



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE
Pour obtenir le diplôme de
MASTER EN TELECOM
Spécialité : télécommunications

Présenté par:

Boualem Maamar

Transport électrique dans les nitrure III-V sous champ électrique élevé pour futures générations de composants

Soutenu le : 30 /09/2024

devant le jury composé de :

Président	Benabdellah Yagoubi	Grade	Université de MOSTAGANEM
Examineur	Mohamed Abdeldjabbar Kouadria	Grade	Université de MOSTAGANEM
Encadrant	Brahim Benbakhti	Grade	Université de MOSTAGANEM
Co-Encadrant	Fatiha Bechiri		Université de MOSTAGANEM

Année Universitaire 2023/2024

Dédicaces

*J'adresse ce travail à mes parents bien-aimés,
à mes frères et sœurs, et à mes enseignants de
l'université, pour leur soutien et leurs
précieuses orientations.*

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement mon professeur benbekhti Ibrahim pour ses précieux conseils et son soutien indéfectible.

Je remercie également ma famille et mes amis pour leur encouragement constant tout au long de ce parcours.

Je prie Allah, le Tout-Puissant, pour accorder à ma mère un prompt rétablissement et pour lui offrir santé et bien-être.

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur l'étude du transport électronique dans les nitrures III-V, en particulier le GaN (nitrure de gallium), sous l'effet de champs électriques élevés et à des températures élevées. À travers des modélisations et des simulations, nous avons exploré les impacts de la température sur des paramètres essentiels tels que la mobilité électronique, la vitesse de dérive, la vitesse de saturation, et la conductivité thermique. Les résultats montrent que l'augmentation de la température provoque une dégradation des performances du dispositif, notamment en réduisant la mobilité des porteurs et en augmentant la dissipation thermique, ce qui entraîne une diminution de la fiabilité. L'étude souligne également l'importance des substrats, comme le carbure de silicium (SiC), pour améliorer la dissipation de chaleur et maintenir les performances à des niveaux optimaux.

Mots clés :

Nitrures III-V, mobilité électronique, GaN, vitesse de dérive, conductivité thermique, auto-échauffement, substrat SiC

Abstract:

This project explores electronic transport in III-V nitrides, particularly gallium nitride (GaN), under high electric fields and elevated temperatures. The increase in temperature reduces electron mobility and drift velocity, while increasing thermal dissipation. Silicon carbide (SiC) substrates improve thermal management, extending the lifespan of electronic devices.

Keywords:

III-V nitrides, electron mobility, GaN, drift velocity, thermal conductivity, self-heating, SiC substrate

المخلص :

نيتريد وبالأخص، III-V المجموعة نتريدات في الإلكتروني النقل التخرج مشروع هذا يستكشف درجة زيادة تؤدي المرتفعة الحرارة ودرجات الكهربائية المجالات تأثير تحت، (GaN) الغاليوم ركيزة. الحراري التبيد في وزيادة الانجراف، وسرعة الإلكترونات تنقل في انخفاض إلى الحرارة الإلكتروني الأجهزة عمر من يعزز مما الحرارة، إدارة تحسين في تساهم (SiC) السيليكون كربيد

الكلمات المفتاحية

.الحرارة درجة السيليكون، كربيد التنقل، (GaN) الغاليوم نيتريد، III-V نتريدات .:

Sommaire

Dedicaces	Erreur ! Signet non défini.
Remerciements.....	III
Résumé	IV
Introduction générale.....	1
Chapitre I :	3
Transistors HEMTs AlGa _N /Ga _N et Technologie Ga _N : Propriétés et Performances	3
I.1 Introduction	4
I.2 Propriétés de base de Ga_N	4
I.2.1 Structure cristalline	5
I.2.2 Structure de la bande électronique	9
I.3 Gaz électronique bidimensionnel	10
I.3.1 Polarisation spontanée et piezoélectrique	11
I.4 Domaines d'application de Ga_N	14
I.5 Les alliages de nitrite III	15
I.6 Hétérostructure Al_xGa_{1-x}N/Ga_N	16
I.7 AlGa_N /Ga_N Transistors à mobilité électrique élevée (HEMTs)	16
I.8. Transistors à haute mobilité électronique (HEMTS)	17
I.8.1. Contexte	18
I.8.1.1.Histoire des HEMT	19
I.8.1.2.Principe de fonctionnement des HEMT	21
I.8.2. Structure des HEMT Al_xGa_{1-x}N/Ga_N	22
I.8.2.1. HEMT basés sur le GAN	23
I.8.2.2 Description de la structure d'un HEMT	23
I.8.2.3 Description des couches	24
I.8.2.4 Formation et caractéristiques de la 2DEG	25
I.9. Techniques de croissance et choix de substrates	26
I.9.1. Substrats de carbure de silicium (SiC)	26
I.9.2. Substrats de saphir	27
I.9.3. Substrats Ga_N et AlN	28
I.10 Opération des HEMT	30
I.10.1. Caractéristiques de DC	31
I.10.2.Dégradation des performances de l' & apos; HEMT	32
I.10.2.1. Mécanismes de dégradation	32
I.10.3 Mécanismes de décomposition Substrat	34
Chapitre II:	37
Étude Thermique et Comportement des HEMT AlGa_N/Ga_N"	37
II.1 Introduction	38
II.2Description du modèle	39
II.2.1Modèle de contrôle de charge	39
II.2.2Mobilité à faible champ I0 de 2DEG	41
II.2.3. Vitesse de dérive vs. champ électrique	43

II.2.4 Champ critique ET	44
II.2.5 Caractéristique courant-tension	44
II.3. Incorporation de l'auto-échauffement	46
Chapitre III:	51
Résultats et discussions	51
III .1 Introduction :	52
III.2.Mobilité à faible champ par rapport à la température	52
III.3.Vitesse de dérive des électrons par rapport au champ électrique	53
III.4.Vitesse de saturation du GaN en fonction de la température du réseau pour ND=10¹⁷/cm³	53
III.5. Conductivité thermique par rapport à la température	54
III.6. Caractérisation et simulation du courant, de la température et de la puissance	55
III.6.1Caractéristiques I-V, sans et avec auto-échauffement	55
III.6.2.Température en fonction de la tension de drainage, sans et avec auto-échauffement	56
III.6.4.Les caractéristiques (I –V) pour les différents substrats	57
III.6.5.Température et tension de drain pour différents matériaux	58
III.6.6. (I – V) caractéristiques de différentes tensions de grille (Vgs)	59
III.6.7 Température en fonction de la tension de drain pour différentes tensions de grille (Vgs) . 60	
III.6.8. Température et dissipation de puissance	60
Conclusion générale	63
Chapitre I : Transistors HEMTs AlGa_xN/GaN et Technologie GaN : Propriétés et Performances	
I.1 Introduction	4
I.2 Propriétés de base de GaN	4
I.2.1 Structure cristalline	5
I.2.2 Structure de la bande électronique	9
I.3 Gaz électronique bidimensionnel	10
I.3.1 Polarisation spontanée et piezoélectrique	11
I.4 Domaines d'application de GaN	13
I.5 Les alliages de nitrite III	15
I.6 Hétérostructure Al_xGa_{1-x}N/GaN	15
I.7 AlGa_xN /GaN Transistors à mobilité électrique élevée (HEMTs)	16
I.8. Transistors à haute mobilité électronique (HEMTS)	17
I.8.1. Contexte	18
I.8.1.1.Histoire des HEMT	19
I.8.1.2.Principe de fonctionnement des HEMT	21
I.8.2. Structure des HEMT Al_xGa_{1-x}N/GaN	22
I.8.2.1. HEMT basés sur le GAN	23
I.8.2.2 Description de la structure d'un HEMT	24
I.8.2.3 Description des couches □	24
I.8.2.4 Formation et caractéristiques de la 2DEG	25

I.9. Techniques de croissance et choix de substrates	26
I.9.1. Substrats de carbure de silicium (SiC).....	27
I.9.2. Substrats de saphir	27
I.9.3. Substrats GaN et AlN.....	28
I.10 Opération des HEMT.....	30
I.10.1. Caractéristiques de DC	31
I.10.2. Dégradation des performances de l' & apos; HEMT	32
I.10.2.1. Mécanismes de dégradation	32
I.10.3 Mécanismes de décomposition Substrat	34

Chapitre II: Étude Thermique et Comportement des HEMT AlGaN/GaN''

II.1 Introduction	38
II.2 Description du modèle	39
II.2.1 Modèle de contrôle de charge	39
II.2.2 Mobilité à faible champ I_0 de 2DEG	41
II.2.3 Vitesse de dérive vs. champ électrique	43
II.2.4 Champ critique ET	44
II.2.5 Caractéristique courant-tension	44
II.3. Incorporation de l'auto-échauffement.....	46

Chapitre III: Résultats et discussions

III .1 Introduction :	52
III.2. Mobilité à faible champ par rapport à la température.....	52
III.3. Vitesse de dérive des électrons par rapport au champ électrique	53
III.4. Vitesse de saturation du GaN en fonction de la température du réseau pour ND=10 ¹⁷ /cm ³	53
III.5. Conductivité thermique par rapport à la température	54
III.6. Caractérisation et simulation du courant, de la température et de la puissance..	55
III.6.1 Caractéristiques I-V, sans et avec auto-échauffement	55
III.6.2. Température en fonction de la tension de drainage, sans et avec auto- échauffement.	56
III.6.4. Les caractéristiques (I –V) pour les différents substrats	57
III.6.5. Température et tension de drain pour différents matériaux	58
III.6.6. (I – V) caractéristiques de différentes tensions de grille (Vgs).....	59
III.6.7 Température en fonction de la tension de drain pour différentes tensions de grille (Vgs).....	60
III.6.8. Température et dissipation de puissance	60
Conclusion générale.....	63

ANNEX..... 70

Figure I.1 . (a) & (b) Structure de la grille HCP

Figure I.2. Éléments de symétrie du groupe de points 6mm pour GaN hexagonal

Figure I.3.D vue de la structure cristallographique de GaN hexagonal.

Figure I.4.Zones d'application de GaN

Figure I.5. Champs de polarisation piezoélectrique et spontanée

Figure I.6 .Diagramme généralisé des bandes d'énergie des HEMT[19]

Figure I.7.AlGa_N/Ga_N HEMT structure[21]

Figure I.8. Structure d'un transistor HEMT

Figure I.9. Diagramme de la structure AlGa_N / Ga_N[22]

Figure I.10. Création d'un puits potentiel dans un transistor HEMT

Figure I.11. a) Structure HEMT AlGaAs/GaAs simplifiée, b) diagramme de bande correspondant

Figure I.12. a) Structure HEMT AlGa_N/Ga_N simplifiée, b) diagramme de bande correspondant

Figure I.13. Caractéristique de sortie typique des dispositifs HEMT

Figure I.14.Schéma des mécanismes de dégradation dans les HEMT AlGa_N/Ga_N.

Figure II.1. Cross-sectional view of an AlGa_N/Ga_N HEMTs.

Figure II.2. Les étapes d'analyse pour la simulation thermique.

Figure III.1 : Vitesse de dérive électrique en fonction du champ électrique du GaN pour des températures de réseau différentes (300 K – 700 K) avec une concentration d'impuretés à 10^{17} cm^{-3}

Figure III.2 : Différence de température des conductivités thermiques β pour les substrats de variation (Si, SiC et GaN) sur des matériaux spécifiques au dispositif AlGa_N/Ga_N.

Figure III.3 : les caractéristiques (I –V) d'un HEMT AlGa_N/Ga_N pour différents substrats. La ligne violette fait référence à un substrat SiC, la ligne verte fait référence à un substrat GaN et la ligne bleue fait référence à un substrat Si.

Figure III.4 : Température en fonction de la tension de drain pour différents substrats. La ligne violette fait référence au substrat SiC, la ligne verte fait référence au substrat GaN et la ligne bleue fait référence au substrat Si.

Figure III.5 : Température en fonction de la dissipation de puissance

Introduction générale

Les progrès constants dans le domaine de la microélectronique et des nanotechnologies nécessitent la recherche de matériaux innovants capables de répondre aux exigences des futures générations de composants électroniques. Les nitrures du groupe III-V, en particulier les composés tels que le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'aluminium (AlN), se distinguent par leurs propriétés exceptionnelles, notamment une large bande interdite, une grande mobilité électronique et une forte résistance à des températures et des champs électriques élevés. Ces caractéristiques rendent ces matériaux particulièrement attractifs pour des applications dans les dispositifs à haute puissance et haute fréquence, ainsi que pour les technologies émergentes telles que les véhicules électriques, les télécommunications 5G et les systèmes radar.

Le transport électronique dans ces nitrures, sous l'effet de champs électriques élevés, constitue un axe de recherche crucial. En effet, la compréhension fine des mécanismes de transport électronique dans ces matériaux, dans des conditions extrêmes, est essentielle pour optimiser les performances des dispositifs et garantir leur fiabilité dans des applications critiques. Les phénomènes non linéaires, tels que l'échauffement électronique, la dégradation des performances et les effets de saturation de la vitesse des porteurs, doivent être étudiés et maîtrisés pour concevoir des composants de nouvelle génération plus efficaces et plus robustes.

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans ce contexte. Il vise à explorer les mécanismes fondamentaux du transport électronique dans les nitrures III-V sous champ électrique élevé, à travers des modélisations et des simulations numériques, afin de proposer des solutions pour l'amélioration des performances des dispositifs électroniques.

Chapitre I :

Transistors HEMTs AlGa_N/Ga_N et
Technologie Ga_N : Propriétés et
Performances

I.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de détailler le fonctionnement des transistors HEMTs à base du GaN. Puisque le transistor HEMT appartient à la famille du transistor à effet de champ, nous allons présenter tout d'abord les différents types d'un transistor FET. Par la suite on va passer au principe de fonctionnement de notre dispositif; cette partie est consacrée dans un premier temps à la physique du contact Schottky, où nous présenterons les cas possibles de ce contact. Dans un deuxième temps nous aborderons la notion, du gaz d'électron bidimensionnel 2DEG et la formation d'un puits énergétique triangulaire.

Puis on expliquera le rôle des différentes couches qui le constitue. L'effet de la contrainte sur l'énergie de gap et l'épaisseur de la couche épitaxiale seront évoqués dans la dernière partie.[02]

I.2 Propriétés de base de GaN

GaN est un matériau semi-conducteur très dur, mécaniquement stable à large écart de bande avec une capacité de chaleur élevée et une conductivité thermique. Dans sa forme pure, il résiste aux fissures et peut être déposé dans un film mince sur le saphir ou le carbure de silicium, en dépit de l'incompatibilité de leurs constantes de grille.

GaN peut être dopé avec du silicium (Si) ou avec de l'oxygène au type n et avec du magnésium (Mg) au type p. Cependant, les atomes Si et Mg modifient la façon dont les cristaux GaN se développent, introduisant des tensions tendues et les rendant fragiles.

Les composés de nitride de gallium ont également tendance à avoir une densité de dislocation élevée, dans l'ordre de 10^8 à 10^{10} défauts par centimètre carré.

Le comportement large-gap de GaN est lié à des changements spécifiques dans la structure de la bande électronique, l'occupation de la charge et les régions de liaison chimique.

Le Laboratoire de recherche de l'armée des États-Unis (ARL) a fourni la première mesure de la vitesse d'électrons de haut champ en GaN en 1999. Les scientifiques de l'ARL ont obtenu expérimentalement une vitesse maximale en état stable de $1,9 \times 10^7$ cm/s, avec un temps de transit de 2,5 picosecondes, atteint à un champ électrique de 225 kV/cm.

Avec cette information, la mobilité des électrons a été calculée, fournissant ainsi des données pour la conception des dispositifs GaN.[5]

Tableau I.1. Rapporte les principales propriétés physiques de GaN

Propriétés	
Formule chimique	GaN
Masse molaire	83,730 g/mol
Apparence	poudre jaune
Densité	6,1 g/cm ³
Point de fusion	> 1600 °C
Espacement de bande	3,4 eV (300 K, direct)
Mobilité électronique	1500 cm ² /(V·s) (300 K)
Conductivité thermique	1.3 W/(cm·K) (300 K)
Indice de réfraction (nD)	2.429

I.2.1 Structure cristalline

Le lien GaN dans le cristal de nitrite de gallium est fortement ionique et l'énergie de liaison est de 8,9 eV. Le lien ionique fort rend le nitrite de gallium très stable et a un point de fusion de 2500 o C [Van Vechten, 1973]. Le nitrite de gallium a deux structures cristallines différentes. La structure normalement stable est la structure hexagonale à emballage fermé (HCP) qui est l'une des deux façons où les sphères peuvent être emballées ensemble dans l'espace avec la plus grande densité possible et ont toujours un arrangement périodique. La structure est illustrée dans la figure I. 1. (a).

Il y a deux points de grille par cellule d'unité, l'un est à $(0,0,0)$ et l'autre est à $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$ ou $(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2})$, ce qui est équivalent. Une autre représentation de la structure HCP est présentée à la figure I.1. b), les trois atomes à l'intérieur du prisme hexagonal sont directement au-dessus des centres du triangle alternant à la base. Le paramètre de grille de HCP GaN est $a_1 = a_2 = 3.1887 \text{ \AA}$, $c = 5.1853 \text{ \AA}$. Le ratio de c/a est de 1.626, ce qui est très proche du ratio standard de 1.633 pour la grille hexagonale faite de sphères.

