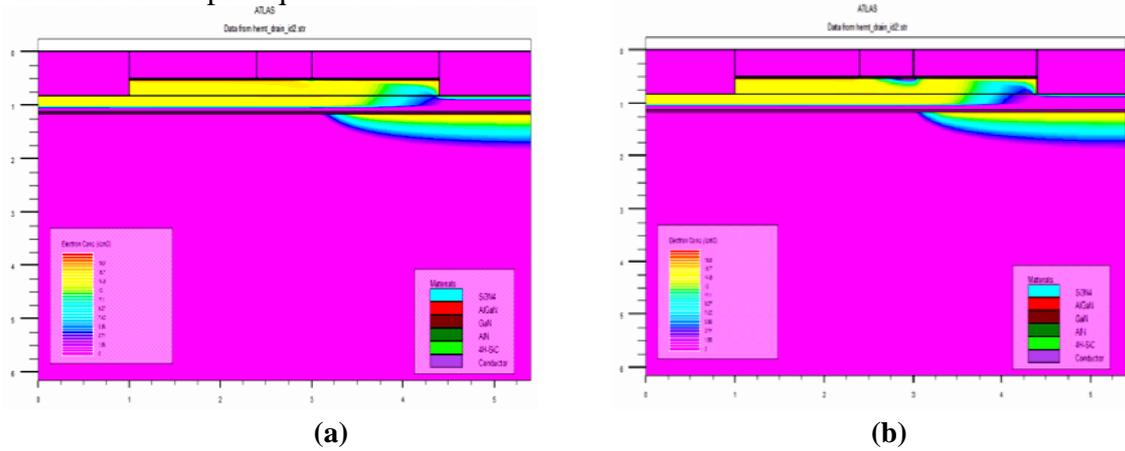


Figure III.15: Carte 2D thermique de la concentration en électron pour $V_{ds} = 10$ V, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V.

III-4-3-3 Carte de la température de réseau

Nous avons tracé sur la figure III.16 les cartes de distribution de la température de réseau dans le HEMT-AlGaIn/GaN sur substrat 4H-SiC, pour une tension de drain de 10 V et pour deux points de polarisations de grille.

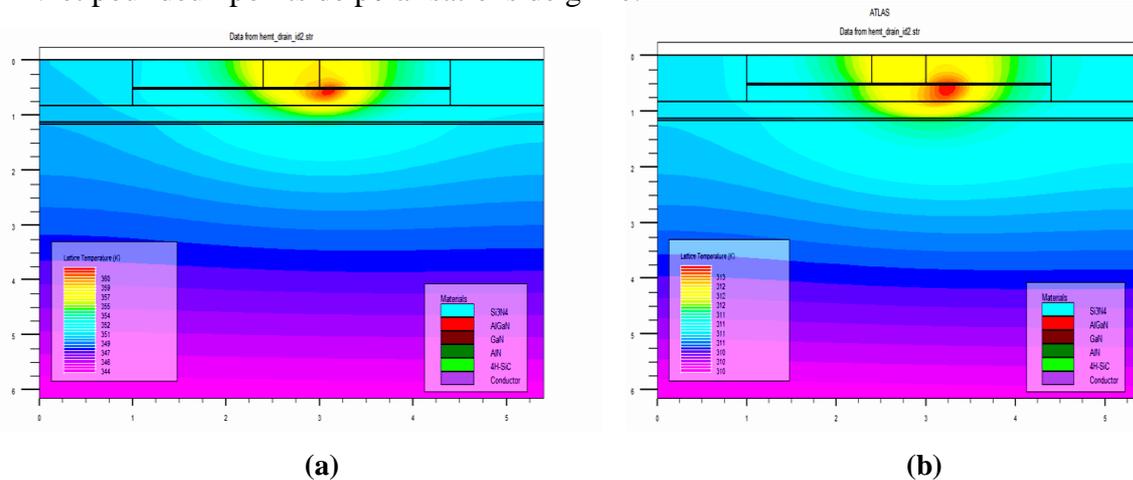


Figure III.16 : Carte 2D de la température de réseau pour $V_{ds} = 10$ V, (a) $V_{gs} = 0$ V et (b) $V_{gs} = -2$ V.

