

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR-EL OUED
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire

**Présenté par :Maamar Ferdia ,Belgacem Labidi, Bachir Feguir et
Ben Ticha Issam**

**Pour l'obtention du Diplôme de Master en Systèmes de
télécommunication**

Spécialité : Systèmes de télécommunication

Mémoire

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

Devant le jury composé de :

- | | | |
|------------------------|------------------|--------------|
| - Mr. CHEMSA ALI | Dr UNV (EL OUED) | Président |
| - Mr. HETTIRI MESSAOUD | Dr UNV (EL OUED) | Encadreur |
| - Mr. SADOUN ALI | Dr UNV (EL OUED) | Co-Encadreur |
| - Mr. TIDJANI AMINA | Dr UNV (EL OUED) | Examineur |

Année universitaire : 2021/2022

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
1 Généralités sur les semi-conducteurs III-V	3
1.1 Introduction	4
1.2 Définition d'un semi-conducteur	4
1.2.1 la bande d'énergie	4
1.3 Les alliages :	5
1.3.1 Définition d'un alliage :	5
1.3.2 Classification des alliages	5
1.4 Généralités sur les composés semi-conducteurs III-V	5
1.4.1 Structure cristalline :	7
1.5 Propriétés physiques du GaN	7
1.5.1 Propriétés électroniques	8
1.5.2 Les structures de bandes	9
1.5.3 Propriétés optiques	10
1.5.4 Energie de bande interdite en fonction de la température et de la pression :	10
1.6 les Avantages du GaN	11
1.7 Conclusion	12
2 Etude de la Transistor HEMT	14
2.1 Introduction	15
2.2 Hétérojonction	15
2.3 Gaz électronique à deux dimensions	16
2.4 Formation du puits de potentiel	16
2.5 Transistor HEMT	17
2.5.1 Historique du transistor HEMT	17
2.6 Structure d'un HEMT	18
2.6.1 Description des couches	18
2.7 Caractéristiques électriques du HEMT	19
2.7.1 Modèle petit-signal d'un HEMT	20
2.7.2 Eléments intrinsèques	22

2.8	Conclusion	24
3	Modélisation physiques et outils de simulation	27
3.1	Introduction	28
3.2	L'environnement ATLAS	28
3.2.1	ATHENA :	29
3.3	L'ordre des commandes	30
3.3.1	Spécifier le maillage initial	31
3.3.2	Région	32
3.3.3	Électrode	33
3.3.4	dopage	33
3.3.5	MATERIAL	33
3.3.6	INTERFACE	33
3.3.7	BEAM	34
3.3.8	MODELS	34
3.3.9	METHOD	34
3.3.10	L'analyse des résultats :	34
3.4	Conclusion	35
4	Résultats et Interprétations	37
4.1	Introduction	38
4.2	Interprétation des Résultats	38
4.3	Paramètres de simulation	38
4.4	Les caractéristiques électriques du HEMT	39
4.4.1	Variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds})	39
4.4.2	Variation du taux d'aluminium	40
4.4.3	Variation de l'épaisseur de la couche donneuse	41
4.4.4	Variation de dopage de la couche donneuse AlGaN	41
4.4.5	Variation du dopage de la couche tampon GaN	43
4.4.6	L'influence de la température	44
4.5	L'influence de paramètre technologique	45
4.5.1	L'effet de la longueur de la grille (L_g) sur les caractéristiques du transistor HEMT	45
4.6	Conclusion	47
	Conclusion générale	49

TABLE DES FIGURES

1.1	<i>Représentation des bandes de conduction et de valence et la définition du gap du matériau</i>	4
1.2	<i>(A)Maille élémentaire de la structure zinc blende .(B)Vue de dessus de la structure zinc blende.</i>	7
1.3	<i>Semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect.</i>	8
1.4	<i>Les structures de bandes GaN.</i>	9
2.1	<i>Diagramme de bandes d'énergies de deux matériaux à gap différents avant contact (a), après contact (b).</i>	16
2.2	<i>Création d'un puits de potentiel dans un transistor HEMT.</i>	17
2.3	<i>Structure d'un transistor HEMT.</i>	19
2.4	<i>Topologie usuelle d'un HEMT.</i>	20
2.5	<i>Origine physique des éléments du modèle électrique petit signal du HEMT.</i>	21
2.6	<i>Modèle électrique petit signal simplifié du HEMT.</i>	21
3.1	<i>Le rôle de simulation[1]</i>	28
3.2	<i>L'environnement ATLAS</i>	29
3.3	<i>L'outil DeckBuild</i>	29
3.4	<i>Diagramme de la simulation numérique via Silvaco[3, 4]</i>	31
4.1	<i>Coupe schématique du HEMT AlGaN/GaN)</i>	39
4.2	<i>Variation du travail de sortie de la Grille sur la caractéristique ($I_{ds} - V_{ds}$)</i>	39
4.3	<i>le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différents taux d'aluminium</i>	40
4.4	<i>le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes épaisseurs de la couche AlGaN</i>	41
4.5	<i>le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes valeurs de dopage AlGaN</i>	42
4.6	<i>le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de dopage GaN</i>	43
4.7	<i>L'influence de la température sur le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de température</i>	44
4.8	<i>L'évolution de la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain ($I_{ds}-V_{ds}$) du transistor HEMT en fonction de la longueur de la grille</i>	45

LISTE DES TABLEAUX

1.1	<i>Propriétés physiques des semi-conducteurs III-V, de leurs principaux substrats et de quelques semi-conducteurs d'utilisation courante [1].</i>	6
1.2	<i>Propriétés électroniques du GaN comparées à d'autres matériaux utilisés.</i>	9
3.1	<i>L'ordre des commandes[2]</i>	30
4.1	<i>paramètres physiques, électriques et technologiques de GaN)</i>	38

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

Notre objectif à travers ce modeste travail est de faire en premier lieu une étude théorique , une simulation numérique d'un dispositif HEMT pour les applications à haut débit , ensuite nous réaliserons nos structures que nous simulee afin de pouvoir comparer les résultats de simulation à ceux expérimentaux et de valider nos modèles.

La réalisation du présent travail est répartie en quatre chapitres, dans le premier chapitre nous passerons de quelque notion de base aux alliages semi-conducteurs et les propriétés des nitrures à savoir leurs structures cristallines ainsi que leurs propriétés électroniques.

Le deuxième chapitre, sera consacré à l'étude théorique des phénomènes physiques et l'aspect physique et électrique des différentes technologies existantes des composants FETs utilisés pour l'amplification de puissance telsque les JFET, MOSFET, MESFET, et la technologie HEMTs

Dans le troisième chapitre nous présenterons les structures d'étude par le logiciel de simulation Silvaco, ses modules et ses outils de simulation ; nous décrirons ensuite les procédés technologiques nécessaires à la réalisation de notre structure qui est une HEMTs en utilisant l'outil de simulation « Athéna ».

Dans le quatrième chapitre, nous présentons, dans un premier temps, les mesures des caractéristiques électriques telles que : $I_{ds}(V_{ds})$, $I_{ds}(V_{gs})$, la transconductance et la capacité pour deux types de transistor avec des longueurs de grilles différentes. Puis en passe à présentés les résultats simulés dans l'environnement Atlas de Silvaco-TCAD.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos principaux résultats et présentées quelques perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES SEMI-CONDUCTEURS III-V

1.1 Introduction

L'évolution technologique de ces dernières années a permis une avancée considérable dans l'élaboration des matériaux semi-conducteurs de la famille des nitrures tels que l'AlN, l'InN et le GaN, à partir de composés organométalliques. Afin de pouvoir réaliser des composants électroniques ou optoélectroniques à base de nitrure de gallium (GaN), nous sommes censés connaître les différentes propriétés de ce matériau et les problèmes rencontrés au cours de son élaboration. nous présentons dans ce chapitre, les propriétés générales des nitrures à savoir leurs structures cristallines ainsi que leurs propriétés électroniques.

1.2 Définition d'un semi-conducteur

Les semi-conducteurs sont des corps solides dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants. Ils sont isolants s'ils sont purs et au zéro absolu, et leurs conductivité électrique augmente avec la température, et elle est sensible aux impuretés ou aux différents types de défauts [1,2].

1.2.1 la bande d'énergie

Dans un corps solide, deux bandes sont particulièrement importantes pour la compréhension des phénomènes de conduction : la bande de conduction et bande de valence. La bande de conduction représente les énergies des électrons libres, dans la bande de valence se situent les électrons liés avec le réseau cristallin (figure1.1).

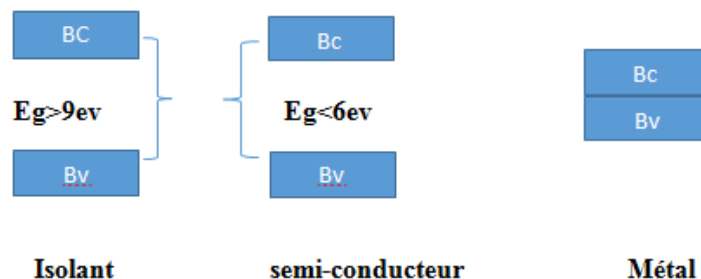


FIGURE 1.1 – Représentation des bandes de conduction et de valence et la définition du gap du matériau

1.3 Les alliages :

1.3.1 Définition d'un alliage :

On entend par un alliage un mélange homogène de deux ou plusieurs matériaux. Avec Le développement rapide des techniques de la croissance cristalline en peut réaliser des plusieurs alliages binaires, ternaires et quaternaires.

1.3.2 Classification des alliages

Les alliages de façons générales se classent suivant le nombre de constituants dans l'alliage en :

⇒ Alliage binaire : Il est de la forme AB.

Les composés ternaires :

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires, ou quaternaires qui sont identifié de la façon suivante :

⇒ Alliage ternaire : Il est divisé en deux types

Alliage ternaire anionique $ABXC_{1-X}$.

Alliage ternaire cationique $AXB_{1-X}C$.

Les composés quaternaires :

⇒ Alliage quaternaire : C'est un mélange composé à partir de quatre matériaux quaternaire, ce type d'alliage est caractérisé par deux coefficients stœchiométriques X et Y.

Il est divisé en deux types :

Alliage quaternaire quadratiques de la forme : $A_{1-x}B_xC_{1-x}Y_x$.

Alliages quaternaires triangulaires dans cette classe deux cas :

✓ Quaternaires cationique triangulaires $AXBYC_{1-x}YD_x$.

✓ Quaternaires anionique triangulaires $ABXC_{1-x}YD_x$.

1.4 Généralités sur les composés semi-conducteurs III-V

Les matériaux semiconducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la 3eme colonne et d'un élément de la 5eme colonne de la classification périodique. Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la struc-

ture des bandes, montre que les éléments les plus légers donnent des composés à large bande interdite, dont les propriétés se rapprochent de celles des isolants, et à structure de bande interdite.

