

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER en

Composants et Systèmes Electroniques pour les Télécommunications

Réalisé par

HADDOUCHE Hichem

HADDOU Mohamed Amine

THEME

**Modélisation du transistor HEMT en technologie GaN
sur substrat 4H-SiC**

Soutenu en 02 juillet 2012 devant le Jury :

Mr. MERZOUGUI Rachid

Maitre de conférence à l'Université de Tlemcen

Président

Mr. Moussaoui Djilali

Maitre Assistant à l'Université de Tlemcen

Examineur

Melle. BENMOSTEFA Naima

Maitre Assistante à l'Université de Tlemcen

Examineur

Melle. DJELTI Hamida

Maitre Assistante à l'Université de Tlemcen

Encadreur

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM
FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET ELECTRONIQUE



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de
MASTER en

Composants et Systèmes Electroniques pour les Télécommunications

Réalisé par

HADDOUCHE Hichem

HADDOU Mohamed Amine

THEME

**Modélisation du transistor HEMT en technologie GaN
sur substrat 4H-SiC**

Soutenu en 02 juillet 2012 devant le Jury :

Mr. MERZOUGUI Rachid

Mr. Moussaoui Djilali

Melle. BENMOSTEFA Naima

Melle. DJELTI Hamida

Maitre de conférence à l'Université de Tlemcen

Maitre Assistant à l'Université de Tlemcen

Maitre Assistante à l'Université de Tlemcen

Maitre Assistante à l'Université de Tlemcen

Président

Examineur

Examineur

Encadreur

Dédicace



*Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs Années d'étude
A la mémoire de mon père qui a souhaité vivre pour longtemps juste pour nous voir
Qu'est-ce que nous allons devenir.
A celle qui m'a transmis la vie, l'amour, le courage, à toi chère maman toutes
mes joies, mon amour et ma reconnaissance.
A mes chères sœurs et frères.
A mes chères amis : Kheireddine, Amine, Kader, Lakhdar, Mohammed, Abdelmalek,
Wahid, Samira, Leila et Asma.
A tous ceux que j'aime
A moi-même.*

Hichem



*A mes parents pour leurs sacrifices,
A tous ceux qui m'aiment, mes amis et mes proches,
A mes frères et ma sœur pour leurs patiences,
A mes professeurs et à mon encadreur pour son immense aide,
Je dédie ce modeste travail.*

Amine



Remerciements

Nous tenons à remercier tout
d'abord, **Allah** qui nous a donné la force et
le courage pour terminer nos études et à élaborer ce
modeste travail.

Nous remercions chaleureusement notre encadreur
Melle **H. DJELTI**, Maitre Assistante au département de Télécommunications
de la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen
pour ses conseils lumineux et ses encouragements tout on long de notre travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudees à tous les membres de jury pour
l'attention qu'ils ont porté à ce travail.

Merci à Monsieur **R. MERZOUGUI**, Maitre de conférence au département de
Télécommunications de la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen d'avoir présidé
le jury.

Merci à Monsieur **D. MOUSSAOUI** Maitre Assistant au département de Télécommunications
de la faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen et à Melle **N. BENMOSTEFA** Maitre
Assistante au département de Télécommunications de la faculté de Technologie
de l'Université de Tlemcen d'avoir examiner ce travail.

Et nous ne saurons finir sans lancer un grand merci à tous nos amis, aux
étudiants de la promotion CoSET et à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loi.

Merci à tous encore.



Hichem & Amine

ملخص

ان تطوير نظم الاتصالات السلكية و اللاسلكية يحفز على تطوير نظم النقل التي تسمح و بمعدل مرتفع من تمرير البيانات عبر مسافات طويلة. و بالتالي يجب على الترانزستورات المستخدمة في هذه الأنظمة أن تعمل على ترددات و استطاعات عالية. الترانزستور HEMT (ترانزستور ذات البنية الالكترونية العالية) من GaN نيتريد الجاليوم يسمح بتوفير استطاعات عالية (يتم ذلك بفضل الكثافات العالية للتيارات و التوترات و الاستقطاب المرتفع), و ترددات العمل هامة. الهدف من مشروع التخرج هو فهم و محاكاة بطريقة العناصر محددة للسلوك الثابت ل HEMT من GaN على الركيزة 4H-SiC. قمنا بتقديم دراسة مفصلة عن عمل الترانزستور HEMT من GaN من أجل محاكاة الخصائص الثابتة للبنية المتغيرة AlGaIn/GaN. لقد قمنا بفحص تأثير بعض العوامل التكنولوجية التي تؤثر الأداء الجيد للترانزستور مثل طول البوابة, سمك الجدار و القناة و المسافة بين البوابة و المصرف. كما قمنا أيضا برؤية تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية للترانزستور. نفذ هذا العمل بمساعدة برنامج المحاكاة « Atlas » من مؤسسة SILVACO.

الكلمات المفتاحية : ATLAS/SILVACO, AlGaIn/GaN, الوصلة المتغيرة, الترانزستور HEMT.

Résumé

Le développement des systèmes de télécommunications motive la mise au point des systèmes de transmissions qui permettent des débits plus élevés sur des grandes distance. De ce fait les transistors utilisés dans ces systèmes doivent fonctionner à des fréquences et des puissances plus élevées. Le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) en nitrure de gallium (GaN) permet d'obtenir des puissances élevées (obtenues grâce aux grandes densités de courant et aux tensions de polarisation élevées), et des fréquences de travail importantes.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de concevoir et de simuler par la méthode des éléments finis le comportement statique du HEMT en GaN sur substrat 4H-SiC. Nous avons présenté une étude détaillée sur le fonctionnement du transistor HEMT en GaN afin de simuler les caractéristiques statiques de l'hétérostructure AlGaIn/GaN. Nous avons examiné 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 canal ainsi que la distance grille/drain. L'effet de la température sur les caractéristiques électriques du transistor a été aussi traité. Ce travail a été réalisé à l'aide du logiciel « Atlas » de la société SILVACO.

Mots Clés : AlGaIn/GaN, ATLAS/SILVACO, Hétérojonction, Transistor HEMT.

Abstract

The development of the systems of telecommunications justifies the development of the systems of transmissions which allow flows higher on the large ones outdistances. Of this fact the transistors used in these systems must function at higher frequencies and powers. Transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) out of gallium nitride (GaN) makes it possible to obtain high powers (obtained thanks to the great densities of current and with the high biasings), and of the important work frequencies.

The objective of this project of end of studies is to conceive and simulate by the finite element method the static behavior of the HEMT in GaN on substrate 4H-SiC. We presented a study detailed on the operation of transistor HEMT in GaN in order to simulate the static characteristics of the AlGaN/GaN heterostructure. We examined the influence of certain technological parameters which impact the performances of the transistor such as the length of the grid, the thickness of the barrier and the channel as well as the distance roasts/drain. The effect of the temperature on the electric characteristics of the transistor was also treated. This work was completed using the software "Atlas" of company SILVACO.

Key words: AlGaN/GaN, ATLAS/SILVACO, Heterojunction, Transistor HEMT.

Table des matières

.....	4
Résumé	4
Abstract	5
Table des matières	7
Liste des figures	10
Liste des tableaux	13
Liste des symboles et abréviations	14
Introduction générale.....	18

Chapitre I : Propriétés des semiconducteurs III-N et évolution du transistor HEMT vers une structure à base de Nitrure de gallium

I.1	Introduction	21
I.2	Les transistors à effet de champs.....	21
I.2.1	Généralités	21
I.2.2	Le JFET	22
I.2.3	Le MOSFET	22
I.2.4	Le MESFET.....	23
I.2.5	Le HEMT.....	24
I.3	Historique du transistor HEMT	24
I.4	Présentation du transistor HEMT classique sur GaAs	25
I.5	Principe de l'hétérojonction	25
I.6	Principe de fonctionnement du transistor HEMT classique.....	28
I.6.1	Les différentes couches d'un transistor HEMT AlGaAs /GaAs classique	28
I.6.2	Origine de fonctionnement d'un transistor HEMT AlGaAs /GaAs	31
I.6.3	Avantages et inconvénients de la technologie à base de GaAs appliquée à la fabrication du transistor HEMT	32
I.7	Evolution de HEMT vers une structure à base de GaN	33
I.8	Principales propriétés des matériaux III-N.....	34
I.8.1	Structure cristalline	34
I.8.2	Structure de bande	35
I.8.3	Effets de polarisation dans le cristal	37
I.8.3.1	Polarisation spontanée.....	37
I.8.3.2	Polarisation piézoélectrique	40

I.9	Etat de l'art du transistor HEMT en GaN d'après l'ITRS.....	41
I.10	Conclusion.....	43

Chapitre II : Etude du HEMT à base de GaN

II.1	Introduction	45
II.2	Présentation du HEMT en GaN et principe de fonctionnement.....	45
II.2.1	Définition de la structure par couche du transistor HEMT GaN	45
II.2.3	Polarisation dans les HEMT AlGa _N /Ga _N	48
II.2.3.1	Polarisation piézoélectrique :	48
II.2.3.2	Polarisation spontanée	50
II.3	Détermination de la quantité de charge a l'interface AlGa _N /Ga _N	51
II.4	Détermination de la quantité de charge a l'interface AlGa _N /Ga _N en GaN contraint en tension.....	53
II.5	Contacts Ohmiques	55
II.5.1	Principe de formation du contact ohmique	55
II.5.2	Procédé de fabrication du contact ohmique	57
II.6	Contact Schottky	57
II.6.1	Propriétés physiques du contact Schottky.....	57
II.6.1.1	Diagramme énergétique d'un contact métal/semi-conducteur.....	57
II.6.1.2	Description du mécanisme de conduction au travers d'un contact Schottky.....	61
II.7	Modélisation physico-électrique du HEMT Ga _N	64
II.7.1	Les équations différentielles de base	64
II.7.2	Configuration de la mobilité des porteurs.....	65
II.8	Conclusion.....	66

Chapitre III : Résultats et interprétations

III.1	Introduction	68
III.2	Description du logiciel SILVACO	68
III.3	Description de la structure à calibrer dans le but de la simuler.....	70
III.3.1	Maillage	71
III.3.2	Diagramme de bandes d'énergie.....	72
III.4	Résultats et interprétations	73
III.4.1	Paramétrage DC	73

III.4.1.1	Caractéristiques de sortie Ids-Vds	73
III.4.1.2	Caractéristiques de transfert Ids-Vgs.....	75
III.4.2	Effet des paramètres géométriques sur les caractéristiques du HEMT en GaN	76
III.4.2.1	Effet de la longueur de la grille	76
III.4.2.2	Effet de la distance grille drain.....	77
III.4.2.3	Effet de l'épaisseur de la couche barrière.....	78
III.4.2.4	Effet de l'épaisseur du canal.....	79
III.4.2.5	Effet de la température sur les caractéristiques de sorties	79
III.4.2.6	Effet de la température sur les caractéristiques de transfert	81
III.4.3	Effet du substrat sur les caractéristiques de sorties.....	82
III.4.4	Distribution des grandeurs électriques dans le HEMT AlGa _N /Ga _N /4H-SiC.....	83
III.4.4.1	Carte du potentiel.....	83
III.4.4.2	Carte de concentration en électron	85
III.5	Conclusion.....	87
	Conclusion générale	89
	Bibliographie	92
	Annexe	96

Liste des figures

Figure I.1: Transistor JFET à canal N et symboles des deux types de JFET	22
Figure I.2: Structure du MOS à Enrichissement canal N.....	23
Figure I.3: Structure du MOS à appauvrissement canal N.....	23
Figure I.4: Vue en coupe du MESFET GaAs implanté auto-aligné.....	24
Figure I.5: Diagramme de bandes d'une hétérojonction Al _x Ga _{1-x} As/GaAs : (a) avant contact et (b) après contact	26
Figure I.6: Schéma de principe du HEMT classique AlGaAs/GaAs	29
Figure I.7: Influence de la polarisation de grille sur le diagramme des bandes de l'hétérojonction..	31
Figure I.8: comparaison des performances puissances fréquences pour différentes filières	33
Figure I.9: Représentation du réseau cristallin du GaN dans sa structure hexagonale de type wurtzite	34
Figure I.10: (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	35
Figure I.11: Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN	37
Figure I.12: (a) Structure GaN wurtzite et (b) Polarisation spontanée dans une structure GaN wurtzite.....	38
Figure I.13: Charges en surface d'une couche GaN wurtzite.structure GaN wurtzite.....	39
Figure I.14: Sens de la polarisation piézoélectrique dans le GaN pour deux contraintes données : (a) en tension et (b) en compression.....	41
Figure II.1: structure d'un transistor HEMT Al _x Ga _{1-x} N/GaN.....	46
Figure II.2: Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique.....	47
Figure II.3: Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui	48
Figure II.4: Répartition des charges et des polarisations piézoélectrique et spontanée à travers la structure HEMT AlGa _x N/GaN, création du 2DEG dans le cas idéal	51
Figure II.5: Evolution des polarisations piézoélectrique et spontanée et de la densité de charges à l'interface AlGa _x N/GaN en fonction de la fraction molaire x.....	52
Figure II.6: Visualisation des différentes sortes de polarisations qui agissent au sein de chacune des couches et de la répartition des charges aux interfaces.....	53
Figure II.7: Diagramme énergétique de l'ensemble de la structure du composant.....	54
Figure II.8: Résistance de contact pour différents types de contacts ohmique	56

Figure II.9: Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ (sans état d'interface)	57
Figure II.10: Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/air/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ (sans contact et avec états d'interface).....	58
Figure II.11: Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ et $q_m > q_x + q_{Bn}$	59
Figure II.12: Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ et $q_m < q_x + q_{Bn}$	60
Figure II.13: Représentation simplifiée des mécanismes de conduction intervenant dans un redresseur sous polarisation électrique : (a) direct et (b) inverse	61
Figure II.14: Évolution de la vitesse des électrons selon l'amplitude du champ électrique	66
Figure III.1: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par SILVACO	69
Figure III.2: Topologie de la structure HEMT Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN simulée	70
Figure III.3: Structure du transistor HEMT AlGa _N /Ga _N simulée sous SILVACO/ATLAS (a) Sans maillage (b) Avec maillage	72
Figure III.4: Diagramme de bandes d'énergie du HEMT AlGa _N /Ga _N	73
Figure III.5: Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} variant de 0 à -4V avec un pas de 1V sous SILVACO/ATLAS	74
Figure III.6: Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} variant de 0 à -4V avec un pas de 1V associé à la référence [31]	74
Figure III.7: Caractéristique de transfert I_{ds} - V_{gs} d'un HEMT Al _{0.3} Ga _{0.7} N /Ga _N	75
Figure III.8: Caractéristique de transfert I_{ds} - V_{gs} avec les grandeurs G_m et V_{TH} pour $V_{ds} = 1, 4$ et 8 V.	76
Figure III.9: Influence de la longueur de grille sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois longueurs de grille différentes ($L_g = 0.5, 0.6$ et $0.7\mu m$).....	77
Figure III.10: Influence de la distance grille-drain sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois distances différentes ($L_{gd} = 1.2, 1.4$ et $1.6\mu m$).....	78
Figure III.11: Influence de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois épaisseurs différentes de la couche barrière ($0.026, 0.027$ et $0.028\mu m$).	78
Figure III.12: Influence de l'épaisseur du canal sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois épaisseurs différentes du canal ($0.4, 0.6$ et $0.8\mu m$).	79
Figure III.13: Influence de la température sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour.....	80

Figure III.14: Influence de la température sur les caractéristiques de transfert I_{ds} - V_{gs} pour $V_{ds} = 8$ V (T varie de 300 à 550 K avec un pas de 50 K).	81
Figure III.15: Influence du substrat (4H-SiC, Sapphire et Silicium) sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V.....	82
Figure III.16: Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = 0$ V. (a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.....	83
Figure III.17: Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = -4$ V. (a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.....	84
Figure III.18: Carte 2D de la concentration en électron de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = 0$ V : (a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.....	85
Figure III.19: Carte 2D de la concentration en électron de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = -4$ V : (a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.	86
Figure 1: Entrées et sorties d'Atlas	96
Figure 2: Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas	97
Figure 3: Organigramme du programme de simulation.	100

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Paramètres caractéristiques de GaAs et $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	27
Tableau I.2 : Récapitulatif de quelques propriétés physiques importantes de différents	36
Tableau I.3 : Valeurs de la polarisation spontanée dans le GaN, l'AlN et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	39
Tableau I.4 : Coefficients piézoélectriques et élastiques d'AlN, de GaN et d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	40
Tableau I.5 : État de l'art des transistors HEMTs sur nitrure de gallium III-N.....	42
Tableau III.1: propriétés (à 300K) des principaux matériaux utilisés dans la simulation.....	71
Tableau III.2: Evolution de la tension de seuil en fonction de la température dans le HEMT en GaN	81

Liste des symboles et abréviations

2DEG	Gaz bidimensionnel d'électrons
a	Paramètre de maille du réseau
Al	Aluminium
AlGaAs	Alliage arséniure aluminium gallium
AlGaN	Alliage nitrure gallium aluminium
AlN	Nitrure d'aluminium
Au	Or
A^*	Constante de Richardson
c_{31} et c_{33}	Constantes d'élasticité
d	Distance grille-canal
\vec{D}	Vecteur de déplacement dans le semi-conducteur
D_{it}	Densité d'états d'interface
\vec{E}	Champ électrique
E_g	Energie de la bande interdite
E_p	Epaisseur
e_{31} et e_{33}	Composantes piézoélectriques et tensorielles des matériaux Piézoélectriques.
Ga	Gallium
GaAs	Arséniure de gallium
G_m	Transconductance
GaN	Nitrure de gallium
Gaz-2D	Gaz bidimensionnel d'électrons
h	Constante de Planck = $6,62 \times 10^{-34}$ J.s
HEMT	High Electron Mobility Transistor
I	Courant circulant à travers un contact redresseur
I_{ds}	Courant drain-source
I_{gr}	Courant de génération-recombinaison
InP	Phosphure d'Indium
I_{rp}	Courant de fuite
I_{te}	Courant dû à l'effet thermoïonique
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors

I_{tu}	Courant dû à l'effet tunnel
JFET	Junction Field Effect Transistor
k_B	Constante de Boltzmann = $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
L_g	Longueur de la grille
L_{gd}	Distance grille-drain
m_n^*	Masse effective des électrons dans le semi-conducteur
MBE	Épitaxie par jet moléculaire
MESFET	MEtal Semi-conductor Field Effect Transistor
Mo	Molybdène
MOC	Capacité Métal Oxyde semi-conducteur
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
MODFET	Modulation Doped Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor
N_D	Dopage du semi-conducteur
n_i	Densité de porteurs intrinsèque
Ni	Nickel
NIID	Non Intentionnellement Dopée
\vec{p}_i	Moments dipolaires
P_{PZ}	Polarisation piézoélectrique
P_{SP}	Polarisation spontanée
Pt	Platine
q	Charge élémentaire de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
qV_i	Potentiel de diffusion du contact Schottky
q	Affinité électronique du semi-conducteur
q_{Bn}	Hauteur de barrière
q_m	Travail de sortie de métal
q_{meq}	Travail de sortie de métal équivalent
q_{SC}	Travail de sortie de semi-conducteur
RF	Radio Fréquence
R_{Sdiode}	Résistance série de la diode due au contact ohmique
S	Surface du contact Schottky
SDHT	Selectively Doped Heterojunction Transistor
Si	Silicium

SiC	Carbure de silicium
SiGe	Silicon-germanium
SiO ₂	Dioxyde de silicium
TEC	Transistor à Effet de Champ
TEGFET	Two Electron Gas Field Effect Transistor
T	La température
Ta	Tantale
TCAD	Technology Computer Aided Design
Ti	Titane
V	Tension appliquée
V_{ds}	Tension drain-source
V_{gs}	Tension grille-source
V_{TH}	Tension de seuil
w-GaN	Nitride de gallium wurtzite
w_D	Largeur de la zone de déplétion
x	Fraction molaire
	Affinité électronique du semi-conducteur
E_c	Discontinuité de la bande de conduction
ΔE_F	Variation du niveau de Fermi
ΔE_V	Discontinuité de la bande de valence
$\nabla \vec{P}$	Gradient de polarisation
ϵ_0	Permittivité du vide
ϵ_i	Constante diélectrique de couche de passivation
ϵ_r	Permittivité relative du semiconducteur
ϵ_S	Constante diélectrique du semi-conducteur
δ	Dopages planaires
ρ	Densité de charges en volume
η	Coefficient d'idéalité
τ	Durée de vie des porteurs
ψ	Potentiel électrostatique
σ^+	Continuité
$ \sigma $	Quantité de charge

Introduction générale

Introduction générale

Depuis trois décennies, le champ des applications de la télécommunication à haute débits ne cesse de s'accroître, s'accompagnant d'une augmentation des fréquences de travail. Initialement, les applications hyperfréquence étaient destinées aux domaines spatial et militaire (radars, communication, guerre électronique, munitions intelligentes, ect..). Ces systèmes ont gagné désormais de nombreux marché civil, dont les plus répandus sont les communications sans fil (GSM, 3G, WiMax), l'électronique embarquée à destination de l'automobile (GPS, radars anti-collision, ect..) et l'aéronautique. Ces applications nécessitent souvent des composants discrets et de puissance pouvant fonctionner à des fréquences élevées. Il s'agit des composants hyperfréquences performants pour des systèmes d'émission réception.

Les potentialités des transistors à effet de champ à grande mobilité électronique HEMTs à base de l'hétérostructure AlGaN/GaN intéressent fortement la communauté scientifique internationale et sont certainement les plus étudiés actuellement au niveau mondial. Ils sont apparus comme candidats attractifs pour les applications à forte tension, puissance élevée aux fréquences micro-ondes. Grâce aux polarisations spontanées et piézoélectriques, ils ont la facilité de réaliser un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) à l'interface avec une concentration de l'ordre 10^{13}cm^{-2} sans dopage intentionnel.

Le cristal de nitrure de gallium GaN offre des qualités intrinsèques qui répondent aux exigences attendues. Ses propriétés cristallines confèrent aux transistors à effet de champ la robustesse et les performances nécessaires pour les applications à fortes puissances et à très hautes températures. Le nitrure de gallium GaN est un semi-conducteur III-V, montrant une grande largeur de bande interdite (3.39eV), ce qui distingue sa technologie de celles conventionnelles des matériaux à faible bande interdite, comme le silicium ou l'arséniure de gallium GaAs. Outre ses propriétés physiques et thermiques, le GaN présente la particularité d'être un matériau pyroélectrique et piézoélectrique. Cette spécificité a permis de réaliser des transistors HEMT de type AlGaN/GaN.

Pour étudier les propriétés et prévoir les performances du composant, il est nécessaire d'avoir un modèle physique de simulation permettant de décrire d'une part, le plus précisément possible les phénomènes physiques existant dans la structure et une meilleure compréhension du fonctionnement du composant. D'autre part, il doit permettre une étude sur l'influence de certains paramètres technologiques et des contraintes en surface afin d'améliorer les performances du composant et ceci à moindre coût.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre concerne une présentation de la structure classique du transistor HEMT à base de GaAs, son principe de fonctionnement et son évolution vers une structure en Nitrure de Galium. Tout d'abord, nous proposerons une description des différents transistors à effet de champ. Nous présenterons ici les JFETs, MOSFETs, MESFETs et leurs dérivés les HEMTs. Dans le large éventail des applications électroniques le silicium sont souvent utilisé, mais si on parle de la génération de puissance en haute fréquence les transistors HEMT sur substrat GaAs ou GaN sont incontournables. Le dernier point de ce chapitre discute les propriétés physiques des matériaux III-N et l'état de l'art du transistor HEMT en GaN d'après l'ITRS.

Le second chapitre va décrire brièvement les différentes couches constituant le transistor HEMT AlGaIn/GaN afin d'expliquer la physique liée à cette structure, puis le principe de fonctionnement du transistor HEMT utilisant la technologie GaN.

Le troisième chapitre soumettra les résultats de simulations physiques en statique de la structure à concevoir. Dans un premier temps, nous présentons un descriptif du logiciel de simulation « Atlas » de la société SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail. Nous définissons ensuite, la structure à simuler ainsi que les paramètres technologiques utilisés. Dans un second temps, nous étudions les différents paramètres géométriques influant sur les performances des HEMTs GaN. Parmi ces paramètres nous avons retenu la longueur de la grille, l'épaisseur du canal et de la couche barrière et la variation de température. Cela nous permettra de proposer des améliorations à la structure.