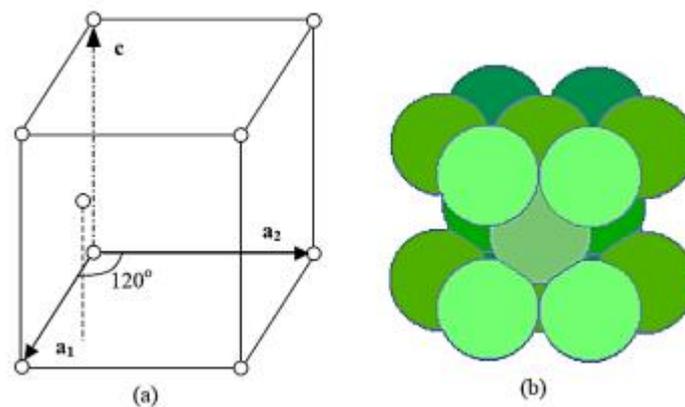


Figure I.1 .(a) & (b) Structure de la grille HCP

Comme on le voit à la figure I.1. a), la structure HCP du nitride de gallium appartient à la grille hexagonale primitive with $a_1 = a_2 \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$. Selon le symbole de Pearson [Pearson, 1967] qui indique la symétrie cristalline et le nombre d'atomes dans la cellule unitaire, la structure HCP pour GaN est désignée comme hP4.

Le « h » signifie « hexagonal », le capital « P » indique que le centre est « primitif » et le nombre « 4 » représente le nombre d'atomes dans la cellule unitaire du wurtzite GaN. Le groupe de points représentant la symétrie en grille bidimensionnelle pour la grille hexagonale GaN est de $6mm$. Le « 6 » signifie symétrie axiale rotative à 6 fois avec l'axe de rotation perpendiculaire au plan de la grille bidimensionnelle. L'axe est le C-axe de la grille tridimensionnelle. Les deux lettres “m” indiquent la présence de la symétrie de réflexion du miroir avec deux plans miroirs (lignes en deux dimensions)

parallèles à l'axe c rotatif. Les éléments de symétrie du groupe de points 6mm pour GaN hexagonal sont présentés à la figure I. 2

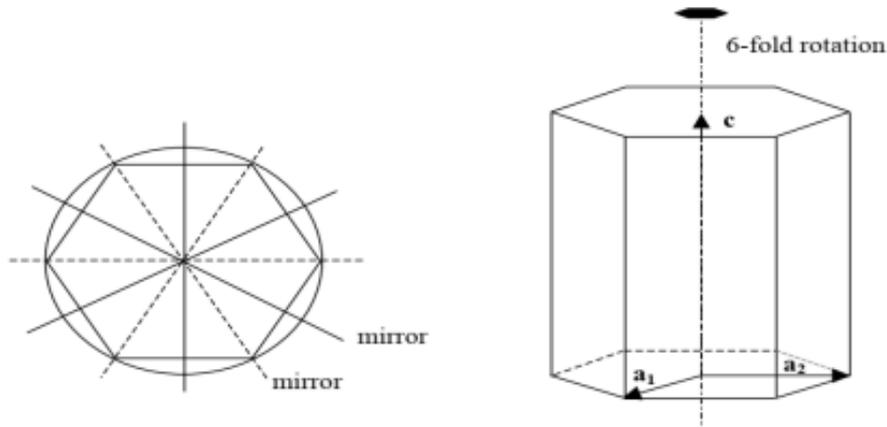


Figure I.2. Éléments de symétrie du groupe de points 6mm pour GaN hexagonal

Un groupe spatial implique non seulement la rotation, l'inversion et les éléments de symétrie de réflexion, mais aussi la traduction [Brown & Forsyth, 1973]. Une combinaison de rotation et de traduction peut être considérée comme une opération de symétrie avec un axe de vis, et une combinaison d'une réflexion et de la traduction peuvent être considérés comme un opération avec un plan glissant de simétrie. Le groupe spatial tridimensionnel de la grille hexagonale de nitrite de gallium appartient à P63mc (The No. is 186 among total of 230). La lettre capitale « P » signifie « primitif ». Cette dernière combinaison de chiffres et de lettres montre le fait que des éléments de traduction et de glissement sont ajoutés pour une description spatiale de la grille. Le "63" indique qu'il y a une répétition par rotation sur $360/6 = 60$ et la traduction de $3/6c = c/2$. La notation « mc » représente le fait que dans le sens tridimensionnel du groupe spatial, l'un des plans miroirs a été remplacé par le plan glissant, qui est parallèle au

vecteur de répétition c . Pour le composé GaN avec les deux atomes Ga et N, il y a des atomes de gallium à la fois $(0,0,0)$ et à $(2/3,1/3,1/2)$. Les atomes d'azote sont situés à $(0,0,u)$ et $(2/3,1/3,1/2+u)$, où u est 0,377, ce qui équivaut approximativement à $3/8$. La vue en 3D de la structure cristallographique de GaN à l'aide du logiciel en ligne Webemaps [Zuo & Mabon, UIUC] est présentée à la figure I. 3

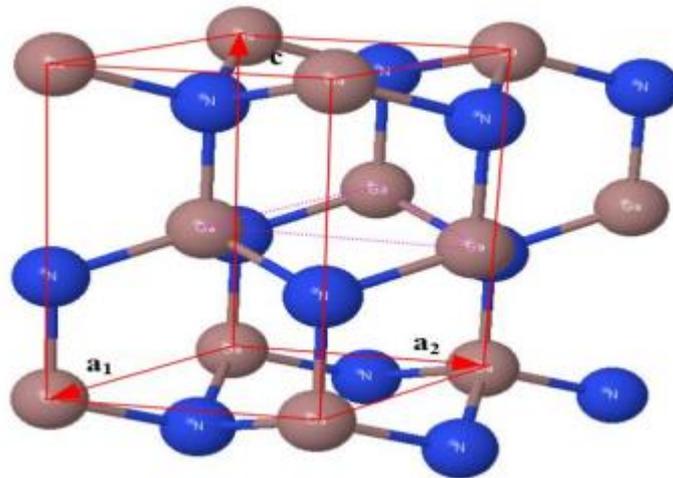


Figure I.3.D vue de la structure cristallographique de GaN hexagonal.

Une autre structure de GaN est la structure cubique centré face (FCC) qui est également fermé dispositif emballé avec la structure HCP. Les atomes sur les plans (111) de la structure FCC sont disposés dans un motif hexagonal de la même manière que les atomes des plans (0002) de la construction HCP. La différence est que les atomes de la troisième couche sont directement au-dessus de ceux de la première couche avec la séquence d'empilement d'ABABA[6]

Tableau I. 4. Différents plans de cristal importants de Wurtzite GaN ainsi que leurs indices et le miller

plan	Indice	Polarité
c - plan	(0001)	Polaire
a - plan	(11-20)	non-polaire
m - plan	(10 -10)	non-polaire
r - plan	(1-102)	non-polaire

GaN a été cultivé conventionnellement en c-plane pour utiliser la polarisation associée pour les applications électroniques. Toutefois, il a été constaté que les champs induits par la polarisation limitent les performances des dispositifs optiques, ce qui a suscité une plus grande attention à la fabrication de périphériques optiques sur GaN non polaire et semi-polaire.

1.2.2 Structure de la bande électronique

En physique de l'état solide, la structure électronique de bande (ou simplement la structure de bande) d'un solide décrit la plage de niveaux d'énergie que les électrons peuvent avoir à l'intérieur de lui, ainsi que les plages d'énergie qu'ils peuvent ne pas avoir. (called band gaps or forbidden bands).

La théorie des bandes dérive de ces bandes et de ces lacunes en examinant les fonctions d'ondes mécaniques quantiques autorisées d'un électron dans une grande grille périodique d'atomes ou de molécules. La théorie des bandes a été utilisée avec succès pour expliquer de nombreuses propriétés physiques des solides, telles que la résistivité électrique et l'absorption optique. (transistors, solar cells, etc.)

Les électrons d'un seul atome isolé occupent des orbitales atomiques dont chacune a un niveau d'énergie discrète, lorsque deux ou plusieurs atomes se rejoignent pour former une molécule, leurs orbitales atomiques se chevauchent.

Le principe d'exclusion de Pauli dit qu'aucun électron ne peut avoir le même nombre quantique dans une molécule. Ainsi, si deux atomes identiques se combinent pour former une molécule diatomique, chaque orbital atomique se divise en deux orbitales moléculaires d'énergie différente, permettant aux électrons des anciens orbitales atomiques d'occuper la nouvelle structure orbitale sans qu'aucun d'eux ait la même énergie.

De même, si un grand nombre de N d'atomes identiques se réunissent pour former un solide, comme une grille de cristal, les orbitales atomiques des atomes se chevauchent,

Comme le principe d'exclusion de Pauli dit qu'il n'y a pas deux électrons dans le solide qui aient le même nombre quantique, chaque orbital atomique se divise en orbitaux moléculaires N discrètes, chacun avec une énergie différente. Puisque le nombre d'atomes dans une pièce macroscopique de solide est un très grand nombre ($N \sim 10^{22}$) le nombre d'orbitales est très grand et donc ils sont très étroitement éloignés en énergie (de l'ordre de 10^{-22} eV). Les énergies des niveaux adjacents sont si proches que l'on peut les considérer comme un continuum, une bande d'énergie.[7]

I.3 Gaz électronique bidimensionnel

Un gaz électronique bidimensionnel (2DEG) est un modèle scientifique en physique de l'état solide. C'est un gaz électronique qui se déplace librement dans deux dimensions, mais fermement confiné dans la troisième.

Cette confinement étroite conduit à des niveaux d'énergie quantifiés pour le mouvement dans la troisième direction, qui peuvent ensuite être ignorés pour la plupart des problèmes. Ainsi, les électrons semblent être une feuille 2D intégrée dans un monde 3D. La construction analogique des trous est appelée un gaz de trou bidimensionnel (2DHG), et de tels systèmes ont de nombreuses propriétés utiles et intéressantes. La plupart des 2DEGs se trouvent dans des structures de type transistor fabriquées à partir de semi-conducteurs.

2DEG est un système précieux pour l'exploration de la physique du magnétisme de superconductivité et de leur coexistence.

La nécessité d'obtenir de nouvelles fonctionnalités dans les appareils électroniques modernes a conduit à la manipulation de la propriété d'un électron appelé degré de liberté de spin avec sa charge. Cela a donné naissance à un tout nouveau domaine de l'électronique-spin ou «spintronics».

La manipulation de la rotation électronique offre de nouvelles dimensions à la recherche fondamentale et appliquée, et le potentiel de nouvelles capacités pour la technologie de l'électronique. Ceci motive les études d'électrons polarisés en rotation dans un gaz électronique bidimensionnel à haute mobilité (2DEG)[8]

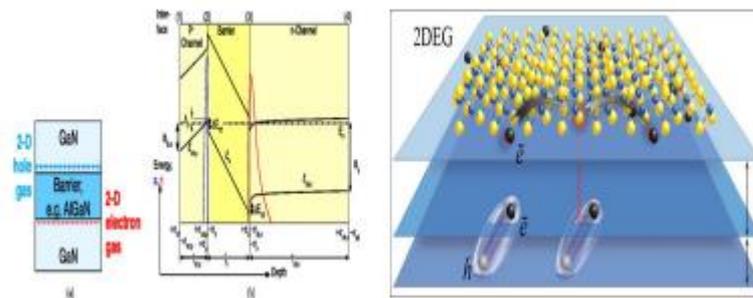


Figure I.4. Zones d'application de GaN

I.3.1 Polarisation spontanée et piezoélectrique

Le rôle de la polarisation spontanée et piezoélectrique dans les hétéro-structures des nitrides III-V est étudié. Les effets de polarisation et la polarité des cristaux sont examinés dans le contexte des matériaux et des conceptions de dispositifs d'hétérostructure des nitrides, et une analyse détaillée de leur influence sur les transistors d'effet de champ d'héro-structure du nitride est présentée.

Les effets combinés de la polarisation spontanée et piezoélectrique expliquent bien les concentrations de porteurs observées dans les structures de transistor AlGaIn/ GaN avec des concentrations Al faibles à modérées, tandis que les données pour les plus grandes concentrations d'Al sont cohérentes. Avec formation de défaut dans la barrière AlGaIn. L'analyse théorique suggère que l'incorporation d'In dans les couches de barrière et/ou de canal peut augmenter considérablement la charge de polarisation à l'interface d'hétérojonction. L'utilisation d'effets de polarisation pour l'ingénierie des structures de barrière Schottky avec de grandes améliorations de la hauteur de la barrière est également discutée, et les caractéristiques électriques des transistors avec des portes de barrières Schottki conventionnelles et polarisées sont présentées. On a constaté que la barrière améliorée par la polarisation produisait une réduction marquée du courant de fuite de la porte, mais avait peu d'effet sur la tension de décomposition du transistor. La forte polarisation spontanée et les effets piezoélectriques des semi-conducteurs de nitrite de wurtzite III ouvrent de nouvelles possibilités pour la conception des appareils. Dans les transistors à effet de champ à hétérojonction typiques, ces effets sont utilisés pour créer de grandes concentrations d'électrons à l'interface AlGaIn/GaN. Cependant, nous examinons plusieurs autres structures de dispositifs possibles qui comprennent les hétérojoints d'AlGaIn, GaN et InGaIn. Par exemple, nous trouvons que les forts champs électriques présents dans ces structures nous permettent de créer des puits quantiques de plus de 1 eV de profondeur.[9]

On étudie à la fois les matériaux Ga-face et N-face. Les concentrations bidimensionnelles de gaz électroniques dans ces structures sont trouvées à l'aide d'un solvant auto-cohérent 1-D Schrödinger-Poisson modifié pour incorporer les effets de la polarisation spontanée et piezoélectrique. Les conditions limitrophes des interfaces d'hétérojonction et de la surface et du substrat sont examinées en détail.

Les concentrations d'électrons sont comparées à celles obtenues expérimentalement par des mesures de capacitance-voltage et d'effet Hall. [10]

En raison de la nature ionique du lien métal-azote et de l'absence d'inversion du centre, les nitrides hexagonaux de phase (wurtzite) sont caractérisés par la présence d'une polarisation interne intense qui se compose de deux contributions: la polarisation spontanée et la Polarisation piézoélectrique. Les barycentres des charges positives (portées par des atomes métalliques) et négatives (portés par les atomes d'azote) ne coïncident pas dans la cellule élémentaire de la wurtzite et forment un ensemble de dipôles électriques orientés le long de l'axe c. Ainsi, une polarisation macroscopique de la puissance électrique apparaît, même dans une structure wurtzite idéale. Ce phénomène existe dans le cristal à l'équilibre en l'absence de tout stress externe. Bernardini et al. montrent que la polarisation spontanée des nitrides est très élevée. Cette polarisation spontanée P_{SP} se manifeste aux interfaces du matériau avec le vide ou avec un autre matériel d'une nature différente. Il crée une charge monopolaire $[P_{SP} \cdot n]$ à l'interface entre le matériau et le vide, ou $[P_{SP} (A) - P_{SP} (B)] \cdot n$ à l'interface entre deux matériaux A et B (n: unit vector normal to the surface).

Dans tous les nitrides de l'élément III, le vecteur de polarisation P_{SP} est orienté suivant la direction [0001]. Il n'existe aucune mesure expérimentale absolue de la polarisation spontanée des nitrides. Seul un calcul ab-initio, développé par Bernardini et al. donnent des valeurs numériques de P_{SP} qui est représenté dans le tableau 3. La polarisation spontanée n'existe pas dans les semi-conducteurs de phase cubique pour des raisons de symétrie. D'autre part, l'action d'une tension bi-axiale exercée dans le plan (111) brise la symétrie cubique et révèle une polarisation orientée le long de l'axe. Ce phénomène est connu sous le nom de piezoélectricité. Une polarisation piezoélectrique se produit également manifestée dans les semi-conducteurs de phase wurtzite lorsqu'une pression est placée sur eux appliquée. L'application d'une contrainte qui varie la distance entre les barycentres de charge positive et négative dans la cellule élémentaire. La

polarisation macroscopique obtenue est proportionnelle à la tension, $P_i^{pe} = \sum_j e_{ij} E_j$ où e_{ij} est le tensor piezoélectrique.