Nous répertorions dans le tableau I.1

, quelques paramètres essentiels des principaux composés binaires III-V, à 300K [1]. E_g est la largeur de la bande interdite ; m^* et m_0 sont respectivement la masse effective et la masse de l'électron dans le vide, du bas de la bande de conduction ; μ est leur mobilité électronique à faible champ ; a est le paramètre de maille.

TABLE 1.1 – Propriétés physiques des semi-conducteurs III-V, de leurs principaux substrats et de quelques semi-conducteurs d'utilisation courante [1].

Composé III-V	E_g (eV)	m^*/m_0	μ (cm ² /V. S)	a (Å)
BN	7.5			3.6150
AlP	2.45			5.4510
AlAs	2.16			5.6605
AlSb	1.58	0.12	200	6.1355
BP	2.0			4.5380
GaN	3.36	0.19	380	3.189
GaP	2.26	0.82	110	5.4512
GaAs	1.42	0.067	8500	5.6533
GaSb	0.72	0.042	5000	6.0959
InP	1.35	0.077	4600	5.8686
InAs	0.36	0.023	33000	6.0584
InSb	0.17	0.0145	80000	6.4794

1.4.1 Structure cristalline :

Les semiconducteurs III-V sont composés à partir des éléments des colonnes III et V du tableau périodique de MendeleÛev. Ils sont obtenus, soit par tirage de monocristaux massifs, soit par croissance épitaxiale de couches minces et cristallisent dans la structure zinc blende ou wurtzite. Dans notre étude, c'est la structure zinc blende représentée sur les figures 1.1 et 1.2 qui nous intéresse ; elle est caractérisée par deux sous-réseaux à faces centrées décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart d'une diagonale principale du cube élémentaire.

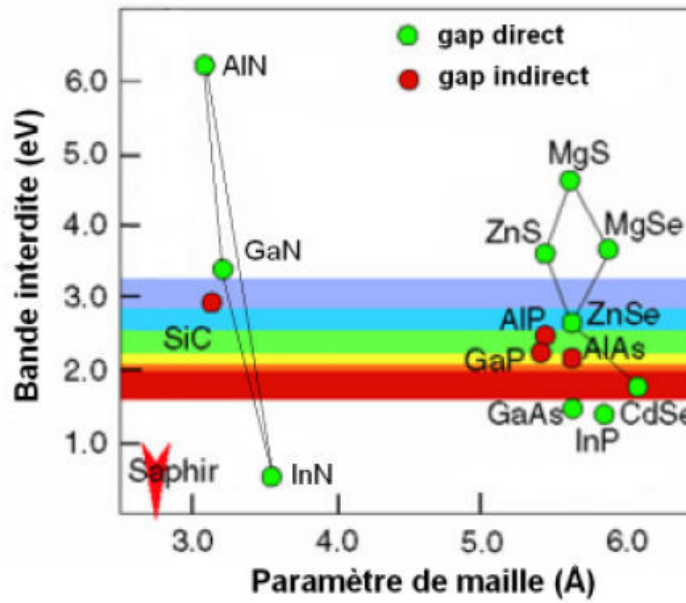


FIGURE 1.2 – (A)Maille élémentaire de la structure zinc blende .(B)Vue de dessus de la structure zinc blende.

1.5 Propriétés physiques du GaN

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

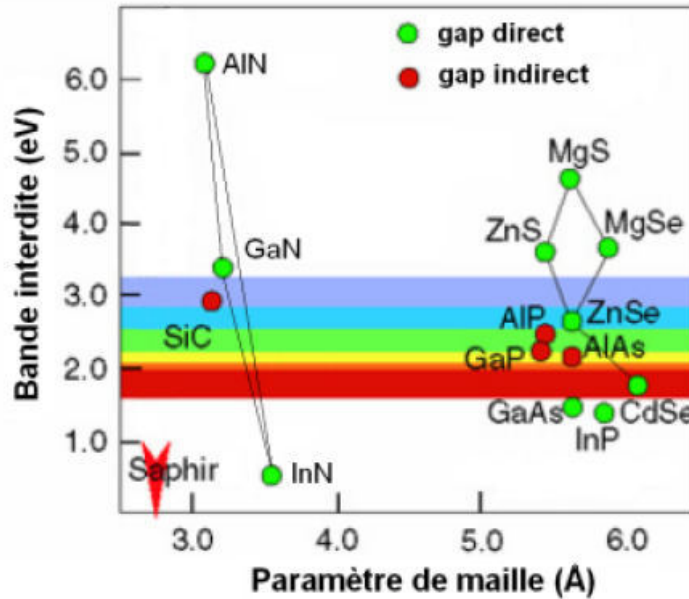


FIGURE 1.3 – Semi-conducteurs III-V à gap direct et indirect.

1.5.1 Propriétés électroniques

Comme la plupart des semi-conducteurs III-V, le GaN wurtzite est doté d'un large gap direct. La valeur expérimentale de ce gap de 3.40 eV[2] permet une émission de lumière dans l'ultraviolet. En plus du fait que ce gap est direct, il donne lieu à des transitions électroniques entre la bande de conduction et celle de valence sans absorption de phonons. Cela augmente l'efficacité optique des dispositifs optoélectroniques, et fait du GaN un candidat de choix pour l'élaboration des émetteurs de lumière bleue tels que les lasers, les diodes électroluminescentes, ... etc.

Le tableau I.3 présente Les propriétés électroniques du matériau GaN comparé avec d'autres matériaux usuellement utilisés [7]. Le nitrure de gallium GaN est un semi-conducteur à large gap direct de 3.4eV, ce qui permet aux dispositifs à base de GaN tel que les HEMTs de supporter un champ électrique interne cinq fois supérieur que le Si et le GaAs, sa tension de claquage élevée qui est supérieure à 70V est un attribut souhaité pour les applications de haute puissance.

TABLE 1.2 – Propriétés électroniques du GaN comparées à d'autres matériaux utilisés.

Matériau	Si	GaAs	SiC	GaN
Energie de gap (eV)	1.11	1.43	3.2	3.4
Champ de claquage (V/cm)	$6.0 \cdot 10^5$	$6.5 \cdot 10^5$	$3.5 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^6$
Vitesse de saturation (cm/s)	$1.0 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^7$	$2.0 \cdot 10^7$	$2.5 \cdot 10^7$
Mobilité électronique (cm ² /V.s)	1350	6000	800	1600
Conductivité thermique (W/cm.K)	1.5	0.46	3.5	1.7

1.5.2 Les structures de bandes

Le gap d'énergie c'est la différence entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction. Ce dernier trouve au point de symétrie pour GaN. Alors ce composé possède une transition directe (gap direct).

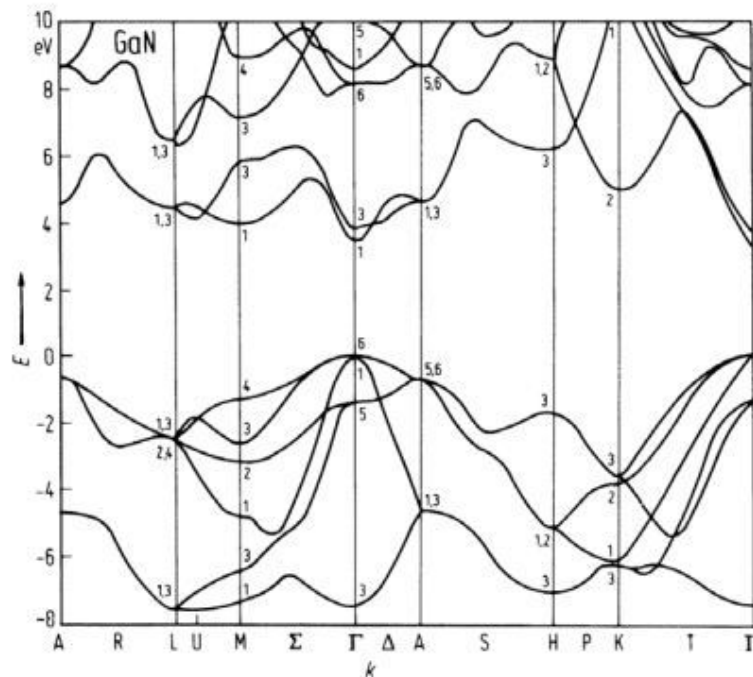


FIGURE 1.4 – Les structures de bandes GaN.

1.5.3 Propriétés optiques

D'un point de vue optique, le nitrure de gallium est biréfringent. Son indice de réfraction a été mesuré par ellipsométrie spectroscopique, réflectivité, transmission ou encore luminescence dans le visible et l'infrarouge. Dans cette région du spectre, la partie imaginaire de l'indice de réfraction, se rapportant à l'absorption, est faible. L'expression de la partie réelle de l'indice de réfraction s'écrit, en fonction de l'énergie E de la source lumineuse, comme[6] :

$$n = 1 + \frac{A}{E_0^2 - E^2} \quad (1.1)$$

avec, $A = 385$ et $E_0 = 9eV$. Entre 900 et 2000 nm, la dispersion de l'indice de réfraction est faible, mais en dessous de 800nm, la dispersion augmente car l'énergie des phonons approche celle du gap. Cette dispersion est très sensible à la teneur en oxygène, elle diminue quand la concentration de l'oxygène augmente. De manière générale, la valeur de l'indice de réfraction varie entre 2.1 à 1900nm et 2.5 à 480nm pour un film de bonne qualité [6,7].

Le coefficient d'absorption a aussi fait l'objet de nombreuses investigations, la valeur de son carré est linéaire en fonction de l'énergie des photons au dessous de l'énergie du gap, comme :

$$\alpha^2 = \alpha_0^2(E - E_g) \quad (1.2)$$

avec $\alpha = 1.08 \times 10^5 cm^{-1}$ Ceci confirme le fait que le gap de GaN est direct. Les mesures du coefficient d'absorption au gap excitonique donnent des valeurs de $3.10^{-4} 10^{-5} cm^{-1}$ [9].

1.5.4 Energie de bande interdite en fonction de la température et de la pression :

La variation de l'énergie de bande interdite $E_g(T)$ en fonction de la température est généralement décrite par la formule empirique de Varshni [5] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{\beta + T} \quad (1.3)$$

α et β sont des constantes, elles sont de l'ordre de 1 meV/K et de 1000 K respectivement pour GaN massif de type würtzite [10]. L'expression du gap dans du GaN massif est linéaire en fonction de la pression hydrostatique et s'écrit comme suit [4,10] :

$$E_g(P) = E_g(0) - \alpha P \quad (1.4)$$

α est de l'ordre de 4,2 meV/kbar dans une structure würtzite de GaN massif [10].

1.6 les Avantages du GaN

Les potentialités désormais bien reconnues du Nitrure de Galium sur un large champ d'applications, alliées à la levée de bon nombre de verrous technologiques en font un matériau particulièrement intéressant en électronique de puissance, notamment pour des applications haute tension et ou haute température. [10]

1.7 Conclusion

Dans cette partie nous avons présentés le principe de base d'un transistor à haute mobilité (HEMT) qui consiste à mettre à profit les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG à partir de la séparation physique des électrons libres. Ainsi que nous avons rappelé les caractéristiques physiques de nitrure de gallium GaN pour les applications en microélectronique.