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 est de 361 K pour $V_{gs} = 0$ V et il est de 313 K pour $V_{gs} = -2$ V.

La figure III.17 illustre la variation de la température de réseau en fonction de la polarisation du drain avec une température de socle de 300 K et pour deux polarisations de grille ($V_{gs} = 0$ et -2 V). On remarque 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 361 K pour $V_{gs} = 0$ V et $V_{ds} = 10$ V.

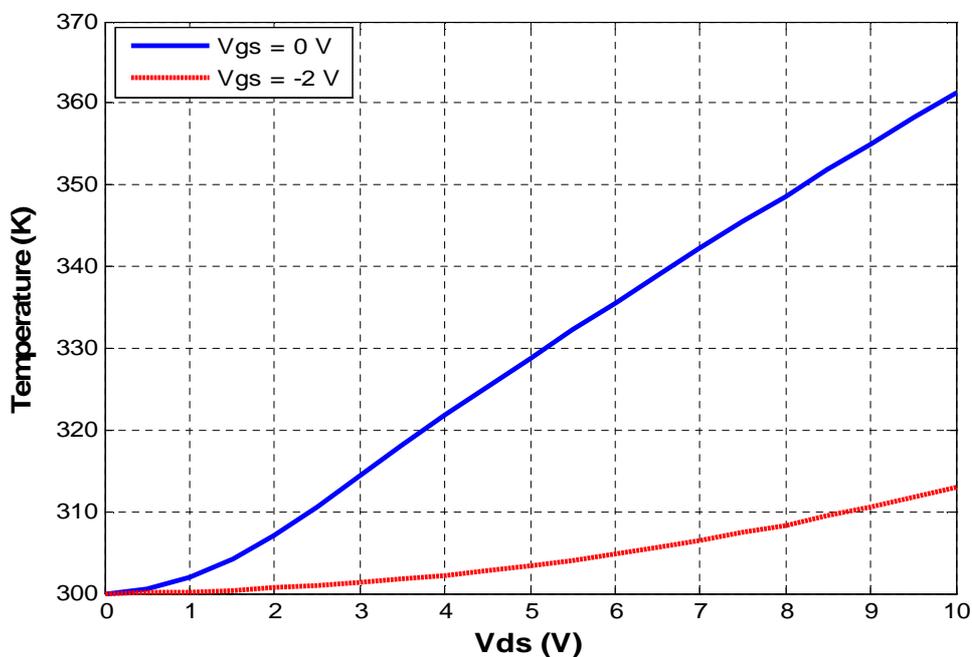


Figure III.17 : Evolution de la température du réseau dans le composant pour $V_{gs} = 0$ et -2 V.

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 AlGaN/GaN sur substrat 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} .

Le modèle 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

Ce paragraphe vient parachever ce projet de fin d'études. Dans ce travail on a contribué à l'étude d'une structure HEMT AlGa_N/Ga_N/4H-SiC en trois aspects différents :

Le premier concerne une description générale sur les principales propriétés des matériaux III-N et les différents transistors à effet de champ les plus utilisés actuellement dans des conceptions hyperfréquences. Nous avons présenté les MESFETs et leurs dérivés les HEMTs, et une présentation de structure conventionnelle du transistor HEMT à base de GaAs, ainsi les propriétés physiques et thermiques des matériaux III-N. Cette étape préliminaire nous a préparé à la conception sous logiciel du composant étant donné tous les paramètres que proposait le module ATLAS.

C'est de ce fait là qu'on a entamé le deuxième aspect de notre étude et qui concerne les caractéristiques physiques et thermiques des HEMTs AlGa_N/Ga_N, les propriétés intrinsèques de ce matériau et leur impact sur les hétérostructures. En effet, les dispositifs à base de nitrure de gallium présentent de bonnes performances dans les applications de haute puissance et haute température. Ceci est principalement dû au large gap direct du GaN qui est de 3.4 eV, sa grande conductivité thermique (1.3 W/cmK) et son champ de claquage élevé (5×10^6 V/cm). De plus l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique existant toutes les deux au sein du GaN s'ajoute à ses qualités. La polarisation spontanée est une polarisation permanente dont la valeur est -0.029 tandis que la polarisation piézoélectrique est variable selon le type de contrainte appliquée sur sa maille. L'effet de la combinaison des deux est très notoire d'autant plus qu'elles contribuent à l'amélioration et à la diversion des domaines d'applications des HEMTs AlGa_N/Ga_N.