Pour un matériau soumis à une tension bi-axiale ϵ_{xx} dans le plan (0001), la polarisation piezoélectrique est donnée par $P_{pz} = 2d_{31} \times [C_{11} + C_{12} - 2C_{33}^2/C_{33}] \times \epsilon_{xx}$ où d est le coefficient piezoélectrique et les C_{ij} sont les constantes élastiques. Le tableau I.3 donne les valeurs des coefficients d'élasticité et des coefficients piezoélectriques pour GaN, AlN et InN

Tableau I.3. Coefficients spontanés de polarisation et d'élasticité et piezoélectrique

	GaN	AlN	InN
P(c/m ²)	-0.029	108	-0.032
C ₁₃ (GPa)	106	373	92
C ₃₃ (GPa)	389	373	224
e ₃₁ (c/m ²)	-0.35	-0.5	-0.57
e ₃₃ (c/m ²)	1.27	1.27	1.57

Dans les nitrures de l'élément III, la polarisation totale du milieu est donc la somme algébrique de deux contributions, l'une existant à l'équilibre (polarisation spontanée), l'autre sous l'action d'un stress externe (piezoelectric polarization) Figure I.5

Ces deux polarisations étant de la même nature physique, il est très difficile de déterminer expérimentalement la contribution de chacun d'eux.[11]

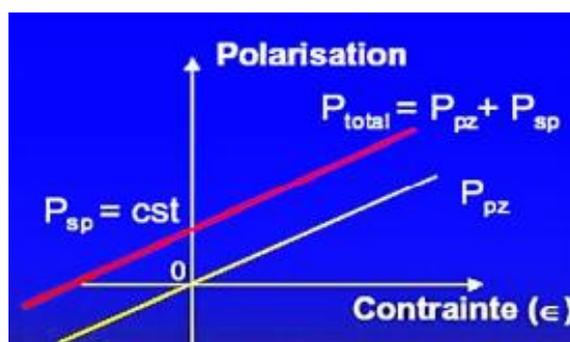


Figure I.5. Champs de polarisation piezoélectrique et spontanée

I.4 Domaines d'application de GaN

GaN est utilisé dans la production de périphériques de puissance semi-conducteurs ainsi que de composants RF et de diodes émettant de la lumière (LEDs).

GaN a démontré la capacité d'être la technologie de déplacement pour les semi-conducteurs en silicium dans la conversion de puissance, RF, et les applications analogiques.

- LEDs

Le mélange de GaN avec In (InGaIn) ou Al (AlGaIn), avec un écart de bande dépendant du rapport In ou Al à GaN, permet la fabrication de diodes émettant de la lumière (LED) avec des couleurs pouvant aller du rouge au ultraviolet.

- Transistors

Les transistors GaN sont adaptés pour les applications à haute fréquence, haute tension, température élevée et haute efficacité.

- Les radars

Ils sont également utilisés dans l'électronique militaire tels que les radars électriquement scannés actifs

- Les nanotubes et nanowires nanoscale

GaN sont proposés pour des applications en électronique à grande échelle, en optoélectronique et en biochimie.

- Spintronics potentiel

Quand dopé avec un métal de transition approprié comme le manganèse, GaN est un matériau prometteur spintronics (magnetic semiconductors).

Certains des avantages du composé GaN qui peuvent être utilisés dans les appareils en général comprennent. Moins de coûts énergétiques: Moins d'énergie est consommée comme chaleur, ce qui entraîne des matériaux moins coûteux et des systèmes qui peuvent être réduits en taille. Ceci est principalement dû au fait que les semi-conducteurs GaN sont plus efficaces que le silicium.

La densité de puissance est plus élevée: Les fréquences de commutation plus élevées que celles du silicium, en plus des températures de fonctionnement, contribuent à une diminution de la chaleur, à une réduction des besoins de refroidissement, à la conversion de la réfrigération liquide en refroidissant de l'air, à l'élimination des ventilateurs et à une baisse du magnétisme.[12]

Système moins coûteux: Même si les semi-conducteurs GaN sont plus chers que le silicium, la réduction des coûts est le résultat de la taille plus faible/coût des autres composants tels que les filtres, le refroidissement, les éléments de circuit inductif passif et capacitif.

Fréquences de commutation plus élevées: Étant donné que les dispositifs GaN ont des fréquences d'interruption supérieures, des inducteurs et des condensateurs plus petits peuvent être utilisés dans les circuits d'alimentation. L'inductance et la capacitance sont à la fois réduites pour correspondre à la fréquence, où une augmentation de 10x des fréquences entraîne une diminution de 10X des capacitances et des inductances. En conséquence, le poids, le coût et le volume sont tous considérablement réduits. La haute fréquence a également le potentiel de créer moins de bruit dans les applications de propulsion moteur..

I.5 Les alliages de nitride III

Les alliages III-Nitrides (GaN, InGaIn, AlGaIn et AlInGaIn) sont largement utilisés pour plusieurs applications, telles que les transistors à haute mobilité électronique (HEMT), les cellules solaires, les dispositifs émettant de la lumière. Ces alliages présentent un écart de bande ajustable avec composition, couvrant tout le spectre visible; cependant, ces matériaux souffrent de la présence de défauts structurels découlant des phénomènes de tension et de relaxation thermique. Nous étudions les propriétés de transport, les spectres optiques, les caractéristiques électriques à l'échelle macro et nanométrique et les effets de confinement quantique afin de clarifier le rôle des caractères matériels dans le comportement des appareils.

Le système de matériaux III-Nitrides a eu un impact sur l'efficacité énergétique à l'échelle mondiale grâce à son application aux diodes émettant de la lumière bleue (LEDs). Cet impact sur la technologie et la société a été reconnu par l'attribution du prix Nobel de physique 2014 à Isamu Akasaki, Hiroshi Amano et Shuji Nakamura. Les nitrides binaires couvrent un large éventail d'énergies d'écart de bande directe avec un écart d'énergie réglable par composition d'alliage allant de 0,65 eV (InN) à 6,0 eV (AlN). Toutefois, la grande incohérence des constantes de grille entre les nitrides et leurs substrates entraîne des hétéro-structures très tendues avec des alliages ternaires. Cette souche peut entraîner une formation défectueuse, une diminution de la qualité du matériau et des champs électriques liés à la polarisation dans la croissance du plan basal.[13]

I.6 Hétérostructure Al_xGa_{1-x}N/GaN

Les transistors à effet de champ hétéro-structurés Al_xGa_{1-x}N/GaN (HFET) pour les applications de haute température et de micro-ondes à haute puissance ont rapidement été élaborés. Une bonne compréhension des propriétés de transport du gaz électronique bidimensionnel (2DEG) à l'interface Al_xGa_{1-x}N/GaN est le moyen fondamental d'améliorer les comportements de fonctionnement des HFETs Al_xGa_{1-x}N/GaN dopés par modulation. Différent de celui des hétéro-structures Al_xGa_{1-x}As/GaAs en raison de la grande constante piezoélectrique des matériaux Al_xGa_{1-x}N et de l'incompatibilité de la grille entre Al_xGa_{1-x}N et GaN, la polarisation piezo électrique est très forte dans une couche d'Al_xGa_{1-x}N sur GaN.

On pense que la polarisation piezoélectrique de la barrière Al_xGa_{1-x}N est le principal facteur dans la détermination des propriétés de transport du 2DEG aux hétérointerfaces Al_xGa_{1-x}N/GaN. Comme nous le savons, la polarisation piezoélectrique est fortement influencée par la relaxation de la tension élastique de la couche Al_xGa_{1-x}N. La relaxation est déterminée par l'épaisseur de la couche Al_xGa_{1-x}N.

Les hétéro-structures Al_xGa_{1-x}N/GaN dopées de modulation avec des épaisseurs de barrière Al_xGa_{1-x}N différentes ont été déposées. La diffraction des rayons X de haute résolution indique que les hétéro-structures sont de grande qualité. La mobilité 2DEG est beaucoup plus élevée que celle des électrons dans les films GaN à 300 e77K. Il a été constaté que la relaxation partielle des barrières Al_xGa_{1-x}N a une forte influence sur la mobilité 2DEG.

[14]

I.7 AlGa_xN /GaN Transistors à mobilité électrique élevée (HEMTs).

fabriqués à partir de nitrure de gallium (GaN) s'est considérablement améliorée, offrant plusieurs avantages. Les HEMT en GaN bénéficient d'une haute densité de charge superficielle dans le gaz d'électrons bidimensionnels (2DEG), ce qui se traduit par une faible résistance en conduction. La haute conductivité thermique du GaN permet une dissipation de puissance élevée tout en maintenant des températures de canal basses. De plus, le champ de défaillance élevé du GaN permet de créer des dispositifs avec des tensions de défaillance allant de centaines à milliers de volts, ce qui le rend idéal pour des applications haute puissance.

Les avancées récentes ont permis aux HEMT en GaN d'atteindre des tensions de défaillance dépassant 1,5 à 1,9 kV, ouvrant la voie à leur utilisation dans l'électronique de puissance. Ces transistors possèdent également un produit faible de la résistance en conduction et de la capacité du dispositif, permettant des fréquences de commutation élevées et des systèmes de conversion de puissance à haute efficacité, avec des rendements supérieurs à 96-98 %.

Cependant, les HEMT en GaN peuvent avoir une durée de vie plus courte en raison de plusieurs mécanismes de dégradation. Ceux-ci incluent :

Dégradation de la jonction Schottky du gate: Augmentation du courant de fuite du gate due à des chemins de court-circuit localisés près du bord du gate.[15]

Dégradation par électrons chauds : Accumulation de charge négative près du bord du gate ou dans la région d'accès gate-drain, réduisant le courant de drain.

Délaminage de la passivation : Températures ou niveaux de puissance élevés entraînant un piégeage de charge et des fuites.

Dégradation dépendante du temps : Génération de défauts dans la hétérostructure AlGaIn/GaN

De plus, les dispositifs de puissance fonctionnant à des tensions de drain élevées peuvent subir des défaillances, caractérisées par une augmentation rapide du courant de drain lorsque la tension de drain atteint une valeur critique. La défaillance peut être catastrophique ou gérable en fonction de la méthode de mesure utilisée. Les chercheurs s'efforcent de comprendre les origines physiques des défaillances, y compris les mécanismes d'ionisation d'impact qui génèrent des paires électron-trou près du gate, afin d'améliorer la fiabilité et la performance des dispositifs. ansistors de haute mobilité électronique AlGaIn /GaN (HEMTs).

1.8. Transistors à haute mobilité électronique (HEMTs)

Un transistor à haute mobilité électronique (HEMT), également connu sous les noms de FET hétérostructuré (HFET) ou FET à dopage de modulation (MODFET), est un type de transistor à effet de champ qui utilise une jonction entre deux matériaux avec des écarts de bande différents comme canal, plutôt qu'une région dopée comme dans

les MOSFETs. Les matériaux courants pour les HEMTs incluent GaAs et AlGaAs, avec des variantes en nitrure de gallium (Ga_N) attirant l'attention pour leurs applications haute puissance. Les HEMTs excellent dans les applications haute fréquence, opérant jusqu'aux fréquences des ondes millimétriques, et sont utilisés dans des dispositifs tels que les téléphones mobiles, les récepteurs satellites et les systèmes radar.[16]

Le concept derrière les HEMTs, connu sous le nom de dopage par modulation, a été démontré pour la première fois en 1978 et consiste à créer un gaz électronique bidimensionnel à l'interface de deux semiconducteurs différents, ce qui améliore la mobilité des électrons. Le HEMT a été démontré avec succès pour la première fois en 1980 par Mimura et ses collègues, en utilisant les avancées de l'épitaxie par faisceau moléculaire pour une croissance précise des matériaux.

La première utilisation commerciale notable des HEMTs a été dans un amplificateur de 20 GHz par Fujitsu en 1983, ce qui a conduit à leur utilisation dans les radiotélescopes, comme le télescope de l'observatoire radio Nobeyama qui a découvert de nouvelles molécules interstellaires. Les HEMTs ont rapidement gagné en popularité dans les communications, notamment dans les récepteurs satellites, entraînant une réduction significative de la taille des antennes et une adoption généralisée. En 1988, environ 20 millions de récepteurs HEMT étaient produits annuellement.[17]

I.8.1. Contexte

Au cours des dernières décennies, de nouveaux matériaux semi-conducteurs, tels que le Ga_N, les oxydes métalliques et les matériaux 2D, ont été largement étudiés pour améliorer encore l'efficacité de la conversion et du stockage de l'énergie, en raison de leurs propriétés de matériau et d'appareil supérieures. Parmi eux, les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) AlGa_N/Ga_N basés sur Ga_N sont de bons candidats pour les applications de haute puissance, haute fréquence et faible perte en raison du champ de décomposition critique élevé et de la mobilité élevée des électrons. La tension de décomposition (BV) est l'un des objectifs de conception les plus importants, et les valeurs rapportées sont encore bien en deçà de la limite théorique.

Par conséquent, il est d'une grande importance d'améliorer davantage la BV, surtout pas au prix d'augmenter la taille de l'appareil. Plusieurs techniques de termination ont été proposées pour améliorer la BV, telles que la plaque de champ, l'implantation d'ions fluorés, et la termination de l'extrémité de la porte.

Les ions fluorés implantés dans la fine couche de barrière AlGaN (FBL) ont un processus de fabrication simple sans induire une capacitance parasitaire supplémentaire; cependant, la position de pointe du profil de fluorure et des distributions de vacance est proche du canal du gaz électronique bidimensionnel (2DEG), ce qui entraînerait inévitablement une dégradation caractéristique statique et dynamique significative.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un HEMT AlGaN / GaN, nous décrirons les différentes structures de bande des matériaux qui en font partie. La juxtaposition d'un matériau avec une large lacune (AlGaN: 3,82eV), et d'une autre avec une lacune légèrement plus faible (GaN : 3,4eV) forme une hétérojonction déclenchée par la discontinuité de la conduction à l'interface (ΔE_c). La figure 2.3 montre les niveaux d'énergie de chaque matériau avant le contact. (Bernardini, 1997) [18].

I.8.1.1.Histoire des HEMT

L'idée des transistors à haute mobilité électronique (HEMT) a émergé des recherches menées dans les années 70, lorsqu'une combinaison de la technique de croissance par épitaxie par faisceau moléculaire et du dopage par modulation a suscité un grand intérêt pour le comportement des structures à puits quantiques. À cette époque, T. Mimura et ses collègues chez Fujitsu travaillaient sur les MESFET GaAs. Confrontés à des problèmes de densité élevée des états de surface près de l'interface, ils ont décidé d'utiliser une hétérojonction modulée par dopage et ont réussi à produire des MOSFETs de type déplétion. En introduisant une grille Schottky sur une simple hétérojonction, ils ont créé le HEMT AlGaAs/GaAs.

Par la suite, le premier circuit intégré basé sur un HEMT a été rapporté. Aux côtés de Fujitsu, plusieurs autres installations de recherche telles que Bell Labs, Thomson CSF et Honeywell ont rejoint le développement des nouvelles structures. Pour résoudre divers problèmes, plusieurs conceptions ont été proposées, y compris les HEMTs AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs pseudomorphiques (pHEMTs) et AlInAs/InGaAs/InP HEMTs, par ordre d'augmentation de complexité. Cependant, jusqu'à la fin de la décennie, les HEMTs étaient principalement utilisés dans des applications militaires et spatiales. Ce n'est qu'à partir des années 90 que la technologie a pénétré le marché grand public, notamment dans les récepteurs satellites et les systèmes de téléphonie mobile émergents.

Au début des années 2000, de nouvelles méthodes de dépôt du GaN sur saphir par MOCVD ont permis la production de HEMTs basés sur AlGaN/GaN. Le GaN possède un large écart de bande, ce qui offre des avantages tels que des tensions de claquage plus élevées et des températures de fonctionnement plus élevées. En raison du grand décalage de réseau entre l'AlN et le GaN, une contrainte est induite dans la couche AlGaN, générant un champ piézoélectrique. Combiné avec le grand décalage de la bande de conduction et la polarisation spontanée, cela conduit à des valeurs très élevées pour la densité de charge électronique. Ce potentiel élevé des structures AlGaN/GaN, ainsi que la conductivité thermique excellente des substrats en saphir, a conduit à un changement de focus de la recherche des dispositifs AlGaAs/GaAs vers les dispositifs AlGaN/GaN.

Au fil du développement et de l'optimisation, diverses techniques ont été adoptées. Une approche antérieure utilisée dans les jonctions p-n haute tension, l'électrode à plaque de champ, a considérablement amélioré les performances des dispositifs en réduisant les valeurs de champ électrique maximales, permettant ainsi d'augmenter la tension de claquage. Cette technique a été affinée pour inclure les électrodes en forme de T et de Y. Une autre étape dans l'optimisation de la structure est l'ajout d'une fine barrière en AlN entre le canal GaN et la couche AlGaN, augmentant le décalage de la bande de conduction et la densité de gaz électronique bidimensionnel (2DEG), tout en réduisant la diffusion due au désordre des alliages, ce qui améliore la mobilité. Une option supplémentaire pour améliorer les propriétés de transport des électrons est la structure à double hétérojonction, avec une couche InGaN sous le canal qui introduit une charge de polarisation négative à l'interface, améliorant ainsi le confinement des porteurs dans le canal.