Références

[1] L.L.Y. Voon, M. Willatzen, M. Cardona, N. Christensen, *Physical review B* 53 (1996) 10703.

[2] S. Adachi, *Properties of semiconductor alloys : group-IV, III-V and II-VI semiconductors*, John Wiley Sons, 2009.

[3] H. Grimmeiss, H. Koelmans, *Zeitschrift für Naturforschung A* 14 (1959) 264-271.

[4] J.-F. Goullin, *Bulletin de Minéralogie* 92 (1969) 590-594.

[5] I. Akasaki, *Journal of Crystal Growth* 237 (2002) 905-911.

[6] H. Amano, I. Akasaki, K. Hiramatsu, N. Koide, N. Sawaki, *Thin Solid Films* 163 (1988) 415-420.

[7] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, *Applied Physics Letters* 64 (1994) 1687-1689.

[8] A. Chakroun, R. ARES, V. AIMEZ, S. CHARLEBOIS, REALISATION DE STRUCTURES METAL-ISOLANT-SEMICONDUCTEUR SUR GaN PAR DÉPOSITION PECVD DE SixN_v, 2012.

[9] A. Souguir-Aouani, Conception d'une nouvelle génération de redresseur Schottky de puissance en Nitrure de Gallium (GaN), étude, simulation et réalisation d'un démonstrateur, in : Lyon, 2016.

[10] M. Benchehima, H. Abid, A. Sadoun, A.C. Chaouche, *Computational Materials Science* 155 (2018) 224-234.

CHAPITRE 2

ETUDE DE LA TRANSISTOR HEMT

2.1 Introduction

La diode Schottky à base de nitrure de gallium (GaN) a connu un grand essor ces dernières années. Lorsqu'on dépose un métal sur un semi-conducteur deux phénomènes physiques peuvent apparaître, l'apparition d'une barrière de potentiel qu'on appelle diode Schottky ou simplement un contact ohmique. Nous allons dans ce chapitre, présenter la structure Métal / Semi-conducteur idéale, pour différents cas de différence de travaux de sortie, puis la structure Schottky réelle, en définissant le phénomène Schottky, l'effet des états d'interface sur la courbure des bandes d'énergie, et les paramètres physiques tel que le courant de saturation, et le facteur d'idéalité.

2.2 Hétérojonction

Une hétérojonction entre deux semi-conducteurs peut être obtenue en faisant croître une couche épitaxiée d'un semi-conducteur sur un autre semi-conducteur. Cette croissance exige que les deux matériaux aient, dans le plan interfacial, les mêmes symétries cristallines et des paramètres cristallins ou des distances interatomiques voisines commensurables. En outre, puisque l'épitaxie est réalisée à température élevée, il faut que les deux matériaux aient des coefficients de dilatation thermique voisins. Ces conditions sont à peu près réalisées pour de très nombreux systèmes. Si les deux semi-conducteurs sont de même type, la jonction est dite isotype dans le cas contraire elle est anisotype [1-3].

Pour réaliser une hétérojonction en faisant croître une couche d'un semi-conducteur 1 sur le semi-conducteur 2.

Pour cela il faut que :

- ▷ les deux semi-conducteurs présentent la même symétrie dans le plan de l'interface
- ▷ les mêmes paramètres de maille
- ▷ les coefficients de dilatation thermiques soient proches (qui réalisé à hautes températures).

La mise en contact d'un matériau à grand gap et d'un matériau à petit gap crée une discontinuité de bande de conduction (ΔE_C) à l'interface entre les deux matériaux, cette discontinuité entraîne la formation d'un puits de potentiel dans le matériau à petit gap créant ainsi un gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) [4], La figure 2.1 présente la juxtaposition de deux matériaux à gap différents avant et après contact [5,6].

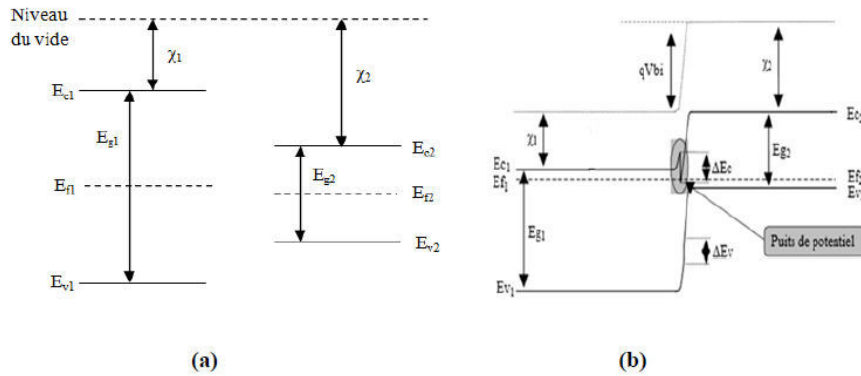


FIGURE 2.1 – Diagramme de bandes d'énergies de deux matériaux à gap différents avant contact (a), après contact (b).

Avec la considération des paramètres des deux matériaux qui sont définis par :

: χ_1 : Affinité électronique du semi-conducteur 1.

E_{g1} : Largeur de la bande interdite du semi-conducteur 1.

χ_2 : Affinité électronique du semi-conducteur 2.

E_{g2} : Largeur de la bande interdite du semi-conducteur 2.

qV_{bi} : Tension de diffusion.

ΔE_C : Discontinuité des bandes de conduction.

ΔE_V : Discontinuité des bandes de valence.

qV_{bi} : Tension de diffusion.

2.3 Gaz électronique à deux dimensions

Ce gaz électronique à deux dimensions est aussi appelé « gaz d'électrons », « canal d'électrons » ou « gaz 2DEG » pour « Two-Dimensional Electron Gas ». Celui-ci se forme à l'interface AlGaN/GaN grâce à l'effet cumulé de la polarisation spontanée et de la polarisation piézoélectrique qui règnent dans les semi-conducteurs AlGaN et GaN.

2.4 Formation du puits de potentiel

Un puits de potentiel est crée à l'interface lors de la jonction des deux matériaux a cause de la différence des énergies de bande interdite. Les électrons provenant de la couche donneuse sont confinés dans ce puits et participant au courant de conduction dans la structure (figure 2.2)[6 , 9].

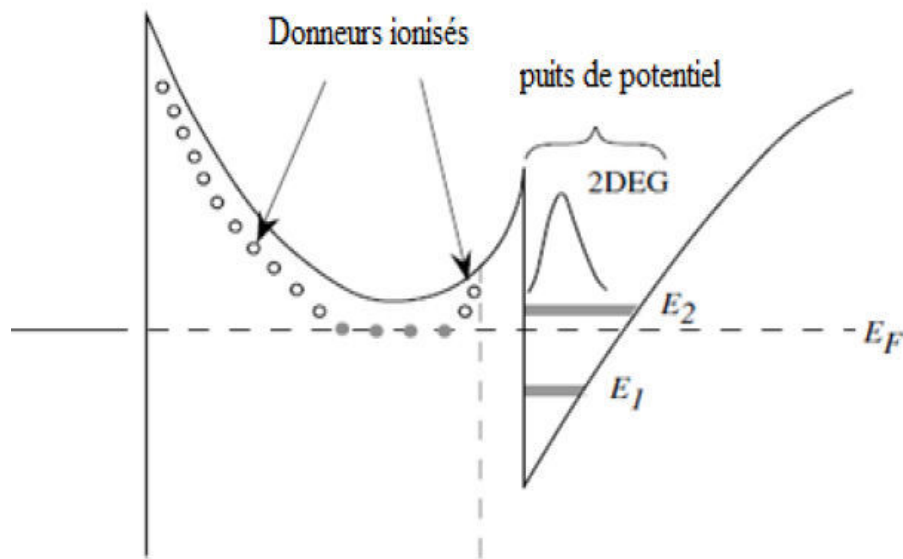


FIGURE 2.2 – Création d'un puits de potentiel dans un transistor HEMT.

2.5 Transistor HEMT

Le HEMT (High Electron Mobility Transistors) appartient à la famille des transistors à effet de champ. Il est un cas particulier du MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). Ce composant possède plusieurs dénominations dans la terminologie anglo-saxonne, TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor), MODFET (MODulation Doped Field Effect Transistor) mais également HFET (Heterojunction Field Effect Transistor). Ce dernier terme est toutefois généralement plutôt réservé à un autre composant à hétérostructure dans lequel le transport s'effectue dans un matériau dopé alors qu'il est non dopé pour le HEMT.

2.5.1 Historique du transistor HEMT

La naissance du transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) date de peu après 1979 où Dingle et al. [7] ont eu l'idée d'utiliser des hétérojonctions du type GaAs/Al_xGa_{1-x}As, pour séparer spatialement les électrons libres des impuretés, ce qui favorise la mobilité dans ces hétérostructures à gaz d'électrons. Une invention conjointe entre Thomson CSF (France) et Fujitsu (Japon) [8] permet, par la suite, la conception des premiers transistors HEMT en 1980. En 1985, le HEMT est présenté comme un composant micro-onde unique ayant les plus faibles caractéristiques en bruit. Initialement, ce transistor était utilisé dans un radiotélescope à Nobeyama (Japon) qui présente un diamètre de 45 mètres. En refroidissant le composant à la température de l'hélium liquide, il est possible

de capter un signal provenant d'une molécule interstellaire située à mille années lumières de la Terre. Plus tard, HEMT est implanté dans des récepteurs de télévision pour capter les signaux des satellites géostationnaires (36000km d'altitude). Puis petit à petit, ce composant se fera une place dans notre quotidien.

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

2.6 Structure d'un HEMT

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

La figure (2.3) représente une schématisation d'un HEMT est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite.

2.6.1 Description des couches

- ▷ **La couche de contact ohmique** : c'est un matériau à petit gap fortement dopé qui sert à former des contacts ohmiques de source et drain de faible résistivité
- ▷ **Le contact de grille** : Dans le transistor HEMT un contact de grille est nécessaire pour contrôler la charge du canal et donc le courant. Ce contact est de type Schottky.

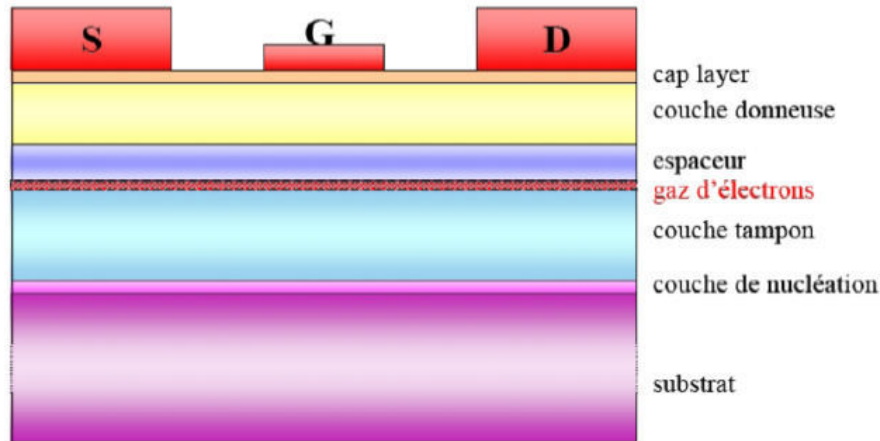


FIGURE 2.3 – Structure d'un transistor HEMT.