Chapitre I

***Propriétés des semiconducteurs III-N
Et évolution du transistor HEMT vers
Une structure à base de
Nitrure de gallium***

I.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter la structure conventionnelle du transistor HEMT à base de GaAs ainsi que son principe de fonctionnement et ses caractéristiques généraux. Tout d'abord, nous proposerons une description sur les différents transistors à effet de champ. Nous présenterons ici les JFETs, MOSFETs, MESFETs et leurs dérivés les HEMTs.

Dans le large éventail des applications électroniques le silicium sont souvent utilisé, mais si on parle de la génération de puissance en haute fréquence les transistors HEMT sur substrat GaAs ou GaN sont incontournables.

Le dernier point de ce chapitre est consacré aux propriétés physiques des matériaux III-N et l'état de l'art du transistor HEMT en GaN d'après l'ITRS.

I.2 Les transistors à effet de champs

I.2.1 Généralités

Le transistor à effet de champ dénommé FET ou TEC repose sur le fonctionnement d'un dispositif semi-conducteur unipolaire, c'est-à-dire qu'un seul type de porteur intervient.

Ainsi, pour une utilisation aux hautes fréquences, il est préférable que le type de porteur responsable de l'effet transistor soit celui présentant les meilleures propriétés de transport : mobilité, vitesse et coefficient de diffusion. Les électrons possèdent des propriétés plus intéressantes que les trous les FET sont essentiellement élaborés sur du matériau de type N. Leur principe peut être comparé à une résistance semi-conductrice dont la section est modulée par une jonction polarisée en inverse, principe décrit pour la première fois en 1952 par **W.Shockley** [1]. Sur ce principe, différentes structures de transistors à effet de champ correspondant à différents contacts de grille ont été élaborées [2] :

- grille à jonction PN pour le transistor JFET (**J**unction **F**ield **E**ffect **T**ransistor).
- grille métallique isolée pour le transistor MOSFET (**M**etal **O**xyde **S**emi-conductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor).
- grille métallique à barrière Schottky pour le transistor MESFET (**M**etal **S**emi-conductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor).

1.2.2 Le JFET : « LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A JONCTION » [3]

Le transistor JFET est un composant de structure plane. Il est constitué par une mince couche de matériau semiconducteur de type N (pour un JFET canal N), sur un substrat de type P. Une diffusion de type P^+ à la surface de la couche réalise l'électrode de la grille et constituant ainsi une jonction P^+N verticale (voir figure I-1).

Deux diffusions N^+ , aux extrémités du canal, permettent d'assurer les contacts ohmiques de source et de drain.

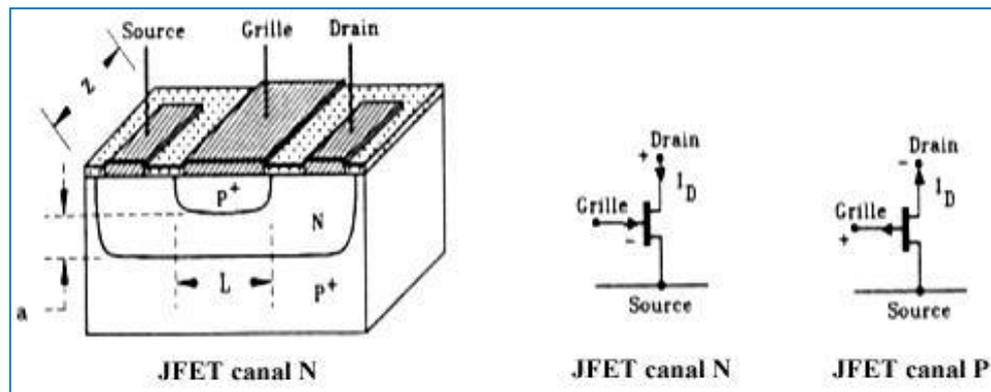


Figure I.1 : Transistor JFET à canal N et symboles des deux types de JFET

1.2.3 Le MOSFET : « TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A GRILLE ISOLEE » [4]

Comme tous les transistors ou même les tubes à vide, le MOSFET module le courant qui le traverse à l'aide d'un signal appliqué à son électrode d'entrée ou grille. La structure du transistor MOSFET comprend un isolant (silice SiO_2), deux îlots, de type opposé à celui du substrat, la source et le drain, délimitent la région active du dispositif qui se situe précisément sous l'électrode de grille. L'intensité du courant circulant entre la source et le drain est commandée par la tension entre la grille et le substrat. Très souvent les électrodes de source et de substrat sont électriquement reliées.

Les deux types fondamentaux du MOSFET sont les MOSFET à enrichissement **E-MOSFET** (figure I-2), et les MOSFET à appauvrissement **D-MOSFET** (figure I-3). Dans chaque type de MOSFET, on peut distinguer le MOSFET canal N (le courant provient du déplacement d'électrons) et le MOSFET canal P (le courant provient du déplacement des trous). Les transistors MOS à

enrichissement sont bloqués sans tension de commande sur la grille (NORMALLY OFF) ils deviennent passants à partir d'une certaine tension de grille V_{TH} .

Plus $|V_{GS}| > |V_{TH}|$, plus le E-MOS devient passant.

Les transistors MOS à appauvrissement sont passants sans tension de commande sur la grille (NORMALLY ON), ils deviennent de moins en moins conducteurs au fur et à mesure que la tension de commande augmente pour finalement se bloquer au delà d'une tension de blocage V_{GSoff} .

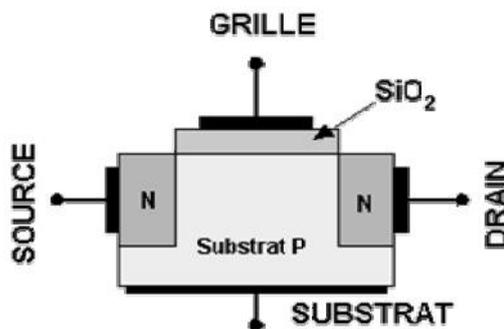


Figure I-2: Structure du MOS à Enrichissement canal N [4]

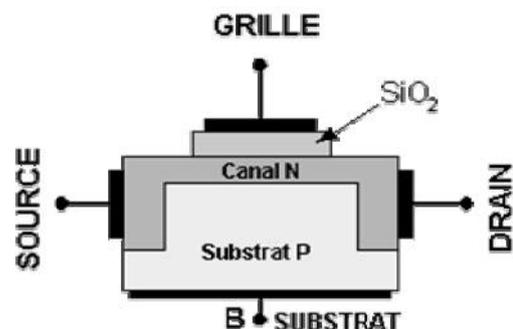


Figure I-3: Structure du MOS à appauvrissement canal N [4]

1.2.4 Le MESFET : «TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A CONTACT SCHOTTKY» [5]

Dans l'état de l'art aujourd'hui, 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-4 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.

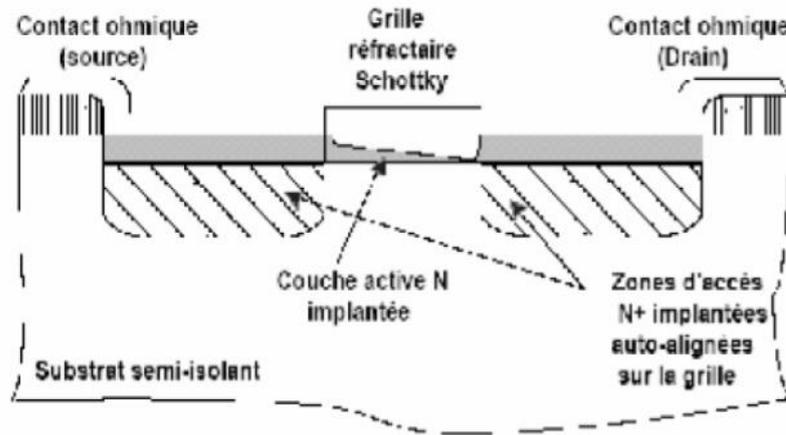


Figure I-4 : Vue en coupe du MESFET GaAs implanté auto-aligné

1.2.5 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.

1.3 Historique du transistor HEMT

Le transistor **HEMT** (**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor) encore appelé dans la littérature **TEGFET** (**T**wo **E**lectron **G**as **F**ield **E**ffect **T**ransistor) ou **MODFET** (**M**odulation **D**oped **F**ield **E**ffect **T**ransistor), ou encore **SDHT** (**S**electively **D**oped **H**eterojunction **T**ransistor), 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/semiconducteur) et a pris le pas sur ce dernier depuis le début des années 1990 [6].

Ce composant est désormais largement utilisé en tant que composant faible bruit dans les systèmes de télécommunications terrestres et spatiales, dans les radiotélescopes, dans les récepteurs de télévision par satellite, ..., dans bon nombre de systèmes électroniques, des téléphones portables aux véhicules automobiles.

1.4 Présentation du transistor HEMT classique sur GaAs

Plusieurs travaux de recherches sur l'utilisation des matériaux semiconducteurs III-V dans des composants optoélectroniques par le développement des techniques d'épitaxie ont permis de recenser des couples de matériaux susceptibles de constituer des hétérojonctions présentant des interfaces de qualité tout à fait acceptable.

Parmi ceux-ci, l'association AlGaAs/GaAs qui cumule de nombreux avantages : largeur de bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température mobilité électronique élevée qui permet d'atteindre de bonnes performances, mailles cristallines assez proches qui minimisent les recombinaisons parasites [7].

Dans les structures classiques constituant le transistor HEMT, le transport électronique s'effectue essentiellement au voisinage de l'interface entre un premier matériau fortement dopé ayant la plus petite affinité électronique et le plus grand gap (AlGaAs) et un second matériau non intentionnellement dopé ayant la plus grande affinité électronique et le plus petit gap (GaAs). Lorsque la discontinuité de bande de conduction entre les deux matériaux est suffisante, elle permet de confiner une importante densité de porteurs dans le matériau intrinsèque où la mobilité et la vitesse électronique sont plus élevées.

Le fonctionnement du HEMT est basé sur les propriétés de l'hétérojonction du matériau ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ de type « N » et du matériau binaire GaAs dopé « P ». Généralement, la fraction molaire x est inférieure à 0,45 ce qui confère au matériau ternaire un gap direct.

1.5 Principe de l'hétérojonction

L'hétérojonction constituée du matériau grande gap (dopé N) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ et du matériau faible gap (non dopé) GaAs est la plus étudiée du fait de la relative facilité de réalisation des couches épitaxiales [8].

Le principe du HEMT est basé sur l'hétérojonction entre semi-conducteurs à grand et petit gap. En effet, le matériau ternaire qui constitue le barreau dopé N^+ possède une affinité électronique plus petite que celle du canal. De plus la bande interdite coté $Al_xGa_{1-x}As$ est plus importante que celle du GaAs (coté canal) ce qui crée une hétérojonction lors de la juxtaposition des deux matériaux. On peut représenter le diagramme énergétique de l'hétérojonction, avant et après contact ci-dessus (figure I-5)

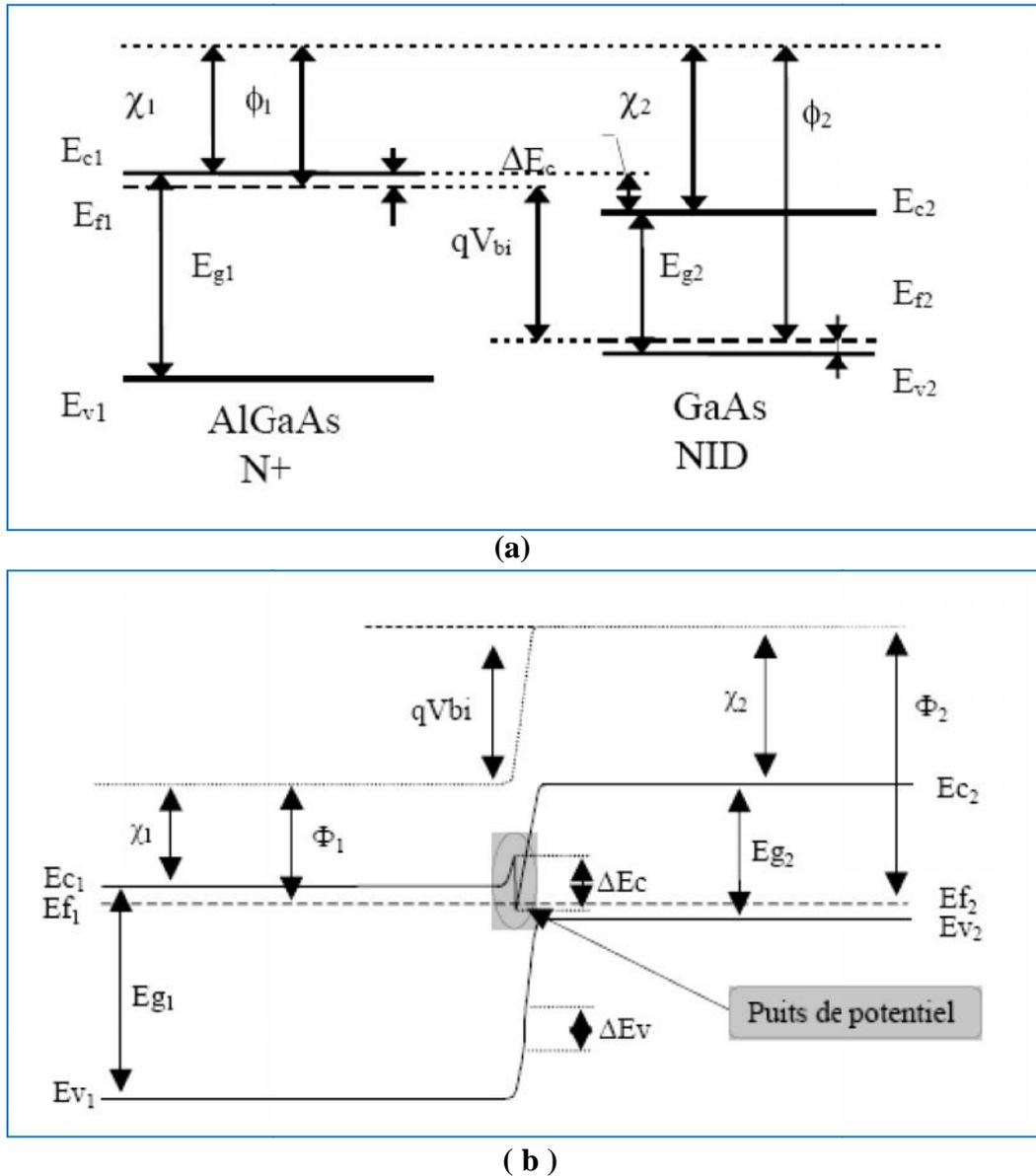


Figure I-5: Diagramme de bandes d'une hétérojonction $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$:

(a) : avant contact et (b) : après contact

Après contact et à équilibre thermodynamique, les niveaux de Fermi des deux semi-conducteurs s'alignent. Il en résulte des discontinuités des bandes de conduction et de valence.

Le puits quantique ainsi réalisé à l'interface de l'hétérojonction GaAs-Al_xGa_{1-x}As N⁺ est de forme triangulaire. La bande de conduction du matériau à plus faible gap va se courber et sera traversée par le niveau de Fermi E_f de la structure. De ce niveau va dépendre la concentration des porteurs dans le puits quantique qui regroupe toutes les charges libres responsables de la conduction dans le GaAs qui constitueront le canal.

La densité des porteurs dans le canal va dépendre aussi de la différence de gap entre les deux matériaux et du dopage de l' Al_xGa_{1-x}As N⁺. Ainsi, les ions donneurs qui sont principalement dans la couche barrière Al_xGa_{1-x}As sont spatialement isolés des électrons principalement confinés dans le puits quantique.

L'interaction Coulombienne électrons-ions en est fortement réduite. C'est là, la principale cause de l'amélioration de mobilité dans le canal du HEMT qui est beaucoup plus forte que dans un canal volumique d'un transistor à effet de champ classique à homo-jonction (MESFET).

De chaque côté de l'hétérojonction formée, infiniment loin de l'interface, le diagramme de bande doit tendre asymptotiquement vers chacun des diagrammes initiaux. Ceci implique la courbure des diagrammes de conduction et de valence au voisinage de l'hétérojonction. Ces courbures ont pour effet de créer un puits de potentiel qui permet le confinement des électrons issus des donneurs du matériau grand gap (AlGaAs) dans le matériau faible gap (GaAs).

L'étroitesse de ce puits (10 à 20 nm) induit la quantification des niveaux d'énergie dans la direction perpendiculaire à la jonction et le mouvement des électrons se fait dans un plan parallèle à l'hétérojonction. On parle alors de gaz d'électrons bidimensionnel (gaz-2D).

Les paramètres de l'hétérojonction dépendent des caractéristiques des matériaux et donc de la fraction molaire x . A titre d'exemple, nous reportons dans le tableau I.1, la dépendance des paramètres de l'hétérojonction Al_xGa_{1-x}As/ GaAs en fonction de la fraction molaire pour $0 < x < 0,45$ [9].

Paramètre à T=300K	GaAs	Al _x Ga _{1-x} As
E _g (eV)	1,42	1,42+1,155.x+0,37.x ²
q.x(eV)	4,07	4,07-1,03.x
E _c (eV)	0	1,03.x
E _v (eV)	0	0,12.x+0,37.x ²
$\frac{E_c - E_v}{kT}$	11,5	13-3,12.x

Tableau I.1. Paramètres caractéristiques de GaAs et Al_xGa_{1-x}As

Les discontinuités des bandes de conduction et de valence se déduisent de la théorie d'*Anderson* :

$$\Delta E_c = x_{\text{GaAs}} - x_{\text{AlxGa1-xAs}} \quad (\text{I.1})$$

$$E_v = (x + E_g)_{\text{AlxGa1-xAs}} - (x + E_g)_{\text{GaAs}} \quad (\text{I.2})$$

1.6 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.

1.6.1 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 [10].

On fait croître les couches les unes sur les autres dans l'ordre exposé au niveau de la structure présentée dans la figure I-6. 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.

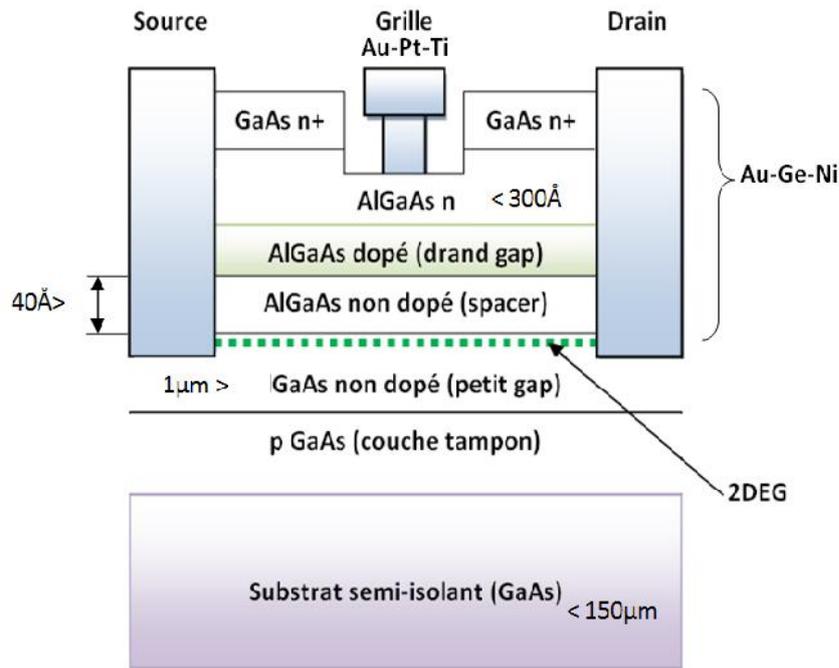


Figure I-6: Schéma de principe du HEMT classique AlGaAs/GaAs

Le HEMT classique AlGaAs/GaAs se compose, comme le montre la figure I-6 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 dopé :** 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 [11].

- **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 dopé est 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.6.2 Origine de fonctionnement d'un transistor HEMT AlGaAs /GaAs

La structure des couches des 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 MESFET et les HEMT se situe au niveau du principe même du contrôle du courant dans le canal. Alors que dans le cas du MESFET, l'électrode de grille contrôle la section du canal disponible pour la conduction, dans le cas du HEMT, elle contrôle la densité d'un gaz d'électrons libres dans une zone non dopée située sous l'hétérointerface 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-7 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.

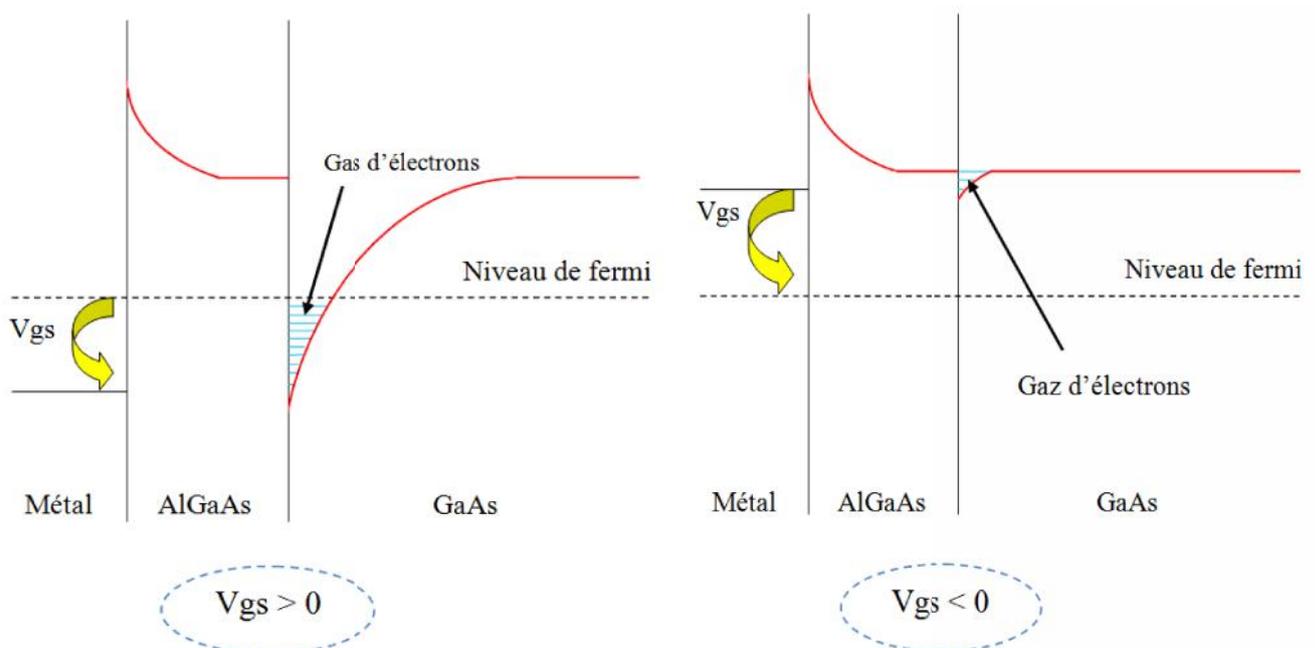


Figure I-7: Influence de la polarisation de grille sur le diagramme des bandes de l'hétérojonction.

I.6.3 Avantages et inconvénients de la technologie à base de GaAs appliquée à la fabrication du transistor HEMT

Les avantages

En général, les HEMT GaAs trouvent leurs avantages dans le type de matériaux utilisés. On parle de L'arséniure de gallium (GaAs), matériau très utilisé dans les composés semiconducteur comme le (HEMT).

Il a comme avantage par rapport au silicium des électrons qui se déplacent plus rapidement sous l'action d'un même champ électrique accélérateur. Cela mène à des composants électroniques plus rapides si l'on fonctionne à même tension logique, ou à une puissance électrique consommée plus faible à vitesse égale, grâce à la réduction possible de tension les technologies disponibles actuellement ne permettent pas de répondre à l'augmentation nécessaire des niveaux de puissance. Alors que Les composants de puissance en arséniure de gallium GaAs sont aujourd'hui des éléments fiables aux hautes fréquences.

Les inconvénients

Comme on a vu dans la partie des avantages, le HEMT GaAs est performant et bien utilisé mais des inconvénients sont apparus. 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 vues de ces inconvénients, il a été nécessaire de tourner vers une technologie plus efficace afin d'améliorer les performances du transistor. Aujourd'hui, les semi-conducteurs à large bande interdite suscitent un intérêt important. En effet, leurs propriétés physiques et électriques et leur largeur de bande interdite sont très intéressantes pour les applications hyperfréquences.

Ainsi, les propriétés intéressantes des matériaux de type Nitrures ont attiré l'attention des chercheurs vers une perspective nouvelle.