Bien que la technologie en mode déplétion (D-mode) ait connu des améliorations significatives, les dispositifs en mode d'amélioration n'ont pas progressé de manière comparable. Cependant, ces dispositifs présentent des avantages dans certaines applications et sont donc de plus en plus étudiés. Plusieurs groupes ont proposé des approches intéressantes, telles que les couches AlGaN très minces et le traitement au plasma fluoré, bien que des préoccupations de stabilité subsistent. Une méthode très prometteuse est la structure de grille en retrait rapportée par Kumar et al., ainsi que les dispositifs avec capteur InGaN, qui ont récemment montré d'excellents résultats.[19]

I.8.1.2.Principe de fonctionnement des HEMT

Les HEMT sont essentiellement des hétérojonctions formées par des semi-conducteurs ayant des faibles de bande différentes. Lorsqu'une hétérojonction est formée, la bande de conduction et la bande d'équilibre dans tout le matériau doivent se plier pour former un niveau continu. L'élément large bande a un excès d'électrons dans la bande de conduction car il est dopé avec des atomes de donneur (ou en raison de la charge de polarisation dans les HEMT à base de GaN). Le matériau de bande étroite a des états de bande de conduction avec une énergie plus faible. Par conséquent, les électrons se diffuseront du matériau à large écart de bande vers le matériel à faible écart adjacent car il a des états d'énergie inférieure. Ainsi, un changement de potentiel se produira en raison du mouvement des électrons et un champ électrique sera induit entre les matériaux. Le champ électrique induit conduira les électrons vers la bande de conduction de l'élément large écart de bande. Les processus de dérive et de diffusion continueront jusqu'à ce qu'ils s'équilibrent mutuellement, créant une jonction à l'équilibre comme une p-n jonction. Notez que le matériau de l'écart de bande étroit non couvert a maintenant un excès de porteurs de charge majoritaire, qui donnent une vitesse de commutation élevée. Un fait intéressant est que le semi-conducteur sans couverture à faible écart de bande n'a pas d'atomes de donneur pour causer la dispersion et assure ainsi une grande mobilité.

Un autre aspect intéressant des HEMT est que les discontinuités de bande à travers les bandes de conduction et de valence peuvent être conçues pour contrôler le type de porteurs entrant et sortant de l'appareil. Cette diffusion des transporteurs conduit à l'accumulation d'électrons la frontière des deux régions à l'intérieur du matériau de l'écart de bande étroit. L'accumulation d'électrons peut entraîner un courant très élevé dans ces appareils. Les électrons accumulés sont également connus sous le nom de 2DEG. La figure II.1 montre le diagramme de bande généralisé formé à l'hétérojonction pour les HEMT typiques. Les deux bandes de conduction (E_c) et de valence (E_v) sont inclinées par rapport au niveau de Fermi (E_F), ce qui entraîne une quantité bien remplie de 2DEG et, finalement, un canal de conduction est formé.[20]

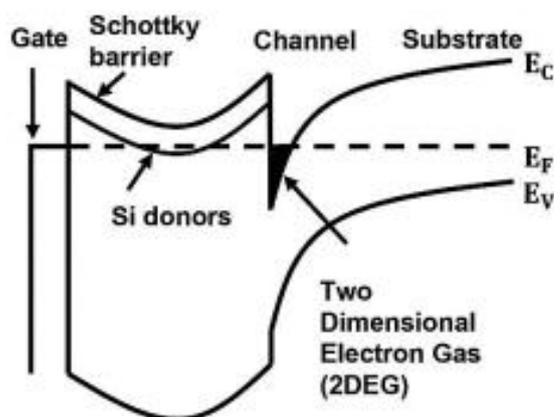


Figure I.6 .Diagramme généralisé des bandes d'énergie des HEMT[19]

I.8.2. Structure des HEMT $Al_xGa_{1-x}N/GaN$

couches $Al_xGa_{1-x}N$ avec une teneur élevée en Al, ce qui entraîne de mauvaises propriétés de transport des structures $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ avec $x > 0,5$. Pour surmonter ce problème, le système de matériaux AlN/GaN binaire ultra-mince, qui peut être cultivé de manière fiable, est devenu un candidat alternatif pour les futures applications de puissance à haute fréquence. En raison de la grande différence de polarisations spontanées et piezoélectriques entre les couches GaN et AlN, le 2DEG qui se forme près de l'interface AlN/GaN peut atteindre plus de $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ pour une épaisseur extrêmement mince de la couche de barrière AlN ($d < 5 \text{ nm}$) avec une grande mobilité ($> 1000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$) et une très faible résistance à la feuille ($R_{sh} < 150 \Omega$). En outre, AlN, avec sa constante diélectrique relativement élevée et son large espace de bande (6,2 eV), offre une meilleure confinement du transporteur et a le potentiel d'être un excellent choix pour le diélectrique de la porte. Par rapport à la structure AlGaN/GaN, la structure AlN/GaN offre une grande réduction de la dispersion des troubles d'alliage et de la diffusion de la rugosité (en enlevant Ga de la barrière).

D'un point de vue de conception de circuit, l'utilisation d'une couche de barrière AlN très mince (3-5 nm) augmente la transconductivité intrinsèque et diminue les effets de canal court en plaçant la passerelle beaucoup plus près du canal 2DEG. Avoir ces propriétés supérieures rend ce système de matériaux possèdent potentiellement les

HEMTs les plus performants dans les nitrides IIIV. Dans les premières années, il a été difficile de cultiver des hétéro-structures AlN/GaN de matériau de haute qualité en raison d'une grande incohérence de grille entre AlN et GaN (2,4 %). Un modèle électro-thermique compact continu à base de potentiel de surface adapté à l'étude de la déformation intermodulaire IMD dans les dispositifs HEMT GaAs et un calcul analytique pour la position du niveau de Fermi E_f dans ces dispositifs à partir d'une solution cohérente des équations de Schrodinger et de Poisson

I.8.2.1. HEMT basés sur le GAN

Les HEMT basés sur GaN ont une structure en couches semblable à celle des HEMTs conventionnels à base de GaAs, comme le montre la figure 5. Mais aucun dopage intentionnel n'est requis dans les HEMT AlGaN/GaN. Les électrons proviennent plutôt des états de surface en raison de la polarisation spontanée trouvée dans le GaN structuré en wurtzite. Cette accumulation de porteurs libres forme une concentration de charge élevée à l'interface conduisant à un canal 2DEG. La figure 2 indique également les pièges de surface de type donneur (vac) en haut et donc la charge positivement polarisée à l'interface AlGaN/GaN. Le 2DEG est une fonction explicite de la surface barrière, épaisseur AlGaN et charge positive liée à l'interface. [21]

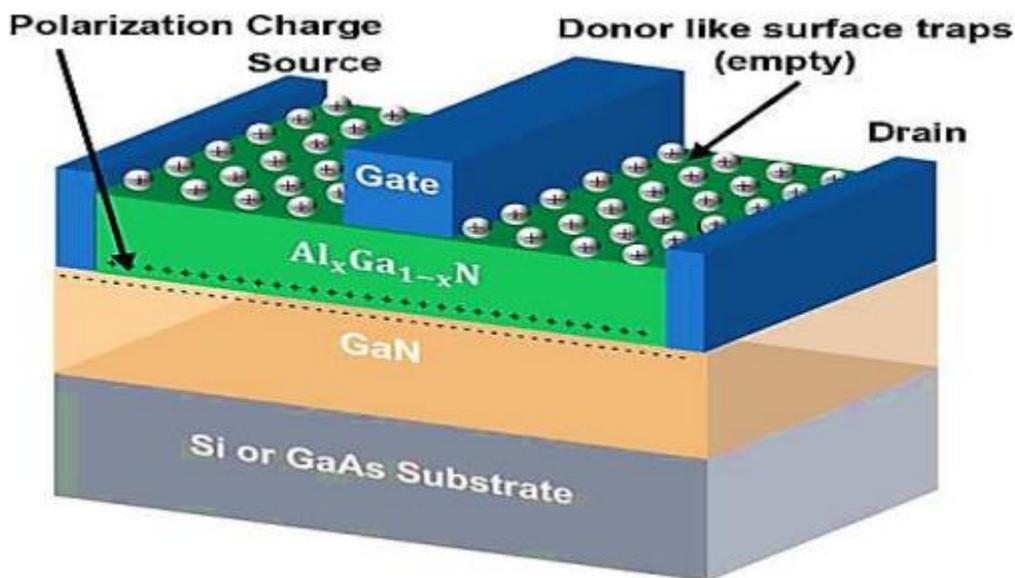


Figure I.7. AlGaN/GaN HEMT structure [21]

I.8.2.2 Description de la structure d'un HEMT

La structure d'un transistor de nitrite de gallium HEMT est très similaire à celle d'un transistor dont le matériau semi-conducteur est l'arsénide de Gallium malgré plusieurs

différences claires. Nous représentons une structure typique d'un transistor HEMT AlGaN / GaN par Figure I-8. Il est fabriqué des matériaux suivants:

- Le substrat
- Un matériau avec un grand écart
- Un petit matériau d'écart

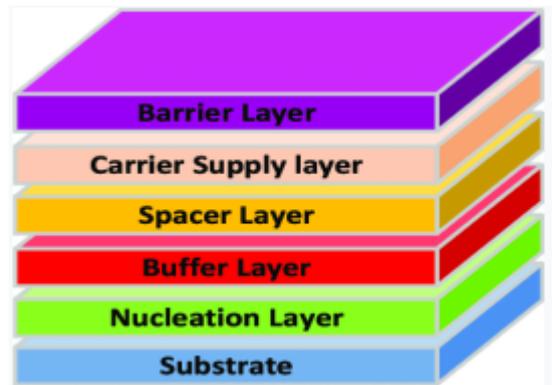


Figure I.8: Structure d'un transistor HEMT

I.8.2.3 Description des couches □

Cap couche

C'est une couche de surface, formée par un matériau à faible écart de bande afin d'obtenir la source ohmique et les contacts de drainage. Cette couche est dans la plupart des cas fortement dopée afin de réduire la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès. Couche de Schottky Cette couche de large-gap non dopée fait le contact Schottky de la porte.

□ **Couche de donneur**

Comme son nom l'indique, il fournit des électrons libres à la structure, le dopage qui est généralement produit par un avion de dopage au silicium, y joue un rôle important car il contribue à augmenter la concentration d'électrons fournis.

□ **Spacer**

Cette couche de matériau délibérément déchiré large-gap permet la séparation des atomes de donneur d'électrons de la coquille de donateur, les électrons du canal. Les interactions électroniques impures sont ainsi réduites, nous remarquons que plus cette couche est épaisse, mieux est la mobilité des électrons dans le canal d'autre part un espace plus mince favorise un meilleur transfert d'électrons au sein du canal.

Le canal

C'est la partie la plus importante de l'HEMT, parce que c'est à cet endroit que le canal est créé qui reçoit le gaz bidimensionnel des électrons et c'est cette couche qui déterminera la performance du composant par les propriétés de transport d'électrons dans le matériau.

□ La couche tampon

En général, cette couche a des propriétés structurales communes entre celle du substrat et le matériau du canal. Il permet une meilleure croissance de Ga_N, le type de visage dépend en partie de cette couche et il favorise le confinement des électrons en interposant l'injection de porteurs au substrat.

□ Le substrat

C'est la couche sur laquelle les matières épitaxiales sont cultivées. Son choix est crucial pour la qualité des composants et leur fonctionnement. En effet, un mauvais choix de substrat peut provoquer pendant la croissance des dislocations, ce qui peut rendre le composant non fonctionnel. [22]

I.8.2.4 Formation et caractéristiques de la 2DEG

Le principe de base d'un HEMT est le transfert d'électrons des atomes donateurs de la couche d'écart de l'élargir vers la plus petite couche pour former le canal près de l'interface. Les HEMTs AlGa_N / Ga_N ont une densité de charge élevée n_s de gaz à électrons bidimensionnel 2DEG qui ne peut être attribuée uniquement à la grande discontinuité de la bande entre Ga_N et Al Ga_N mais surtout en raison de la présence d'une forte interface de polarisation hétéro.

La figure suivante montre une AlGa_N / Ga_N HEMT, où les paramètres d_d et d_i sont respectivement les épaisseurs de la couche donneuse et de l'espacement

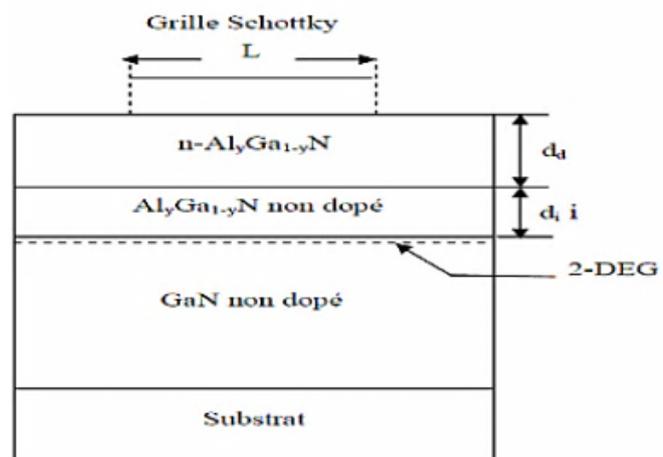
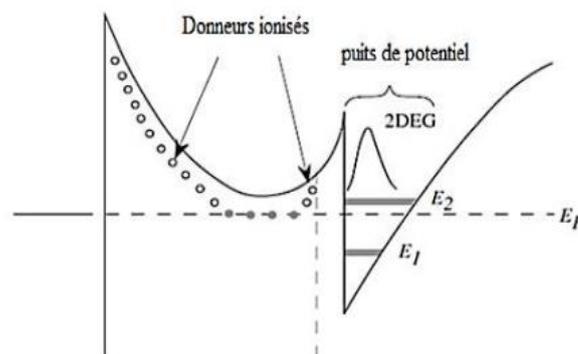


Figure I.9: Diagramme de la structure AlGaN / GaN[22]

En raison de la différence dans les énergies de l'écart de bande des deux matériaux, un puits de potentiel est créé à l'interface, dans lequel les électrons provenant de la couche sont confinés donneur et participant au courant de conduction dans la structure; cette différence d'énergies d'écart de bande ΔE_g influence donc la concentration des transporteurs et doit être aussi grande que possible.

Sous l'effet de la polarisation, le fond du puits quantique tombe en dessous du niveau de Fermi, qui est généralement assez proche du milieu de l'écart de bande du matériau avec le plus bas écart [..]



I.10: Création dans un transistor HEMT

Figure d'un puits potentiel

I.9. Techniques de croissance et choix de substrates

I.9.1. Substrats de carbure de silicium (SiC)

Ce substrat représente un accord parfait de maille avec GaN, ainsi qu'une bonne conductivité thermique $4.9 \text{ W.cm}^{-1}\text{.K}^{-1}$ en comparaison avec le silicium, ce qui lui donne la possibilité de dissiper la chaleur du puits. Cependant, son coût demeure très élevé et le dépôt de nitride de gallium sur ce substrat est très délicat. [23].

Le carbure de silicium SiC a un certain nombre d'avantages par rapport au saphir pour la croissance de GaN. Tout d'abord, l'incompatibilité de la grille pour cette paire est de 3,1%. En outre, la conductivité thermique

Le coefficient de SiC est élevé ($3,8 \text{ Wt/cm K}$), alors que le SiC dopé possède une conductivité électrique élevée. Cela implique que les contacts électriques peuvent être montés sur le côté inverse d'un substrat, et la technologie de fabrication d'appareils est nettement simplifiée ici. Il existe à la fois des substrats C-polaire polaire du carbure de silicium, les soi-disant C-substrates, et S-polar substrates, c'est-à-dire Si substrates. Dans le premier cas, les atomes C entrent dans la surface du substrat, alors que dans les substrats Si seulement Si atom y passe. De nos jours, les Si-substrats sont plus préférables, car les films GaN cultivés sur eux sont de qualité supérieure. La principale limitation du carbure de silicium réside dans son coût élevé. Un wafer 4 pouces de haute qualité coûte environ 3000 \$, alors que des wafer d'un plus grand diamètre ne sont pas disponibles maintenant. L'incompatibilité de la grille de 3,1% conduit à la formation de défauts dans une quantité marquée, et ce fait s'oppose au développement de dispositifs à courant élevé. En outre, après l'arrêt du processus de croissance, il est nécessaire d'étirer un substrat initial; C c'est une tâche difficile dans le cas de SiC, car étirer le matériau est un processus très ennuyeux et complexe. Le carbure de silicium existe dans plus de 250 polytypes, qui sont caractérisés par l'alternance de divers plans biatomiques serrés. L'élément principal de tous les polytypes est un tétraèdre lié covalent formé d'atomes C et Si atom situé au centre et vice versa un tétraèdre composé de atomes Si avec atomes C positionnés au centre [24].