- ▷ **La couche nommée** : non intentionnellement dopée qui est constituée d'un matériau grand gap .
- ▷ **La couche de nucléation** : C'est une couche mince qui sert à minimiser le désaccord de maille entre la couche tampon et le substrat, et pour s'assurer d'avoir une bonne qualité cristallographique afin de faire croître la couche du cristal
- ▷ **Le canal** : il est constitué d'un matériau à petit gap non dopé. cette couche est importante dans la mesure où elle reçoit le gaz d'électron bidimensionnel (2DEG) qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.
- ▷ **La couche donneuse** : C'est dans cette couche que la zone d'espace de charge se forme au niveau de la jonction Schottky de grille ainsi qu'aux abords de l'hétérojonction.
- ▷ **La couche Cap layer** : C'est une couche superficielle fine, formée par un matériau de faible bande interdite, sur laquelle sont réalisés de bons contacts ohmiques de drain et de source.
- ▷ **Le substrat** : C'est la couche sur laquelle on fait croître les matériaux par épitaxie.

2.7 Caractéristiques électriques du HEMT

L'effet souhaité dans la réalisation de tels dispositifs reste un effet d'amplification, ou effet transistor ; celui-ci procède de l'application simultanée du signal à amplifier (sur la grille) et d'une tension de polarisation continue de part et d'autre de la structure, entre source et drain. Le courant total résultant du déplacement des porteurs situés à l'hétérojonction peut être modulé par le potentiel appliqué

sur la grille du composant. Il est évident que, comme tout phénomène physique, celui-ci se voit confronté à un certain nombre d'effets limitatifs. Dans l'optique de comprendre certains d'entre eux, il peut être important de décrire plus en détail la topologie des dispositifs HEMTs employés.

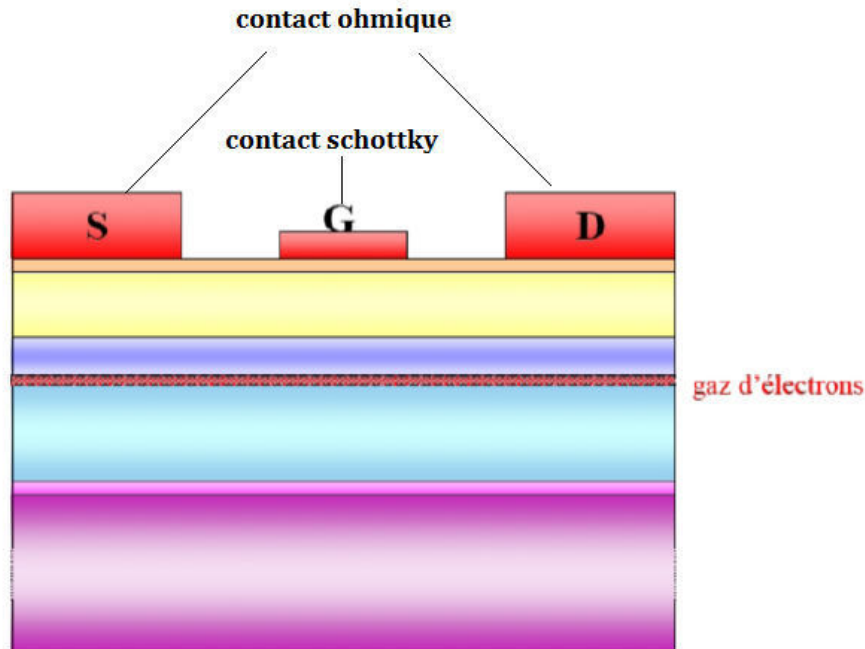


FIGURE 2.4 – Topologie usuelle d'un HEMT.

Sur la figure 2.4, il est aisé de constater que l'apposition de la grille métallique ne s'effectue pas de manière symétrique. Elle se trouve plus proche du contact de source que du contact de drain.

2.7.1 Modèle petit-signal d'un HEMT

Afin de concevoir et simuler des circuits à base de ces composants, il faut construire un modèle électrique du transistor. Le modèle le plus souvent utilisé est un modèle électrique en éléments localisés pour son adaptation à la CAO. La Figure 2.5 montre l'origine physique de ce modèle équivalent en éléments localisés d'un transistor HEMT. La Figure 2.5 représente ce modèle tel qu'il peut être utilisé en simulation dans un logiciel de CAO.[9-12]

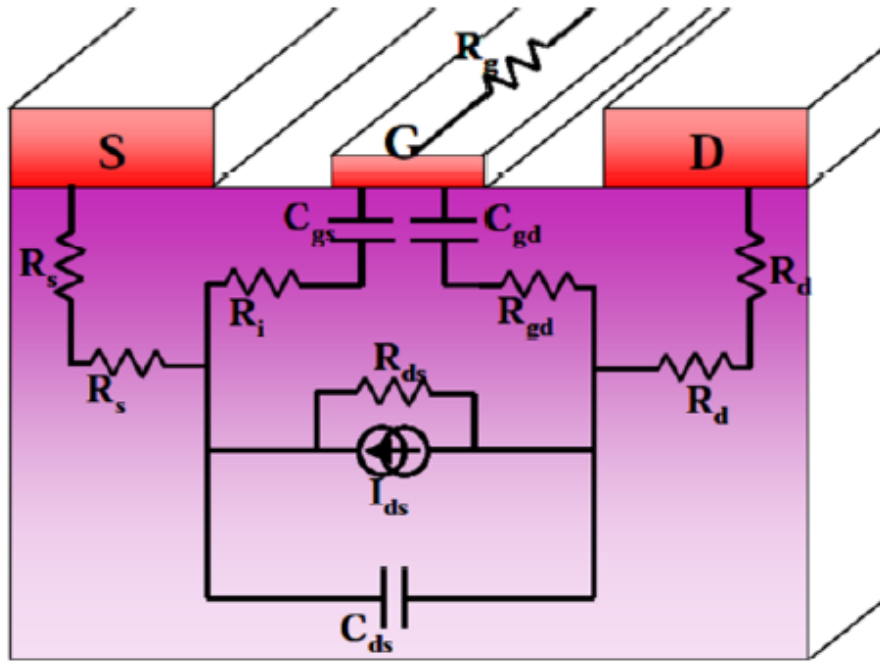


FIGURE 2.5 – Origine physique des éléments du modèle électrique petit signal du HEMT.

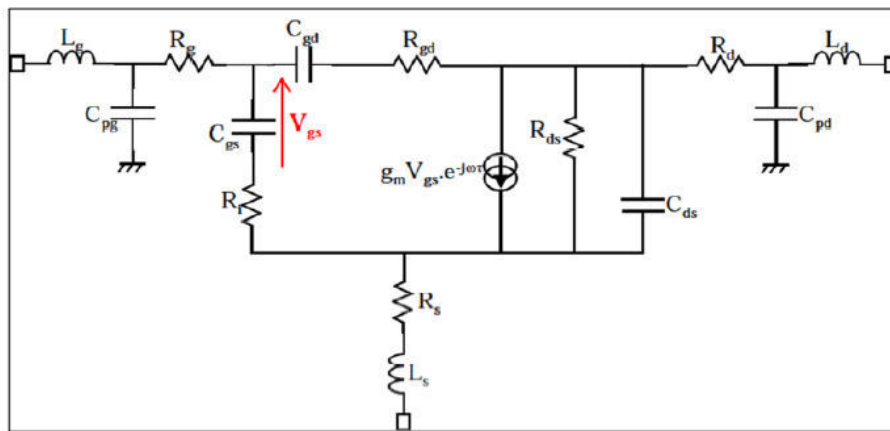


FIGURE 2.6 – Modèle électrique petit signal simplifié du HEMT.

2.7.2 Eléments intrinsèques

La transconductance

Le générateur de courant I_{ds} représente l'effet fondamental du transistor. Il constitue une source de courant contrôlée en tension, modélisant le phénomène de gain au sein du composant. On définit la transconductance comme étant la pente de la caractéristique définie par l'équation :

$$G_m = \left. \frac{dI_{ds}}{dV_{ds}} \right|_{V_{ds} = Const} \quad (2.1)$$

Pour le régime linéaire la transconductance est égale à :

$$G_{mlin} = \frac{dI_{dslin}}{dV_{gs}} = \frac{W_g \mu_n c_0}{L_{ds}} V_{ds} \quad (2.2)$$

Pour le régime de saturation la transconductance est égale à :

$$G_{mSat} = \frac{dI_{dsSat}}{dV_{gs}} = \frac{W_g \mu_n c_0}{L_{ds}} (V_{gs} - V_T) \quad (2.3)$$

Le courant Drain-Source

Le courant Drain-Source est localisé dans le canal, c'est un courant de dérive et son évolution en fonction du champ latéral est décrite par l'équation (2.4)[10].

$$I_{Ds} = W Q_{2DEG}(x) v(x) \quad (2.4)$$

Où W représente la largeur de grille, $[Q_{2DEG}$ la charge dans le canal est donnée par l'équation (2.5)[12],

$$Q_{2DEG}(x) = q N_{2DEG}(x) = \frac{\epsilon}{d} (V_{GS} - V(x) - V_{th}) \quad (2.5)$$

$v(x)$ la vitesse de déplacement des électrons à la position x , Aux faibles polarisations de drain, la vitesse de déplacement est inférieure à la vitesse de saturation électronique v_{sat} , elle donné par l'équation (2.6)[4].

$$v_{sat} = \frac{\mu_0 \frac{dV_c(x)}{dx}}{1 + \mu_0 \frac{dV_c(x)}{V_{sat} dx}} \quad (2.6)$$

μ_0 : la mobilité à faible champ électrique, $V_c(x)$ est le potentiel du canal à la position x . Ainsi I_{DS} est l'intégrale de l'équation (2.7) le long de la grille, L

$$I_{DS} = \frac{Wg}{L} \int_0^L Q_{2DEG}(dx)v(x)dx = \frac{W\mu_e}{L} \int_0^L Q_{2DEG} = \frac{dV(x)}{dx} \quad (2.7)$$

La conductance

La conductance de sortie $g_d = 1/R_{ds}$, représente la variation du courant dans le canal en fonction de la tension V_{ds} à polarisation de grille constante. Elle est un indicateur de la saturation du courant drain source. Cette valeur traduit la résistance du canal.

$$g_d = \left. \frac{dI_{ds}}{dV_{ds}} \right|_{V_{gs}=cest} \quad (2.8)$$

La capacité grille-source

La capacité grille-source C_{gs} représente la variation de la charge accumulée dans la zone dépeuplée, située sous la grille. C_{gs} détermine cette variation modulée par la tension grille-source pour une tension grille-drain constante :

$$g_{gs} = \left. \frac{dQ_g}{dV_{gs}} \right|_{V_{gd}=cest} \quad (2.9)$$

Avec Q_g , la charge de la zone dépeuplée sous la grille.