I.7 Evolution de HEMT vers une structure à base de GaN

Les transistors HEMT en Nitrure de Gallium possèdent de nombreux avantages. Très utilisé dans le domaine de télécommunications. Le HEMT GaN est très apprécié pour ses propriétés semi-conductrices intéressantes. En effet, Ce matériau présente une énergie de bande interdite jusqu'à trois fois plus élevée par rapport au GaAs. D'autre part, le GaN présente une bonne conductivité thermique, sa haute température de fusion ainsi que l'importante vitesse de saturation des électrons. L'ensemble de ces caractéristiques en font un candidat de choix pour les applications de puissance hyperfréquence.

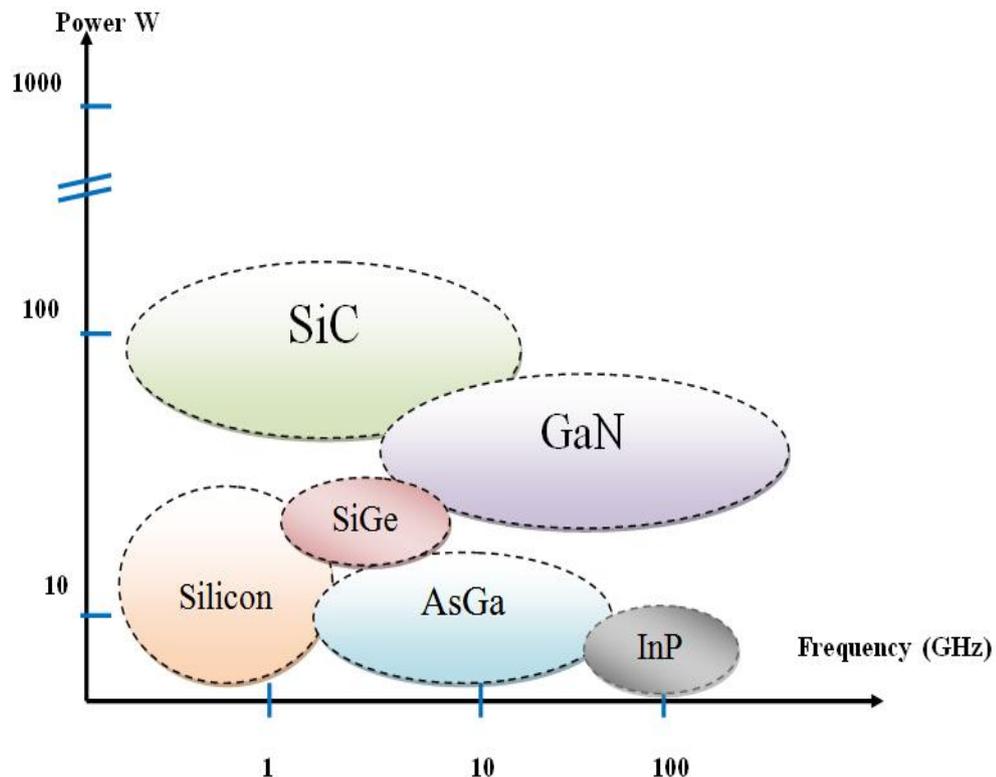


Figure I-8: comparaison des performances puissances fréquences pour différentes filières

Le graphe de la figure I-8 montre les plages d'applications puissances-fréquences que peuvent couvrir les différentes filières. On observe que la filière nitrure de gallium offre actuellement le meilleur potentiel. Elle permet d'amplifier une puissance importante RF jusqu'à environ 80GHz ce qui justifie les nombreux travaux de recherche menés actuellement dans ce domaine [12].

I.8 Principales propriétés des matériaux III-N

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

I.8.1 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**). La seconde est la forme cubique (structure **zinc-blende**). 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 à température ambiante (figure 1.9). 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.

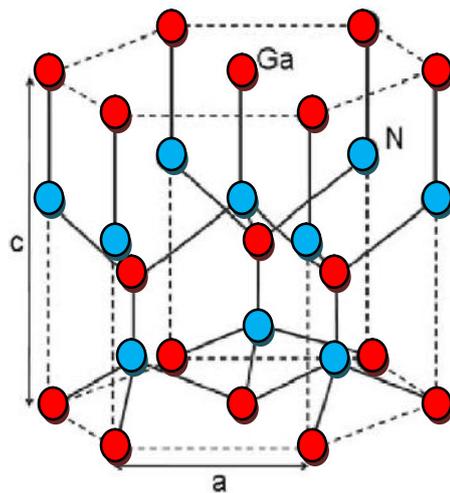


Figure I-9: Représentation du réseau cristallin du GaN dans sa structure hexagonale de type wurtzite [13]

1.8.2 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 1-10) [14]. Nous les représentons dans l'espace réciproque et, pour simplifier suivant des directions de plus hautes symétries. La densité d'états est représentée au centre de la première zone de Brillouin.

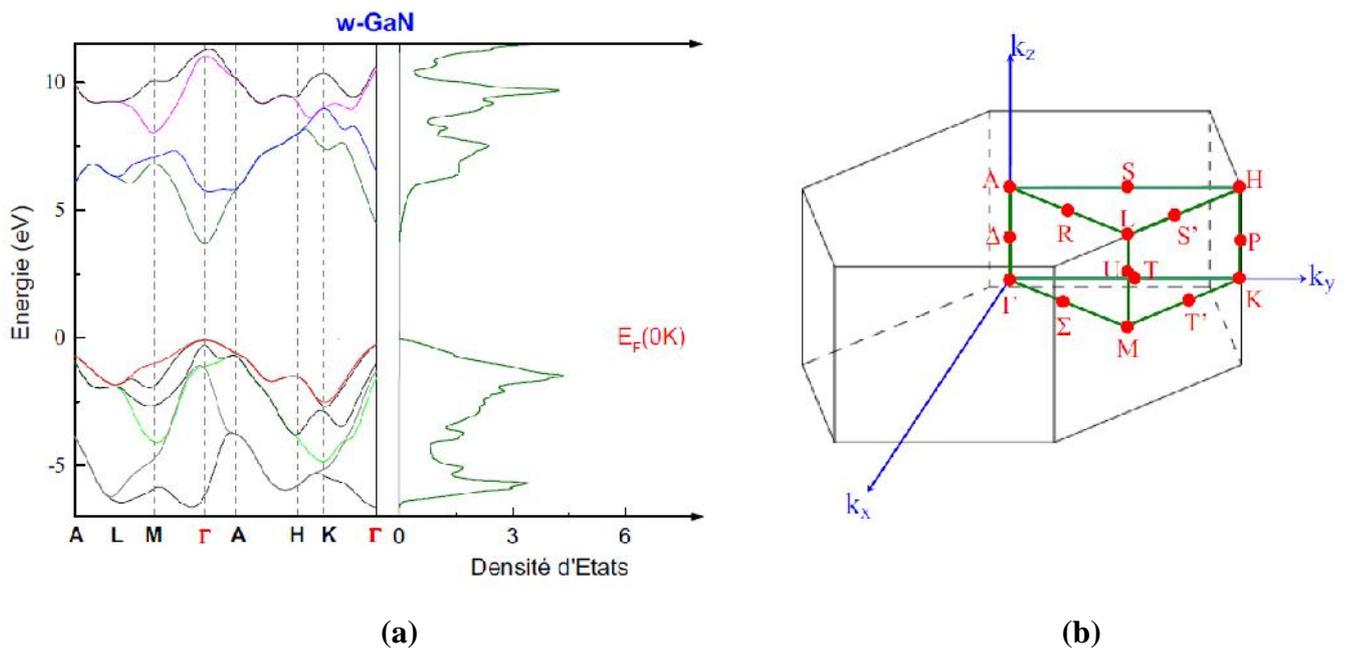


Figure I-10: (a) Structure de bandes et densité d'états du w-GaN et (b) Schématisation de la première zone de Brillouin dans un cristal de w-GaN.

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 minima secondaires en bordure de la zone de Brillouin dans la direction L-M et K, ces minima 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 nitrure d'aluminium (w-AlN) Et nitrure de gallium (w-GaN), sont regroupées dans le tableau I.2 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)	6,2	3,39	1,12	3,23	1,42
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	130	130	490	46
Vitesse de saturation (cm/s)	$1,4 \times 10^7$	2×10^7	1×10^7	2×10^7	$0,9 \times 10^7$
Permittivité relative	8,5	10	12	9,7	11,5
Masse effective de l'électron ($\times m_0$)	0,4	0,2	1,06	0,29	0,066

Tableau I.2. Récapitulatif de quelques propriétés physiques importantes de différents semiconducteurs AlN, GaN, Si, SiC et GaAs à température ambiante [15].

Les matériaux AlN et GaN sont donc des matériaux très prometteurs compte tenu de leurs excellentes propriétés, adéquates pour de nombreuses applications. 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.2). 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.8.3 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 [16]. M. Asif Khan et al [17] ont été les premiers à mettre à profit cette propriété pour réaliser le premier transistor AlGaIn/GaN en 1993. Aussi, O. Ambacher et al [18] ont expliqué quantitativement les effets induits par les polarisations spontanée et piézoélectrique dans une hétérostructure AlGaIn/GaN (dopée ou non-dopée).

I.8.3.1 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-11. 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.

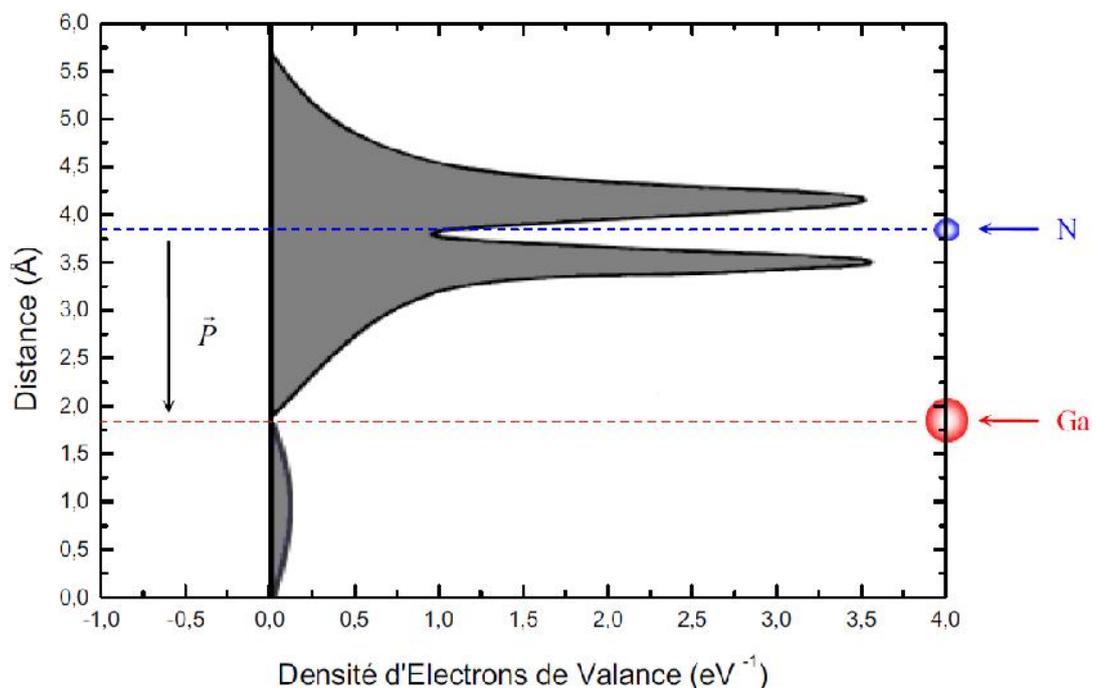


Figure I-11: Distribution des électrons de la bande de valence d'un atome GaN.

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 :

$$\sum_{i=1}^4 \vec{P}_i = \vec{P}_{SP} \quad (I.3)$$

La figure I.12 (a) montre la contribution des moments dipolaires autour d'un atome de gallium. La somme vectorielle des moments dipolaires \vec{P}_1, \vec{P}_2 et \vec{P}_4 , forme un moment dipolaire \vec{P}_{SP} parallèle à l'axe c , c'est-à-dire, parallèle au moment dipolaire \vec{P}_3 mais de sens opposé (Fig. I.12 (b)). Pour une structure GaN wurtzite relaxée, le moment dipolaire $|\vec{P}_1| > |\vec{P}_3|$ entraîne un vecteur de polarisation spontanée $|\vec{P}_{SP}| = |\vec{P}_1| - |\vec{P}_3|$ qui est non nul et dirigé suivant l'axe de croissance du matériau (0001).

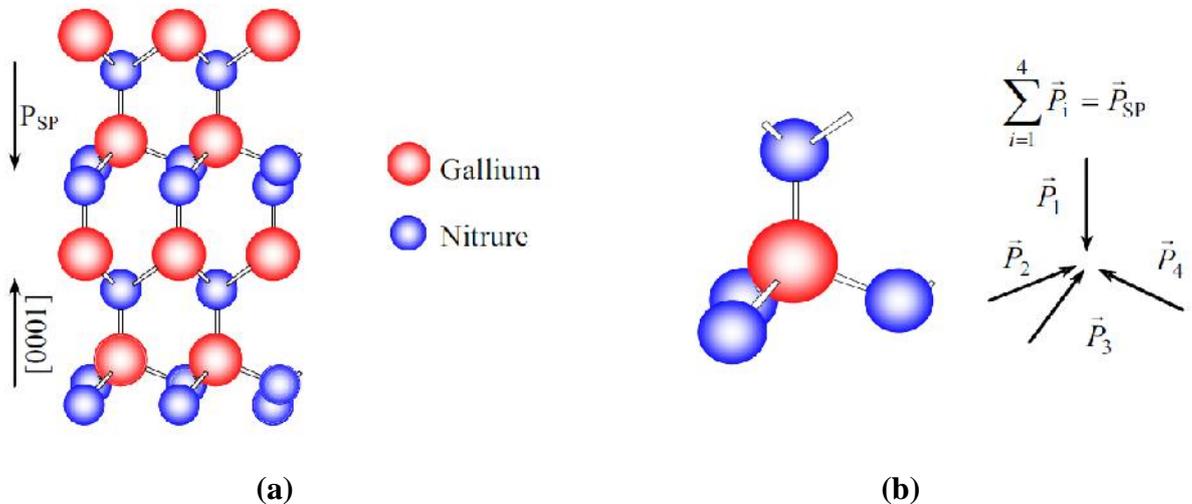


Figure I-12: (a) Structure GaN wurtzite et (b) Polarisation spontanée dans une structure GaN wurtzite.

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-13) orienté dans la direction opposée à l'axe de croissance (0001) et ceci sans excitation extérieur.

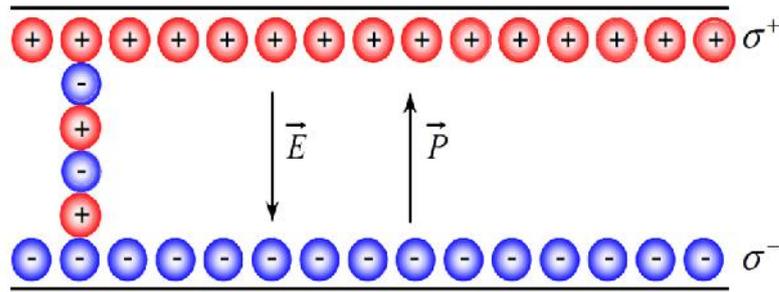


Figure I-13: Charges en surface d'une couche GaN wurtzite. structure GaN wurtzite

Le GaN cristallin possède une symétrie suivant l'axe optique c tel que le gradient de polarisation ($\nabla \cdot \vec{P} = -\rho$) 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 semiconducteur/air. Comme la densité de charge en volume est nulle, la relation de continuité s'écrit :

$$\sigma^+ = |\vec{D}| = \epsilon_0 \epsilon_r |E_{int}| - \epsilon_r |E_{ext}| \tag{I. 4}$$

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

$$\sigma^+ = |\vec{D}| = \epsilon_0 \epsilon_r |E_{int}| \tag{I. 5}$$

Les valeurs de la polarisation spontanée (P_{sp}) pour le GaN, l'AlN et l' $Al_xGa_{1-x}N$ sont regroupées dans le tableau I.3 [19].

Matériaux	w-GaN	w-AlN	$Al_xGa_{1-x}N$
$\frac{P_{sp}}{e_0} / \frac{e_0}{e_0}$	1,6259	1,6010	-0,0249x-1,6259
$\frac{P_{sp}}{e_0} (C/m^2)$	-0,029	-0,081	-0,052x-0,029

Tableau I.3. Valeurs de la polarisation spontanée dans le GaN, l'AlN et l' $Al_xGa_{1-x}N$

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' $Al_xGa_{1-x}N$.

I.8.3.2 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.4 présente les paramètres de polarisation piézoélectrique pour les matériaux à base de semi-conducteur III-N à large bande interdite [20].

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.4. 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-14 (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-14 (b)).

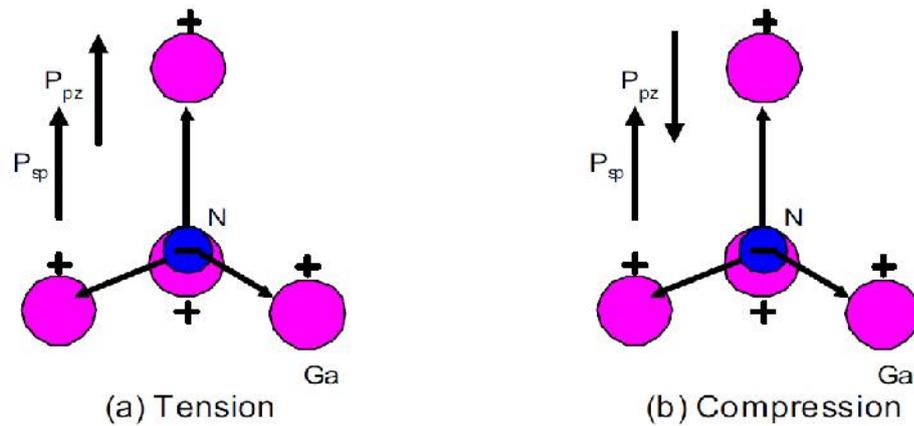


Figure I-14: Sens de la polarisation piézoélectrique dans le GaN pour deux contraintes données :
(a) en tension et (b) en compression.

1.9 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** (**I**nternational **T**echnology **R**oadmap for **S**emiconductors) [21]. Le Tableau 1-5 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.5. 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.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les caractéristiques générales du HEMT conventionnel sur GaAs, ainsi que ses performances. En outre, nous avons insisté sur le choix de la technologie Nitrure de Gallium qui intervient dans la réalisation du transistor HEMT. Nous avons aussi rappelé l'intérêt de la structure cristalline wurtzite du GaN.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude du transistor HEMT AlGa_xN/GaN. Les mécanismes de conduction des contacts Schottky du transistor HEMT sur GaN seront présentés.

Chapitre II

Etude du HEMT à base De GaN

II.1 Introduction

Les transistors HEMT en Nitrure de Gallium possèdent de nombreux avantages. Très utilisés dans le domaine des télécommunications, le HEMT GaN est très apprécié pour ses propriétés semi-conductrices et aussi pour les applications de forte puissance, l'apparition de matériaux à grande bande interdite et en particulier la technologie à base de GaN ceci nous incite à l'étudier dans un nouveau chapitre plus particulier et plus profondément le composant **High Electron Mobility Transistor** à base de GaN.

II.2 Présentation du HEMT en GaN et principe de fonctionnement

Le transistor HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, est un dispositif à effet de champ de la filière nitrures. 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.

II.2.1 Définition de la structure par couche du transistor HEMT GaN

La structure d'un transistor de type 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 AlGa/GaN à la figure II.1.

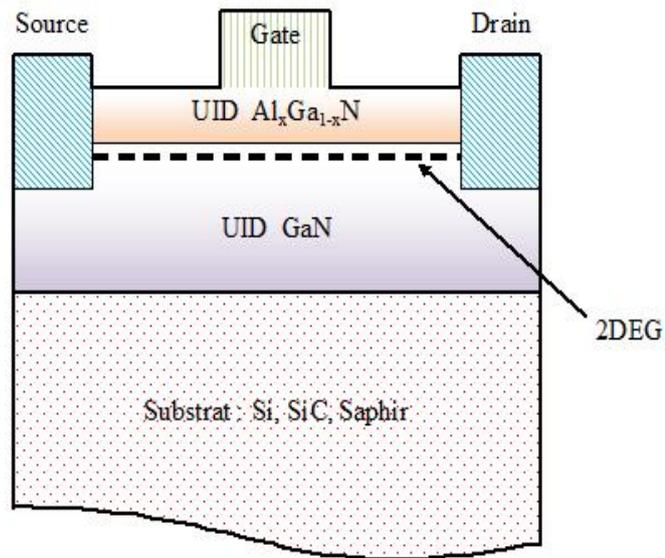


Figure II.1 : structure d'un transistor HEMT $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$

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.

A la lumière de la figure II.1, 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 II.1 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 II.1. 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.

II.2.2 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 II.2 et II.3 ci-dessous.

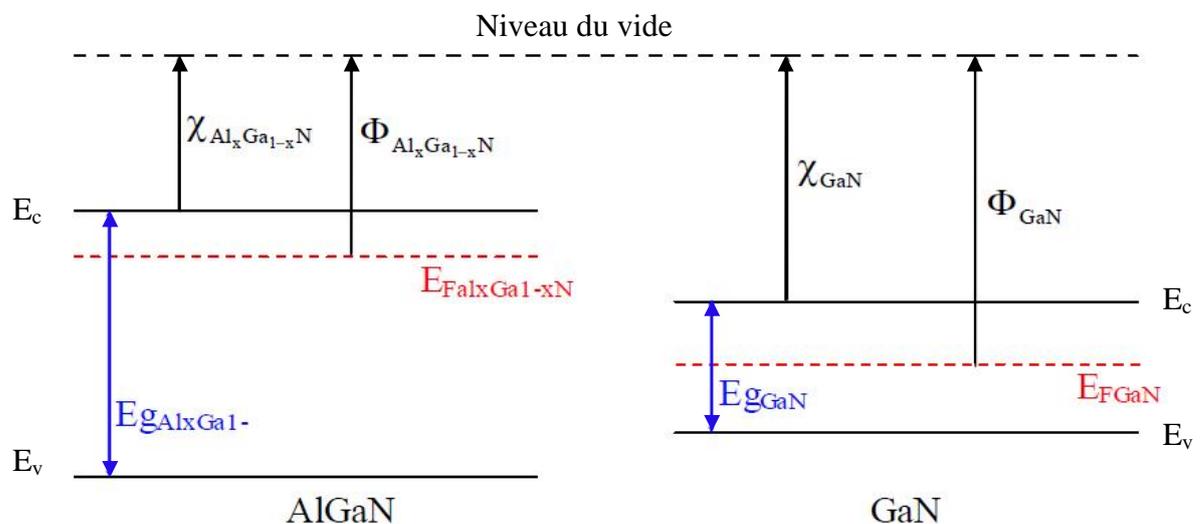


Figure II.2 : Diagrammes des bandes d'énergie des matériaux constituant l'HEMT GaN (pris séparément) à l'équilibre thermodynamique.

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 II.3.

D'après les règles développées en 1960 par R.L. Anderson [18] 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.

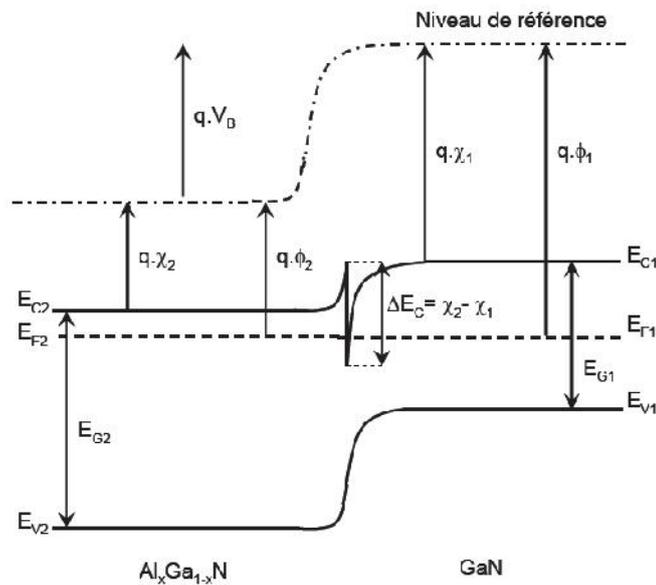


Figure II.3 : Diagrammes des bandes après jonction des deux couches qui constituent l'HEMT AlGa_xN/GaN l'équilibre thermodynamique.