I.9.2. Substrats de saphir

Il est le plus utilisé pour la fabrication de diodes émettant la lumière et les diodes laser. Cependant, il comporte plusieurs défauts majeurs. En effet, le désaccord de la grille avec GaN est de 16% (après rotation de la couche épitaxiale par rapport au substrat). densités de dislocation de l'ordre de 10^{10} cm^{-2} . Toutefois, avec une nitruration adéquate et une couche tampon optimisée déposée à basse température, par exemple en AlN, des films GaN de très bonne qualité avec une densité de dislocation inférieure à 2

$\times 109 \text{ cm}^{-2}$ peuvent être obtenus. Sur le substrat de saphir, la croissance par MOVPE permet d'obtenir le type GaN face-Ga, tandis que celle par MBE permet de obtenir GaN Face-Ga ou N-face. Les inconvénients du saphir sont la faible conductivité thermique et la grande difficulté à être coupé. L'une des méthodes de coupe consiste à faire une fente avec un laser, puis gravure dans cette fente à l'aide d'une aiguille de diamant, pour terminer par un pliage. En outre, le substrat est dans ce cas enlevé par le "lift off" take-off et remplacé par un substrat d'une conductivité thermique plus élevée. Enfin ; le saphir est un isolant, qui ne permet pas de placer un contact électrique directement sur le substrat. Les substrates de saphir sont généralement nitrés avant la croissance de GaN par une exposition de leur surface chauffée, généralement autour de 1073K (800 °C), à un flux d'ammoniac.

Il semble qu'un AlN monolayer se forme au cours de cette étape. Une couche de tampon AlN peut éventuellement être déposée avant la croissance. Notez que ce type de couche tampon est épitaxié à une température comparable à celle de la croissance GaN et diffère donc des couches tampon utilisées dans MOCVD[25].

I.9.3. Substrats GaN et AlN

Les ingénieurs de Fujitsu prétendent avoir ouvert un nouveau terrain pour la performance des HEMT basés sur RF GaN opérant dans la bande X. Leur dispositif, fabriqué sur un substrat AlN, fournit une densité de puissance de plus de 15 W mm⁻¹, et des valeurs beaucoup plus élevées pourraient suivre avec l'introduction de plaques de terrain et l'optimisation des dimensions de l'appareil.

Selon l'équipe, les autres rapports sur les HEMT basés sur GaN sur les substrates AlN ont utilisé les canaux AlGaIn pour améliorer les performances à des températures plus élevées.

Cependant, avec cette conception, la dispersion de l'alliage dans le ternaire diminue la mobilité des électrons et retient les performances. Pour éviter ces problèmes, l'équipe de Fujitsu emploie un canal GaN. Travailler avec un substrat AlN promet d'offrir le meilleur des deux mondes, car il a une conductivité plus élevée que GaN et évite les problèmes de désaccord de grille de SiC. Mais les substrates AlN sont chers et de taille limitée. Le porte-parole de l'équipe, Shiro Ozaki, a déclaré à Compound Semiconductor qu'il espère que l'utilisation accrue de ces dispositifs pour les diodes laser ultraviolets et les LEDs aidera à résoudre ces problèmes. Il s'attend à ce que cela

conduise finalement à la disponibilité de substrats abordables de 3 pouces de diamètre.

Ozaki et ses collègues ont produit une gamme de HEMT GaN avec une longueur de porte de 0,25 μm , une largeur de la porte de 50 μm et une portée de 3 μm . Un de ces transistors a été produit sur un substrat AlN de 1 pouce de diamètre avec une densité de dislocation de filetage inférieure à 10^3 cm^{-2} , et cinq autres variantes ont été fabriquées sur SiC : l'une, comme celle sur AlN, a une épaisseur de canal de 200 nm, pour trancher le courant de drain-leakage ; et les quatre autres ont des canaux de 1000 nm d'épaisseur et différentes compositions de barrière AlGaN, pour évaluer l'impact de la densité du porteur sur les caractéristiques de DC.

Des mesures du courant de drainage en fonction de la tension d'entraînement, qui est la différence entre la tension porte-source et la tension de seuil, ont révélé un parcours de courant d'écoulement pour les HEMT qui ont un canal épais. Des dispositifs dotés d'un canal plus mince et d'une épaisseur de 200 nm ont supprimé cette fuite. L'équipe a également constaté que le tampon AlGaN avec une composition élevée en aluminium, utilisé dans l'appareil cultivé sur le substrat AlN, réduisait nettement l'état de pinch-off et avait un courant de fuite plus faible que le dispositif similaire fabriqué sur SiC. Pour assurer d'excellentes caractéristiques de puissance de sortie, les HEMT doivent produire un courant de drainage élevé à une tension de blocage élevée. Les mesures des cinq appareils effectuées sur SiC montrent que les gains sur un de ces fronts sont compromis par les pertes sur l'autre, tandis que le HEMT sur AlN offre une performance inégalée.

Le GaN-on-AlN HEMT de l'équipe, qui a une largeur totale de la porte de 1 mm, produit une efficacité de puissance ajoutée maximale de 49,1 % lorsqu'il fonctionne à 70 V, en utilisant 10 μs d'impulsions à un cycle de tâche de 1 %. La puissance de sortie associée est de 41,7 dB, équivalent à 14,7 W mm^{-1} , et le gain est de 9,6 dBm. Pour les appareils cultivés sur SiC, une densité de puissance de 30,6 W mm^{-1} a été signalée dans la bande X. « Notre objectif est plus élevé que cela, » dit Ozaki. Pour atteindre cet objectif, Ozaki et ses collègues ont l'intention d'augmenter la tension de fonctionnement de leurs HEMTs à plus de 100 V. —Pour réaliser cela, l'optimisation de la plaque de terrain sera une technologie clé. [26]

I.10 Opération des HEMT

Le transistor haute mobilité électronique (HEMT) est un transistor à effet de champ hétéro-structure.

Le terme « HEMT » est appliqué à l'appareil parce que la structure profite des propriétés de transport supérieures des électrons dans un puits potentiel de matière semi-conductrice légèrement dopée. Une structure HEMT AlGaAs/GaAs simplifiée est illustrée à la figure I.11

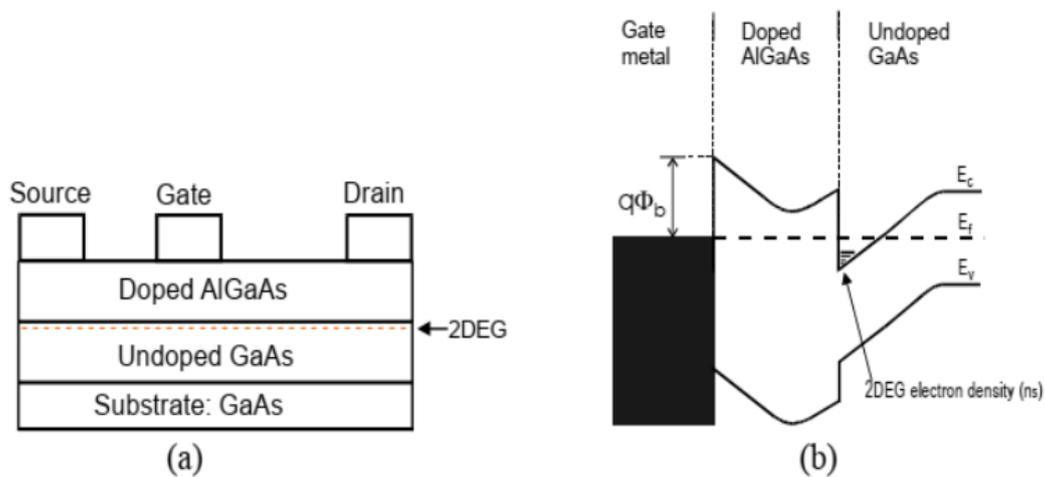


Figure I.11. a) Structure HEMT AlGaAs/GaAs simplifiée, b) diagramme de bande correspondant

Comme indiqué dans la figure, un matériau semi-conducteur à large écart de bande (AlGaAs dopés) est situé sur une bande étroite (undoped GaAs). Le diagramme de bande de la structure corrélée est montrée à la figure 8.b. Une plongée aiguë dans le bord de la bande de conduction se produit à l'interface AlGaAs/GaAs. Cela se traduit par une haute portée concentration dans une région étroite (bouchon quantique) dans la direction source-déversement. La distribution des électrons dans le puits quantique est essentiellement bidimensionnelle à la très petite épaisseur du puits quantique par rapport à la largeur et la longueur du canal. Par conséquent, la densité de charge est appelée un gaz électronique bidimensionnel (2DEG) et quantifiée en termes de densité du porteur de feuille n_s . AlGaIn/GaN HEMT a ont été fabriqués de manière similaire à l'aide d'une couche d'AlGaIn dopée ou non dopée comme indiqué à la figure 8.a. Il a été observé qu'un 2DEG est formé dans l'interface AlGaIn/GaN même s'il n'y a pas de dopage intentionnel de la couche AlGaIn. Il a également été observé que lorsque la

couche AlGaIn est délibérément dopée, la densité de charge dans la 2DEG n'est pas proportionnelle à la quantité de dopage. La question fondamentale est, puisqu'il n'y a pas d'atomes délibérément introduits pour fournir des électrons, quelle est la source des électrons qui forment le 2DEG?

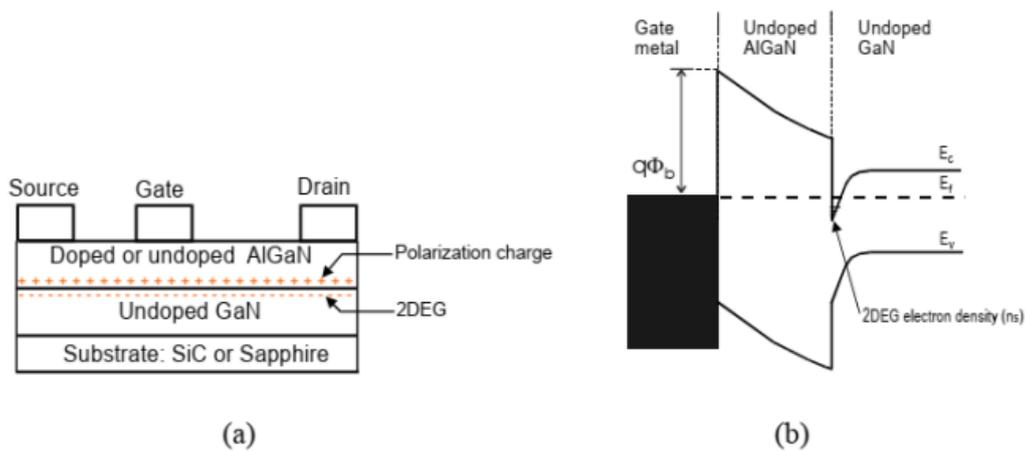


Figure I.12. a) Structure HEMT AlGaIn/GaN simplifiée, b) diagramme de bande correspondant

Dans AlGaIn/GaN HEMT, le mécanisme de formation de 2DEG à l'hétérointerface est différent de celui de l'AlGaAs/GaAs HEMT. En raison de la présence d'un fort champ de polarisation à travers l'hétérojonction AlGaIn/GaN, un 2DEG avec la densité du porteur de feuille jusqu'à 10^{13} cm^{-2} peut être obtenu sans aucun dopage. Ibbetson et al. ont découvert que les états de surface agissent comme une source d'électrons dans 2DEG. Le champ électrique statique intégré dans la couche AlGaIn induit par la polarisation spontanée et piezoélectrique modifie considérablement le diagramme de bande et la distribution d'électrons de l'hétéro-structuration d'AlGaIn/GaN. Ainsi, un nombre considérable d'électrons est transféré des états de surface à l'hétérointerface AlGaIn/GaN, ce qui conduit à un 2DEG à haute densité. Le diagramme de bande de la structure présenté à la figure I.12. [27]

I.10.1. Caractéristiques de DC

Des mesures de courant direct (DC) sont effectuées pour évaluer les propriétés électriques des appareils fabriqués. Le dispositif de mesure est composé d'un analyseur de paramètres de semi-conducteur et d'une station de sondage. Le schéma de la configuration utilisée dans ce travail est fourni à la figure 10. La station d'essai

permettait d'adresser facilement les petits contacts. et le courant de drainage est mesuré. Cette mesure est répétée à différents écarts de porte.

Les paramètres importants à mesurer sont la tension du genou (V_{knee}), la tension de pinch-off ($V_{pinch-off}$), le courant de drainage maximal (I_{DS}), la transconductivité (g_m) et la tension d'éclatement (V_{br}). Une courbe de sortie IV typique du dispositif HEMT est montrée à la figure 10. La tension du genou signifie la tension où la saturation se produit dans le graphique. En outre, le courant de drainage maximal est l'intersection des régions linéaires et de saturation. La tension de pinch-off est où le courant de drainage est presque zéro. La transconductivité est le ratio du changement courant et est défini comme

$$g_{m,DC} = \frac{\Delta I_{DS}}{\Delta V_{GS}} / V_{DC} = \text{constant}$$

En outre, la tension de décomposition est la tension maximale qu'un dispositif peut gérer lorsque la tension d'anticipation de la porte est inférieure à la décompression et que la tension du drain est augmentée jusqu'à ce que le courant de drainage atteigne sa valeur maximale. [14]

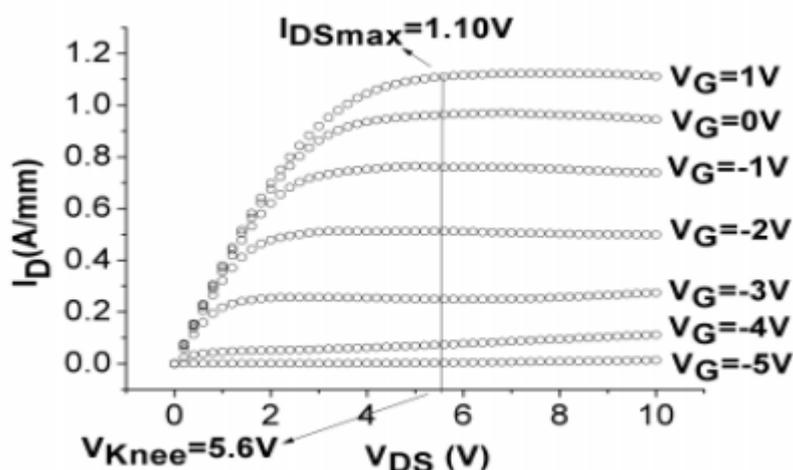


Figure I.13. Caractéristique de sortie typique des dispositifs HEMT

I.10.2. Dégradation des performances de l'HEMT

I.10.2.1. Mécanismes de dégradation

La dégradation des performances des HEMTs AlGaIn/GaN peut être attribuée à trois mécanismes principaux : la dégradation des contacts, l'effet des électrons chauds et

l'effet piézoélectrique inverse. Avec l'amélioration de la conception et des technologies de traitement des matériaux, plusieurs de ces mécanismes ont été abordés.

Dégradation des contacts : Les contacts Schottky et Ohmiques montrent une bonne stabilité en dessous de 300 °C. Cependant, des problèmes peuvent survenir à des températures plus élevées, comme une augmentation de la résistance de contact et des fissures de passivation dues à la diffusion de Ga et à l'interdiffusion d'Al après des tests thermiques à 340 °C. Les contacts Schottky à base de nickel, par exemple, peuvent former des nitrures de nickel à des températures aussi basses que 200 °C, réduisant ainsi la hauteur de la barrière Schottky.

Effet des électrons chauds : Les électrons accélérés dans un champ électrique important peuvent créer des pièges dans les couches AlGaIn et le tampon, entraînant une dégradation réversible de la transconductance et du courant de drain saturé. Ce phénomène est accentué par l'effet piézoélectrique inverse sous haute tension, qui induit un stress supplémentaire dans la couche AlGaIn déjà contrainte. Cela peut causer des dommages irréversibles au dispositif lorsque la tension dépasse un seuil critique, entraînant la formation de défauts et des fuites d'électrons.

Effet piézoélectrique inverse : Sous des conditions de polarisation élevées, le champ électrique supplémentaire provoque un stress supplémentaire dans la couche AlGaIn, ce qui peut conduire à des dommages irréversibles et à la formation de défauts.

Les électrons chauds génèrent des pièges au niveau de l'interface AlGaIn/GaN et/ou de l'interface de passivation du GaN, ce qui augmente la résistance de drain et réduit le courant de drain-source saturé. En conditions de polarisation inverse (hors état), la dégradation est considérablement réduite en raison de la diminution des électrons dans le canal. Les études montrent que les dispositifs soumis à un stress en état de marche (on-state) pendant 3000 heures présentent une augmentation des pièges de surface avec une énergie d'activation d'environ 0,55 eV, tandis que les dispositifs stressés en conditions hors état présentent une très faible augmentation des pièges.