La capacité grille-drain

Cette capacité grille-drain représente les effets réactifs entre les deux électrodes. Restant très faible en régime saturé, son influence apparaît surtout en hautes fréquences ou lorsque la grille est chargée par une haute impédance. Elle est définie par :

$$C_{gd} = \left. \frac{dQ_g}{dV_{gd}} \right|_{V_{gs}=cest} \quad (2.10)$$

La capacité drain-source

La capacité drain-source C_{ds} décrit le couplage capacitif entre les deux régions du canal sous les contacts ohmiques de drain et de source.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini quelques rappels théoriques concernant L'hétérojonction est la base des composants HEMT utilisés dans le domaine hyperfréquence, haut puissance et haut température... . Ainsi, nous avons exposés les différents mécanismes de transport de courant dans le transistor à hétérostructure HEMT , son principe de fonctionnement, les caractéristiques électrique, les défauts et les limites.

Références

D.R. Lide, CRC handbook of chemistry and physics, CRC press, 2004.

[2] H. Mathieu, H. Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Dunod Paris, 2001.

[3] S. Zellag, Modélisation et simulation des propriétés électriques d'une structure Métal-Isolant-Semi-conducteur MIS, in : Université mohamed khider biskra, 2018.

[4] G. Greco, F. Iucolano, F. Roccaforte, Applied surface science 383 (2016) 324-345.

[5] charges in N- and Ga-face AlGa_N/Ga_N heterostructures,» Journal of Applied Physics, vol. 85, pp. 3222-3233, 1999..

[6] O. TERGHINI, Simulation numérique des effets de radiation dans les détecteurs de particules à base de silicium de type p, in : Université de Biskra, 2015.

[10] H. Fujitani, S. Asano, Applied surface science 41 (1990) 164-168.
O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff,

[7] N. Vellas, Études expérimentales de transistors HFET de la filière nitrure de gallium pour des applications de puissances hyperfréquences, in : Lille 1, 2003.

[8] A. Cowley, S. Sze, Journal of Applied Physics 36 (1965) 3212-3220.

[9] L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger, and J. Hilsenbeck, «Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization

[11] O. Ambacher et al.. Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGa_N/Ga_N heterostructures. J. Appl. Phys. (1999) 85 : pp. 3222-3232.

[12] Rashmi, Abhinav Kranti, S. Haldar, R.S.Gupta ; «An accurate charge control model for spontaneous and piezoelectric polarization dependent two-dimensional electron gas sheet charge density of lattice-mismatched AlGa_N/Ga_N HEMTs», Solid- State Electronics 46 621-630, 2002

CHAPITRE 3

MODÉLISATION PHYSIQUES ET OUTILS DE SIMULATION

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, le TCAD (Technology Computer-Aided Design) a été utilisé comme un simulateur pour simuler les caractéristiques électriques des Transistor HEMT, Le rôle de la simulation est de faire un lien entre le monde expérimental et le monde théorique comme le montre la figure 3.1 dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, Cet outil permet donc l'optimisation la calibration des simulateurs de procédès et de dispositifs. nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO (ATLAS),son principe de fonctionnement et son module de simulation pour le comportement électrique des composants. Ensuite, nous présentons une description des différentes étapes de simulation..

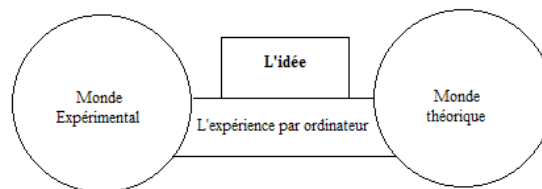


FIGURE 3.1 – *Le rôle de simulation*[1]

3.2 L'environnement ATLAS

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

L'environnement de l'ATLAS a été conçues de façon à pouvoir l'utiliser avec d'autres outils qui facilitent ou complètent son utilisation. (Figure 3.2)

DEVEDIT est un environnement où sont dessinés la structure (dimension, dopage, ..) et son maillage.

DECKBUILD est un environnement où est défini le programme de simulation comme le montre la Figure 3.3.

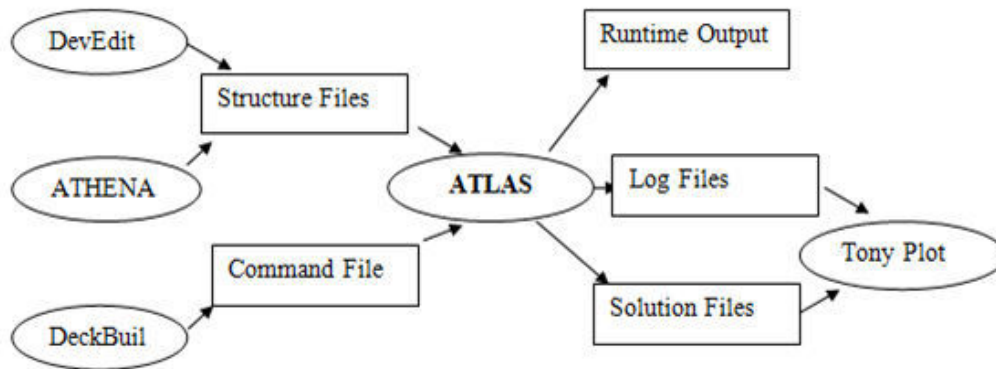


FIGURE 3.2 – L’environnement ATLAS

TONYPLOT outil de visualisation et d’analyse graphique 1D et 2D des résultats des simulations.

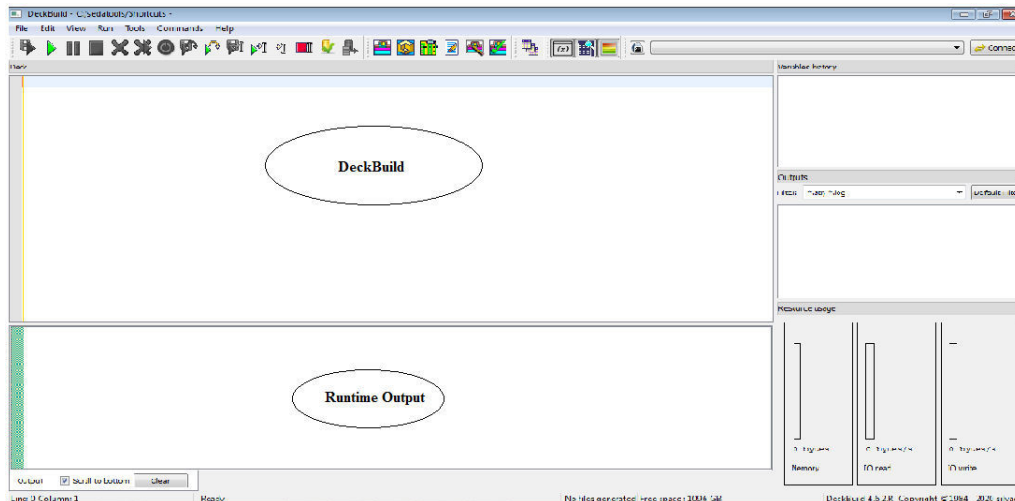


FIGURE 3.3 – L’outil DeckBuild

3.2.1 ATHENA :

est un simulateur désigné pour la création des structures avec une bonne résolution des mailles, fait aussi l’implantation ionique et la diffusion des impuretés et l’oxydation, les épaisseurs des couches, dopage ainsi que certains paramètres électriques, La Figure 3.4 représente La structure de la diode simulée ,nous sommes basés sur des valeurs trouvées dans la littérature, concernant l’étude de différentes structures des diodes Schottky

3.3 L'ordre des commandes

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement « d'Atlas » nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ».

Il existe des commandes pour définir une structure de périphérique dans Le logiciel Atlas il y a cinq groupes d'instructions qui doivent apparaître dans un ordre correct (Ordres des groupes des commandes dans un programme Atlas) comme le montre le Tableau.1 et la Figure 3.8 pressante diagramme de la simulation numérique via Silvaco

TABLE 3.1 – *L'ordre des commandes*[2]

	Groupe	Instruction
1	Spécification de structure	MESH, REGION, ELECTRODE, DOPING
2	Spécification du modèle	MATERIAL, MODELS, CONTACT, INTERFACE
3	Méthode numérique	METHOD
4	La solution	LOG, SOLVE, LOAD, SANE
5	Analyse	EXTRACT, TONYPLOT

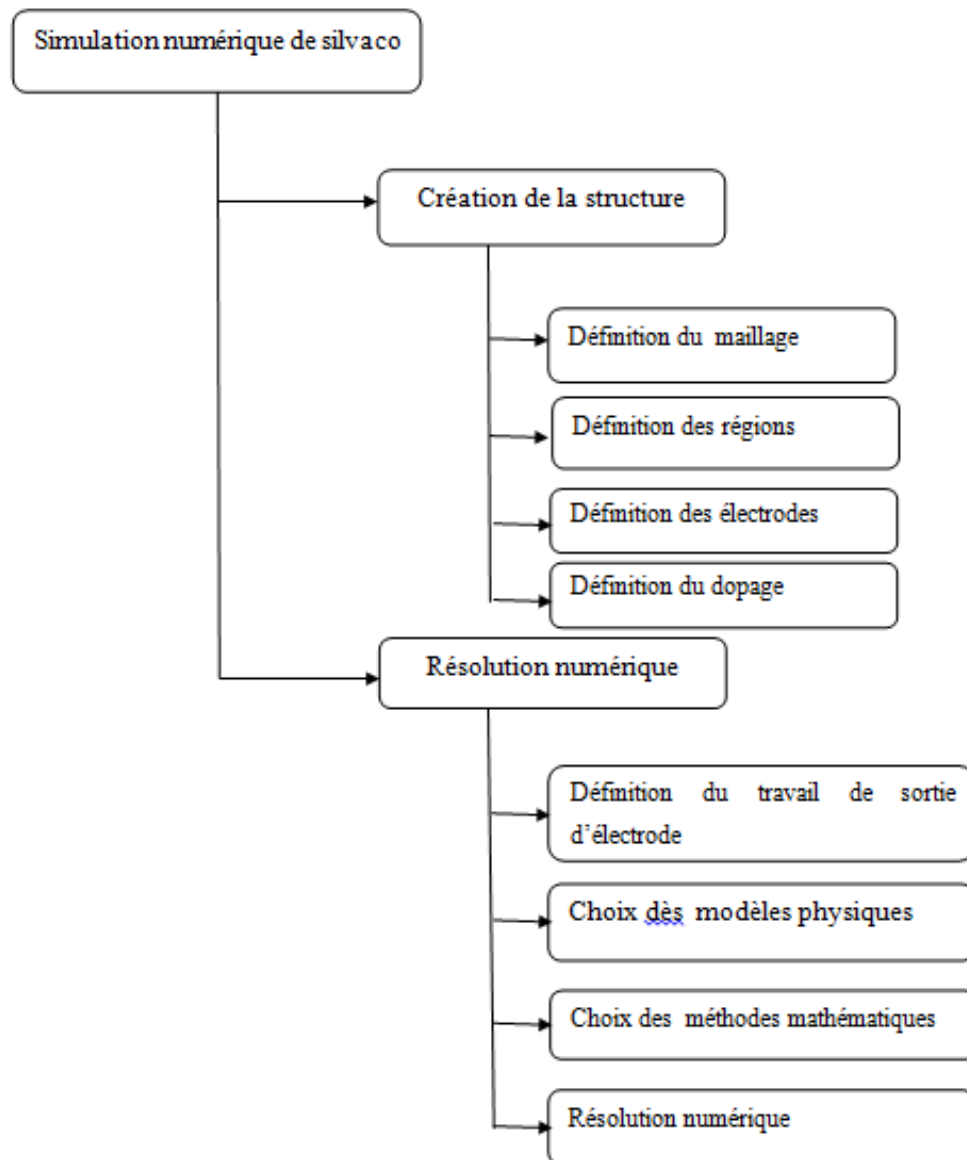


FIGURE 3.4 – Diagramme de la simulation numérique via Silvaco[3, 4]