II.2.3 Polarisation dans les HEMT AlGa_xN/GaN

Les transistors HEMT 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 principalement à la structure même du transistor qui est le siège de deux types de polarisation, la polarisation piézoélectrique et la polarisation spontanée.

II.2.3.1 Polarisation piézoélectrique :

La piézoélectricité est une propriété que possèdent 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]. En fait, cette polarisation peut être exprimé de la manière suivante :

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

Où :

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

Et

$$\epsilon_3^{AlGaN} = -2 \frac{c_{11}^{AlGaN}}{c_{33}^{AlGaN}} \epsilon_1^{AlGaN} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

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 (II.4) de cette polarisation en fonction de la fraction molaire x d'après les travaux extraits de la thèse de N.Vellas [22].

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

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.

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

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

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

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

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

Ces relations linéaires donnent l'évolution des composantes piézoélectriques et d'élasticité dans le composé ternaire en fonction de la fraction molaire x . Elle sont tirées de la même thèse de N.Vellas qui s'est appuyé sur les travaux de Bernardini et *al.* [23].

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.

Toutefois, la constitution du gaz bidimensionnel d'électrons est liée notamment à la polarisation spontanée des matériaux de type Nitrure III-V.

II.2.3.2 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 regroupent autour du Ga.

La polarisation spontanée est donc la polarisation résultante 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 et doivent être prises en compte ensemble.

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 [21]. Elle est exprimée par l'équation suivante.

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

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

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

II.3 Détermination de la quantité de charge à l'interface AlGa_xN/GaN

Il s'agit de déterminer la quantité de charges σ à l'interface AlGa_xN/GaN qui constituera le gaz bidimensionnel d'électrons et ce, à partir de la superposition de tous les champs occasionnés par les deux types de 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'AlGa_xN présente des charges positives au niveau de sa partie inférieure et des charges négatives dans sa partie supérieure comme montre la figure II.4. 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.

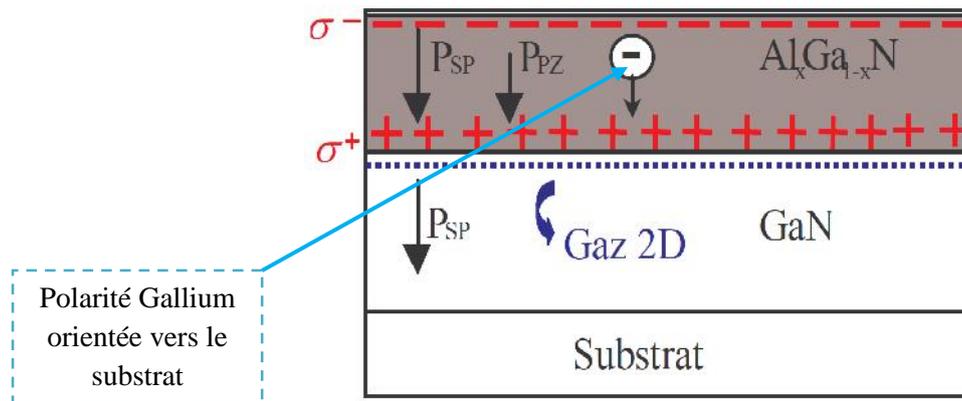


Figure II.4 : Répartition des charges et des polarisations piézoélectrique et spontanée à travers la structure HEMT AlGa_xN/GaN, création du 2DEG dans le cas idéal.

Comme on peut le constater sur la figure II.4, lorsque le matériau GaN est relaxé et que l'on fait croître l'Al_xGa_{1-x}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.

$$|\sigma| = |P_{SP_{Al_xGa_{1-x}N}}(x) + P_{PZ_{Al_xGa_{1-x}N}}(x) - P_{SP_{GaN}}(x)| \quad C/m^2 \quad (II.7)$$

Par ailleurs, la connaissance des expressions des trois polarisations ci dessus 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 dans le cas où le matériau GaN est relaxé.

Par conséquent, la figure II.5 nous montre l'évolution de $|\sigma|$ pour les trois types de polarisations.

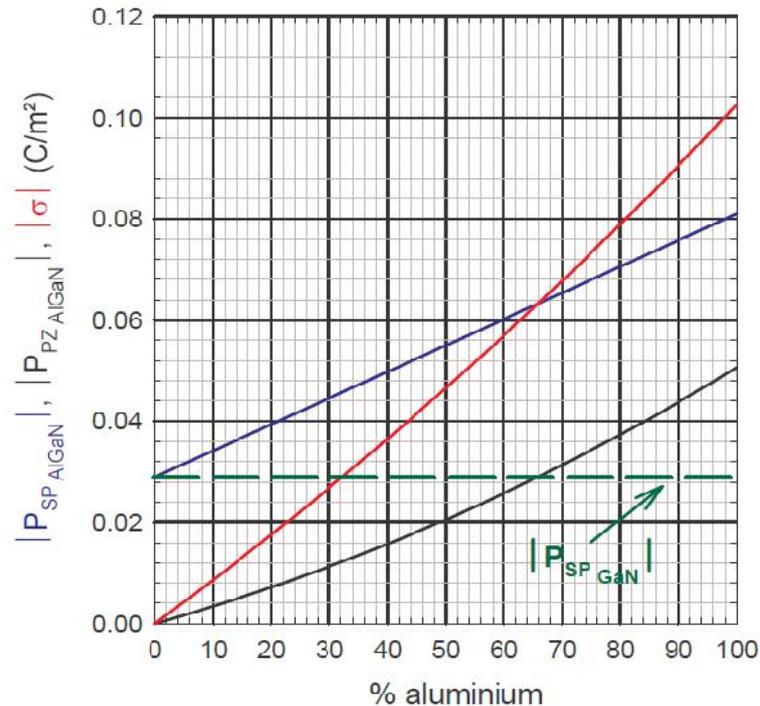


Figure II.5 : Evolution des polarisations piézoélectrique et spontanée et de la densité de charges à l'interface AlGaN/GaN en fonction de la fraction molaire x [20].

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 linéairement avec le taux d'aluminium.

On parlait de cas idéal, c'est-à-dire le matériau GaN 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.

Malheureusement, 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 a 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.6 du composant entier.

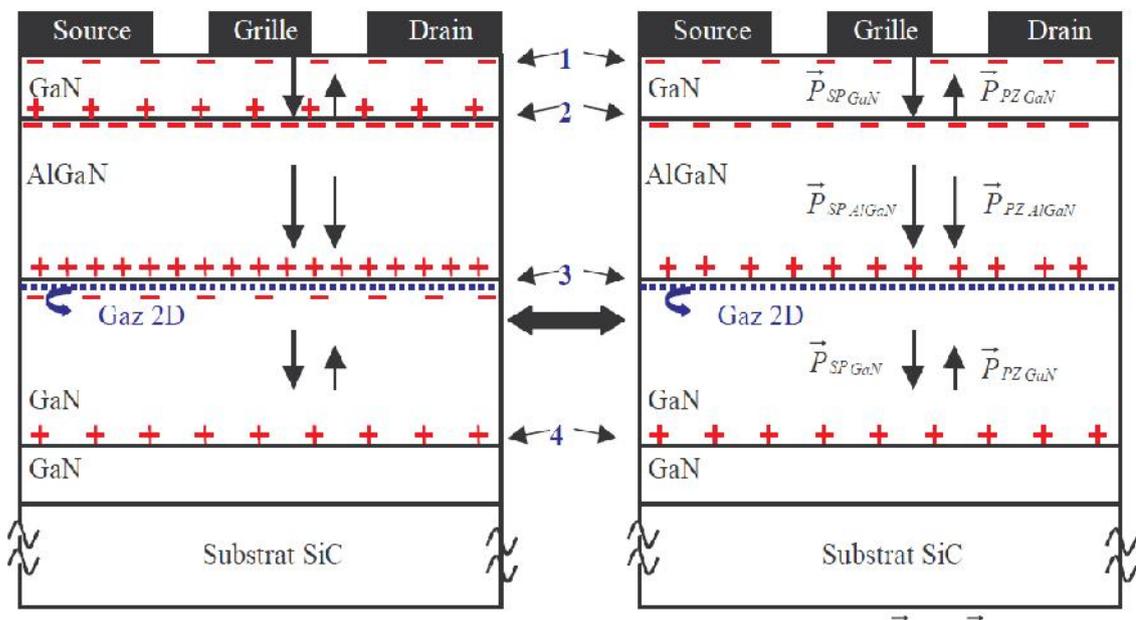


Figure II.6 : Visualisation des différentes sortes de polarisations qui agissent au sein de chacune des couches et de la répartition des charges aux interfaces.

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:

$$|\sigma^+| = |P_{SP_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}}(x) + P_{PZ_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}}}(x) + P_{PZ_{\text{GaN}}}(x) - P_{SP_{\text{GaN}}}(x)| \quad \text{C/m}^2 \quad (\text{II.8})$$

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.7 ci-dessous.

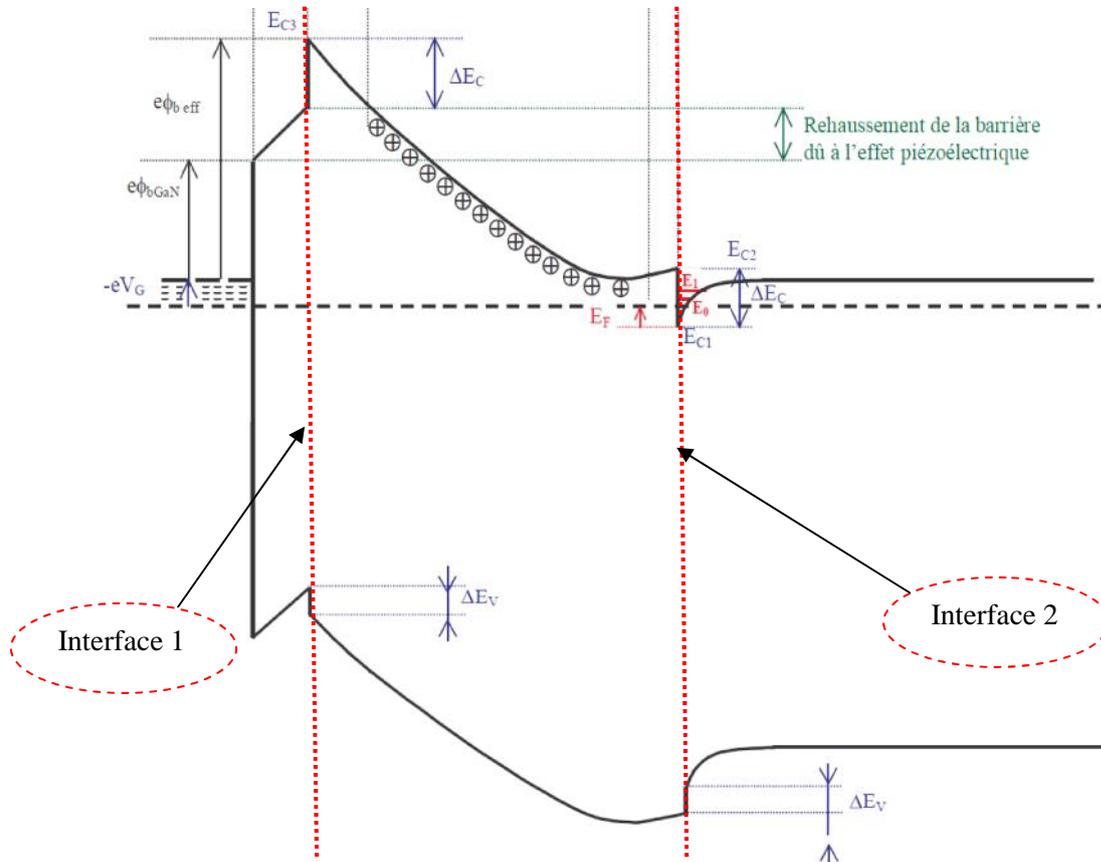


Figure II.7 : Diagramme énergétique de l'ensemble de la structure du composant.

Il est possible d'établir un lien entre le diagramme des bandes présenté à la figure II.7 et les charges apparaissant au niveau de la structure présentée à droite de la figure II.6. 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 Contacts Ohmiques

Les contacts utilisés sur le semi-conducteur pour la réalisation des connexions, nécessitent généralement une métallisation préalable des zones concernées. En effet, la réalisation d'une jonction M-S forme une barrière Schottky qui présente un effet redresseur, mais le niveau de potentiel de cette barrière peut être rendu pratiquement négligeable, par un choix correct du métal utilisé et un dopage suffisamment élevé du semi-conducteur. On obtient alors un contact à faible résistance et de caractéristique symétrique que l'on appelle contact ohmique. La qualité du contact ohmique est contrôlée par plusieurs paramètres, le plus important est la résistance spécifique.

II.5.1 Principe de formation du contact ohmique

Les contacts ohmiques sont réalisés par des structures multi-couches, utilisant des métaux comme le titane, l'aluminium, l'or, le nickel, le platine, le molybdène, ou le tantale.

Les séquences d'empilement peuvent être les suivantes : Ti/Al/Ni/Au, Ti/Al/Ti/Au, Ti/Al/Mo/Au, Ti/Al/Pt/Au, Al/Ti/Ta, Ti/Al, Ti/Al/Au, et cette liste n'est pas exhaustive. Le titane est utilisé pour éviter la diffusion des autres matériaux dans le semi-conducteur. Les épaisseurs typiques des

différentes couches sont par exemple dans le cas des contacts réalisés en Ti/Al/Ti/Au de l'ordre de 200/1000/450/550Å. Le dépôt des contacts ohmiques est toujours suivi d'un recuit thermique rapide. Des températures de 800 à 950°C pendant une durée de l'ordre de 30 s sont couramment employées. A titre d'exemple, les contacts ohmiques réalisés en Ti/Al/Ni/Au présentent une résistivité de contact spécifique de l'ordre de $8,9 \times 10^{-8} \text{ .cm}^2$. Ceux réalisés en Ti/Al/Pt/Au présentent une résistivité de contact spécifique de l'ordre de $8,4 \times 10^{-5} \text{ .cm}^2$, et sont stables dans le temps [24]. Ceux réalisés en Ti/Al/Mo/Au présentent une résistivité de contact spécifique de l'ordre de $4,5 \times 10^{-7} \text{ .cm}^2$, conduisant a des résistances de contact de 0,2 .mm [25]. La figure II.8 présente la résistance de contact de différents contacts ohmiques réalisés sur des couches GaN ou AlGaN d'après [26].

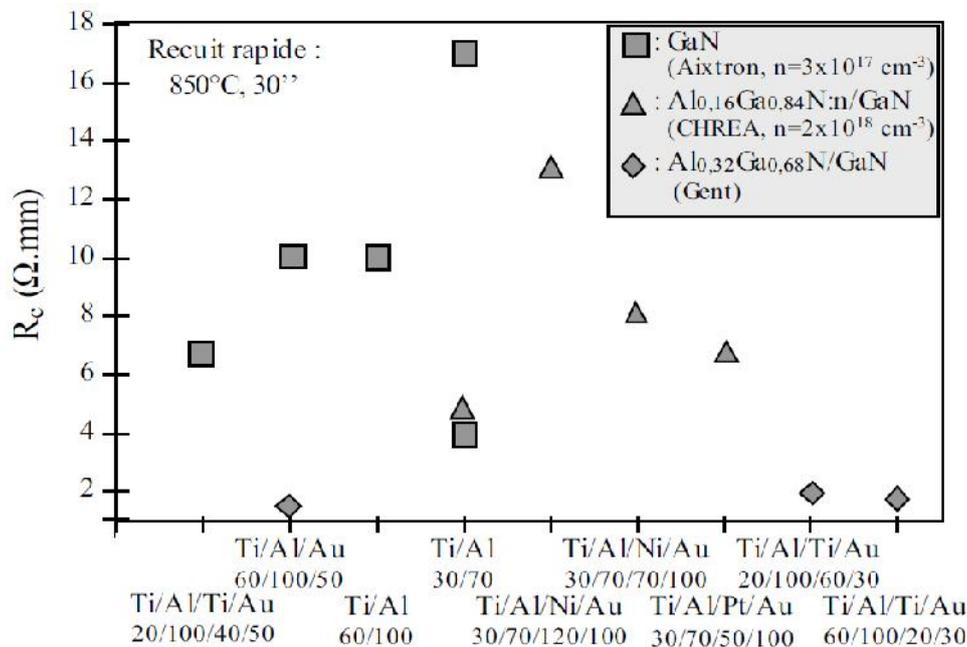


Figure II.8 : Résistance de contact pour différents types de contacts ohmique [24].

On peut constater que les plus faibles résistances de contact sur une couche Al_{0,32}Ga_{0,68}N sont obtenues en utilisant un empilement Ti/Al/Au, ou Ti/Al/Ti/Au. Pour les contacts réalisés en Ti/Al/Ti/Au, la rugosité de surface augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'or. Cette dernière doit donc être fine (50 nm). Enfin, les contacts réalisés en Ti/Al/Au (60/100/50) ont montre une meilleure morphologie de surface que les contacts en Ti/Al/Ti/Au.

Des recherches ont été menées sur l'utilisation de Tantale pour réaliser l'interface entre la couche AlGaN et le contact ohmique. Ces contacts sont réalisés avec un empilement Al (500 Å) / Ti(500 Å) / Ta(500 Å), et présentent une résistivité de $(5 \pm 2) \times 10^{-7} \text{ .cm}^2$, valeur qui doit être comparée au $(7 \pm 1) \times 10^{-5} \text{ .cm}^2$ pour un contact réalisé en Al (200 Å) / Ti(1500 Å) [27].

II.5.2 Procédé de fabrication du contact ohmique

Un contact ohmique sur AlGaN/GaN peut être obtenu par l'une des deux étapes suivantes :

- Doper N^{++} la couche barrière AlGaN. Dans ce cas, le dopant de type N le plus adéquat pour ce faire est le silicium. Cependant, il nécessite un recuit d'activation à une température telle que le matériau s'en trouve dégradé et que le taux d'activation reste partiel. Ajoutons que les impuretés non-ionisées peuvent représenter des pièges potentiels lors du fonctionnement du transistor en hyperfréquence.
- Former un alliage sous le contact métallique par un recuit à haute température ou le faciliter par un pré-fossé de contact ohmique pour se rapprocher du gaz d'électrons.

La première solution est mal adaptée aux objectifs envisagés en plus d'être onéreuse à la réalisation technologique. Par conséquent, la seconde solution est la plus utilisée lors de la réalisation pratique du composant.

II.6 Contact Schottky

II.6.1 Propriétés physiques du contact Schottky

II.6.1.1 Diagramme énergétique d'un contact métal/semi-conducteur

a) Diagramme énergétique sans présence d'états d'interface

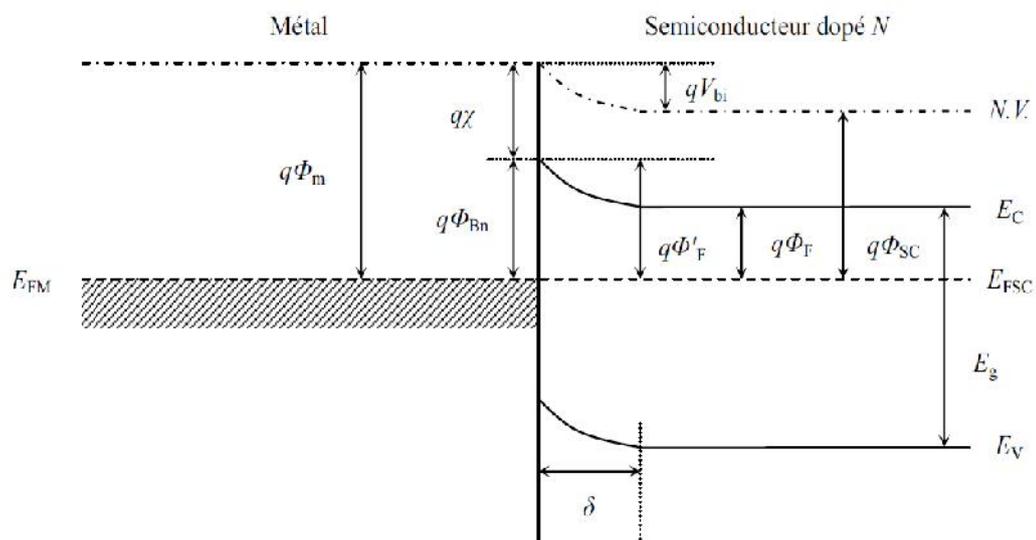


Figure II.9 : Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semi-conducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ (sans état d'interface)

La figure II.9 montre le diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semiconducteur de type N.

Au voisinage de l'interface, l'écart entre la bande de conduction et le niveau de Fermi est plus important que dans la région neutre du semiconducteur (loin de l'interface) $q\Phi'_F > q\Phi_F$. Cette grandeur est définie comme étant la hauteur de barrière Schottky q_{Bn} . La hauteur de barrière q_{Bn} est alors donnée en l'absence d'état d'interface par la différence entre le travail de sortie du métal q_m et l'affinité électronique du semiconducteur $q\chi$ en supposant que l'abaissement de barrière associé à la force image reste négligeable.

$$q_{Bn} = q_m - q\chi \tag{II.9}$$

On peut alors se poser la question suivante: Que devient ce contact en présence d'états de surface ?

a) Diagramme énergétique en présence d'états d'interface

Dans le volume du semiconducteur, les états électroniques accessibles sont d'une part les bandes de valence et de conduction résultant de la périodicité du réseau cristallin, et d'autre part les états discrets associés aux donneurs et accepteurs ou aux centres profonds.

À la surface du semiconducteur, les états électroniques sont modifiés car chaque atome n'établit des liaisons que dans un demi-plan, et dans l'autre demi-plan il reste ce que l'on appelle communément des liaisons pendantes. La stabilisation des états électroniques en surface peut alors être réalisée par l'adsorption d'atomes étrangers, comme l'oxygène, entraînant l'oxydation de la surface. La présence d'atomes étrangers associée à la différence de paramètres de maille entre le semiconducteur et son oxyde natif crée des états électroniques en surface différents de ceux du volume.

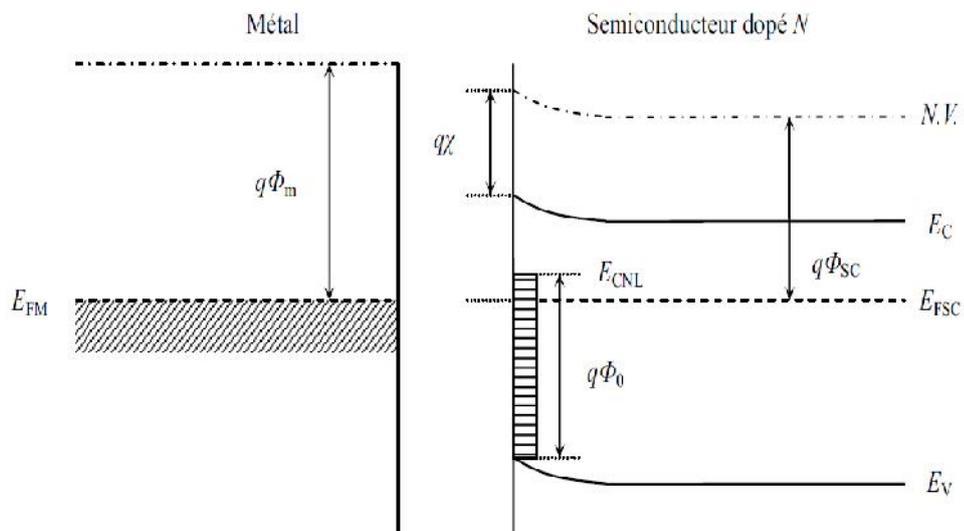


Figure II-10 : Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/air/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{sc}$ (sans contact et avec états d'interface)

La figure II.10 montre le diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/air/semiconducteur (sans contact et avec états d'interface) tel que $q_m > q_{SC}$. Lorsque les deux matériaux sont mis en contact, la représentation du diagramme énergétique de l'ensemble de la structure implique de considérer deux cas [22] :

- $q_m > q_{\chi} + q_{Bn}$

Si la nature et la densité des états de surface associées au choix du métal sont telles que $q_m > q_{\chi} + q_{Bn}$, alors la hauteur de barrière métal/semiconducteur est fixée par l'ancrage du niveau de Fermi par les états de surface (états d'interface). Dans ce cas, le déplacement des électrons des états de surface vers le métal laisse apparaître une charge positive dans le semiconducteur et une charge négative dans le métal. Dès lors, à l'interface métal/semiconducteur et sur une épaisseur de quelques Angströms, le métal équivalent formé présente un travail de sortie q_{meq} inférieur à celui déposé tel que :

$$q_{meq} = q_m - qV_i \tag{II.10}$$

En d'autres termes, une fine couche interfaciale d'épaisseur δ située entre le métal et le semiconducteur se forme et se comporte comme un dipôle. La hauteur de barrière métal/semiconducteur obtenue est égale à q_{Bn} mais celle-ci est inférieure à la hauteur de barrière qui serait obtenue sans état de surface avec un écart égal à qV_i .