Ensuite et après un aperçu des principes fondamentaux des HEMTs AlGa_N/Ga_N, le troisième aspect traite la présentation de l'outil de simulation. Les différents modèles de transport (dérive-diffusion, transfert thermique) ont été décrits. A partir de ces considérations, des hypothèses sont posées afin de pouvoir réaliser des simulations physiques et thermiques précises. Ainsi, la structure simulée est réalisée en 2D. Le choix du modèle dérive-diffusion répond au meilleur compromis rapidité de calcul, précision des simulations et problèmes de convergence.

Conclusion générale

Donc, nous avons proposé un modèle numérique physico-thermique du transistor AlGaIn/GaN en utilisant comme outil de simulation le module ATLAS du simulateur SILVACO. La modélisation a été effectuée en prenant en compte la dépendance avec la température des paramètres du transistor comme par exemple la mobilité des électrons, la vitesse de saturation ou encore la conductivité thermique. 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 du transistor HEMT, en particulier la distribution de différentes grandeurs électriques et thermiques en fonction de la température. En effet, nous avons déterminé l'impact des paramètres géométriques tels que la longueur de la grille, l'épaisseur de la couche barrière et du substrat sur la distribution de la température de réseau. Les conditions de polarisations de grille 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 ont été discutées.

Les perspectives qui se dégagent de ce projet de fin d'études peuvent être:

- L'étude des topologies plus complexes à partir du modèle proposé pour le HEMT. Dans ce contexte, 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.
- La validation des résultats de simulations en régime statique et dynamique du transistor HEMT AlGaIn/GaN à canal composite, par des mesures.

A-1 Introduction

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est une société Américaine, « Silvaco International » ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design).

Comme on peut le voir en figure C.1, Silvaco contient de nombreux modules tels qu'Athéna et Devedit. Les structures des composants que l'on souhaite simuler peuvent être créées à partir de Devedit qui est une interface graphique permettant de dimensionner, à la main, chacune des couches physiques constituant le transistor, ou directement à partir de lignes de codes sous Atlas [15, 33].