3.3.1 Spécifier le maillage initial

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales, généralement l'instruction mesh sert pour spécifier le maillage. Dans notre étude, le maillage utilisé est à 2D, donc seuls les paramètres x et y sont définis. Le type peut être défini en 2 ou 3 dimensions. Ici, nous verrons comment définir une structure cylindrique 2D. La première déclaration doit être :

↳ *MAILLECYLINDRIQUE* > Ceci est suivi d'une série d'énoncés X.MESH et Y.MESH.

x.MESH LOCATION = < VALEUR > SPACING = < VALEUR >
y.MESH LOCATION = < VALEUR > SPACING = < VALEUR >

Exemple :

x.mesh loc=0.0 spac=0.2
x.mesh loc=0.4 spac=0.2
x.mesh loc=0.9 spac=0.07
Loc : définit l'intervalle de maillage

Spac : définit la résolution du maillage

3.3.2 Région

Après avoir déterminé le maillage, il est maintenant nécessaire de définir les régions. Les instructions de région spécifient l'emplacement des matériaux dans un maillage défini précédemment. Les numéros de région, doivent commencer à 1 et sont augmentés pour chaque déclaration de région suivante. Dans Atlas, le nombre maximum de régions pouvant être définies est 15 000. L'instruction de région est donnée sous forme de flux.

NUMÉRO DE RÉGION = MATERIEL INTEGRE= POSITION =PARAMÈTRES

Les paramètres de position sont spécifiés en microns à l'aide des paramètres X.MIN, X.MAX, Y.MIN et Y.MAX.

Exemple :

Region num=1 material=Au y.max=0.0
region num=1 material=GaN y.min=0.4

3.3.3 Électrode

Une fois les régions et les matériaux spécifiés, au moins une électrode en contact avec un matériau semi-conducteur doit être définie. Ceci est fait avec l'instruction ELECTRODE.

ELECTRODE NAME = < NOMD'LECTRODE > < POSITIONPARAMETERS >

Les instructions suivantes :

X.MIN : Spécifie le point de départ de l'électrode.

RIGHT : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure (inverse :LEFT).

TOP : la position de l'électrode est en haut de la structure (inverse : BOTTOM).

Exemple

Electr name=anode num=1 top x.min=0.0 x.max=2.0 y.min=-0.1 y.max=0.0

Electr name=cathode num=2 top x.min=3.0 x.max=5.0 y.min=-0.1 y.max=0.0

3.3.4 dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit : Les paramètres de position peuvent être définis par X.MIN, X.MAX, Y.MINET Y.MAX ou par le type de matériau ou par le numéro de région. Par exemple, vous pouvez spécifier comme flux.

DOPING N.TYPE CONC = 1.2E17 MATERIAU UNIFORME = GaN

3.3.5 MATERIAL

MATERIAL permet de définir des paramètres propres associés à chaque matériau tels que le bande interdite, la permittivité, la mobilité des porteurs. Dans ATLAS, les paramètres par défauts de plusieurs matériaux sont déjà implémentés.

3.3.6 INTERFACE

INTERFACE permet de définir les paramètres associés à l'interface de deux régions. Ces paramètres sont appliqués à l'interface

3.3.7 BEAM

BEAM indique un signal d'entrée optique sous forme d'un faisceau de lumière monochromatique ou polychromatique. Le faisceau ainsi défini est activé avec la commande SOLVE. BEAM est utilisé pour calculer des courants sous lumière ou des réponses spectrales.

3.3.8 MODELS

MODELS spécifie les modèles physiques utilisés et la température globale de la structure.

Les modèles et les paramètres de matériau sont choisis en 3D en commun avec d'autres modules 2D à l'aide des instructions MODELS, IMPACT, MATERIAL, MOBILITY, INTERFACE et CONTACT. Les modèles physiques peuvent être regroupés en cinq classes : mobilité, recombinaison, statistiques des porteurs, ionisation par impact et effet tunnel

3.3.9 METHOD

METHOD permet de choisir les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et aussi de choisir les paramètres liés à ces algorithmes.

3.3.10 L'analyse des résultats :

Tony Plot :

TonyPlot est un outil de post-traitement graphique à utiliser avec tous les simulateurs Silvaco. Il fait partie intégrante des outils interactifs VWF. Tony Plot peut fonctionner de manière autonome ou avec d'autres outils interactifs VWF, tels que DECKBUILD, VWF ou SPDB. Pour tracer un fichier journal ou plusieurs fichiers journal avec TonyPlot l'instruction sont respectivement TONYPLOT file1.LOG TONYPLOT - OVERLAY fichier1.LOG fichier2.LOG

▷ **LOG** permet d'enregistrer toutes les caractéristiques électriques calculées par ATLAS dans un fichier de type « .log ». Suivant le régime (continu, alternatif ou transitoire), toutes les données générées par la commande SOLVE sont enregistrées dans ce fichier.

▷ **LOAD** charge des solutions antérieures qui vont ainsi servir comme valeur initiale pour trouver la solution d'autres points de polarisation.

▷ **SOLVE** permet d'ordonner à ATLAS de trouver une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'environnement de l'ATLAS tel que la spécification de structure, le maillage, Région et Spécification de modèles physiques. Cet outil permet donc l'optimisation, la calibration des simulateurs de procédés et de dispositifs ,il permet de connaître l'influence de quelques paramètres sur l'évolution d'un grand nombre de composants semi-conducteurs en régime continu, en fonction de la température ou fréquence. . . .ect

Références

[1] F. Bourouba, Modelisation et simulation des contacts metal-semiconducteur à barrière inhomogène, Thèse de doctorat, in : univ setif 2010.

[2] A.U.s.M. SILVACO-TCAD, Silvaco International, California (2004).

[3] M. Tang, Etudes et modélisation compacte du transistor FinFET, Thèse de doctorat, in : Strasbourg, 2009.

[4] R. Negru, Conception et modélisation de pixels de photodétection : Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme détecteurs de particules, Thèse de doctorat, in : Palaiseau, Ecole polytechnique, 2008.

[5] M. MANCER, Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs), Thèse de doctorat, in : Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons étudié le transistor à effet de champ AlGAN/-GaN HEMT, influence sur les performances d'un transistor à effet de champ HEMT a base de GaN et que Atlas-Silvaco nous offre un outil de simulation a la fois physique et électrique qualifié comme L'influence des propriétés physiques (le dopage) et structurales (longueur de la grille, distance entre le drain et la source) ont été explorés durant notre simulation bidimensionnel. Les résultats obtenus dans cette section de mémoire prouvent que ces paramètres ont une forte

4.2 Interprétation des Résultats

4.3 Paramètres de simulation

Le tableau.1 donne les paramètres physiques, électriques et technologiques de GaN utilisé dans la simulation.

TABLE 4.1 – *paramètres physiques, électriques et technologiques de GaN)*

Paramètres	Symbol	Value
Épaisseur Cap layé GaN (nm)	e	1
Épaisseur Couche supplémentaire AlGaN (nm)	e	5
Épaisseur Couche donneuse AlGaN (nm)	e	10
Épaisseur Espaceur AlGaN (nm)	e	5
Épaisseur Couche tampon GaN	e	800
Épaisseur Couche de nucleation GaN (nm)	e	270
Épaisseur Substrat (Al ₂ O ₃)		200
Bande interdite (eV)	E _g	1.40
travail de sortie (eV)	Φ _n	5.65
Affinité électronique (eV)	χ	1.75
Constante diélectrique	ε	3.32

Nous donnons à la figure 4.1, une vue en coupe schématique de la structure du transistor que nous allons simuler sous SILVACO.

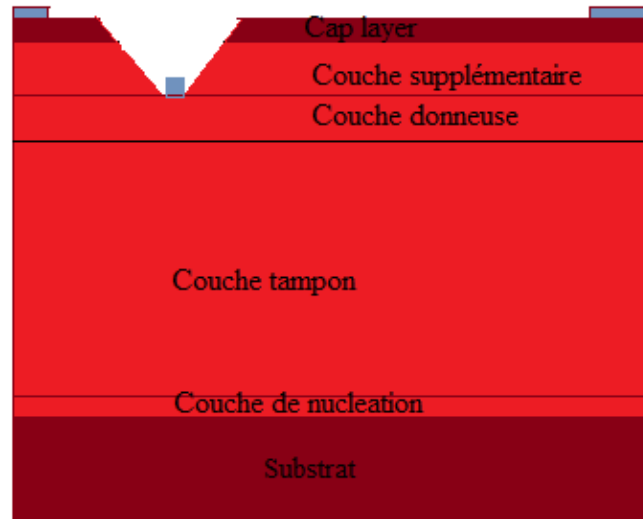


FIGURE 4.1 – Coupe schématique du HEMT AlGaIn/GaN

4.4 Les caractéristiques électriques du HEMT

4.4.1 Variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds})

La figure 4.2 montre l'effet de variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaIn/GaN HEMT A partir de cette

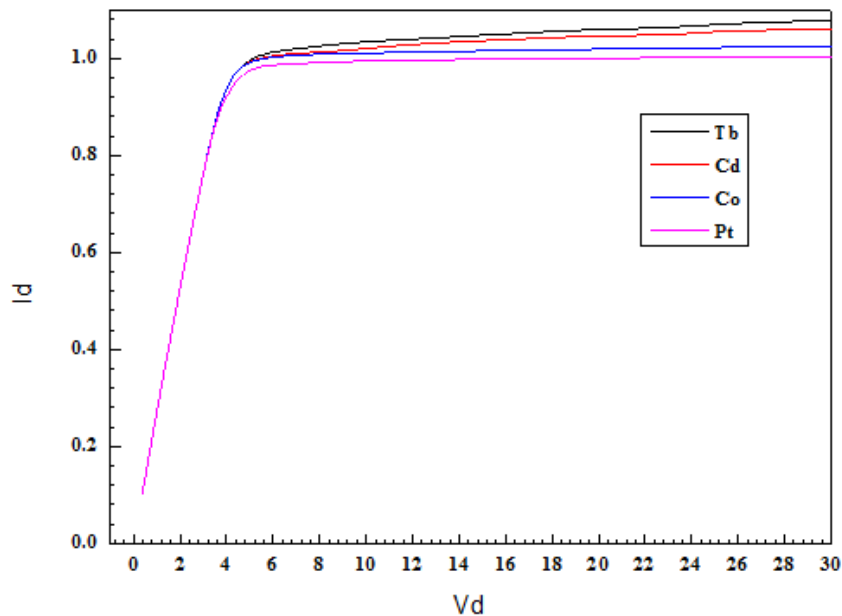


FIGURE 4.2 – Variation du travail de sortie de la Grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds})

figure, le courant Drain-Source diminue avec l'augmentation du travail de sortie de la grille a cause de l'augmentation des dislocations du réseau cristallin, suite au désaccord de maille.