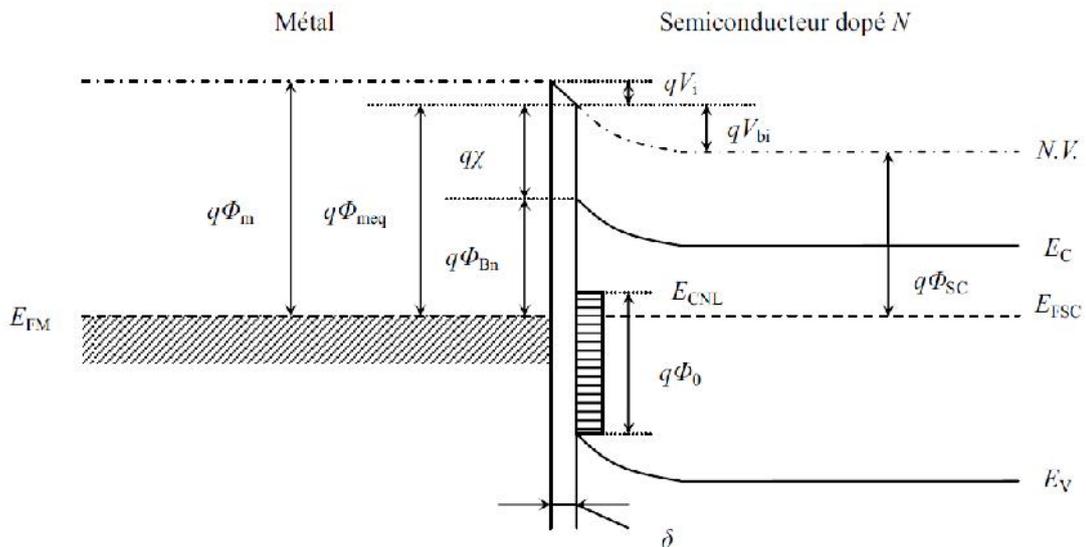


Figure II.11 : Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ et $q_m > q_{\chi} + q_{Bn}$ (avec contact et états d'interface) [22].

- $q_m < q\chi + q_{Bn}$

Lors de la mise en contact des deux matériaux (figure II.12) dans la configuration du second cas, l'équilibre thermodynamique est atteint quand le niveau de Fermi du métal et celui du semiconducteur sont alignés.

La variation du niveau de Fermi E_F est simplement liée au remplissage des états de surface non occupés et situés en dessous du niveau de Fermi avant contact. Dans ce cas, le déplacement des électrons du métal vers les états de surface du semiconducteur laisse apparaître une charge positive dans le métal et une charge négative dans le semiconducteur. Dès lors, à l'interface métal/semiconducteur et sur une épaisseur de quelques Angströms, le métal équivalent formé présente un travail de sortie q_{meq} supérieur à celui déposé tel que :

$$q_{meq} = q_m + qV_i \tag{II.11}$$

La hauteur de barrière métal/semiconducteur obtenue est égale à q_{Bn} mais celle-ci est supérieure à la hauteur de barrière qui serait obtenue sans état de surface avec un écart égal à qV_i .

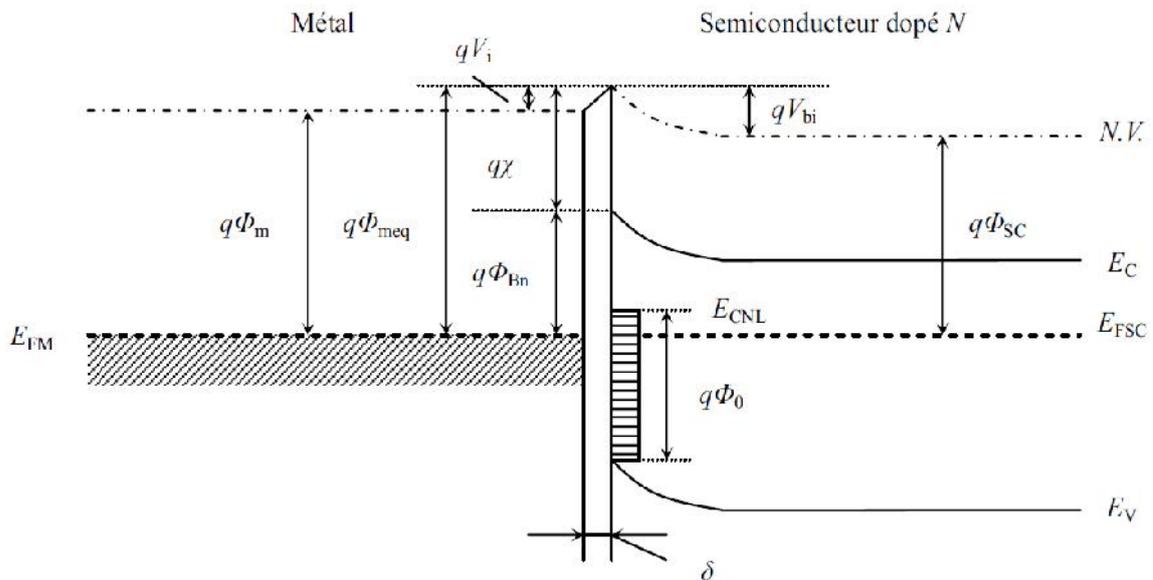


Figure II.12 : Diagramme énergétique à l'équilibre thermodynamique d'une structure métal/semiconducteur (N) tel que $q_m > q_{SC}$ et $q_m < q\chi + q_{Bn}$ (avec contact et états d'interface).

II.6.1.2 Description du mécanisme de conduction au travers d'un contact Schottky

Les mécanismes de conduction électrique au travers d'un contact redresseur métal/semiconducteur sont divers et variés. Les différents processus de conduction intervenant dans un contact redresseur polarisé en direct et en inverse sont représentés figure II.13. Afin d'alléger la représentation graphique, les états de surface n'ont pas été pris en considération.

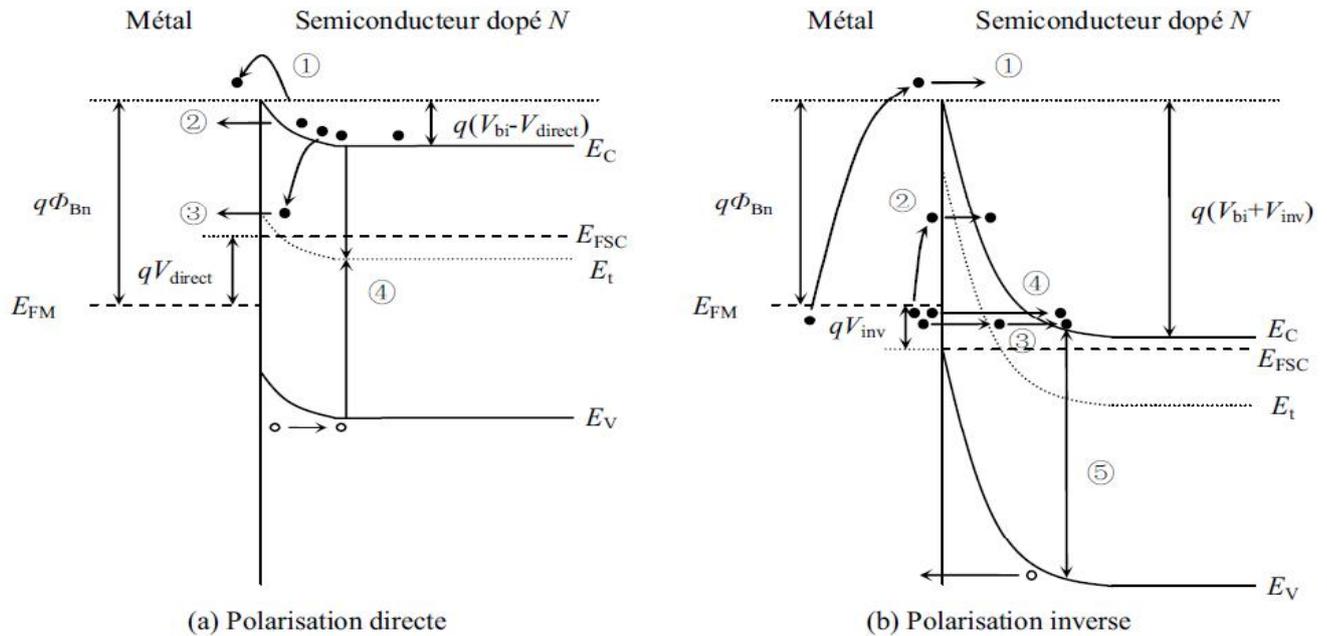


Figure II-13 : Représentation simplifiée des mécanismes de conduction intervenant dans un redresseur sous polarisation électrique : (a) direct et (b) inverse.

a) Conduction en polarisation directe :

- ① Lorsque la température est suffisante, l'énergie thermique acquise par certains électrons du semiconducteur leur permet de franchir la barrière de potentiel, c'est l'émission thermoïonique.
- ② Lorsque l'énergie thermique acquise par certains électrons est suffisante pour qu'ils atteignent une zone où la barrière métal/semiconducteur est relativement étroite, alors ces derniers peuvent passer à travers la barrière. Il s'agit de l'effet tunnel activé thermiquement.
- ③ Les électrons peuvent passer à travers la barrière de potentiel par effet tunnel assisté par des défauts. C'est l'émission par saut de courant (hopping).

- ④ Lorsque le semiconducteur présente des centres profonds de génération-recombinaison, alors sous polarisation directe les porteurs peuvent se recombiner. C'est la recombinaison des paires électron-trou sur des centres profonds agissant comme centres de recombinaison.

b) Conduction en polarisation inverse :

- ① Émission thermoïonique.
 ② Effet tunnel activé thermiquement.
 ③ Effet tunnel assisté par effet de champ via des défauts.
 ④ Sous l'action d'une polarisation inverse la courbure de bande augmente et la barrière de potentiel devient de plus en plus étroite contrairement à ce qui se passe lors de la polarisation directe. Par conséquent, les électrons peuvent passer à travers la barrière par effet de champ. C'est l'effet tunnel par effet de champ.
 ⑤ Lorsque le semiconducteur présente des centres profonds de génération-recombinaison, alors sous polarisation inverse et dans la zone désertée, des paires électron-trou peuvent être générées. C'est la génération des paires électron-trou assistée par des défauts.

c) Courant dans un contact redresseur [17, 28]

Le courant circulant à travers un contact redresseur est la somme de toutes les composantes évoquées précédemment auxquelles il faut ajouter le courant de fuite I_{rp} relié à la chute de potentiel dans la résistance série du contact Schottky.

$$I = I_{tu} + I_{te} + I_{gr} + I_{rp} \quad (\text{II.12})$$

- Le terme I_{tu} représentant le courant dû à l'effet tunnel pour et/ou activé thermiquement est exprimé par la relation II.13 :

$$I_{tu} = I_{tu0} \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_{Sdiode})}{E_0}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.13})$$

Où I_{tu0} est la valeur du courant tunnel à la saturation. V est la tension appliquée, R_{Sdiode} est la résistance série de la diode due au contact ohmique, au volume du semiconducteur et à l'accès métallique de la grille à ne pas confondre avec la résistance d'accès de source des transistors R_S . I est le courant total dans la diode et E_0 est un paramètre qui dépend du degré de transparence de la barrière, soit :

$$E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{k_B T}\right) \quad (\text{II.14})$$

$$\text{et } E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_D}{\epsilon_S m_n^*}} \quad (\text{II.15})$$

Où N_D correspond au dopage du semiconducteur, k_B est la constante de Boltzmann, T est la température en Kelvin, ϵ_S est la constante diélectrique du semiconducteur, m_n^* est la masse effective des électrons dans le semiconducteur, h est la constante de Planck et q est la charge de l'électron.

➤ Le terme I_{te} dont l'expression est donnée par la relation II.16 représente l'effet thermoionique :

$$I_{te} = I_{te0} \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_{Sdiode})}{\eta_{te} k_B T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.16})$$

Où η_{te} le coefficient d'idéalité doit être proche de 1 dans le cas d'une émission thermoionique seule. I_{te0} est la valeur du courant thermoionique de saturation qui s'exprime par :

$$I_{te0} = A^* T^2 S \exp \left(\frac{-q\phi_B}{k_B T} \right) \quad (\text{II.17})$$

Avec S la surface de la diode, ϕ_B la tension de « built-in » ou la hauteur de barrière car η_{te} est proche de 1. A^* est la constante de Richardson donnée par la relation :

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k_B^2}{h^3} \quad (\text{II.18})$$

➤ Le terme I_{gr} correspond au courant de génération et de recombinaison suivant le sens de la polarisation est donnée par :

$$I_{gr} = I_{gr0} \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_{Sdiode})}{\eta_{gr} k_B T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.19})$$

Où le coefficient d'idéalité η_{gr} vaut 2 dans le cas d'un processus de génération-recombinaison et I_{gr0} est le courant de saturation dont l'expression est :

$$I_{gr0} = \frac{q S w_D n_i}{2\tau} \quad (\text{II.20})$$

Avec S la surface du contact Schottky, w_D la largeur de la zone de déplétion, n_i la densité de porteurs intrinsèque et τ la durée de vie des porteurs. La relation II.20 correspond à un maximum de recombinaison et est basée sur l'hypothèse que le niveau d'énergie des pièges E_t (centres profonds) se confond avec le niveau de Fermi intrinsèque.

➤ Le terme I_{rp} (relation II.21) correspond au courant de fuite. Il peut s'agir :

- D'un courant par effet tunnel dont le comportement serait celui d'une résistance R_p en parallèle sur la diode, considération qui ne peut être effectuée qu'à très faible tension.
- D'un courant surfacique lié à une forte densité d'états de surface, qui serait générée entre le contact ohmique et le contact Schottky sous l'effet de la polarisation. À cause de la forte densité d'électrons piégés, la surface se comporterait comme un matériau à

faible conduction (conduction par hopping) et serait assimilable à une résistance R_p en parallèle sur la diode.

L'impact du terme I_{RP} est visible essentiellement à faible polarisation quand le courant I total est très faible d'où :

$$I_{rp} = \frac{V - R_{Sdiode} I}{R_p} \approx \frac{V}{R_p} \quad (\text{II.21})$$

II.7 Modélisation physico-électrique du HEMT GaN

II.7.1 Les équations différentielles de base

Le modèle physique utilisé dans notre modélisation numérique est de type Dérive-Diffusion (DD). Il est constitué de l'équation de Poisson (II.22) couplée avec l'équation de continuité de courant pour les électrons (II.23) et les trous (II.24). En effet, l'équation de Poisson permet de définir la densité de charges et donc le potentiel électrostatique. Tandis que l'équation de continuité de courant permet de définir le flux de porteurs et donc le courant électrique.

$$\text{div}(\epsilon \nabla \psi) = q(n - Nd) \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n - G_n - R_n \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{II.24})$$

D'où :

ϵ représente la permittivité électrique du matériau semi-conducteur.

ψ est le potentiel électrostatique.

q est la charge de l'électron.

n est la densité volumique d'électron et

N_d est la concentration des impuretés de type donneur.

\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.

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

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

II.7.2 Configuration de la mobilité des porteurs

Le paramétrage de la mobilité est une phase très importante dans la configuration des modèles associés aux matériaux. Dans le HEMT classique, on note la présence de deux zones fondamentales. La première correspond à une zone où la vitesse des électrons est presque linéaire par rapport au champ électrique. Toutefois, il faut que ce champ électrique reste suffisamment faible ($|\mathbf{E}| < 10^4 \text{ V/cm}$) [28] pour considérer la vitesse comme proportionnelle à ce champ. La seconde zone importante de la caractéristique correspond à la zone de saturation. Cela signifie que pour un champ suffisamment grand ($|\mathbf{E}| \approx 10^5 \text{ V/cm}$) [28], la vitesse des porteurs sature ce qui, de surcroît, fait saturer le courant.

La variation de la mobilité des porteurs en fonction du champ électrique est exprimée au moyen des deux relations suivantes [29] :

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{VSATN} \right)^{BETAN}} \right]^{\frac{1}{BETAN}} \quad (\text{II.25})$$

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{VSATP} \right)^{BETAP}} \right]^{\frac{1}{BETAP}} \quad (\text{II.26})$$

Avec ;

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

On trace sur la figure II.14 l'évolution de la vitesse des électrons en fonction de champ électrique présent au sein du matériau GaN.

En effet, 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 d'après l'équation II.25. De ce fait, la mobilité diminue quand le champ augmente de manière à maintenir la vitesse des porteurs constante lorsqu'ils atteignent leur vitesse de saturation.

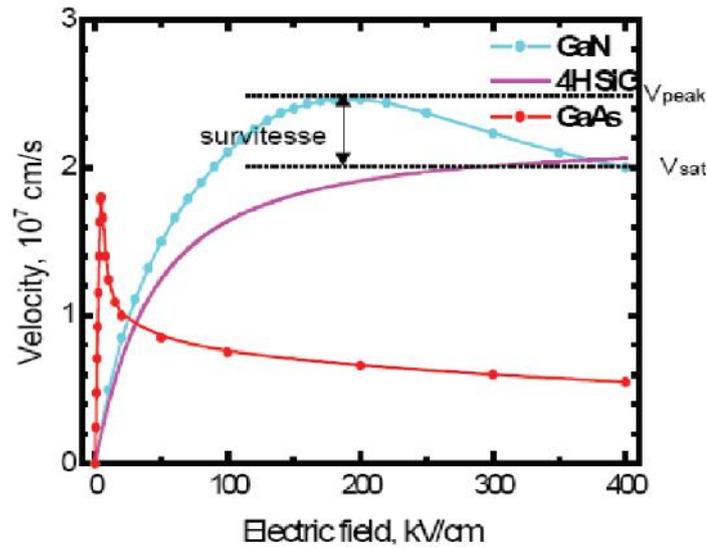


Figure II.14 : Évolution de la vitesse des électrons selon l'amplitude du champ électrique

II.8 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 Nitrure de Galium. Les polarisations spontanée et piézoélectrique dans le HEMT AlGaIn/GaN ainsi que son modèle physico-électrique ont été exposées.

Le prochain chapitre se positionnera sur le paramétrage DC de la structure HEMT AlGaIn/GaN en utilisant le simulateur commercialisé ATLAS de la société SILVACO.

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulations des caractéristiques statiques (DC) du transistor HEMT GaN. Pour cela, nous avons mis au point le module ATLAS de SILVACO.

Dans un premier temps, nous présentons un descriptif du logiciel de simulation « Atlas » de la société SILVACO et sa mise en œuvre dans le cadre de notre travail. Nous définissons ensuite, la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés lors de la conception du composant. Ce dernier provient d'un article IEEE publié en 2006 par l'université de California-Santa Barbara à l'USA [30]. La même technologie a été étudiée par la société CrossLight [31, 32].

Dans un second temps, nous présentons les résultats de simulation bidimensionnelle du HEMT AlGaIn/GaN. Ainsi, nous traitons l'effet de certains paramètres géométriques et thermiques sur les performances statiques de notre structure calibrée tels que la longueur de la grille, l'épaisseur du canal, de la couche barrière et l'influence de la température.

Enfin, nous étudions l'impact de trois types de substrat (Si, 4H-SiC et le Saphire) sur les caractéristiques de sorties Ids-Vds.

III.2 Description du logiciel SILVACO

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

- ✚ La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme3, SSupreme4, etc.

- ✚ La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les HEMTs, les transistors bipolaires..., réalisée 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 bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semiconducteurs 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, etc, autant de données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité de courant pour les électrons et les trous 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 de deux parties :

- ⇒ Une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...).
- ⇒ Une partie formée des modèles physiques des composants semiconducteurs les plus récents.

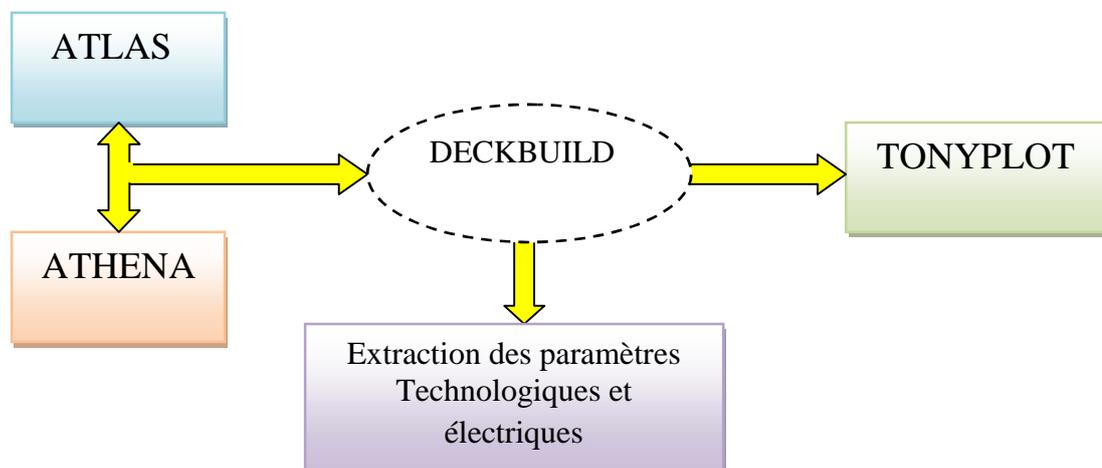


Figure III-1 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par SILVACO

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 : environnement où est défini le programme de simulation. La structure et son maillage peuvent également être définis dans Deckbuild (voir l'annexe pour plus de détails sur les commandes propres à la logique de programmation d'Atlas).
- ⇒ TONYPLOT : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...),

III.3 Description de la structure à calibrer dans le but de la simuler

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, En fait, cette structure a été réalisée par Crosslight [31].

Le but de ce projet de fin d'études est de concevoir un transistor HEMT utilisant la technologie Nitrure de Gallium. Donc, la topologie de la structure étudiée est celle d'un HEMT $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ épitaxié sur un substrat 4H-SiC (polytype 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 $6,43 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

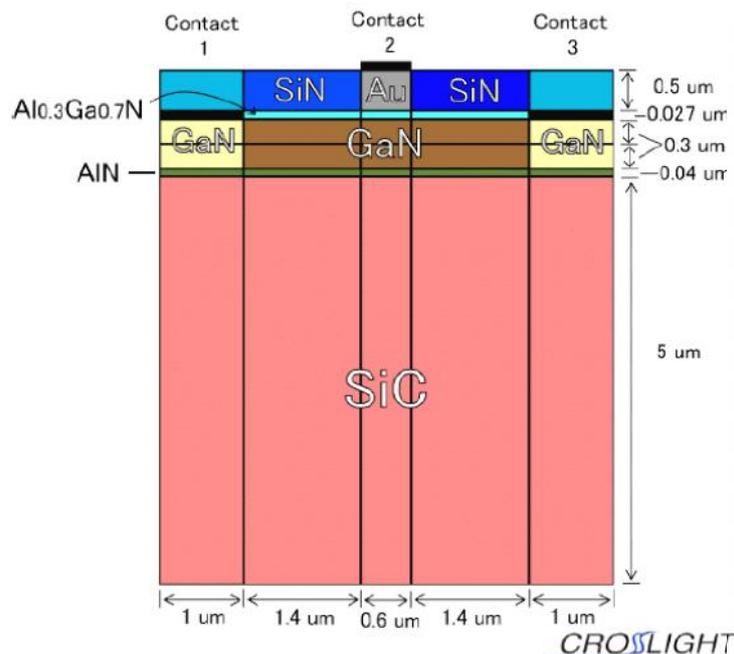


Figure III.2 : Topologie de la structure HEMT $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ simulée.

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
Bande interdite (eV)	3,96	3,39	1,12	6,2	3,23	1,12
Conductivité thermique (W/k.cm)	0,25	1,3	0,35	2,85	4,9	1,3
Permittivité relative	9,55	10	7,5	8,5	9,7	11,8
Affinité des électrons (eV)	3.169	4,1	1,02	1.9	4,05	4,05
Mobilité des électrons (cm ² /Vs)	985,5	1350	-	300	460	1450
Mobilité des trous (cm ² /Vs)	13,3	130	-	14	124	450

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

III.3.1 Maillage

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Pour obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie en fonction des variations des grandeurs physiques. 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.