A-2 Types d'informations qui circulent en entrée et en sortie d'Atlas

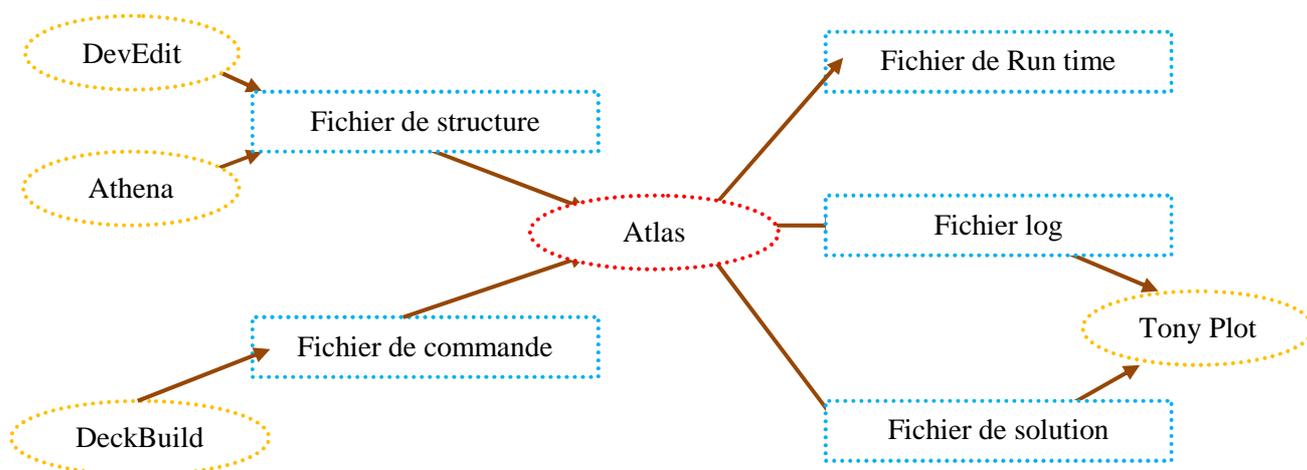


Figure A.1 : Entrées et sorties d'Atlas.

La figure .1 montre les entrées et les sorties d'Atlas. La plupart des simulations réalisées par Atlas utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier est représenté par « *Fichier de commande* », c'est un fichier script contenant les commandes pour qu'Atlas s'exécute. Le second fichier est un « *Fichier de structure* » qui définit la structure à simuler.

A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichier. Le premier de ces fichiers est la sortie « *Run time* » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le « *fichier log* » qui stocke toutes les paramètres physiques calculés (tensions et courants de polarisation en statique ou paramètres S et gains HF en radiofréquences par exemple) provenant de l'analyse du dispositif simulé. Le troisième fichier de sortie est le « *fichier de solution* », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « *Tony Plot* » ou « *Tony Plot3D* ».

A-3 Commandes dans script du programme ATLAS

Après avoir lancé Atlas, le code de description de la structure et des instructions de simulations va être exécuté par le simulateur Atlas. Les différentes parties du code doivent être présentées dans un ordre précis. Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation d'Atlas. Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (voir figure C.2). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