Les recherches utilisant l'électroluminescence (EL) ont montré une émission uniforme le long du canal sous certaines conditions de stress, mais des points chauds apparaissent sous d'autres conditions, ce qui peut être dû à l'injection d'électrons du porteur dans le canal.[28.29]

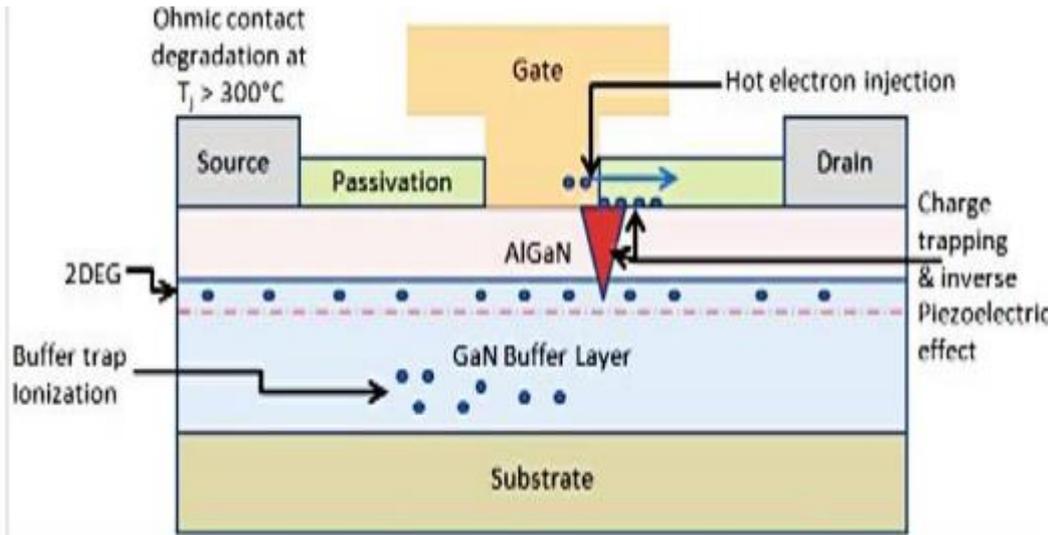


Figure I.14. Schéma des mécanismes de dégradation dans les HEMT AlGaIn/GaN.

Grâce aux récentes avancées dans les procédés de croissance et de fabrication, les transistors à haute mobilité électronique (HEMT) basés sur le GaN ont considérablement amélioré leurs performances. Les principaux avantages du GaN pour les HEMTs incluent .

I.10.3 Mécanismes de décomposition Substrat

Haute densité de charge de l'électron bidimensionnel (2DEG) : Cela conduit à une faible résistance à l'état de marche des transistors.

Haute conductivité thermique : Le GaN ($>2 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) permet une dissipation de puissance élevée tout en maintenant une température de canal basse.

Champ de claquage élevé : Le GaN a un champ de claquage de 3,3 MV/cm, permettant de fabriquer des dispositifs avec des tensions de claquage allant de centaines à des milliers de volts, en fonction de l'espacement entre la grille et le drain et de l'épaisseur du tampon.

Ces caractéristiques font du GaN un matériau presque idéal pour les transistors haute puissance. Grâce aux efforts récents de la communauté scientifique et industrielle, des

transistors basés sur le Ga_N avec des tensions de claquage supérieures à 1,5–1,9 kV ont été démontrés, facilitant ainsi leur adoption dans l'électronique de puissance. De plus, grâce à un produit faible (résistance à l'état de marche) × (capacité du dispositif), les HEMTs de puissance en Ga_N peuvent atteindre des fréquences de commutation élevées (>40 MHz), permettant la fabrication de systèmes de conversion de puissance très efficaces, avec des rendements supérieurs à 96–98 %.

Cependant, malgré leurs performances élevées, la durée de vie des HEMTs en Ga_N peut être inférieure à ce qui est attendu en raison de plusieurs mécanismes de dégradation physique, notamment :

Dégradation de la jonction Schottky de la grille : Induite par le stress à l'état hors marche, elle augmente le courant de fuite de la grille en générant des chemins de court-circuit localisés près du bord de la grille.

Dégradation semi-permanente ou permanente due aux électrons chauds : Lors de l'opération en état de marche, cela peut réduire le courant de drain en raison de l'accumulation de charges négatives près du bord de la grille ou dans la région d'accès grille-drain.

Délamination de la passivation : Exposée à des niveaux élevés de température/pouvoir, ce qui peut entraîner des processus supplémentaires de piégeage de charges et de fuites

Processus de dégradation dépendants du temps : Génération de défauts au sein de l'hétérostructure AlGa_N/Ga_N.

En outre, les dispositifs de puissance opérant à des tensions élevées peuvent montrer des processus de claquage importants. Le claquage se manifeste par une augmentation rapide du courant de drain lorsqu'une tension critique est atteinte en mode hors état. Ce claquage peut être catastrophique ou durable, selon que les mesures sont effectuées en mode contrôlé par la tension ou par le courant. Les composants de courant de claquage élevés au niveau de la grille peuvent être dus à des fuites à travers la jonction Schottky ou à une conduction liée à la surface. Le claquage vertical peut résulter d'une mauvaise compensation du tampon ou de l'utilisation d'un substrat conducteur, et peut être limité par des configurations appropriées de barrière arrière ou d'hétérostructure. Les mécanismes d'ionisation d'impact peuvent également induire une augmentation significative du courant de drain en générant des paires électron-trou proches de la grille.[30]

Chapitre II:
Étude Thermique et Comportement
des HEMT AlGaN/GaN"

II.1 Introduction

Les transistors à haute mobilité électronique (HEMT) AlGaIn/GaN ont attiré beaucoup d'attention ces dernières années. Bénéficiant de la polarisation spontanée et piézoélectrique, des concentrations élevées de supports de feuille (ns) de 10^{13} cm^{-2} ont été obtenues, ce qui les rend conformes aux exigences des applications de haute puissance. La dissipation de puissance élevée dans le canal du dispositif peut entraîner une température de jonction élevée et améliorer la diffusion des phonons.

Cela peut entraîner une réduction successive de la mobilité de 2DEG et de la vitesse de saturation des électrons, et par conséquent induire une pente négative du courant de drain I par rapport à la tension de drain V_{ds} (c'est-à-dire une résistance différentielle négative). Les effets d'auto-échauffement sont observés expérimentalement dans la plupart des HEMT AlGaIn/GaN, en particulier chez ceux cultivés sur un substrat Saphire en raison de sa faible conductivité thermique. À l'aide de la spectroscopie Raman, Kuball et al. ont estimé que la température à l'ouverture de la grille et du drain était aussi élevée que 180 °C d'un HEMT à base de GaN cultivé sur Saphire lorsqu'il était polarisé avec une tension de drain de 20 V et une tension de grille de 0 V , respectivement [32]. Par conséquent, pour obtenir une prédiction plus fiable des caractéristiques à partir de simulations de dispositifs, une étude détaillée dans les effets d'auto-échauffement doivent être traités.

De nombreuses études expérimentales et théoriques ont été rapportées sur l'effet d'auto-échauffement [32–34]. Cependant, il existe peu de rapports sur les modèles de dispositifs analytiques incluant l'effet d'auto-échauffement pour les HEMT à base de GaN. Frank Schwierz a développé une expression empirique proposée par Caughey et Thomas pour modéliser la dépendance de la mobilité de faible champ sur la concentration d'électrons :

$$\mu_0(T, x) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + (n/n_{\text{ref}})^\alpha}, \quad (1)$$

où I_{min} , I_{max} , n_{ref} et a sont des paramètres appropriés, n est la concentration d'électrons dans le GaN en vrac qui est à son tour une mesure de la concentration de dopage. La dépendance de la mobilité à faible champ sur la température est incarnée en rendant les quatre paramètres d'ajustement dépendants de la température à partir de l'équation ci-dessus [38]. Manju et al. ont directement incorporé cette équation dans les caractéristiques I-V pour le HEMT GaN [39]. Cependant, la concentration de 2DEG n_s augmente de manière monotone avec le biais de porte à source pour les HEMT, et l'équation (1) implique une simple diminution de la dépendance de la mobilité de faible champ sur n_s , c'est-à-dire donc l'équation. (1) conduira à une diminution monotone de la faible mobilité de champ de 2DEG avec l'augmentation de la polarisation de porte. Cette conclusion est contestée avec le fait observé par Dang et al. [40].

II.2 Description du modèle

La vue en coupe d'un HEMT général que nous étudions dans le travail présent est montrée dans la Figure II.1. Les segments, de haut en bas, sont la grille, la couche n-AlGaN, la couche AlGaN dopée de manière non intentionnelle, la couche GaN non dopée avec 2DEG formée à l'interface entre les couches UID-AlGaN et GaN [41]. Les paramètres de la structure sont étiquetés avec la longueur de grille L , l'épaisseur de la couche n-AlGaN d_d , et l'épaisseur de la couche d'espacement d_i , respectivement. Dans notre déduction, l'origine O est placée du côté gauche de l'hétérointerface. La longueur de la région à faible champ et de la région de saturation dans le canal sont respectivement appelées L_1 et L_2 .

II.2.1 Modèle de contrôle de charge

Lorsque $V_{ds} = 0$ ou que le champ électrique du canal est faible, le champ électrique longitudinal le long du canal est négligeable, la densité de porteurs de charge en feuille n_s en fonction de la tension de grille V_{gs} peut être obtenue par la solution auto-cohérente des équations de Poisson et de Schrödinger en 1-D [42]:

$$n_s = \frac{\varepsilon(m)}{qd} (V_{gs} - V_{off}(m, T) - E_F(n_s, T)), \quad (2)$$

où q est la charge de l'électron, m est la fraction molaire d'Al dans Al_m-Ga_{1-m}N, $\varepsilon(m)$ et $d = d_d + d_i$ sont respectivement la permittivité et l'épaisseur totale de la couche AlGa_N. V_{off} est la tension de seuil du HEMT et E_F est le niveau de Fermi par rapport au bas de la bande de conduction dans la couche Ga_N. Dans nos travaux précédents, V_{off} est défini comme l'équation (3) [41]:

$$V_{off}(m, T) = \Phi_B(m) - \Delta E_C(m, T) - \frac{qN_D d_d^2}{2\varepsilon(m)} - \frac{q\sigma(m)}{\varepsilon(m)} (d_d + d_i), \quad (3)$$

où Φ_B est la hauteur de la barrière Schottky, N_D est la concentration de dopage de la couche n-AlGa_N, r est la densité de charge induite par la polarisation à l'interface donnée dans [4] et ΔE_C est le décalage de bande de conduction à l'interface AlGa_{1-m}N/Ga_N. Avec la masse effective de l'électron, $m = 0,22m_0$, $\Delta E_C(m, T)$ est calculé par [34]:

$$\Delta E_C(m, T) = 0.7 \left(E_g^{AlGaN}(m, T) - E_g^{AlGaN}(0, T) \right). \quad (4)$$

La dépendance de la température de l'écart de bande AlGa_{1-m}N entre 2 K et 580 K et $0 \leq x \leq 0,65$ est donnée par l'expression de Bose–Einstein suivante [43]:

$$E_g^{AlGaN}(m, T) = E_g^{AlGaN}(m, T = 0) - \frac{2a_B^{GaN}}{\exp\left(\frac{\theta_B^{GaN}}{T} - 1\right)}. \quad (5)$$

Ici, $E_g^{AlGaN}(m, T = 0)$ est le gap de bande dépendant de la composition de AlGa_{1-m}Nat0K, a_B^{GaN} est la constante de couplage électron-phonon, et θ_B^{GaN} est la température phonon moyenne. Tous ces trois paramètres sont indépendants de la température, et par conséquent $\Delta E_C(m, T)$ est en fait indépendant de la température au moins pendant $2 \text{ K} \leq T \leq 580 \text{ K}$ car le terme dépendant de la température sera annulé lors de la soumission de l'équation

(5) dans l'équation (4). $r(m)$ dans l'équation (2) est la densité de charge de surface induite par la polarisation à l'hétérojonction et la dépendance de la température peut également être négligée [39]. E_F est aussi une fonction de n_s et Manju et al. ont proposé une expression polynomiale pour E_F en termes de n_s , valable de la région de sous-seuil à la région de haute conduction [44] comme :

$$E_F = k_1(T) + k_2(T)\sqrt{n_s} + k_3(T)n_s. \quad (6)$$

Cette expression comprend trois paramètres dépendants de la température nommés k_1 , k_2 et k_3 , ces trois paramètres sont déterminés par la méthode numérique proposée par Kola [17] en utilisant une masse effective $m = 0,22m_0$ [41]

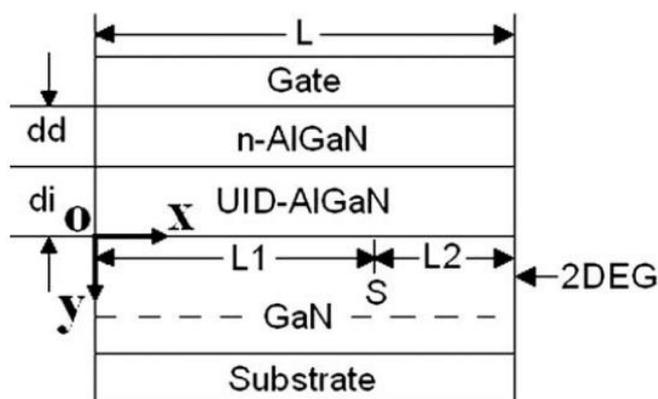


Figure II.1. Cross-sectional view of an AlGaN/GaN HEMTs.

II.2.2 Mobilité à faible champ I_0 de 2DEG

Nous avons développé un modèle phénoménologique pour décrire la dépendance non monotone de la mobilité longitudinale basse I_0 par rapport au biais porte-source dans nos travaux précédents [41].

$$\mu_0(V_{gs}) = \frac{p_1}{p_2 + (V_{gs} + p_3)^2}. \quad (7)$$

Dans le travail présent, nous le rendons applicable à l'analyse thermique en considérant également l'effet de la température. Shur et al. ont donné théoriquement les expressions des quatre principaux mécanismes de diffusion dans le 2DEG dans les HEMTs AlGaIn/GaN [35]. Pour développer un modèle compact, nous réécrivons les expressions en introduisant quatre paramètres indépendants du biais k_{i1} [4]. Les méthodes de calcul de ces paramètres ont été données dans [4], mais dans le travail présent, nous les traitons comme des paramètres d'ajustement. Après avoir obtenu ces quatre paramètres, la mobilité peut être donnée par

$$\mu(T) = 1 / \left(\mu_i^{-1} + \mu_{po}^{-1} + \mu_{ac}^{-1} + \mu_{pie}^{-1} \right), \quad (8)$$

où μ_i est déterminé par le mécanisme de diffusion des impuretés ionisées, μ_{po} par le mécanisme de diffusion optique polaire, μ_{ac} par le mécanisme de diffusion acoustique et μ_{pie} par le mécanisme de diffusion piézoélectrique. Ces quatre quantités sont données par

$$\mu_i = k_{u1} T^{3/2}, \quad (9)$$

$$\mu_{po} = k_{u2} \left[\exp \left(\frac{E_o q}{k_B T} \right) - 1 \right] \left(1 - \frac{5 k_B T}{q E_g} \right), \quad (10)$$

$$\mu_{ac} = k_{u3} T^{-3/2}, \quad (11)$$

$$\mu_{pie} = k_{u4} T^{-1/2}. \quad (12)$$

Nous présumons que les effets de température et le biais de la porte à la source sur μ_0 sont indépendants, et que la mobilité à faible champ à une certaine température et condition de biais peut être calculée comme suit :

$$\mu_0(V_{gs}, T) = \mu_0(V_{gs}) \frac{\mu(T)}{\mu(T_0)}. \quad (13)$$

II.2.3. Vitesse de dérive vs. champ électrique

Nous avons développé un modèle de mobilité MPS dans le cadre de nos précédents travaux

$$v(E) = \frac{\mu_0(V_{gs}, T)E + v_{sat} \left(\frac{E}{E_T(T)} \right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_T(T)} \right)^4 + a \frac{E}{E_T(T)}}, \quad (14)$$

où $v(E)$ et E sont respectivement la vitesse de dérive et le champ électrique le long du canal. $\mu_0(V_{gs}, T)$, E_T et v_{sat} sont la mobilité de champ faible, le champ critique et la vitesse de saturation, et a est un paramètre ajustable qui modélise la région de mobilité différentielle négative des caractéristiques v E . Dans le présent travail, nous simplifions l'expression en omettant le terme d'ordre 4 dans l'équation (14) et obtenons l'éq. (15) afin de le rendre applicable pour le calcul ultérieur de la charge de porte et de la capacité.

$$v(E) = \frac{\mu_0(V_{gs}, T)E}{1 + a \frac{E}{E_T(T)}}. \quad (15)$$

Bien que l'équation (15) ne puisse pas décrire la mobilité différentielle négative à un champ électrique à canal élevé, elle n'entraînerait pas beaucoup de différences dans les caractéristiques de sortie calculées de la région de saturation. En fait, nous montrerons plus loin que le calcul du courant de drainage ne nécessite que la mobilité précise sous un champ électrique de canal inférieur à E_T .