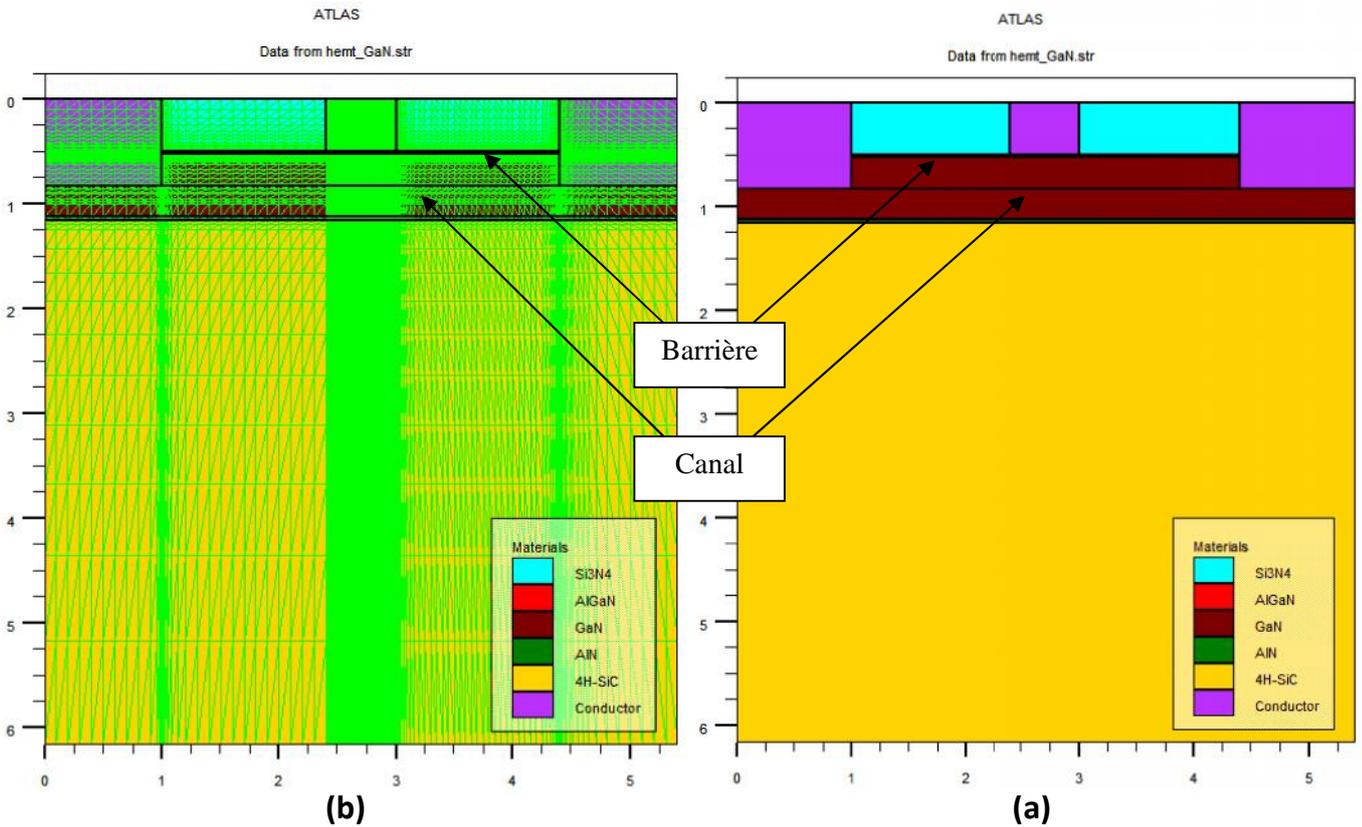


Figure III.3 : Structure du transistor HEMT AlGaIn/GaN simulée sous SILVACO/ATLAS
 (a) Sans maillage (b) Avec maillage

III.3.2 Diagramme de bandes d'énergie

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

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

Or, on connaît la valeur de l'affinité électronique χ du matériau Al_{0,3}Ga_{0,7}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 qui sera de la forme présentée à la figure III.4 (cette figure est obtenue par simulation de notre structure calibrée).

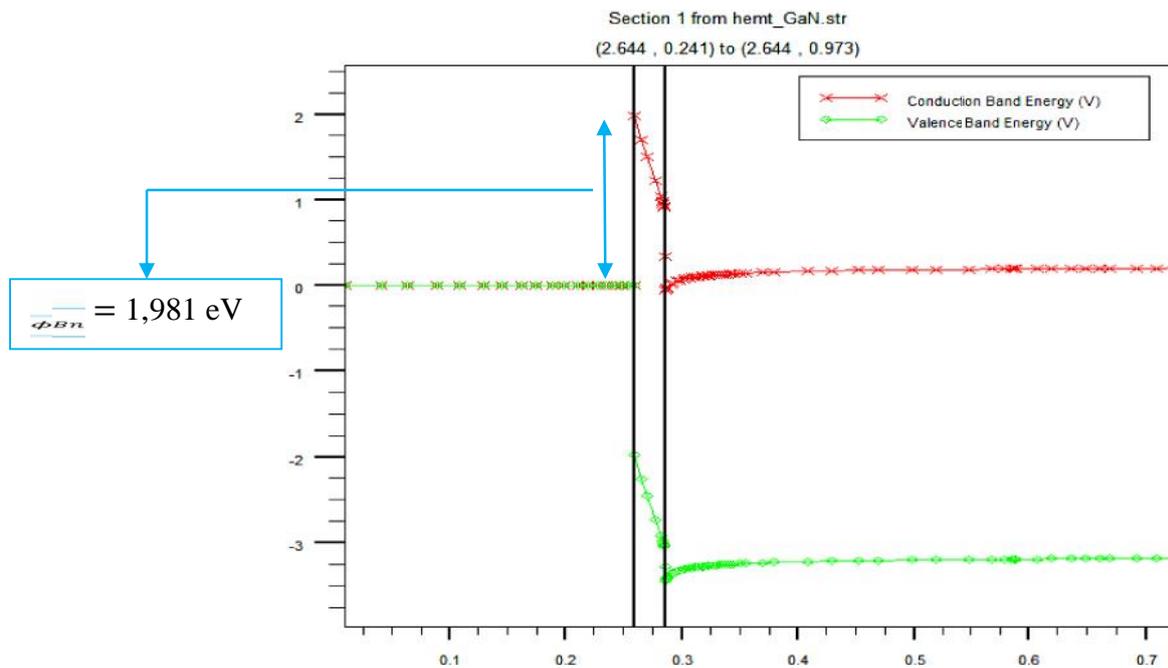


Figure III.4 : Diagramme de bandes d'énergie du HEMT AlGaIn/GaN.

Ce diagramme des bandes est correct, la hauteur de barrière (marquant la frontière entre le contact Schottky et le barreau de semi-conducteur) a la valeur souhaitée. De plus, les courbures des bandes semblent bonnes car elles correspondent à ce que l'on attend en théorie.

III.4 Résultats et interprétations

III.4.1 Paramétrage DC

L'intérêt premier de simulation est de pouvoir effectuer une comparaison entre les simulations obtenues à partir du logiciel Atlas et les résultats attendus présentés dans [31] et [32] de manière à valider les paramètres de calibrage qui ont été choisis pour caractériser et définir la structure sous Atlas/SILVACO.

III.4.1.1 Caractéristiques de sortie Ids-Vds

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

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

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

Par ailleurs, nos caractéristiques simulées (figure gauche) apparaissent en accord avec les caractéristiques de la référence [31] (figure III.6 droite).

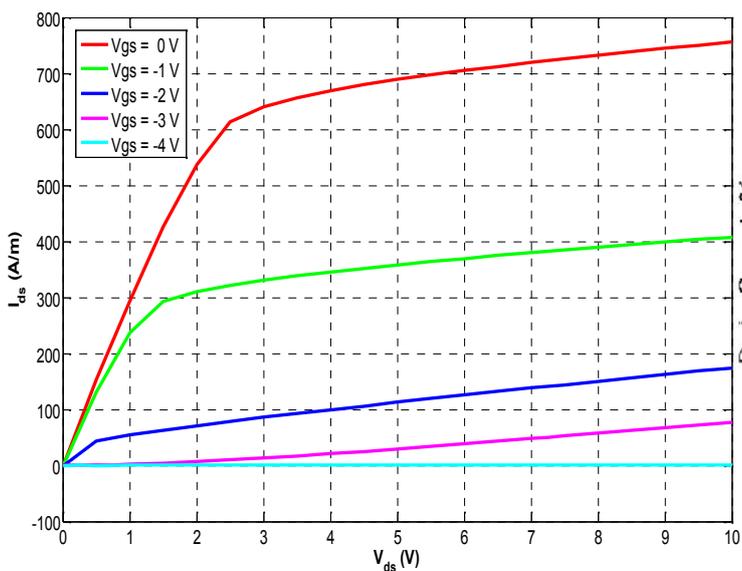


Figure III.5 : Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} variant de 0 à -4V avec un pas de 1V sous SILVACO/ATLAS

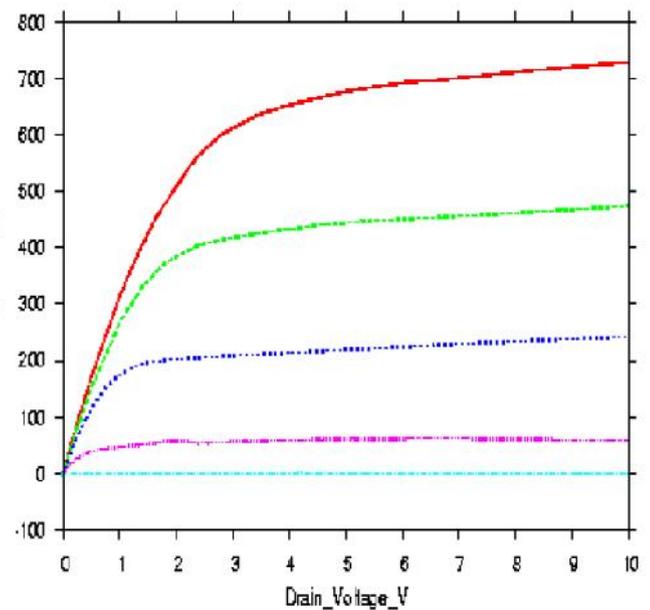


Figure III.6 : Caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} variant de 0 à -4V avec un pas de 1V associé à la référence [31]

III.4.1.2 Caractéristiques de transfert I_{ds} - V_{gs}

Nous avons représenté sur la figure III.7 les caractéristiques de transfert simulées qui consiste à tracer l'évolution du courant drain-source I_{ds} , en fonction de tension grille-source V_{gs} pour une tension drain-source V_{ds} , donnée (1, 4 et 8 V).

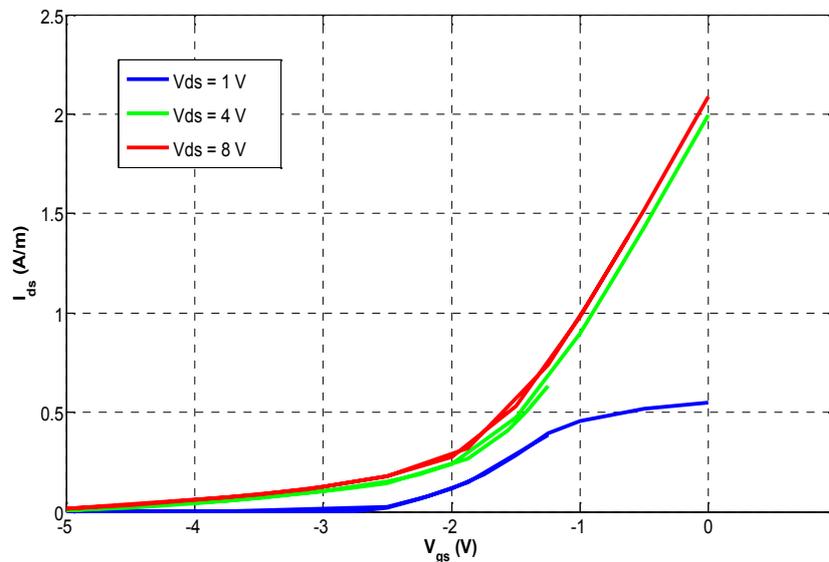


Figure III.7 : Caractéristique de transfert I_{ds} - V_{gs} d'un HEMT $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ pour $V_{ds} = 1V, 4V, 8V$

La caractéristique de transfert est définie par deux grandeurs:

- La tension de seuil V_{TH} , qui définit la tension de grille nécessaire pour pincer le canal.
- La transconductance G_m , qui définit le gain de transfert: dI_{ds}/dV_{gs} à un V_{ds} donné.

a) *La tension de seuil V_{TH} :*

V_{TH} représente la tension à appliquer sur la grille pour dépléter complètement le canal et ainsi pincer le canal. La différence de potentiel, ddp , entre le contact de grille et le canal induite 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.

Mais si la définition de la tension de seuil est identique, les méthodes d'obtention varient d'un laboratoire à l'autre. Nous allons décrire ici la plus fréquente :

« Méthode de la tangente » : elle consiste à tracer la caractéristique $I_{ds} = f(V_{gs})$. On considère alors la partie quasi linéaire de la courbe et la tension de seuil V_{TH} correspond alors à l'intersection avec l'axe des abscisses de la tangente à la droite (figure III.8).

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 :

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

Graphiquement G_m est défini comme étant la pente de la caractéristique I_{ds} - V_{gs} (figure III.8). Ces grandeurs (G_m et V_{TH}) sont représentées sur la figure III.8 qui illustre les caractéristiques de transfert pour chaque polarisation de V_{ds} (1, 4 et 8 V).

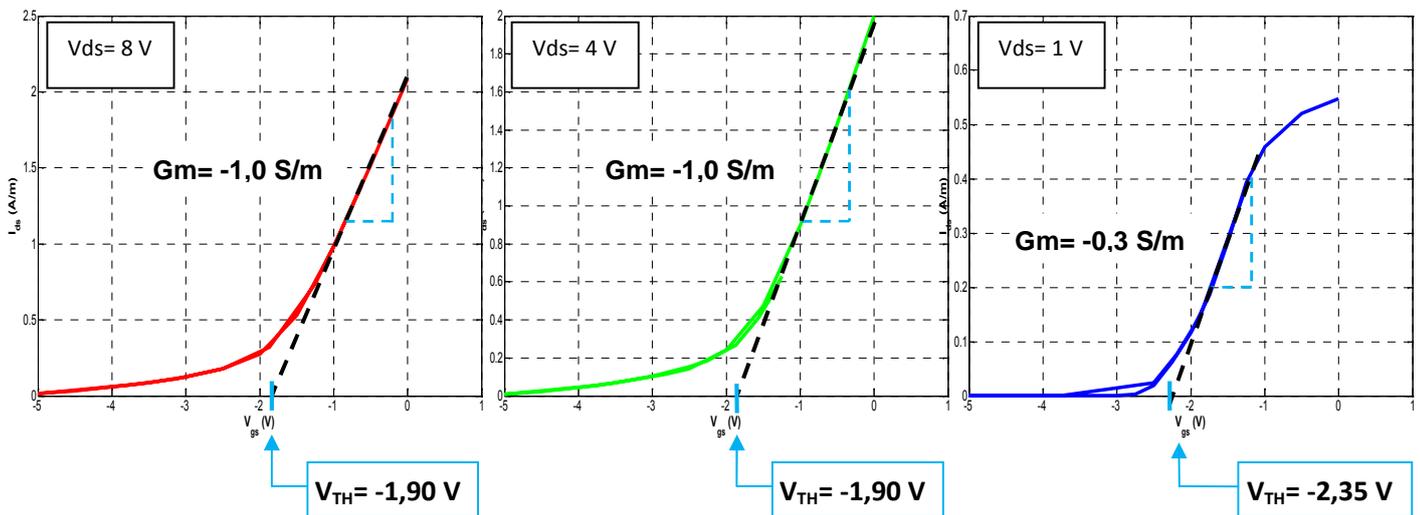


Figure III.8 : Caractéristique de transfert I_{ds} - V_{gs} avec les grandeurs G_m et V_{TH} pour $V_{ds} = 1, 4$ et 8 V.

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 figures III.9 représente la variation du courant drain source I_{ds} en fonction de la tension drain-source V_{ds} pour différentes longueurs des grilles L_g ($0,5 \mu\text{m}$, $0,6 \mu\text{m}$ et $0,7 \mu\text{m}$) dans le HEMT AlGaN/GaN. On constate que le courant drain de saturation diminue avec l'augmentation de la longueur de grille (pour $L_g = 0,5 \mu\text{m}$ $I_{ds} = 800$ A/m et pour $L_g = 0,7 \mu\text{m}$ $I_{ds} = 710$ A/m). En

effet, l'extension latérale de la zone des charges d'espace conduit à un allongement du canal conducteur tout en s'amincissant; ce qui limite le passage des électrons. Cela veut dire que plus la grille est longue, plus le contrôle par la grille est efficace; par contre ceci provoque une augmentation de la capacité grille source C_{gs} et par conséquent une dégradation des performances en terme de fréquences F_{MAX} (fréquence d'oscillation) et F_T (fréquence de transition).

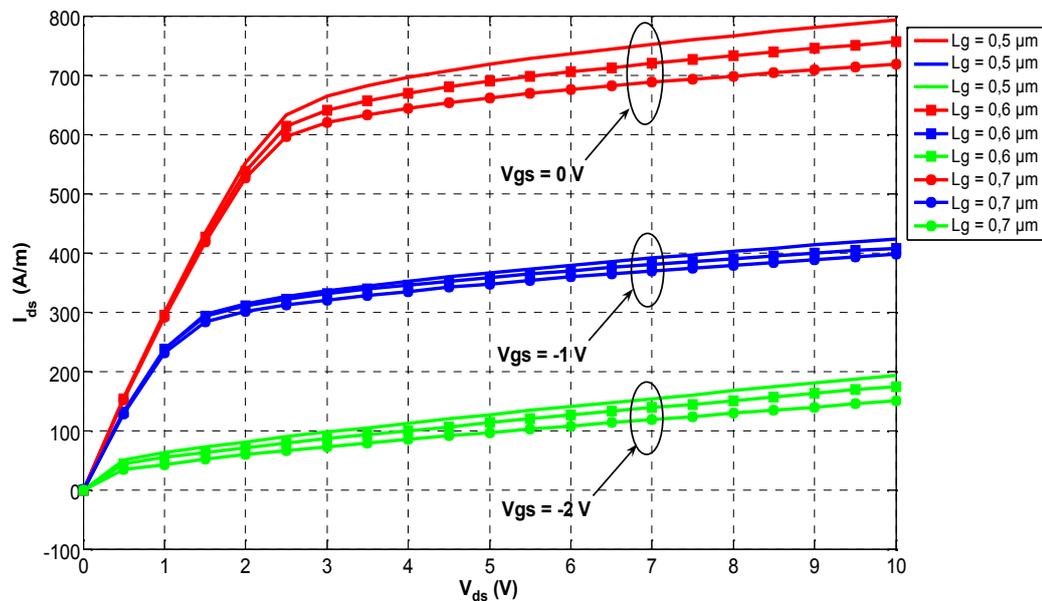


Figure III.9 : Influence de la longueur de grille sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois longueurs de grille différentes ($L_g = 0.5, 0.6$ et $0.7 \mu\text{m}$)

III.4.2.2 Effet de la distance grille drain

Les figures III.10 représente la variation du courant drain source I_{ds} en fonction de la tension drain-source V_{ds} pour différentes distances grille-drain L_{gd} (1.2 μm , 1.4 μm et 1.6 μm). On constate que le courant drain de saturation diminue avec le déplacement de la grille vers le drain (diminution de la distances grille-drain), par exemple : pour $L_{gd} = 1.6 \mu\text{m}$ $I_{ds} = 780$ A/m et pour $L_{gd} = 1.2 \mu\text{m}$ $I_{ds} = 720$ A/m.

On peut conclure que les valeurs du courant drain-source pour différents points de polarisation dépendent de la position de la grille donc l'augmentation de la distance grille-drain engendre une augmentation de la puissance délivrée par le transistor HEMT en GaN.

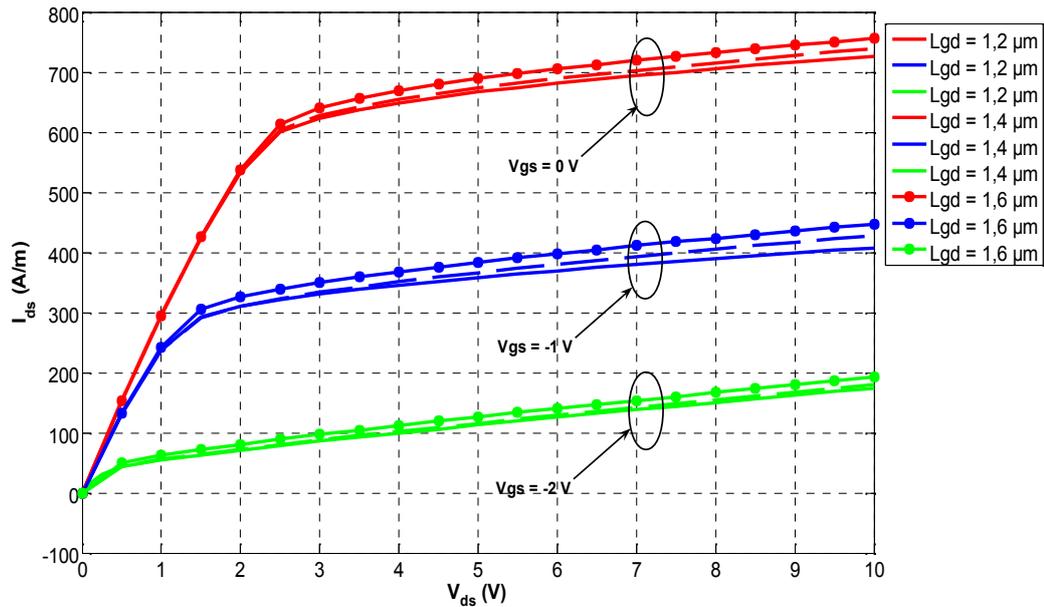


Figure III.10 : Influence de la distance grille-drain sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois distances différentes ($L_{gd} = 1.2, 1.4$ et 1.6 μm)

III.4.2.3 Effet de l'épaisseur de la couche barrière

Nous représentons dans cette partie de simulation l'effet de l'épaisseur de la couche barrière (couche $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$) sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} simulées dans la structure HEMT $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$. La figure III.11 montre les caractéristiques de sortie pour une épaisseur variant de $0,026$ μm à $0,028$ μm . On remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la couche barrière engendre une augmentation du courant drain-source I_{ds} .

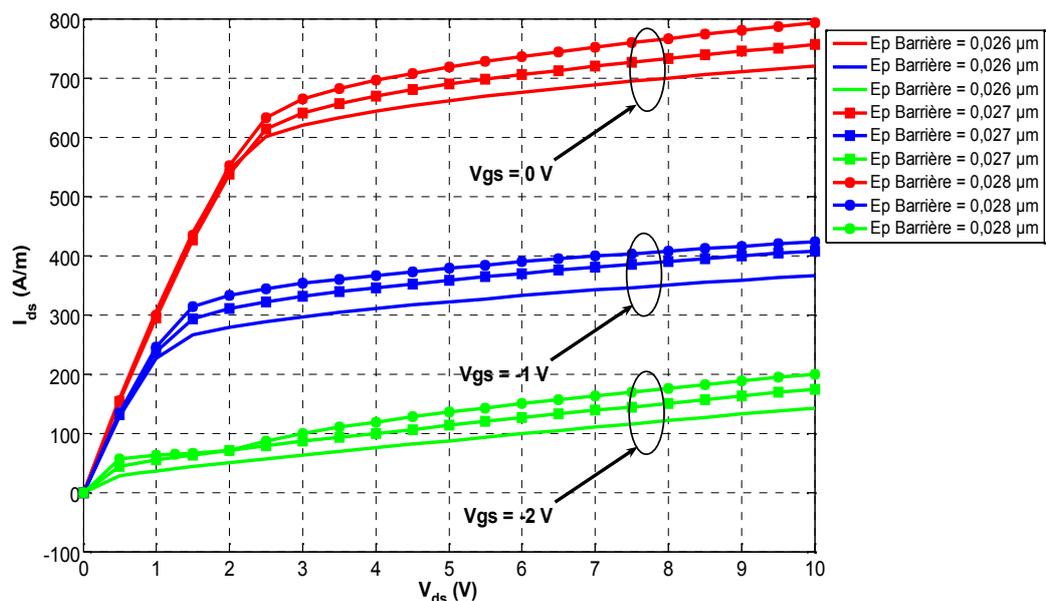


Figure III.11 : Influence de l'épaisseur de la couche barrière sur les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois épaisseurs différentes de la couche barrière ($0.026, 0.027$ et 0.028 μm).