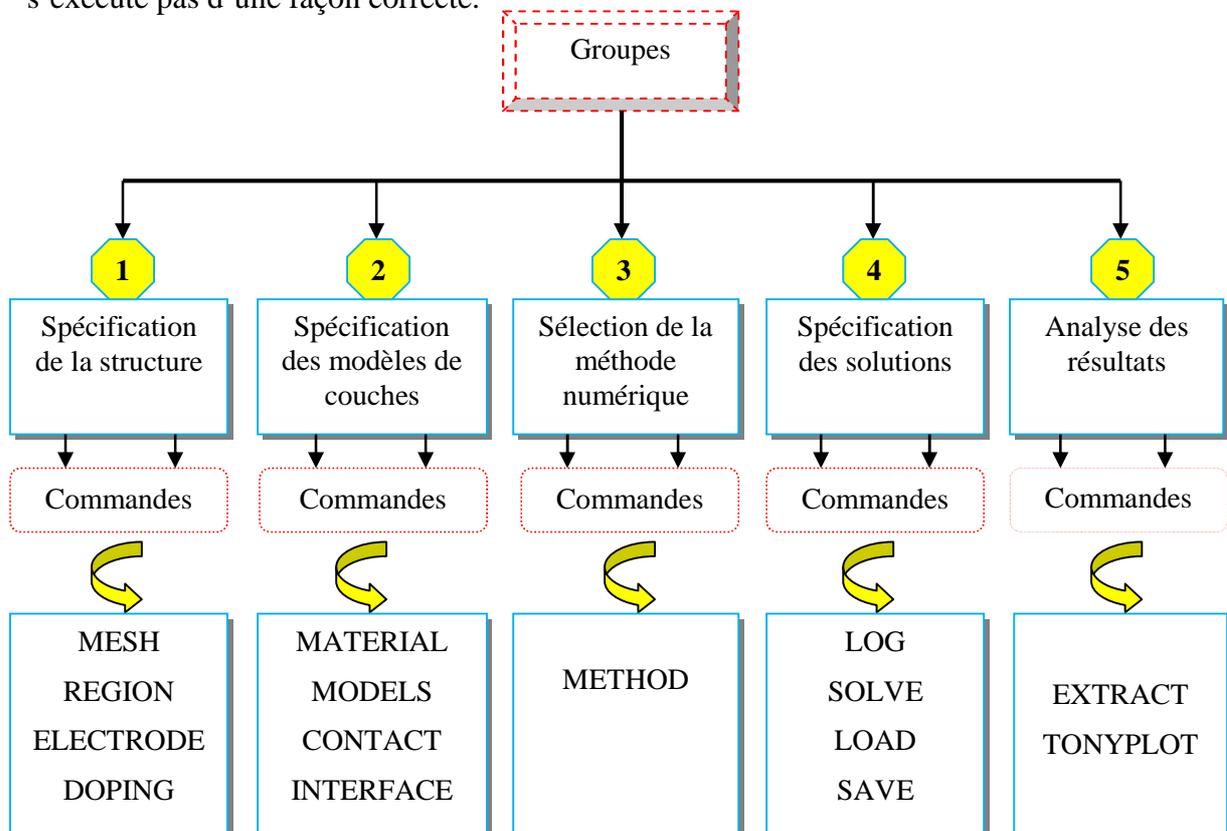


Figure A.2 : Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas.

A-3-1 Spécification de la structure

Il s'agit de définir la structure des couches la plus réaliste. La construction de la structure consiste en quatre étapes : définition du maillage, définition des régions, définition des électrodes et définition des dopages.

MESH (définition du maillage) : Le maillage divise la structure simulée en petites cellules pour pouvoir résoudre les équations fondamentales numériquement. L'élément de maille utilisé est le triangle. L'ensemble des mailles ainsi constitué forme une gigantesque matrice de points. C'est d'ailleurs à ces points de maillage que seront calculées les tensions de polarisation et les densités de courants associées à la structure. Pour assurer une bonne précision lors de la simulation, il faut avoir le maillage le plus fin possible. Par contre si le maillage est très fin, le temps de calcul est très élevé, car il y a plus d'éléments à calculer. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre le temps et la précision de calcul.

REGION (définition des régions) : Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions. Dans cette partie nous définissons des régions rectangulaires, par exemple la région n°1 est définie comme un matériau de type InAlAs et la région n° 2 comme l'InGaAs, etc. Ainsi que les différentes dimensions sont définies par défaut en micromètre.

ELECTRODE (définition des électrodes) : La définition des électrodes permet de réaliser les contacts ohmiques de source et de drain ainsi que le contact Schottky de grille.

DOPING (définition des dopages) : Le dernier aspect de la construction de la structure est le dopage. Le dopage peut être de type n ou p, aussi la distribution peut être uniforme, gaussien, etc...

A-3-2 Spécification des modèles physiques

Après la construction de la structure, il est nécessaire de préciser les modèles physiques et de définir les matériaux. La spécification de modèles et matériaux comporte quatre étapes:

MATERIAL : associe des paramètres physiques et thermiques aux matériaux dans la maille. Le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard comme le silicium ou encore l'arséniure de gallium par exemple.

MODELS : Ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques et thermiques (recombinaison, mobilité, source de chaleur, etc...). Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

CONTACT : indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie, résistance...).

INTERFACE : indique les paramètres d'interface aux frontières des semi-conducteurs ou des isolants. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.

THERMCONTACT : spécifie la position et les propriétés du contact thermique. Cette déclaration doit être indiquée lorsque l'équation de conduction de la chaleur est spécifiée dans l'instruction MODEL en utilisant le module GIGA ou GIGA3D.

Par exemple :

```
THERMCONTACT num=1 elec.num=4 ext.temp=300
```

A-3-3 Sélection de la méthode numérique

METHOD : Dans ATLAS, il existe essentiellement deux méthodes numériques pour la résolution des équations : les méthodes dites de Newton et de Gummel. La méthode de Newton correspond à la résolution itérative d'un système regroupant les trois équations différentielles régissant le fonctionnement de la structure. La méthode de Gummel consiste à découpler en trois sous-systèmes le système global décrit précédemment : les trois équations sont résolues itérativement les unes après les autres jusqu'à atteindre la convergence globale des solutions. L'intérêt potentiel de cet algorithme par rapport à celui de Newton réside dans la réduction des dimensions des systèmes matriciels à résoudre, ce qui permet a priori de diminuer le temps de calcul.