4.4.2 Variation du taux d'aluminium

La figure 4.3 montre les caractéristiques courant-tension (le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source) de la structure AlGaN / GaN , à la température de 300 K, dans une échelle normal avec Variation du taux d'aluminium.

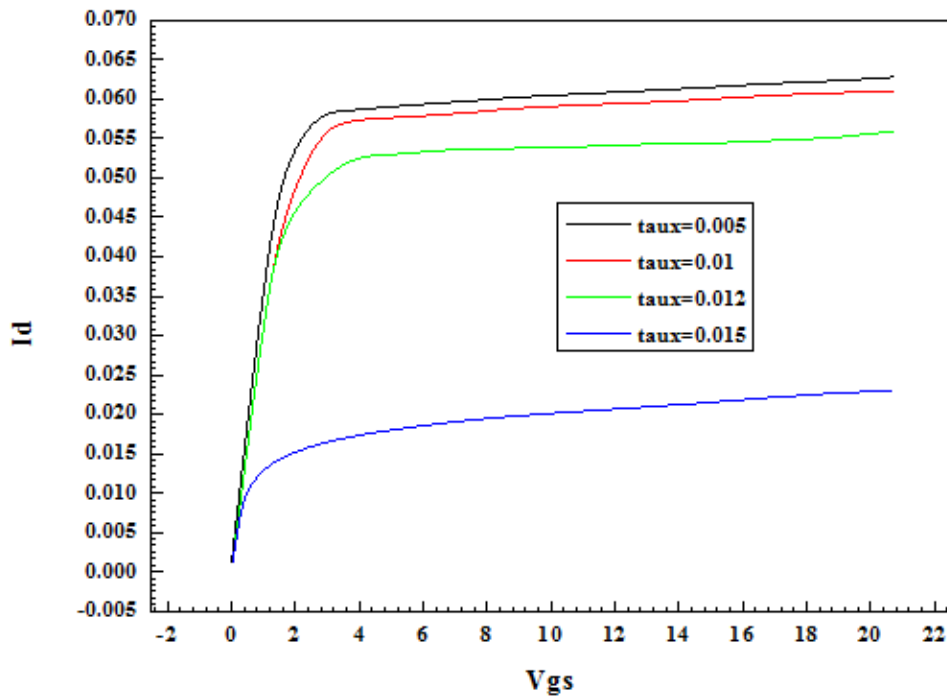


FIGURE 4.3 – le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différents taux d'aluminium

Une augmentation du taux d'aluminium provoque une hausse de la densité de porteurs. En revanche, la mobilité atteint un maximum pour une certaine concentration d'aluminium. Au-delà de cette concentration, les contraintes deviennent trop importantes et les effets de dispersion ainsi que les rugosités d'interface provoquent une baisse de la mobilité

4.4.3 Variation de l'épaisseur de la couche donneuse

La figure 4.4 représente l'influence de l'épaisseur de la couche donneuse sur la caractéristique courant-tension (le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source) de la structure AlGaN /GaN. Nous faisons varier l'épaisseur de la couche donneuse de 20nm à 30nm.

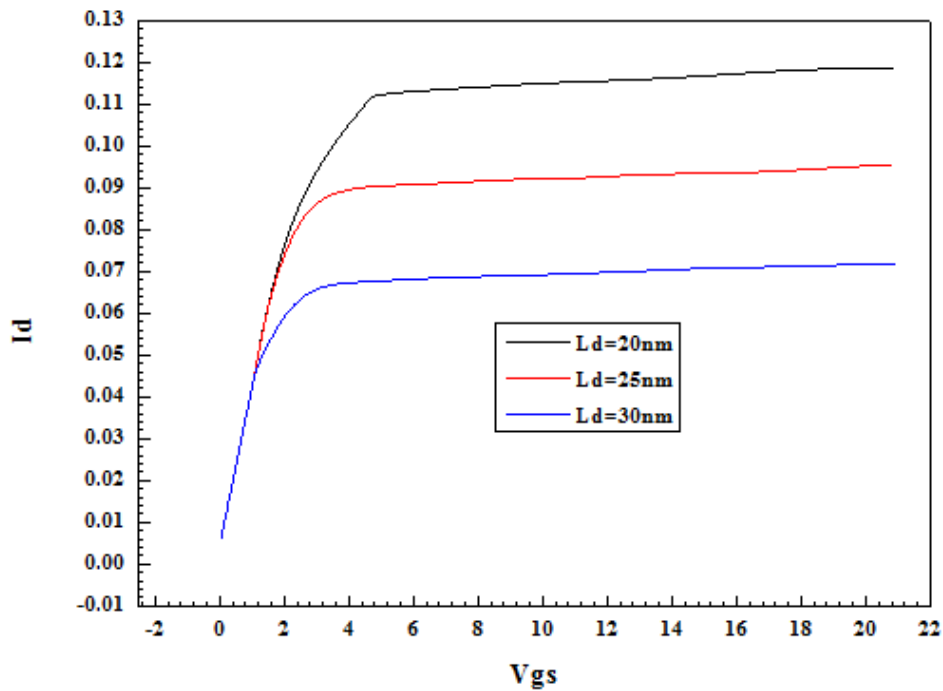


FIGURE 4.4 – le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes épaisseurs de la couche AlGaN

Il est bien connu que tant la densité des électrons dans canal est importante, la conduction est meilleure et par suite le courant I_{dsmax} est plus grand, mais ce n'est pas le cas toujours spécialement dans les hétérojonctions a nano-dimensions est cela est principalement due a l'augmentation de la densité de charge.

Pour les épaisseurs respectives 20 et 35nm de la couche donneuse, le courant passe de 60 à 120 mA environ à cause de l'augmentation de la densité de charge.

4.4.4 Variation de dopage de la couche donneuse AlGaN

La Figure 4.5 montre les résultats de la simulation le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes valeurs de dopage AlGaN . Nous faisons varier dopage AlGaN entre $2.E20$ et $4.E19$.

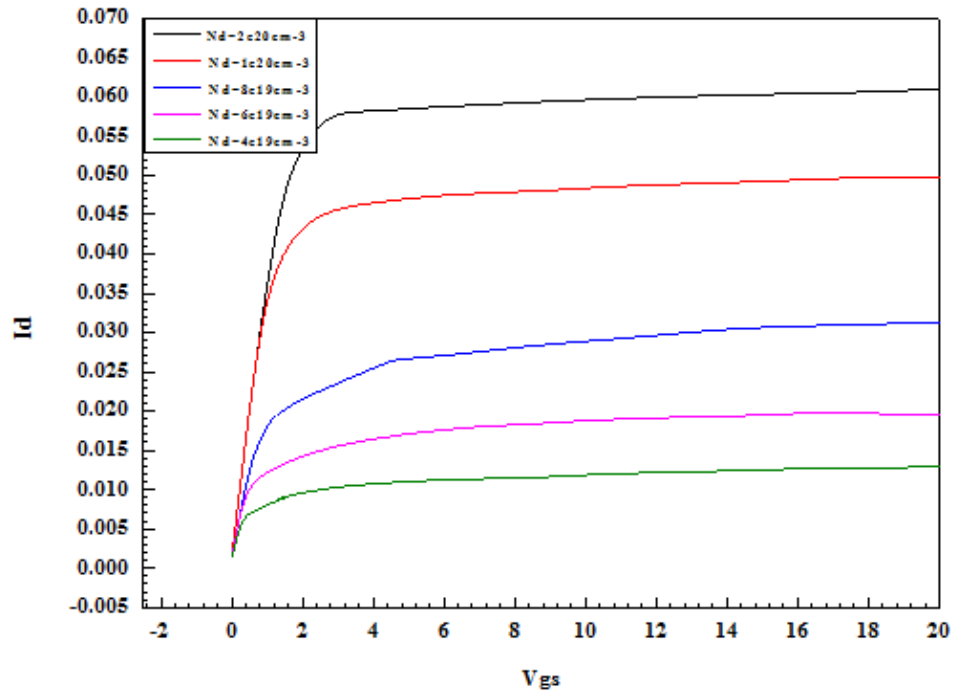


FIGURE 4.5 – le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes valeurs de dopage AlGaN

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

4.4.5 Variation du dopage de la couche tampon GaN

La figure 4.6 montre l'influence du dopage de la couche tampon GaN sur le courant de drain. L'augmentation de la tension de drain a un comportement habituel, elle augmente avec l'augmentation de dopage.

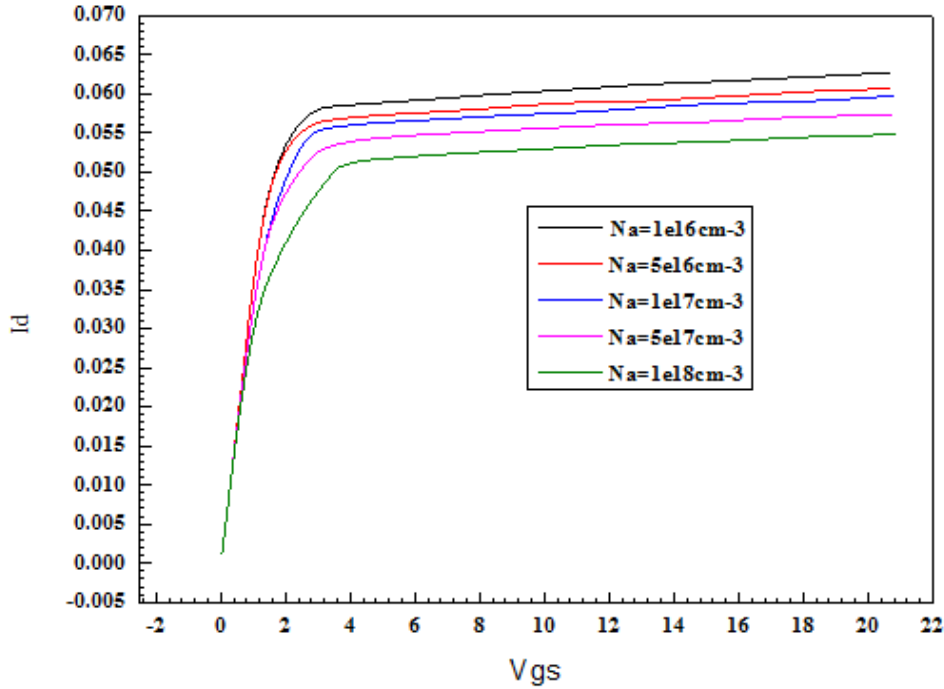


FIGURE 4.6 – le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de dopage GaN

Selon la figure 4.6, on remarque que l'augmentation du dopage dans le canal n'améliore pas la caractéristique de transfert $I_{ds} V_{ds}$.