III.4.2.4 Effet de l'épaisseur du canal

Afin d'estimer l'effet de l'épaisseur de la couche GaN (canal) sur les caractéristiques Ids-Vds dans la structure HEMT $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$. La figure II.12 montre les caractéristiques de sortie pour une épaisseur variant de $0,4 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$.

Les effets sur le courant drain-source sont négligeables. En raison de la faible épaisseur de la couche AlGaN, environ $0,027 \mu\text{m}$, il peut paraître logique que l'influence de l'épaisseur de la couche GaN devienne négligeable.

Une diminution de l'épaisseur de la couche GaN provoque une diminution des longueurs des contacts ohmiques (source et drain) et donc une diminution du courant drain Ids.

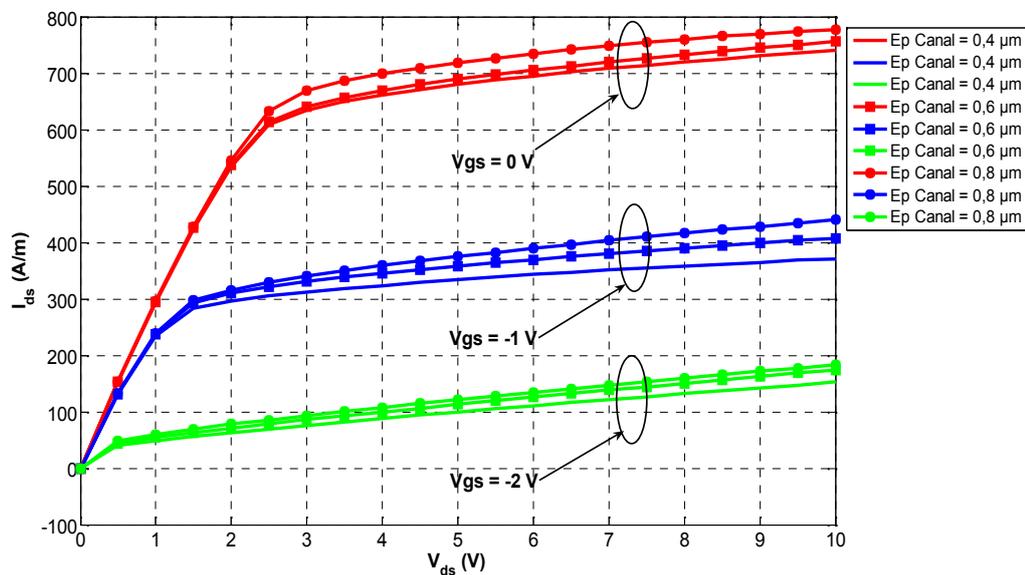


Figure III.12 : Influence de l'épaisseur du canal sur les caractéristiques de sortie Ids-Vds pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V avec trois épaisseurs différentes du canal ($0,4, 0,6$ et $0,8 \mu\text{m}$).

III.4.2.5 Effet de la température sur les caractéristiques de sorties

Nous représentons dans la figure III.13 le réseau direct $I_{ds}=f(V_{ds})$ simulé d'un transistor HEMT $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}/\text{GaN}$ en fonction de la température dans une gamme de température allant de 300 à 900 K avec un pas de 100 K.

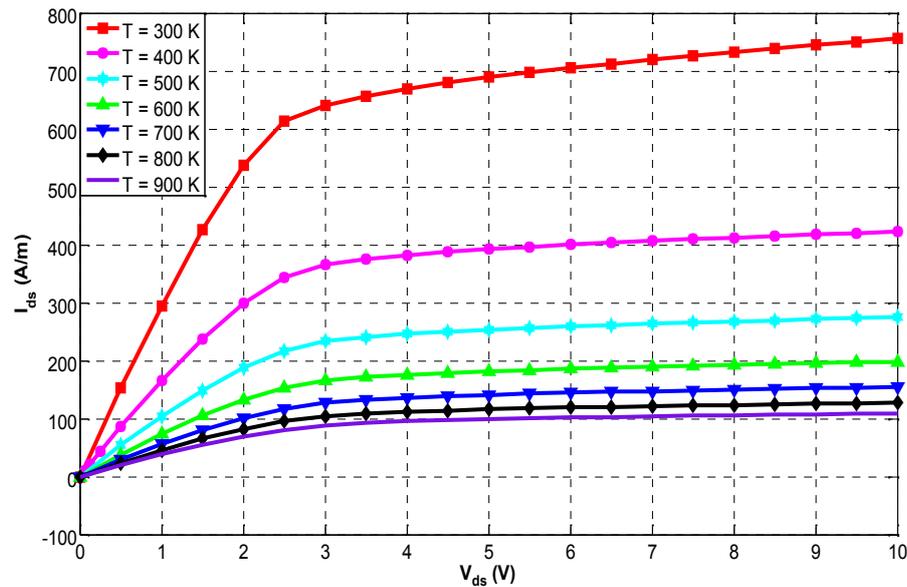


Figure III.13 : Influence de la température sur les caractéristiques de sortie Ids-Vds pour $V_{gs} = 0$ V (T varie de 300 à 1000 K avec un pas de 100 K).

Les performances et la fiabilité d'un transistor sont fortement influencées par la température. La conduction le long du canal étant due aux porteurs majoritaires, elle ne sera modifiée par la température que pour une variation de certains paramètres (mobilité des électrons, la hauteur de barrière Schottky, la vitesse de saturation, la constante diélectrique et même la résistance spécifique des contacts ohmiques).

Si la température croît, l'agitation thermique des porteurs croît, le nombre des porteurs croît également et par conséquent la mobilité des porteurs majoritaires du canal diminue, ce qui provoque une dégradation de courant Ids (voir la figure III.13). De même la hauteur de barrière de potentiel diminue quand la température augmente, donc la zone désertée se rétrécit, par contre la largeur du canal augmente et par conséquent le courant drain décroît.

Ces anomalies présentes dans les transistors HEMT $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN / 4H-SiC$ peuvent limiter leurs performances puisque ces composants sont destinés à des applications dans le domaine micro-ondes.

Finalement nous pouvons constater que le HEMT $Al_{0.3}Ga_{0.7}N / GaN / 4H-SiC$ peut fonctionner à haute température.

III.4.2.6 Effet de la température sur les caractéristiques de transfert

Dans le but de suivre l'évolution de la tension de seuil V_{TH} en fonction de la température (allant de 300 à 550 K avec un pas de 50 K), nous traçons les caractéristiques I_{ds} - V_{gs} pour $V_{ds} = 8$ V (voir la figure III.14).

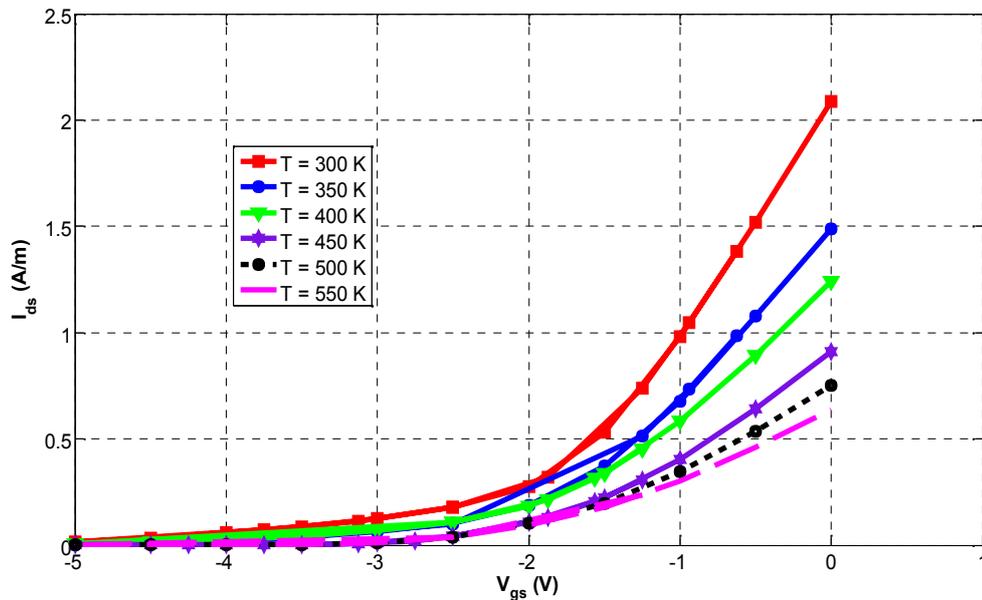


Figure III.14 : Influence de la température sur les caractéristiques de transfert I_{ds} - V_{gs} pour $V_{ds} = 8$ V (T varie de 300 à 550 K avec un pas de 50 K).

Température (K)	300	350	400	450	500	550
Tension de seuil V_{TH} (V)	-1,90	-1,85	-1,81	-1,77	-1,75	-1,72

Tableau III.2 : Evolution de la tension de seuil en fonction de la température dans le HEMT en GaN.

On remarque que l'augmentation de température provoque :

- ⇒ une dégradation du courant drain-source I_{ds} (voir la figure III.14).
- ⇒ un décalage de la tension de seuil V_{TH} vers les valeurs positives (voir le tableau III.2).

Ceci associé à la décroissance de la mobilité des électrons issue de l'augmentation de la température qui influe sur les caractéristiques du courant en plus de la relaxation qui agit directement sur la valeur de la tension de seuil V_{TH} .

III.4.3 Effet du substrat sur les caractéristiques de sorties

Les principaux substrats pour les transistors HEMTs AlGaIn/GaN sont : **Le substrat saphire (Al_2O_3)** autorise des productions sur de larges surfaces de plaquettes, mais est souvent à l'origine de dislocations lors de l'épitaxie des composants (désaccord de maille important avec les matériaux GaN nécessitant des croissances de la couche tampon), ce qui affecte les performances en bruit non-linéaire. **Le substrat silicium (Si)** est intéressant de par sa compatibilité technologique (SiGe, optoélectronique GaN avec dispositifs Si ...) associée à la réduction des coûts de fabrication pour des applications 'grand public'. **Le substrat carbure de silicium (SiC)** tire le double avantage d'un faible désaccord de maille avec les matériaux GaN ou AlN (3% contre plus de 13% pour le Saphir) et d'une excellente conductivité thermique de l'ordre de 4,9 W/K.cm (pour polytype 4H, voir tableau III.1) : ce dernier point autorise des polarisations plus importantes que pour les autres substrats, en limitant les phénomènes de dégradation thermique.

Nous avons représenté sur la figure III.15 l'effet du substrat (4H-SiC, Saphire Al_2O_3 et Silicium) sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour les points de polarisation $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V.

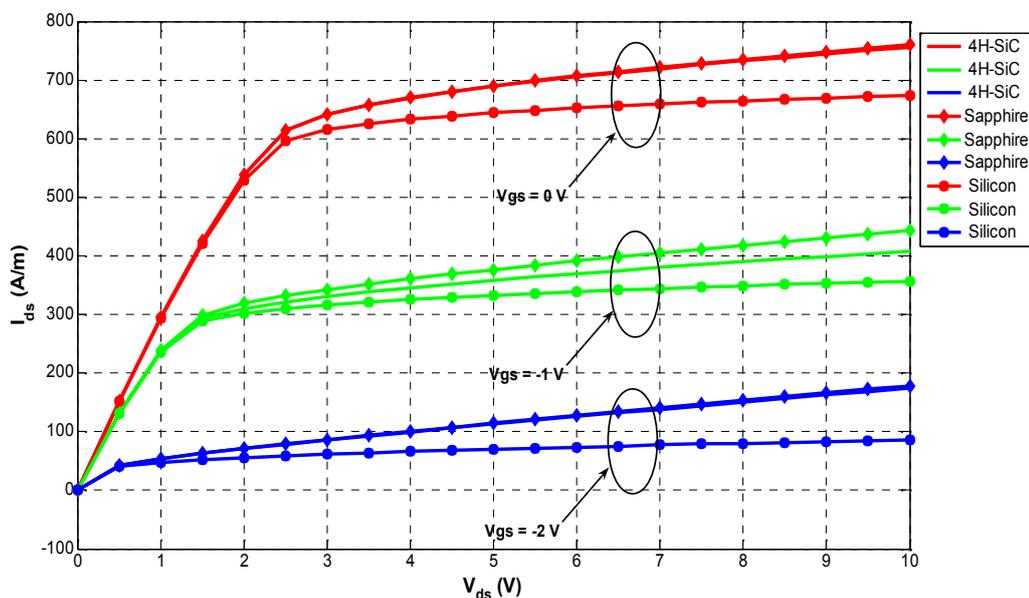


Figure III.15 : Influence du substrat (4H-SiC, Saphire et Silicium) sur les caractéristiques de sortie I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0, -1$ et -2 V.

Cette étude fait état d'une comparaison de transistors de type HEMT réalisés sur trois substrats différents (silicium (Si), saphir (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 4H-SiC et Saphir Pour de les deux polarisations $V_{gs} = 0$ et -2 V possède le même courant I_{ds} qui est supérieur au courant relevé sur les substrats Si.

III.4.4 Distribution des grandeurs électriques dans le HEMT AlGaIn/GaN/4H-SiC

III.4.4.1 Carte du potentiel

Pour mieux connaître le profil de distribution du potentiel dans la région de la barrière, nous avons tracé les cartes 2D (figures III.16 et III.17) de potentiel de réseau dans le HEMT AlGaIn/GaN/4H-SiC.

La polarisation du composant électronique en régime statique se fait par une tension de grille $V_{gs} = 0$ V (figure III.16) et $V_{gs} = -4$ V (figure III.17) et pour une tension de drain $V_{ds} = 10$ V.

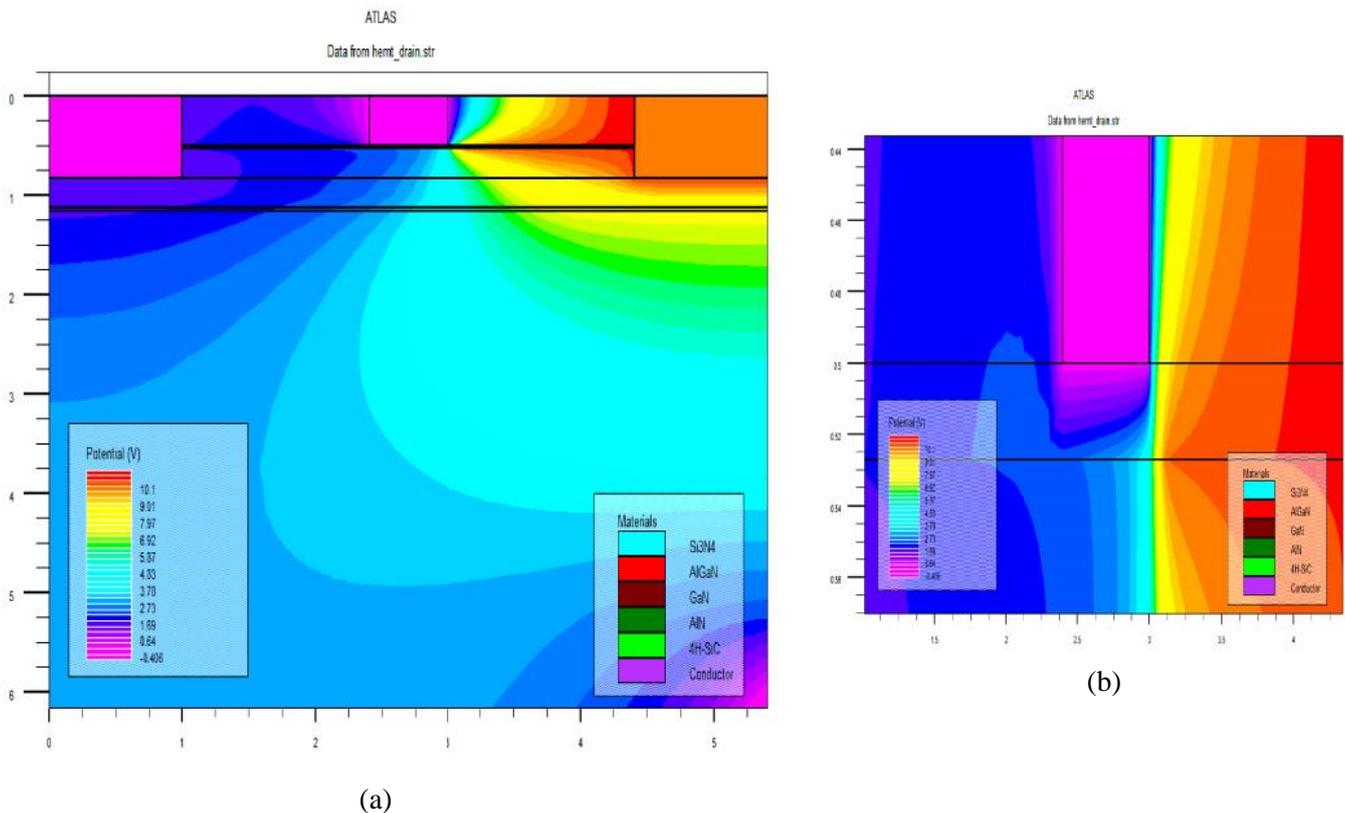


Figure III.16 : Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = 0$ V.

(a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.

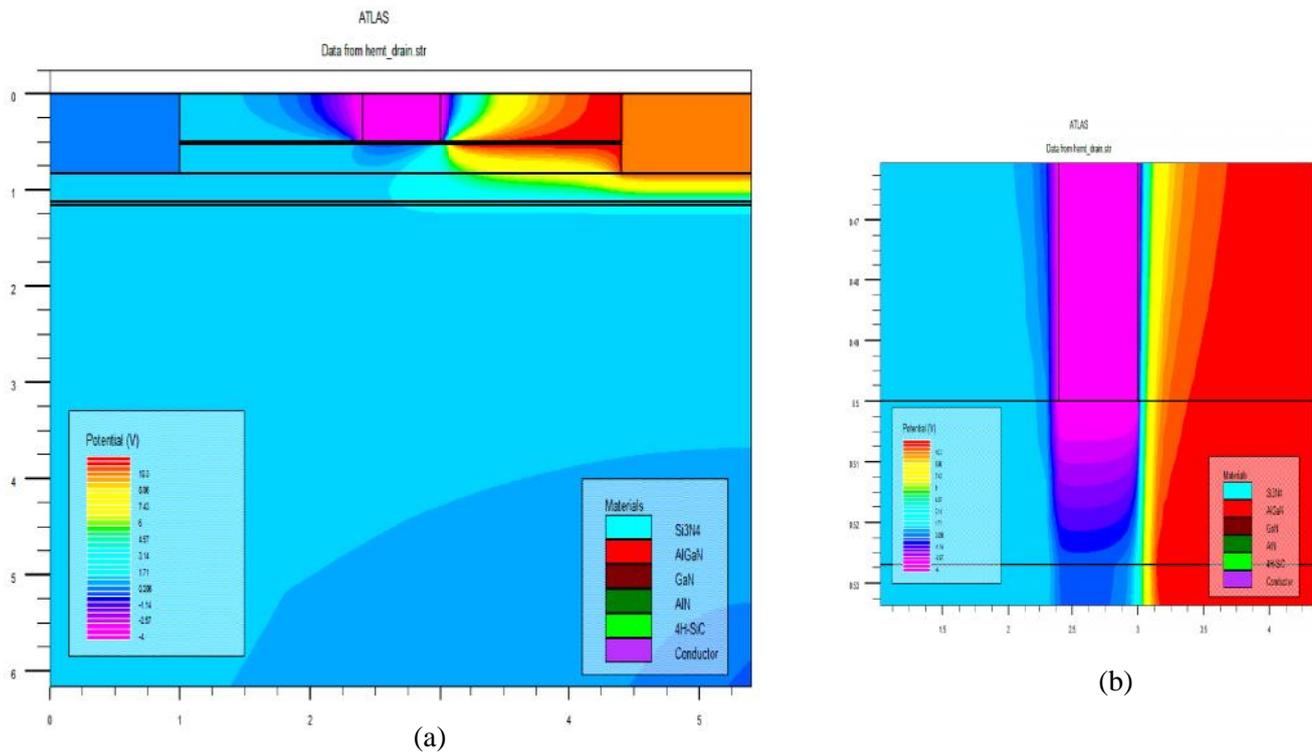


Figure III.17 : Carte 2D de potentiel de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = -4$ V.

(a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.

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 bas du substrat. 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 $V_{gs} = 0$ V a le même comportement que celui de $V_{gs} = -4$ 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, après elle croit jusqu'à des valeurs positives pour atteindre la tension de polarisation du drain.

III.4.4.2 Carte de concentration en électron

Pour mieux connaître le profil de distribution de la concentration en électron dans la région de la barrière, nous avons tracé les cartes 2D (figures III.18 et III.19) de la concentration en électron de réseau dans le HEMT AlGaIn/GaN/4H-SiC. La polarisation du composant électronique en régime statique se fait par une tension de grille $V_{gs} = 0$ V (figures III.18) et $V_{gs} = -4$ V (figures III.19). La tension de drain appliquée est de 10 V.

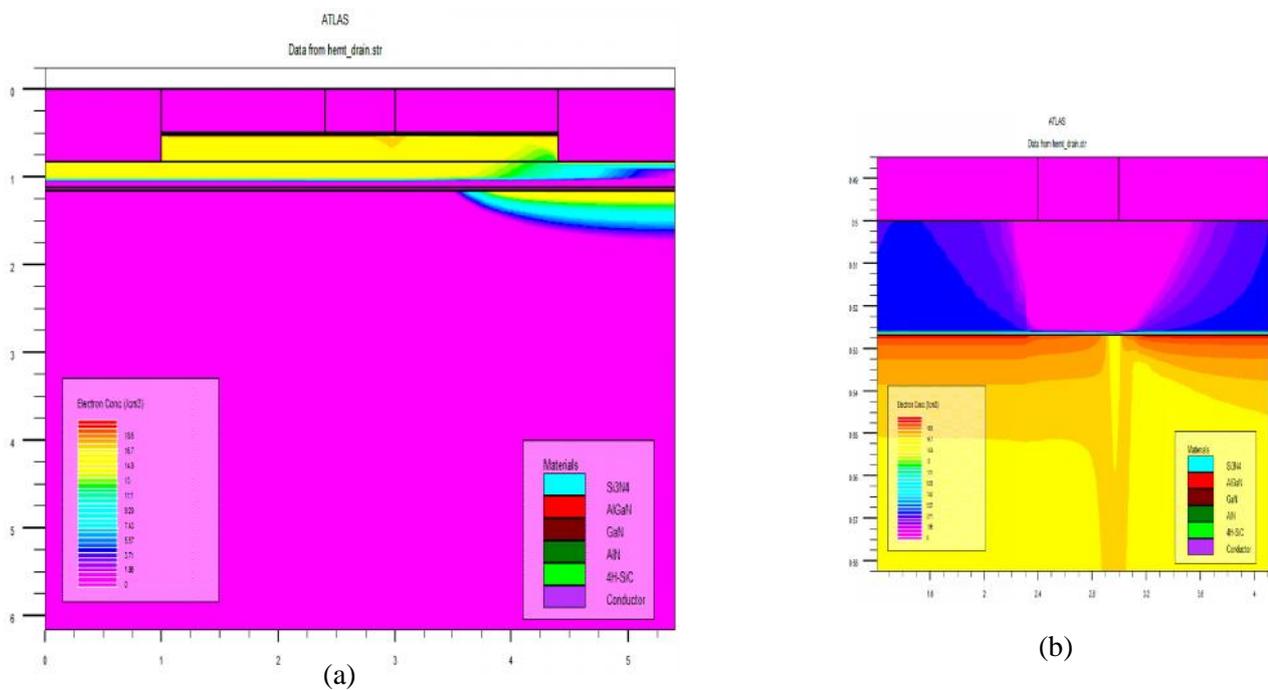


Figure III.18 : Carte 2D de la concentration en électron de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = 0$ V : (a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.