Dans notre simulation, on a choisi d'utiliser la méthode de *NEWTON*, celle-ci est en effet la méthode la plus adaptée pour les simulations de caractéristiques DC (remarque : l'algorithme de Newton est utilisé par défaut, il n'est pas obligatoire de le déclarer). Toutefois cet algorithme nécessite des conditions initiales pour qu'il puisse donner des solutions. Pour cela on utilise l'instruction *SOLVE INIT* que l'on place directement avant l'instruction *METHOD*.

A-3-4 Spécification des solutions

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations : *LOG*, *SOLVE*, *LOAD*, et *SAVE*.

LOG : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log). Notons que log en minuscule veut dire le type de fichier et LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme. Cela se traduit par la syntaxe suivante :

```
LOG OUTFILE=nom_du_fichier.log
```

Les informations sauvées sont de type électrique et thermique. Aussi n'importe quel paramètre spécifié par la commande *PROBRE1* est stocké dans le fichier de type log. Si dans le programme, il y a plusieurs commandes *LOG*, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.

SOLVE : La déclaration *SOLVE* fait suite à la déclaration *LOG*. *SOLVE* effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

Par exemple :

```
SOLVE vdrain=0 vstep=0,05 name=drain vfinal=12
```

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

SAVE : sauvegarder toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis, dont la syntaxe est précisée ci-dessous :

save outf=nom_du_fichier.str (sauvegarde de la structure et de tout le calibrage)

tonyplot nom_du_fichier.str (lancement de la fenêtre graphique qui permet de visualiser la structure et d'évaluer les propriétés physiques du composant).

A-3-5 Analyse des résultats

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semi-conducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement.

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

TONYPLOT : démarre le programme « Tony Plot » permettant une représentation graphique des données. On lance la fenêtre graphique grâce à l'instruction **TONYPLOT** suivant la syntaxe :

TONYPLOT nom_du_fichier.log

Une autre commande importante est **BEAM**, sa position est au niveau 4 des groupes de commande. **BEAM** indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière (mono ou multi-spectrale). Le faisceau ainsi déclaré est allumé et utilisé par la commande **SOLVE**, dans ce cas le module luminous2 est activé. Donc **BEAM** est utilisé pour simuler des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

Références Bibliographiques

- [1] **G. Popovici**, “Deposition and Properties of Group III Nitride by Molecular Beam Epitaxy in Group III Semiconductors Compound: Physics and Applications”, Edited by B. Gil, Oxford, Clarendon Press, pp.19-69, 1998.
- [2] **Rongming Chu**, “AlGaN/GaN single and double channel high electron mobility transistors”, thesis MSC Hong Kong university of Science and technology, 2004.
- [3] **A. M. MALIK**, “Technology and Physics of Gate Recessed GaN/AlGaN FETs”, Thèse de doctorat, université de Stuttgart, 2003.
- [4] **Henry MATHIEU**, “Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques”, Édition MASSON, 2004.
- [5] **Audrey PHILIPPON-MARTIN**, “Étude d’une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [6] **M. D. Janezic**, “Dielectric Measurement Methods at Millimeter-Wave Frequencies”, Communication of Electromagnetic Division, National Institute of Standards and Technology.
- [7] **W. T. Masselink**, “Electron velocity in GaAs: bulk and selectively doped heterostructures”, *Semicond. Sci. Technol.*, pp. 503-512, 1989.
- [8] **M. Asif Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai, D. T. Olson**, “Metal Semiconductor Field Effect Transistor Based on Single Crystal GaN”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 62, pp. 1786-1787, 1993.
- [9] **O. Ambacher, B. Foutz, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A. J. Sierakowski, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, A. Mitchell, M. Stutzmann**, “Two Dimensional Electron Gases Induced by Spontaneous and Piezoelectric Polarization in Undoped and Doped AlGaIn/GaN Heterostructures”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 1, pp. 334-344, 2000.
- [10] **F. Sacconi, A. Di Carlo, P. Lugli, H. Morkoç**, “Spontaneous and Piezoelectric Polarization Effects on the Output Characteristics of AlGaIn/GaN Heterojunction Modulation Doped FETs”, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 48, No. 3, pp. 450-457, 2001.