II.2.4 Champ critique ET

La vitesse de saturation dans les champs électriques élevés dépend faiblement de la température. Nous utilisons une fonction de température empirique pour calculer la vitesse de saturation des porteurs v_{sat} en ajustant les résultats de la simulation de Monte Carlo [8] :

$$v_{sat}(T) = 2.87 \times 10^7 - 9.8 \times 10^3 \times T \text{ (cm/s)}. \quad (16)$$

Ensuite, nous définissons ET comme suit :

$$E_T(T) = \frac{v_{sat}(T)}{\mu_0(V_{gs}, T)}. \quad (17)$$

II.2.5 Caractéristique courant-tension

En négligeant le courant de diffusion, le courant de drain peut être décrit comme suit :

$$I = wqv(x)n_s(x), \quad (18)$$

où $V(x)$ et $n_s(x)$ sont respectivement la vitesse de dérive et la densité du support de feuille en un point arbitraire le long du canal, W est la largeur de la porte. Dans la région linéaire, la densité de charge de la feuille est donnée comme suit :

$$n_s(x, T) = \frac{\varepsilon(m)}{qd} (V_{gs} - V_{off}(m, T) - E_F(n_s, T) - V(x)). \quad (19)$$

En substituant les équations. (15) et (19) dans l'équation (18), et en utilisant

$$e_x = E(x)/E_T, \lambda = \varepsilon\mu_0/d, V_{gt} = V_{gs} - V_{off} - E_F,$$

Nous pouvons obtenir :

$$I = \lambda E_T \frac{e_x}{1 + ae_x} (V_{gt} - V(x)). \quad (20)$$

Pour calculer le courant, on réarrange (20) et on divise les deux membres de l'équation par e^2 et on les intègre par rapport à la variable e le long du canal de la source ($x = 0$) à n'importe quel point du canal, on obtient :

$$\frac{I}{\lambda E_T} \left(\frac{1}{2e_0^2} - \frac{1}{2e_x^2} \right) = E_T x. \quad (21)$$

Le début de la saturation est marqué par le champ électrique du canal qui s'approche du champ électrique critique E_T lorsque le biais de drainage atteint la valeur de saturation V_{dsat} . À l'aide des équations. (20) et (21), nous obtenons e_{0sat} , I_{sat} et V_{dsat} au début de la saturation.

$$e_{0sat} = \frac{\sqrt{(2aE_T L + V_{gt})V_{gt} + E_T^2 L^2} - E_T L}{2aE_T L + V_{gt}}, \quad (22)$$

$$I_{sat} = \frac{V_{gt} \lambda E_T e_{0sat}}{1 + a e_{0sat}}, \quad (23)$$

$$V_{dsat} = V_{gt} - \frac{I_{sat}(1 + a)}{\lambda E_T}. \quad (24)$$

Dans la région à faible champ, lorsque $V_{ds} < V_{dsat}$, en substituant $V(0) = 0$, $a x = 0$ et $V_L = V_{ds}$ à $x = L$ en Eqs. (19) et (20) et le courant d'écoulement peuvent être acquis explicitement en tant que :

$$I = \frac{\lambda E_T (2V_{gt} - V_{ds}) V_{ds}}{2(aV_{ds} + E_T L)}. \quad (25)$$

Dans la région de saturation de vitesse, lorsque $V_{ds} > V_{dsat}$, le potentiel de canal et le champ dans la région de saturation de vitesse peuvent être exprimés comme équation (26) [16]. Les significations des paramètres indéterminés p peuvent être trouvées dans nos travaux précédents [41].

$$V(x) = V_{gt} - \frac{qd}{\varepsilon} n_{sat} + pE_T \sinh\left(\frac{x - L_1}{p}\right). \quad (26)$$

En substituant $V(0) = 0$ à $x = 0$, $eL_1 = 1$ à $x = L_1$, $V_L = V_{ds}$ à $x = L$ en Eqs. (19) et (20), et à l'aide de l'équation (26), le courant de drain peut être calculé par :

$$I = \frac{V_{gt} \lambda E_T e_0}{1 + ae_0}, \quad (27)$$

où e_0 est déterminé en résolvant les équations suivantes :

$$L_2 = L - \frac{V_{gt}(1 - e_0^2)}{2e_0(1 + ae_0)E_T}, \quad (28.a)$$

$$V_{gt} \left(1 - \frac{(1 + a)e_0}{1 + ae_0}\right) + pE_T \sinh\left(\frac{L_2}{p}\right) = V_{ds}. \quad (28.b)$$

Differentiating the drain current with respect to the gate-to-source and drain-to-source biases, we can acquire the transconductance and output conductance analytically.

II.3. Incorporation de l'auto-échauffement

Dans un HEMT AlGaIn/GaN comme le montre la Fig. 1, si la structure de l'épicouche est très mince, nous pouvons la négliger dans l'évaluation du flux de chaleur de la région active du dispositif vers le substrat, l'impédance thermique peut être calculée comme [36] :

$$R_{TH} = \frac{1}{\pi K} \ln \frac{8t_{sub}}{\pi L}, \quad (29)$$

où t_{sub} est l'épaisseur du substrat et L est la longueur de la porte, j est la conductivité thermique du substrat. Pour le substrat Sapphire, l'expression expérimentale de j déterminée à partir des ajustements de courbe des données mesurées est donnée par Jon C. Freeman [37] :

$$\kappa_{\text{Sapphire}}(T) = \frac{73.9}{T - 159} \text{ (W/cm K)}. \quad (30)$$

D'après Eqs. (29) et (30), on peut trouver que l'impédance thermique peut être décrite par :

$$\begin{aligned} R_{TH}(T) &= \left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{8t_{\text{sub}}}{\pi L} \right) \frac{T_0 - 159}{73.9} + \left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{8t_{\text{sub}}}{\pi L} \right) \frac{T - T_0}{73.9} \\ &= R_{TH,0} + K_{TH,0}(T - T_0). \end{aligned} \quad (31)$$

Nous définissons $R_{TH,0}$ comme l'impédance thermique à 300 K et $K_{TH,0}$ pour décrire la dépendance en température des conductivités thermiques des matériaux. Pour un substrat SiC, une expression expérimentelle de forj déterminée à partir des ajustements de courbe des données mesurées est [37] :

$$\kappa_{\text{SiC}}(T) = 3.4 \left(\frac{300}{T} \right)^{1.5} \text{ (W/cm K)}. \quad (32)$$

Cela conduira à une relation non linéaire entre l'impédance thermique et la température. Cependant, pour simplifier, nous supposons également que la relation linéaire donnée par l'équation (31) peut être utilisée pour des dispositifs cultivés sur un substrat SiC car l'augmentation de température est faible et bénéficie de sa bonne conductivité thermique. L'impédance thermique rapportera alors la température effective du canal à la puissance dissipée en :

$$T_{\text{eff}} = R_{TH}IV_{ds} + T_{\text{sub}}, \quad (33)$$

où T_{sub} est la température du fond du substrat. On suppose que la température inférieure du substrat T_{sub} augmente linéairement avec la puissance dissipée, et peut être décrite par $T_{\text{sub}} = T_0 + k_{\text{pack}}$

IVds. Ici, T0 est la température du dissipateur thermique. kpack est un paramètre

qui correspond à la résistance thermique de l'ensemble de l'appareil et est mis à zéro dans le travail actuel. Pour chaque biais, l'analyse thermique est traitée à l'aide d'une méthode d'itération, comme le montre la Fig. 2. Il convient de mentionner que dans la troisième case 'Calculer', nous prenons en compte les résistances des séries source et drain en recalculant le biais intrinsèque à l'aide des équations. (34) et (35).

$$V_{ds} = V_{ds,ext} - I \times (R_d + R_s), \quad (34)$$

$$V_{gs} = V_{gs,ext} - I \times R_s, \quad (35)$$

où Vds,ext et Vgs,ext sont le biais extrinsèque.

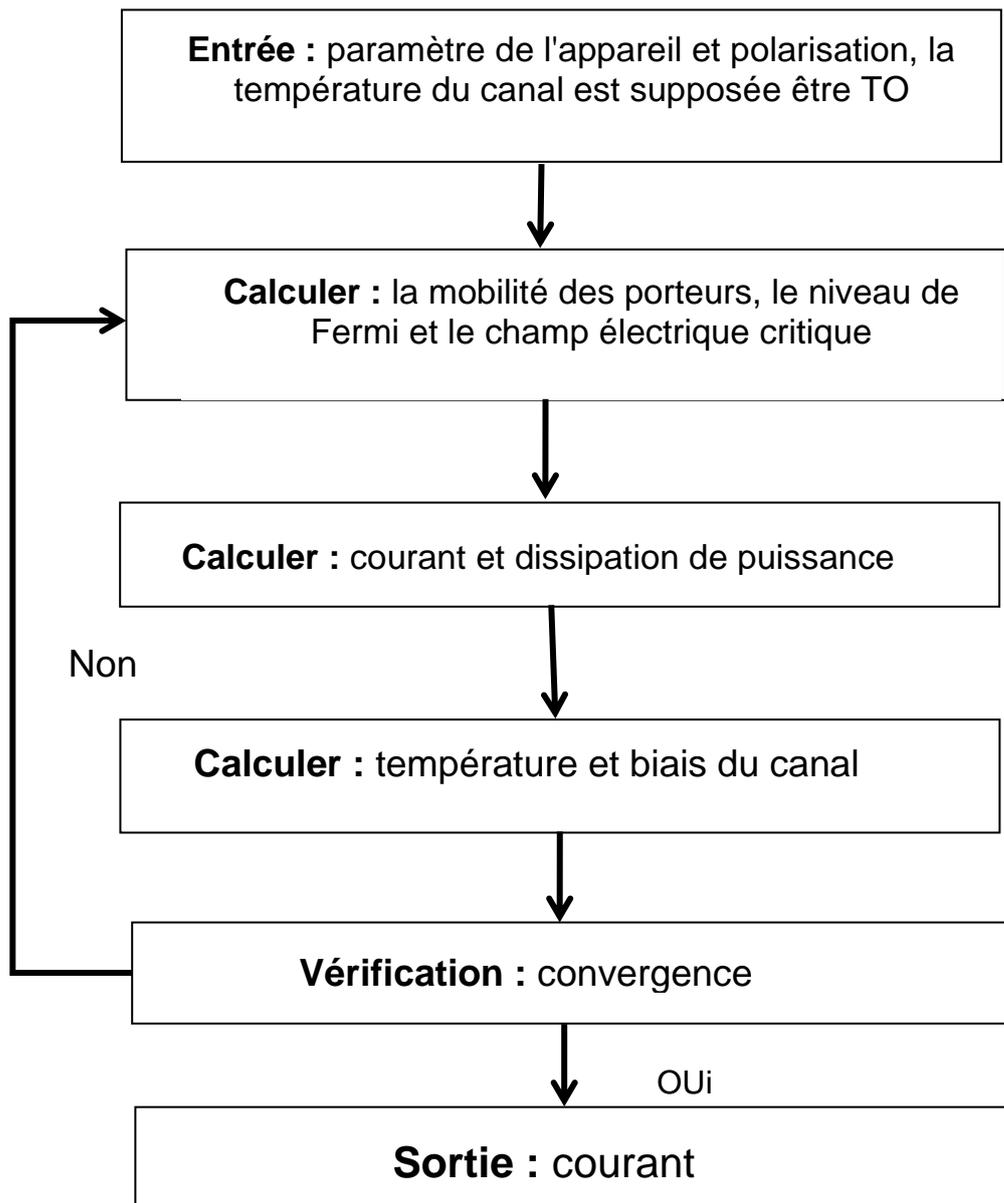


Figure II.2. Les étapes d'analyse pour la simulation thermique.

Cette figure II.2 illustre le diagramme de flux pour une simulation thermique des transistors HEMT (High Electron Mobility Transistors), détaillant le processus par étapes à partir de l'entrée des paramètres du dispositif et des conditions de polarisation. Le processus commence par le calcul de la mobilité des porteurs, du niveau de Fermi, et du champ électrique critique. Ensuite, il évalue le courant et la dissipation de l'énergie, suivis par un ajustement de la température et du biais du canal en réponse à la chaleur générée. Le processus inclut une

vérification de convergence pour s'assurer que les variations de température entre les itérations successives sont minimales. Une fois la convergence atteinte, le courant stabilisé est obtenu comme sortie finale, mettant en évidence l'importance de l'interaction entre les effets thermiques et électriques dans la performance du dispositif.

Chapitre III:

Résultats et discussions

III .1 Introduction :

Résultats et les étapes suivantes illustrent la relation entre la température et d'autres paramètres différents afin d'indiquer les effets de la température sur chacun d'eux. Par conséquent, cette section montre la relation entre les élévations de température sur chacun des autres paramètres, caractéristiques et simule les comportements des matériaux des HEMT AlGaIn/GaN en utilisant un logiciel spécial comme Matlab, etc. Les résultats seront sous forme de figures avec une précision exacte. leur explication, pour préciser le comportement de ces paramètres dans l'appareil.

III.2.Mobilité à faible champ par rapport à la température

Pour estimer l'impact de la température sur la faible mobilité du champ, la relation entre les augmentations de température et la faible mobilité du champ du 2DEG, la faible mobilité du champ a été mesurée dans la plage de température de (300 K - 700 K), utilisant l'effet Hall avec des concentrations d'impuretés ionisées à (10^{17} cm^{-3}). On a observé que la relation est inverse, de sorte que lorsque la température augmente, la faible mobilité électrique diminue, car la taille de la faible mobilité du champ est fonction de la température, ce qui signifie une température élevée, ce qui conduit à une augmentation de l'amplitude des vibrations du réseau, produisant une diffusion élevée et une chute du champ. mobilité.

Il convient de mentionner ici que les résultats montrent que les masses efficaces des électrons et les temps de relaxation énergétique sont approximativement identiques pour toutes les températures de réseau considérées. Par conséquent, la mobilité est la seule quantité qui dépend fortement de la température du réseau. La faible mobilité du champ à une certaine température et condition de polarisation peut être calculée comme suit :

$$\mu_0(V_{gs}, T) = \mu_0(V_{gs})\mu(T)/\mu(T_0)$$

III.3. Vitesse de dérive des électrons par rapport au champ électrique

La figure (III.1) illustre la dépendance de la vitesse de l'électron en fonction de la température du réseau et du champ électrique que lorsque la température augmente à un champ électrique fixe, la vitesse de dérive moyenne diminue, car lorsque la température du réseau augmente, le taux de diffusion total augmente directement. Indéniablement, la raison de l'augmentation du taux de diffusion des phonons est due à la température plus élevée due à un plus grand nombre d'occupation des phonons.

L'équation de la vitesse de dérive pour le GaN en fonction du champ électrique par rapport à une plage de température de (300 K – 700 K) est la suivante :

$$v_o = (2 * V_{peak} - (m_n * E_{peak}) / (1 + E_{peak}/E_3)) * (1 + (E_{peak}/E_2)^4) - v_{sat} * (E_{peak}/E_2)^4$$

Où T est la température du réseau en Kelvin, μ_n est la faible mobilité de champ, E_C est le champ électrique critique, v_{peak} est la finesse de crête et v_{sat} est la vitesse de saturation. Ces paramètres sont déterminés en fonction des températures

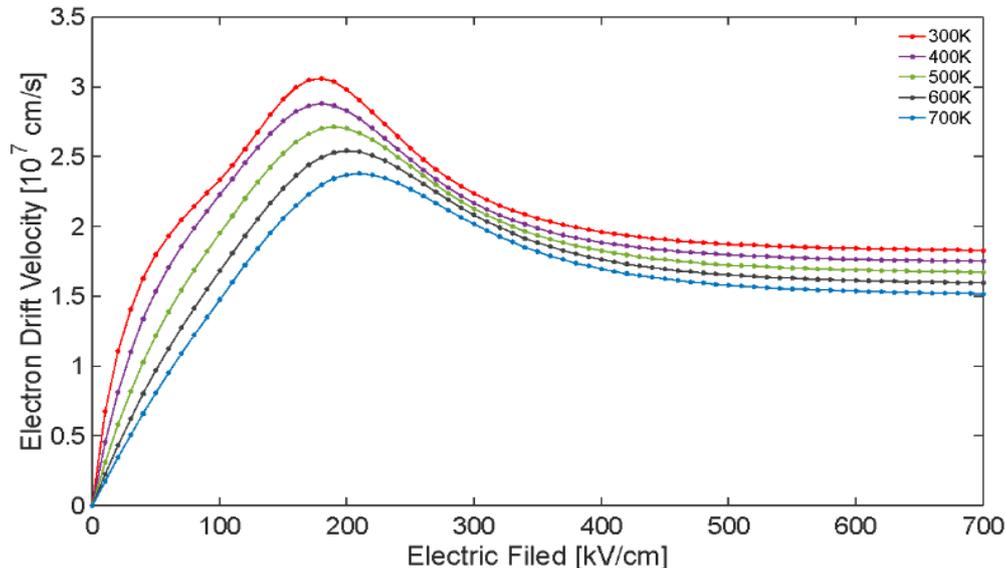


Figure III.1 : Vitesse de dérive électrique en fonction du champ électrique du GaN pour des températures de réseau différentes (300 K – 700 K) avec une concentration d'impuretés à 10^{17} cm^{-3}

III.4. Vitesse de saturation du GaN en fonction de la température du réseau pour $ND=10^{17}/\text{cm}^3$

lorsque la température augmente, la vitesse de saturation diminue progressivement. Il convient de noter que la croissance de la vitesse par rapport au champ électrique est due à l'augmentation plus importante de la masse effective des électrons dans les vallées satellites.