Il est bien connu que tant la densité des électrons dans canal est importante, la conduction est meilleure et par suite le courant I_d est plus grand, mais ce n'est pas le cas toujours spécialement dans les hétérojonctions à nano-dimensions est cela est principalement due au phénomène de dispersion.

4.4.6 L'influence de la température

L'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension de la diode Schottky est montrée par les résultats simulés faites sur ces jonctions. Les caractéristiques le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de température, pour différentes valeurs de températures, sont présentées par les figures suivantes :

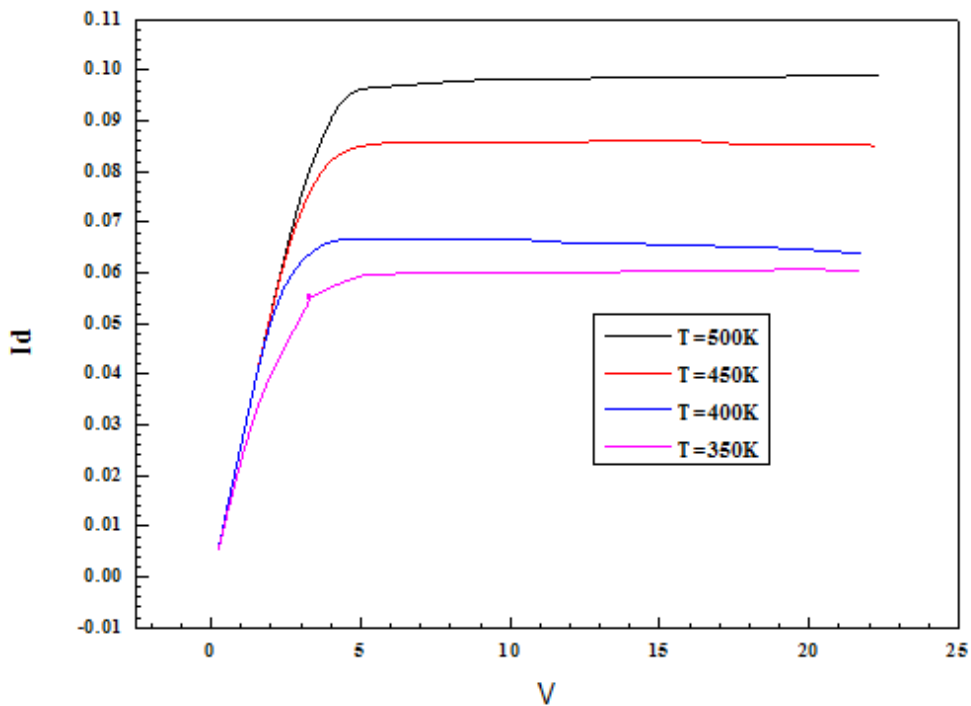


FIGURE 4.7 – L'influence de la température sur le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source pour différentes valeurs de température

4.5 L'influence de paramètre technologique

4.5.1 L'effet de la longueur de la grille (Lg) sur les caractéristiques du transistor HEMT

La figure 4.8 illustre la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor HEMT en fonction de la longueur de la grille a la température ambiante. Selon la figure suivante, il est bien clair que la réduction de la

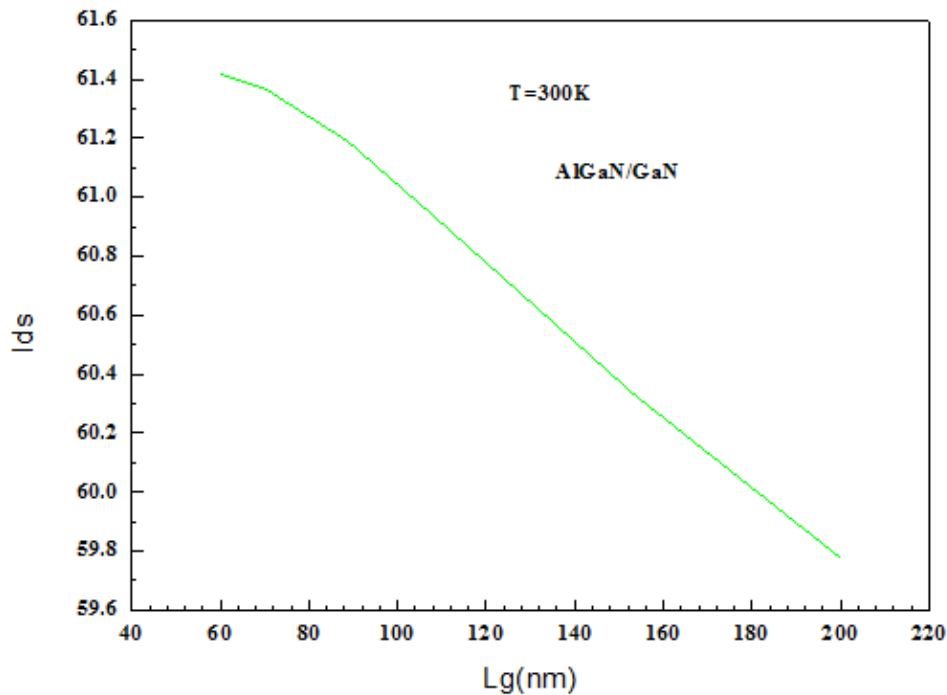


FIGURE 4.8 – L'évolution de la caractéristique de transfert courant-drain- tension-drain (I_{ds} - V_{ds}) du transistor HEMT en fonction de la longueur de la grille

longueur de la grille augmente le courant du canal. Cela est principalement dû à l'augmentation du champ électrique latéral qui est inversement proportionnel à la longueur de la grille selon l'équation suivante :

$$E = \frac{V}{L_g} \quad (4.1)$$

Cette monté de champ augmente le courant du canal I_{ds} , sachant que ce dernier est principalement un courant d'entraînement dont :

$$J_d(\text{ladensitducourant}) = A \cdot \sigma \cdot E. \quad (4.2)$$

Ici, σ est la conductivité du canal (spécifie le matériau), A est la surface du canal et V le potentiel.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les méthodes de caractérisation électriques ont été présentées. La caractérisation en régime directe permet d'évaluer les performances des composants. Pour cela, Nous avons calculé les différentes caractéristiques en fonction des grandeurs internes du dispositif : les épaisseurs et les dopages des différentes couches. Ainsi, nous pourrions dire qu'un transistor HEMT AlGaN/GaN

Références

T. Dewolf, Nano-caractérisation des mécanismes de commutation dans les mémoires résistives à base d'HfO₂, in : Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2018.

[2] E. Bersch, S. Rangan, R.A. Bartynski, E. Garfunkel, E. Vescovo, *Physical review B* 78 (2008) 085114.

[3] M. Saadi, Etude des mécanismes de commutation de résistance dans des dispositifs Métal (Ag)/Isolant (HfO₂)/Métal, application aux mémoires résistives à pont conducteur (CBRAMs), in : 2017.

[4] G.D. Wilk, R.M. Wallace, J. Anthony, *Journal of applied physics* 89 (2001) 5243-5275.

[5] A. Shetty, B. Roul, S. Mukundan, L. Mohan, G. Chandan, K. Vinoy, S. Krupanidhi, *AIP Advances* 5 (2015) 097103.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, nous vivons l'ère de la rapidité des applications technologiques dans différents domaines. Cette rapidité de développement est liée à l'efficacité et à la performance des composants élaborés. Le transistor à effet de champ HEMT à base de GaN est la plus adaptée aux applications des hautes fréquences.

Ce modeste travail avait pour but l'étude du comportement électrique des transistors à effet de champ HEMT à base de GaN et spécialement les structures AlGaN / GaN. Dans ce travail, nous avons présenté en premier lieu les propriétés électriques de III-V qui est le composant de base de notre structure.

Ensuite, nous avons illustré les caractéristiques courant-tension (I-V) simulées des diodes à jonctions métal/semi-conducteur (diode Schottky) et traduit les mécanismes de passage de courant à travers ces jonctions.

▷ montre l'effet de variation du travail de sortie de la grille sur la caractéristique (I_{ds} - V_{ds}) du transistor AlGaN/GaN HEMT

▷ montre les caractéristiques courant-tension (le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source) de la structure AlGaN / GaN, à la température de 300 K, dans une échelle normale avec variation du taux d'aluminium.

▷ l'influence de l'épaisseur de la couche donneuse sur la caractéristique courant-tension (le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source) de la structure AlGaN / GaN. Nous faisons varier l'épaisseur de la couche donneuse de 20nm à 30nm.

▷ montre les résultats de la simulation le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source, pour différentes valeurs de dopage AlGaN. Nous faisons varier le dopage AlGaN entre $2 \cdot 10^{20}$ et $4 \cdot 10^{19}$.

▷ Variation du dopage de la couche tampon GaN

enfin nous avons montré l'influence de la température sur les caractéristiques le courant de drain en fonction de la tension Drain-Source des structures AlGa_N / GaN dans une gamme de températures (500 K - 350 K).

En perspective, nous pouvons compléter cette étude en apportant plus d'informations sur le comportement électriques de la structure l'AlGa_N/Ga_N HEMT, en réalisant les travaux suivants :

- ▷ L'influence des paramètres technologique de l'AlGa_N/Ga_N HEMT.
- ▷ Les effets de couche Pérovskite sur le comportement électriques des les structures (AlGa_N / Ga_N)
- ▷ L'effet de la concentration d'interface sur les structures AlGa_N / Ga_N .

Résumé

Durant cette dernière décennie, Les nitrures d'éléments III tels que le GaN, l'InN, l'AlN et BN, sont entrain de connaitre un essor considérable. L'intérêt croissant pour la construction des dispositifs électroniques à Semi-conducteur pour les applications dans les domaines de la micro, de la nano et de l'optoélectronique. Notre travail consiste à simuler un transistor HEMT AlGaN/GaN, on tenant compte de toutes les grandeurs qui puissent influencer ses performances. Ainsi, nous pourrions optimizer notre dispositif.

Mots clés : Semi-conducteurs ; AlGaN ; transistor ; HEMT, SILVACO

Abstract

During the last decade, the nitrides of elements III such as GaN, InN, AlN and BN, are experiencing a considerable boom. The growing interest in the construction of semiconductor electronic devices for applications in the fields of micro, nano and optoelectronics.

Our work consists in simulating a transistor HEMT AlGaN/GaN, we take account of all the sizes which can influence its performances. Thus, we could optimize our device.

Keywords : semiconductors ; AlGaN ; Transistor ; HEMT, SILVACO