- [11] **Xiao TANG**, “Optimisation théorique et expérimentale de composants hyperfréquences de la filière nitrure de gallium à partir d’études physico-thermiques et électriques”, Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2010.
- [12] **Mohamed Amir ABDI**, “Modélisation de l’inverse de la pente sous seuil des transistors FETs nanométriques”, Mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [13] **C. A. Mead**, “Schottky barrier gate field effect transistor”, Proceedings of the IEEE 54 (2), pp. 307–308, Feb 1966.
- [14] **W. Aliouat**, “Étude des propriétés des transistors à effet de champs à grille Schottky à l’Arséniure de Gallium”, Thèse de Magistère, université de Constantine, 2006.
- [15] **Sandra DE MEYER** “Étude d’une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium. Conception d’une architecture flip-chip d’amplificateur distribué de puissance à très large bande ”, Thèse de doctorat, Université De Limoges, 2005.
- [16] **R. CASTAGNE, J. P.DUCHEMIN, M. GLOANEC, C. RUMELHARD**, “Circuits intégrés en arséniure de gallium”, Ed. Masson, Paris, 1989.
- [17] **MOUETSI Souheil**, “contribution a l’étude du bruit basse fréquence dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs/AlGaAs”, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.
- [18] **T.Gasseling**, “Caractérisation non linéaire avancée de transistors de puissance pour la validation de leur modèle CAO”, Thèse doctorat, Université de Limoges, 2003.
- [19] **O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, J. Hilsenbeck**, “Two- Dimensional Electron Gases induced by Spontaneous and Piezoelectric Polarization Charges in N- and Ga-Face AlGaN/GaN Heterostructures”, J. Appl. Phys. Vol. 85, No. 6, pp. 3222-3233, 1999.
- [20] **Site web**: www.itrs.net/reports, 2012.
- [21] **Nicolas VELLAS**, “Etudes expérimentales de transistors HFET de la filière Nitrure de Gallium pour des applications de puissance hyperfréquences”, Thèse de Doctorat, Université des sciences et technologies Lille, 2003.

- [22] **F. BERNARDINI et Al**, “Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides”, Physical review B, Vol.56, No. 16, pp. 10024-10027, 1997.
- [23] **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.
- [24] **Hilde Muller et Jan Nicolas Myklebust**, “Les composants actifs hyperfréquences”,
Site web: www.etud.insa-toulouse.fr/~sroy/cce/Transistors_HF.doc
- [25] **Eric Pop, SanjivSinha, and Kenneth E. Goodson**, “Heat Generation and Transport in Nanometer-Scale Transistors”, Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 8, August 2006.
- [26] **Eric. Pop**, “Energy Dissipation and Transport in Nanoscale Devices”, Nano Research 3, pp. 147-169, 2010.
- [27] **J. M. Tirado, J. L. Sanchez-Rojas, and J. I. Izpura**, “2D simulation of static surface states in AlGa_N/Ga_N HEMT and Ga_N MESFET”, Semiconductor Science and Technology, (20), pp. 864-869, 2005.
- [28] **ATLAS user’s manual**, SILVACO international, 2010.
- [29] **Crosslight Software Inc**, “Advanced Issues in HEMT Simulation”,
Site web: http://www.crosslight.com/applications/crosslight_hemt2.pdf
- [30] Site web: <http://www.crosslight.com/>, 2011.
- [31] **C. Canali, G. Majni, R. Minder, G. Ottaviani**, “Electron and hole drift velocity measurements in Silicon and their empirical relation to electric field and temperature”, IEEE Transactions on Electron device, Vol. 22, No 7, 1975.
- [32] **O. Turin et al.**, “A modified transferred-electron high-field mobility model for Ga_N devices simulation”, Solid-State Electronics. Vol. 49, pp. 1678-1682, 2005.
- [33] **M. Gassoumi**, “Étude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et Ga_N”, Thèse de Doctorale, INSA-Lyon, juin 2006.