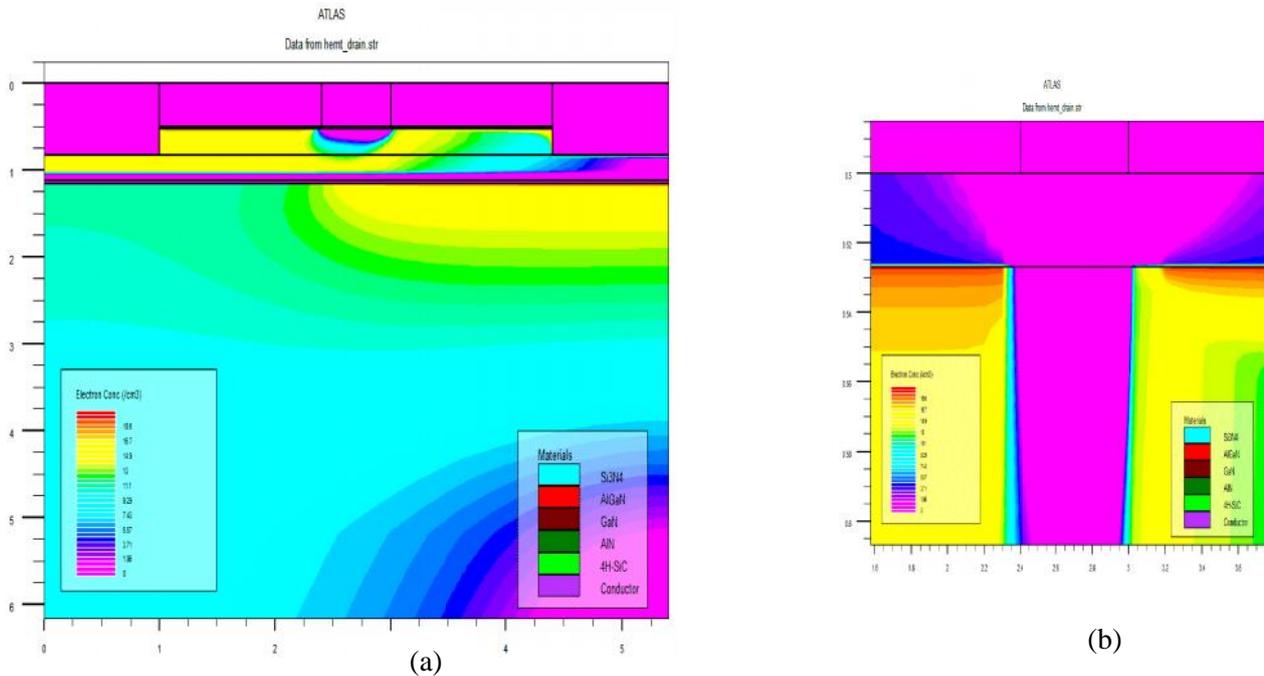


Figure III.19 : Carte 2D de la concentration en électron de réseau pour une tension appliquée de 10 V, $V_{gs} = -4$ V : (a) le composant entier et (b) zoom proche de la couche barrière.

On peut remarquer une augmentation de la concentration en électron de la région canal vers la région barrière, quelle que soit la valeur de V_{gs} . Ces courbes montrent aussi que la concentration en électron augmente avec la polarisation de grille.

A l'interface de la couche GaN (canal), la concentration en électron est d'environ $18,6/\text{cm}^3$. Puis la concentration diminue progressivement jusqu'à $1,86/\text{cm}^3$ vers le substrat. On remarque aussi que la distribution de concentration sur les régions drain, grille, Si_3N_4 et source est très stable pour une valeur constante égale à $1,86/\text{cm}^3$.

La concentration en électron diminue d'une manière très rapide quand on va de la zone canal vers le bas du substrat.

On observe aussi que suivant les tensions de polarisation, la concentration en électron pour $V_{gs} = 0\text{V}$ a le même comportement que celui de $V_{gs} = -4$ V.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons regroupé l'ensemble des résultats des simulations statiques obtenus par le simulateur de dispositif ATLAS de SILVACO.

Dans un premier temps, nous avons validé les paramètres de calibrage du HEMT AlGa_N/Ga_N/4H-SiC simulé sous le module ATLAS. Cette étape de conception est indispensable pour définir précisément le comportement des électrons dans le canal. La définition de chacun des paramètres intervenant dans la mise en œuvre du transistor est capitale et impose une certaine rigueur car chacun d'entre eux ont leur rôle à jouer dans le comportement du composant.

Dans un second temps, nous avons étudié l'effet de certains paramètres technologiques sur les caractéristiques DC du HEMT AlGa_N/Ga_N/4H-SiC tels que la longueur de grille, l'épaisseur de la couche barrière, la distance grille-drain, l'épaisseur du canal, la température et le substrat. Les résultats de simulations montrent que les meilleures performances de ce composant sont obtenues pour une épaisseur importante de la couche barrière et canal, pour des longueurs de grilles réduites et pour un large distance grille-drain. L'ensemble de ces phénomènes influent sur le comportement du composant et entraîne des effets néfastes sur les performances en puissances.

L'effet de température sur les performances du transistor a été faite. Cet effet a pour conséquence une dégradation des propriétés électriques qui se traduit par une chute de courant drain source. Cette étude nous a permis d'estimer la variation de la tension de seuil pour une gamme de température définie.

Ainsi, nous avons étudié l'effet de la nature du substrat sur le comportement statique du transistor. Les résultats obtenus montrent que les valeurs du courant drain source du HEMT en 4H-SiC sont très élevées par rapport à celles du HEMT en Si, ce qui confirme la suprématie du 4H-SiC sur le Silicium du point de vue puissance et par conséquent atteste la validité de notre modèle paramétré.

Nos résultats de simulations nous ont permis de prévoir le comportement physique à travers les paramètres technologiques et électriques du composant au moyen des différentes simulations par ATLAS, et par conséquent elles nous donnent l'opportunité d'améliorer les performances du composant électronique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce paragraphe vient parachever ce projet de fin d'études. Ce projet constitue nos tous premiers pas dans le monde de la recherche.

En effet, dans ce travail on a contribué à l'étude des structures à base de Nitrure de Gallium, spécialement les HEMTs AlGa_N/Ga_N, sur trois aspects différents :

Le premier concerne l'étude générale sur les transistors à effet de champs et leur évolution jusqu'au HEMT. Après avoir rappelé les propriétés intrinsèques du matériau Ga_N 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 Ga_N qui est de 3.39 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 Ga_N s'ajoute à ses qualités. 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. Cette première étude permis de quantifier les performances en puissance et en fréquence de ce type de composant, mais également d'en déterminer les limites fondamentales et technologiques.

C'est de ce fait là qu'on a entamé le deuxième aspect de notre étude et qui concernera la caractéristiques électriques des HEMTs AlGa_N/Ga_N. L'intérêt a été porté particulièrement sur les propriétés physiques des contacts ohmiques et Schottky et leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons présenté une étude détaillée sur la topologie de HEMT AlGa_N/Ga_N et leur diagramme des bandes d'énergie. Après, nous avons déterminé la quantité de charge à l'interface AlGa_N/Ga_N et à l'interface AlGa_N/Ga_N en Ga_N contraint en tension.

Enfin et après un aperçu des principes fondamentaux des HEMTs AlGa_N/Ga_N, le troisième aspect concernera l'étude par simulation bidimensionnel des effets influent sur le comportement physique à travers les paramètres technologiques, et électriques du composant au moyen des différentes simulations par ATLAS, et par conséquent elles nous donnent l'opportunité d'améliorer les performances du composant électronique.

Dans un premier temps, nous avons validé les paramètres de calibrage de la structure simulée. Tenant en compte les caractéristiques de sortie et de transfert. Ensuite, nous avons étudié l'effet des paramètres géométriques sur les caractéristiques DC du HEMT AlGa_N/Ga_N tel que l'effet de la longueur de grille, la distance grille/drain, l'épaisseur de la couche barrière et du canal. Les résultats de simulation montrent que les meilleures performances de ce composant sont obtenues pour une épaisseur importante de la couche barrière et canal, pour des longueurs de grilles

réduites et pour un large distance grille-drain. L'ensemble de ces phénomènes influent sur le comportement du composant et entraîne des effets néfastes sur les performances en puissances.

A fin de d'étudier l'effet de température sur les performances du transistor une analyse pour différentes températures a été faite. Ces effets ont pour conséquence une dégradation des propriétés électriques qui se traduit par une chute de courant I_{ds} . Cette étude nous a permis d'estimer la variation de la tension de seuil pour une gamme de température définie.

Ensuite, nous avons étudié l'effet de la nature du substrat sur le comportement statique du transistor. Les résultats obtenus montrent que les valeurs du courant drain source du HEMT en 4H-SiC sont très élevées par rapport à celle du HEMT en Si, ce qui confirme la suprématie du 4H-SiC sur le Silicon du point de vue puissance et par conséquent atteste la validité du notre modèle numérique paramétré.

Ce projet vient clore efficacement nos études à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen et notre année de master car il nous a permis d'appréhender toutes les étapes théoriques et de conception que le chercheur doit franchir pour atteindre ses objectifs.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **W. SHOCKLEY**, "A unipolar field effect transistor ". Proc. Of the IRE, vol.40, pp.1365- 1376, 1952.
- [2] **Souad BELHOUR**, "Simulation du transistor à effet de champ a grille Schottky à l'arséniure de gallium MESFET GaAs, " Mémoire de magister, Université de Constantine, 2007.
- [3] **Henry MATHIEU**, " physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", Edition MASSON (2004).
- [4] **Mohamed Amir ABDI**, "Modélisation de l'inverse de la pente sous seuil des transistor FETs nanométriques", Mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [5] **Hilde Muller et Jan Nicolas Myklebust**, "Les composants actifs hyperfréquences".
Site web: www.etud.insa-toulouse.fr/~sroy/cce/Transistors_HF.doc
- [6] **Sandra DE MEYER**, "Etude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium : Conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande ", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2005.
- [7] **M. Gassoumi**, "Etude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN", Thèse de Doctorale, INSA-Lyon, juin 2006.
- [8] **E. Byk**, "Méthodes d'analyse couplés pour la modélisation de composants et modules millimétriques de forte puissance", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2002.
- [9] **F.STERN, S.D.SARMA**, "Electron energy levels in GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructures", Phys. Rev.B, Vol.30, pp. 840-848, 1984.
- [10] **R.CASTAGNE, J.P.DUCHEMIN, M.GLOANEC, C.RUMELHARD**, "Circuits integres en arséniture de gallium", Ed. Masson, Paris, 1989.
- [11] **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.
- [12] **W.L. PRIBBLE, J.W. PALMOURS, S.T. SHEPPARD, R.P. SMITH, S.T. ALLEN, et al.**
« Application of SiC MESFETs and GaN HEMTs in power amplifier design », IEEE MTTs International Microwave Symposium Digest, Vol. 3, pp. 1819-1822, 2002.
- [13] **Audrey PHILIPPON-MARTIN**, "étude d'une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium " Thèse de Doctorat, Université Limoges, 2007.
- [14] **Y. C. Yeo**, "Electronic Band Structures and Effective Mass Parameters of Wurtzite GaN and InN", J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 3, pp. 1429-1436, 1998.

-
- [15] **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.
- [16] **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.
- [17] **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.
- [18] **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.
- [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 AlGaIn/GaN Heterostructures", J. Appl. Phys. Vol. 85, No. 6, pp. 3222-3233, 1999.
- [20] **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.
- [21] **Site web**: www.itrs.net/reports, 2012.
- [22] **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.
- [23] **F. BERNARDINI et Al**, «Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides », Physical review B, Vol.56, No. 16, pp, 10024-10027, 1997.
- [24] **C. T. Lee, H. W. Kao**, "Long-term thermal stability of Ti/Al/Pt/Au Ohmic contacts to n-type GaN", Applied Physics Letters, Vol. 76, No. 17, pp. 2364-2366, Avril 2000.
- [25] **Low Resistance Ti/Al/Mo/Au Ohmic Contacts for AlGaIn/GaN HFETs**. D. Selvanathan, L. Zhou, V. Kumar, and I. Adesida. Phys. Stat. Sol. (a) Vol. 194, No. 2, pp 583-586, 2002.
- [26] **E Mu oz, A. Jiménez, J. A. Garrido, J. M. Tirado, R. Ranchal, F. Calle, E. Calleja**, "Gallium nitride substrates and components", ESA Contract 13519/99/NL/MV: GaN.
-

- [27] **D. Qiao, L. Jia, L. S. Yu, P. M. Asbeck, S. S. Lau, S.-H. Lim, Z. Liliental-Weber, T. E. Haynes and J. B. Barner**, “Ta-based interface ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 10, pp. 5543-5546, Mai 2001.
- [28] **Pierre POUVIL** «Composants semi-conducteurs micro-ondes» MASSON, 1994.
- [29] **ATLAS user’s manual**, SILVACO international, 2010.
- [30] **Felix Recht, L. McCarthy, S. Rajan, A. Chakraborty, C. Poblenz, A. Corrion, J. S. Speck, and U. K. Mishra**, “Nonalloyed Ohmic Contacts in AlGaN/GaN HEMTs by Ion Implantation With Reduced Activation Annealing Temperature », *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 27, No. 4, April 2006.
- [31] **Crosslight Software Inc**, “Advanced Issues in HEMT Simulation”, Site web: http://www.crosslight.com/applications/crosslight_hemt2.pdf
- [32] Site web: <http://www.crosslight.com/>, Crosslight Software Inc, 2011.

Annexe

1. Les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas » [29]

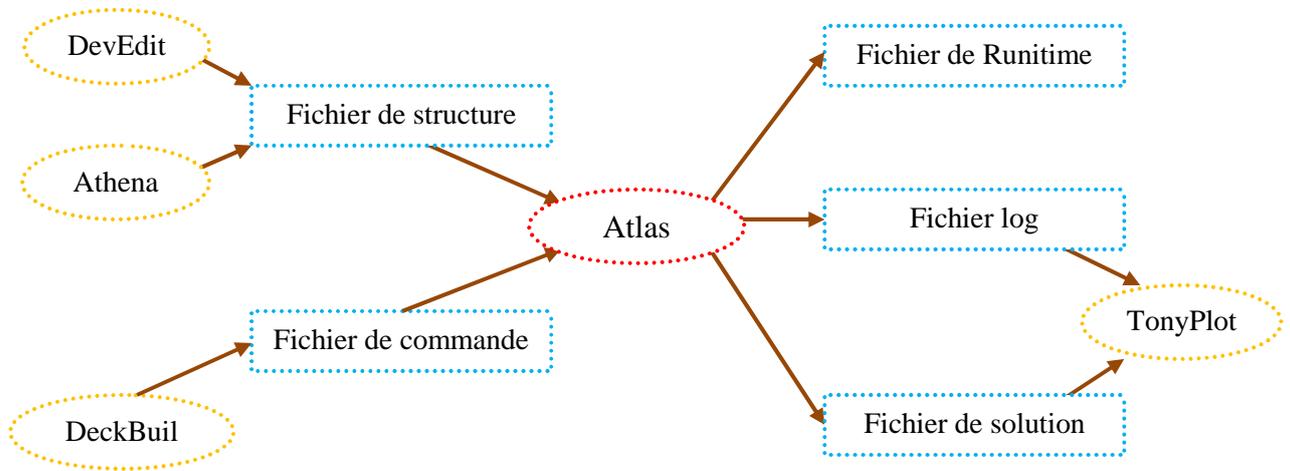


Figure 1 : Entrées et sorties d'Atlas

La figure 1 montre les entrées et 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 « *Runtime* » 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 valeurs de tensions et des courants 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 « *TonyPlot* ».

2. Commandes dans un programme ATLAS

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 2). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte.

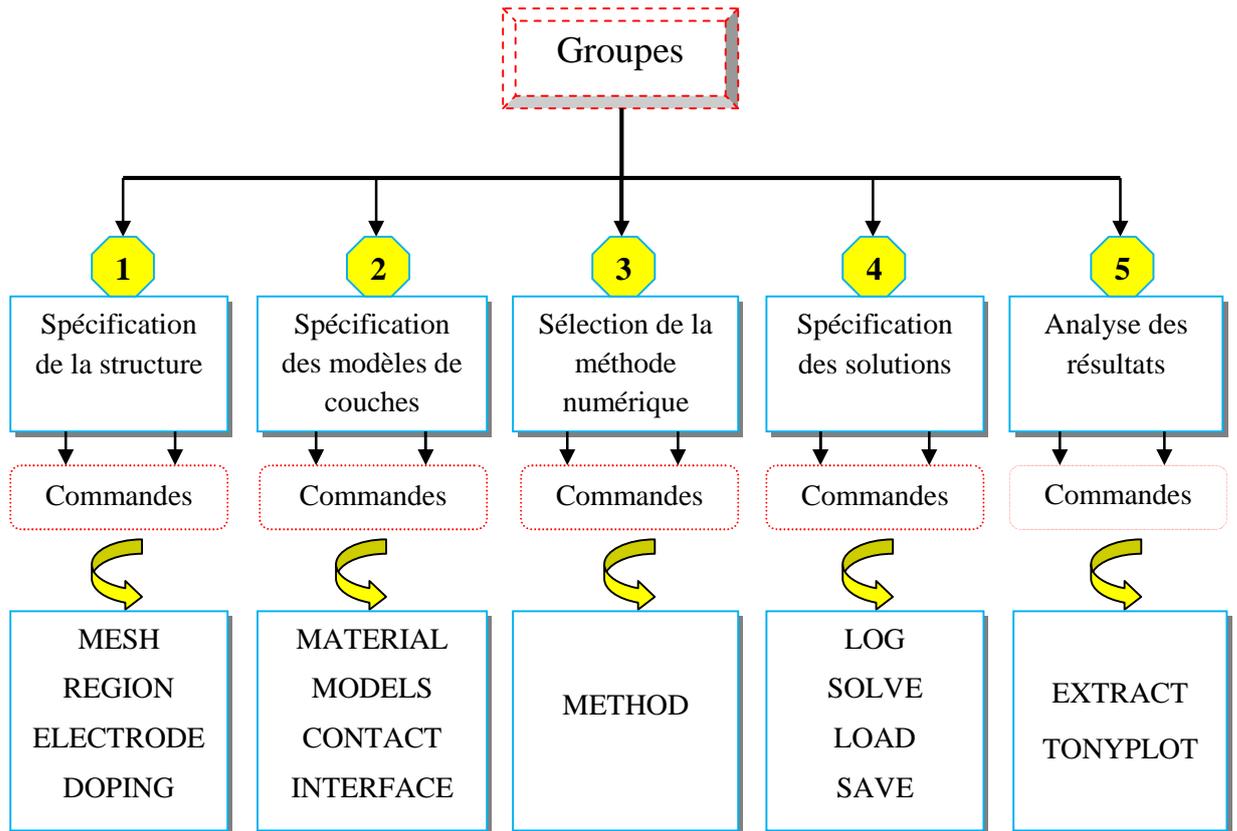


Figure 2 : Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas
(Les commandes fondamentales afférentes)

Les commandes fondamentales sont :

a) Spécification de la structure :

Il s'agit de définir la structure 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. 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 silicium et la région n° 2 comme de l'oxyde (SiO₂), etc.. . Ainsi que les différentes dimensions sont définies en micromètre.

ELECTRODE (définition des électrodes) : La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode.

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...

b) 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 aux matériaux dans la maille. Le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semiconducteurs standard.

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

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

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

c) 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.

d) 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.

Les informations sauvées sont de type électrique. 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.

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

SAVE : sauve toutes les informations d'un point noeud 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.

e) Analyse des résultats :

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semiconducteurs, 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 « TonyPlot » permettant une représentation graphique des données.

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.

3. Organigramme du programme de simulation

Le programme que nous avons conçu (transistor HEMT AlGaIn/GaN) est décrit par l'organigramme de la figure 3.

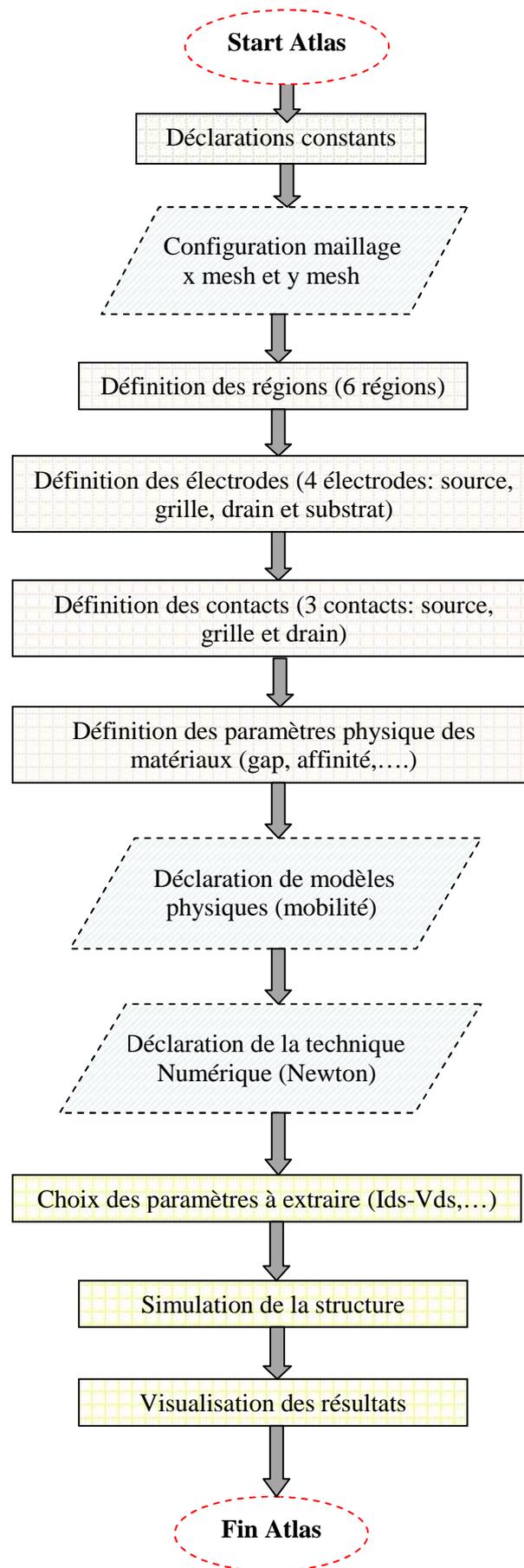


Figure 3 : Organigramme du programme de simulation.

ملخص

ان تطوير نظم الاتصالات السلكية و اللاسلكية يحفز على تطوير نظم النقل التي تسمح و بمعدل مرتفع من تمرير البيانات عبر مسافات طويلة. و بالتالي يجب على الترانزستورات المستخدمة في هذه الأنظمة أن تعمل على ترددات و استطاعات عالية. الترانزستور HEMT (ترانزستور ذات الركيبة الالكترونية العالية) من GaN نيتريد الجاليوم يسمح بتوفير استطاعات عالية (يتم ذلك بفضل الكثافات العالية للتيارات و التوترات و الاستقطاب المرتفع). و ترددات العمل هامة. الهدف من مشروع التخرج هو فهم و محاكاة بطريقة العناصر محددة للسلوك الثابت ل HEMT من GaN على الركيبة 4H-SiC. قمنا بتقديم دراسة مفصلة عن عمل الترانزستور HEMT من GaN من أجل محاكاة الخصائص الثابتة للبنية المتغيرة AlGaIn/GaN. لقد قمنا بفحص تأثير بعض العوامل التكنولوجية التي تؤثر الأداء الجيد للترانزستور مثل طول البوابة, سمك الجدار و القناة و المسافة بين البوابة و المصرف. كما قمنا أيضا برؤية تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية للترانزستور. هذا العمل بمساعدة برنامج المحاكاة « Atlas » من مؤسسة SILVACO.

الكلمات المفتاحية : ATLAS/SILVACO, AlGaIn/GaN, الوصلة المتغيرة, الترانزستور HEMT.

Résumé

Le développement des systèmes de télécommunications motive la mise au point des systèmes de transmissions qui permettent des débits plus élevés sur des grandes distance. De ce fait les transistors utilisés dans ces systèmes doivent fonctionner à des fréquences et des puissances plus élevées. Le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) en nitrure de gallium (GaN) permet d'obtenir des puissances élevées (obtenues grâce aux grandes densités de courant et aux tensions de polarisation élevées), et des fréquences de travail importantes.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de concevoir et de simuler par la méthode des éléments finis le comportement statique du HEMT en GaN sur substrat 4H-SiC. Nous avons présenté une étude détaillée sur le fonctionnement du transistor HEMT en GaN afin de simuler les caractéristiques statiques de l'hétérostructure AlGaIn/GaN. Nous avons examiné 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 canal ainsi que la distance grille/drain. L'effet de la température sur les caractéristiques électriques du transistor a été aussi traité. Ce travail a été réalisé à l'aide du logiciel « Atlas » de la société SILVACO.

Mots Clés : AlGaIn/GaN, ATLAS/SILVACO, Hétérojonction, Transistor HEMT.