III.5. Conductivité thermique par rapport à la température

L'HEMT AlGaIn/GaN est principalement fabriqué sur des substrats différents tels que le carbure de silicium (SiC), le Si et le saphir. En pratique, le GaN-on-SiC succède actuellement aux densités de puissance les plus élevées car il s'agit d'une conductivité thermique massive. Le carbure de silicium (SiC) en tant que substrat fournirait une conductivité thermique extrêmement élevée ($\kappa_{\text{SiC}} = 490 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ce qui permet peut-être des performances encore plus élevées.

La figure (III.2) montre la différence de température des conductivités thermiques pour différents substrats (Si, SiC, GaN) et des matériaux spécifiques aux dispositifs AlGaIn/GaN. De toute évidence, lorsque la température augmente, tout le Si, le SiC et le GaN diminuent progressivement avec le niveau de différence, plus clairement, la conductivité thermique du SiC est plus élevée que celle des autres matériaux, tandis que l'augmentation de la température SiC diminue considérablement. La conductivité thermique du Si est inférieure à celle d'autres matériaux, tandis que la température augmente et que le SiC diminue progressivement. La conductivité thermique du GaN est supérieure à celle du Si et inférieure à celle du SiC, tandis que l'augmentation de la température Le GaN diminue très lentement Pour déterminer la conductivité du GaN, du SiC et du Si

respectivement.

:

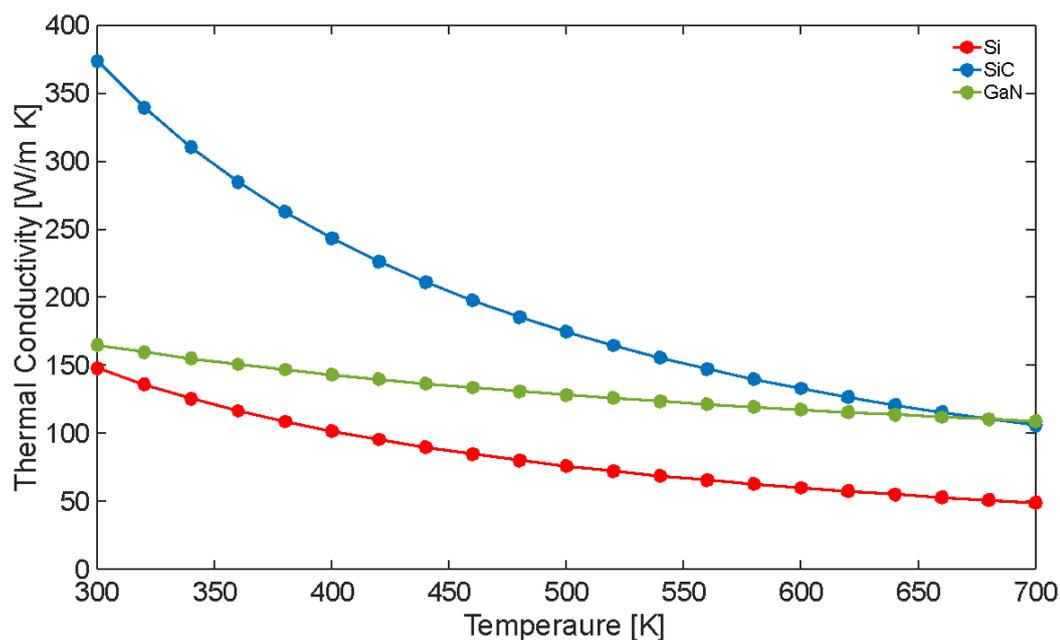


Figure III.2 : Différence de température des conductivités thermiques λ pour les substrats de variation (Si, SiC et GaN) sur des matériaux spécifiques au dispositif AlGaIn/GaN.

III.6. Caractérisation et simulation du courant, de la température et de la puissance.

Toutes les figures précédentes ont montré l'effet de l'augmentation de la température sur chacun des autres paramètres du dispositif, à l'exception de la densité du support de feuille (ns), qui a clairement confirmé l'effet de la température. L'étape suivante montre désormais la caractérisation et la simulation des comportements de courant, de température et de puissance des HEMT AlGaIn/GaN à l'aide du logiciel spécial MATLAB, etc. Les paramètres répertoriés caractériseront et simuleront dans différentes conditions. Les résultats seront sous forme de figures avec une description précise de ceux-ci, pour indiquer le comportement de ces paramètres dans l'appareil.

III.6.1 Caractéristiques I-V, sans et avec auto-échauffement

Pour connaître les caractéristiques de sortie du dispositif à une température (300 K) pour des conditions de variance drain-source et porte-source, des simulations sont

utilisées. L'association du courant de drain (I_{ds}) d'un HEMT en nitrure de gallium (GaN) avec la densité de la feuille de support (n_s) et la vitesse $v_d(x)$ donnée par :

$$I_{ds} = q W n_s v_d(x)$$

Où:

I_{ds} est le courant de drain (A),

q est une charge de l'électron a une valeur mesurée d'environ $1,6021766208 \times 10^{-19}$ (C)

W est la largeur du canal de l'appareil (cm).

n_s est une densité de porteurs de feuille en un point arbitraire le long du canal (cm^{-2}).

V_a est une vitesse de drainage en un point arbitraire le long du canal (m/s).

les caractéristiques ($I - V$) du dispositif, décrivant les caractéristiques courant-tension pour la polarisation grille-source à tension nulle lorsque l'influence d'auto-échauffement et le non-auto-échauffement sont pris en compte. Montre que lorsque la tension de drain (V_{ds}) augmente, le courant de drain (I_{ds}) augmente proportionnellement, et cette différence est linéaire pour une petite tension de drain (V_{ds}), puis sature à un V_{ds} appliqué attribué à la tension de drain V_d (sat). La ligne rouge est sans auto-échauffement pour la température (300 K) à tension de grille nulle, et la ligne bleue est avec auto-échauffement pour la température (300 K) à tension de grille nulle, observé la différence entre les deux est évidemment grande, le courant augmenter plus sans auto-échauffement que le courant avec auto-échauffement.

Généralement, les caractéristiques courant-tension d'un HEMT AlGaIn/GaN ont une région linéaire partout où les porteurs se déplacent sous v_{sat} et une zone de saturation, dans laquelle les porteurs voyagent avec $v = v_{sat}$.

III.6.2. Température en fonction de la tension de drainage, sans et avec auto-échauffement.

température en fonction de la tension de drain sans et avec prise en compte de l'auto-échauffement. La ligne rouge fait référence à la température à un niveau fixe (300 k) sans considération d'auto-échauffement, il n'y a pas de changement de température

lorsque la tension de drain augmente. Alors que la ligne bleue fait référence à la température à un niveau fixe (300 k) en tenant compte de l'auto-échauffement, il est clair que la température change radicalement lorsque la tension de drain augmente. Il existe une relation directe entre la température et la tension de drain, ce qui signifie que la température augmentera directement lorsque la tension de drain augmentera.

III.6.4. Les caractéristiques ($I - V$) pour les différents substrats

La figure (III.3) décrit la polarisation du courant de drain (I_{ds}) par rapport à la tension de drain (V_{ds}) à une tension de grille (0 V) en tenant compte de l'auto-échauffement pour différents matériaux tels que le silicium (Si), le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN). Étant donné que la tension de drain (V_{ds}) augmente, le courant de drain (I_{ds}) augmente directement avec un niveau différent pour chaque matériau et cette différence est une doublure pour une légère tension de drain (V_{ds}), puis après saturation à un niveau appliqué (V_{ds}) se réfère à une tension de drain $V_{d(sat)}$. Plus clairement. La ligne violette fait référence au substrat SiC, qui montre une augmentation du courant plus élevée lorsque la tension de drain augmente. La ligne verte fait référence au substrat (GaN), qui montre des augmentations de courant inférieures à celles du substrat (SiC), tandis que le courant augmente plus que le substrat Si. La simulation a montré que le substrat en carbure de silicium (SiC) est le meilleur car la conductivité thermique est élevée par rapport au carbure de silicium (SiC), désamorçant ainsi l'effet d'augmentation du courant.

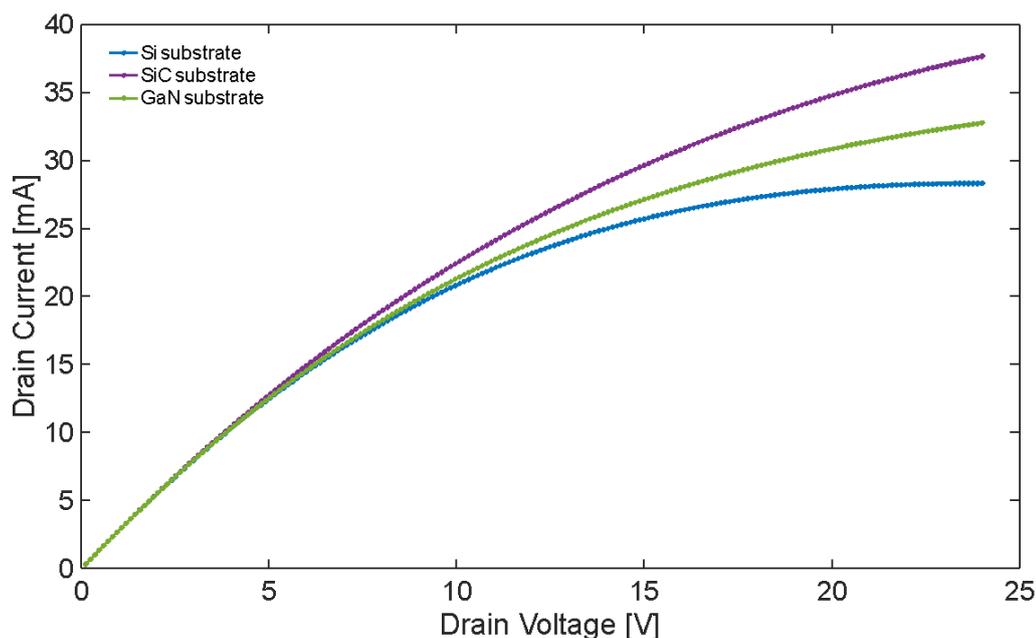


Figure III.3 : les caractéristiques ($I-V$) d'un HEMT AlGaIn/GaN pour différents substrats. La ligne violette fait référence à un substrat SiC, la ligne verte fait référence à un substrat GaN et la ligne bleue fait référence à un substrat Si.

III.6.5. Température et tension de drain pour différents matériaux

La figure (III.4) illustre la relation entre la température et la tension de drain pour différents matériaux tels que le substrat en silicium (Si), en carbure de silicium (SiC) et en nitrure de gallium (GaN). Affiché chaque fois que la tension de drain augmente, la température augmente progressivement. Pour plus de clarté, la ligne violette fait référence à un substrat SiC, qui présente des augmentations de température certainement plus faibles lorsque la tension de drain augmente. La ligne verte fait référence au substrat GaN, qui présente moins d'augmentations de température que le substrat SiC, tandis que la température augmente plus que le substrat Si. Cependant, la ligne bleue fait référence au substrat Si, qui présente une augmentation de courant inférieure à celle des deux autres. Comparé à d'autres substrats, le substrat SiC est le meilleur choix entre ces substrats car la conductivité thermique du carbure de silicium (SiC) est élevée, désamorçant l'effet d'augmentation du courant. Par conséquent, l'effet du courant est moindre et la température augmente moins que les autres substrats.

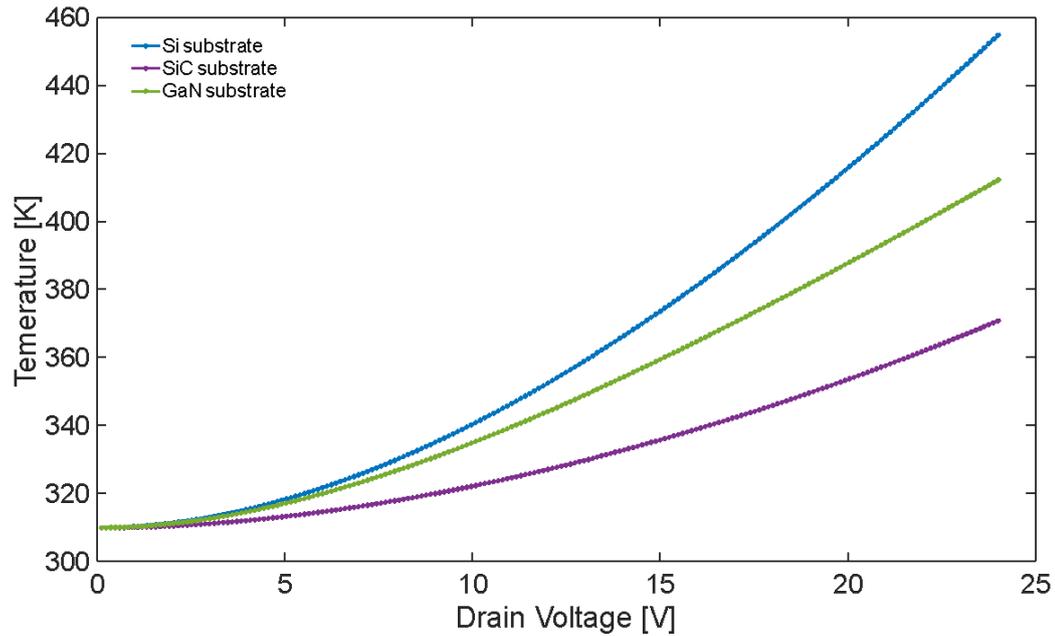


Figure III.4 : Température en fonction de la tension de drain pour différents substrats. La ligne violette fait référence au substrat SiC, la ligne verte fait référence au substrat GaN et la ligne bleue fait référence au substrat Si.

III.6.6. (I – V) caractéristiques de différentes tensions de grille (V_{gs}).

les caractéristiques (I – V) du dispositif AlGa_N/Ga_N HEMT, décrit les caractéristiques courant-tension pour différentes tensions de grille (V_{gs}) allant de (1 V à -2 V). Affiché chaque fois que la tension de grille (V_{gs}) augmente, le courant de drain (I_{ds}) augmente proportionnellement avec un niveau différent pour chaque tension de grille. Plus précis, la ligne bleue à la tension de grille (1 V) montre les augmentations de courant les plus élevées. Alors que la ligne orange à la tension de grille (0 V) indique une augmentation inférieure à celle de la première. Cependant, la ligne violette à (-1 V) montre moins de courant augmentant la précédente. Enfin, la ligne verte en (-2) montre moins que toutes les autres augmentations actuelles. J'ai observé la différence de réaction entre les tensions appliquées (1 V à -2 V), ce qui signifie que chaque fois que la tension de grille appliquée augmente, le courant augmente proportionnellement et vice versa, chaque fois que la tension de grille appliquée diminue, le courant diminue également. Il apparaît clairement que le courant de drain saturé augmente lorsque la tension de grille augmente. Les résultats des simulations ont montré que le nœud de tension de grille

doit contrôler le canal du dispositif et définir l'état de fonctionnement, jouant ainsi un rôle important dans les performances et la fiabilité du dispositif.

*Pour une meilleure compréhension de cette caractéristique, il est bon de voir le principe de fonctionnement HEMT.

III.6.7 Température en fonction de la tension de drain pour différentes tensions de grille (V_{gs}).

la relation entre la température et la tension de drain pour différentes tensions de grille (V_{gs}) allant de (1V à -2V). Il semble clair que la tension de grille joue un rôle important dans le contrôle du courant de drain et de la température dans le dispositif afin de préserver les performances et la capacité du dispositif.

III.6.8. Température et dissipation de puissance

La figure (III.5) montre la simulation de la relation entre la température et la puissance dissipée pour différents matériaux tels que le carbure de silicium SiC, le silicium Si et le nitrure de gallium GaN, ce qui signifie que lorsque la température augmente, la puissance dissipée augmente directement et vice versa.

Après un ensemble de calculs, d'analyses, de caractérisations et de simulations entre différents paramètres et matériaux pour déterminer l'influence de la température sur chacun d'eux afin de connaître l'effet de la température sur la durée de vie, les performances et la fiabilité de l'appareil. En conséquence, cela a confirmé que l'augmentation de la température a un effet négatif direct et massif sur la durée de vie, les performances et la capacité du dispositif, car la température provoque un ensemble de problèmes tels que la puissance dissipée et l'auto-échauffement dans les dispositifs AlGaN/GaN. De toute évidence, les résultats résument que chaque fois que la température augmente, tous les paramètres suivants diminuent :

- faible mobilité sur le terrain,

- vitesse de dérive des électrons dans une plage de température de (300 K -700 K),
- vitesse de saturation,
- Hauteur de la barrière Schottky,
- Discontinuité de la bande interdite énergétique,
- la densité des porteurs de feuilles 2DEG,
- Conductivité thermique.

Cependant, lorsque la tension appliquée (tension de grille et tension de drain) augmente, le courant augmente également, provoquant une augmentation de la température, ce qui entraîne alors une dissipation de puissance et un auto-échauffement dans les dispositifs AlGaN/GaN. ainsi, il s'avère que l'augmentation de la température a un effet négatif direct et massif sur la durée de vie, les performances et la fiabilité de l'appareil.

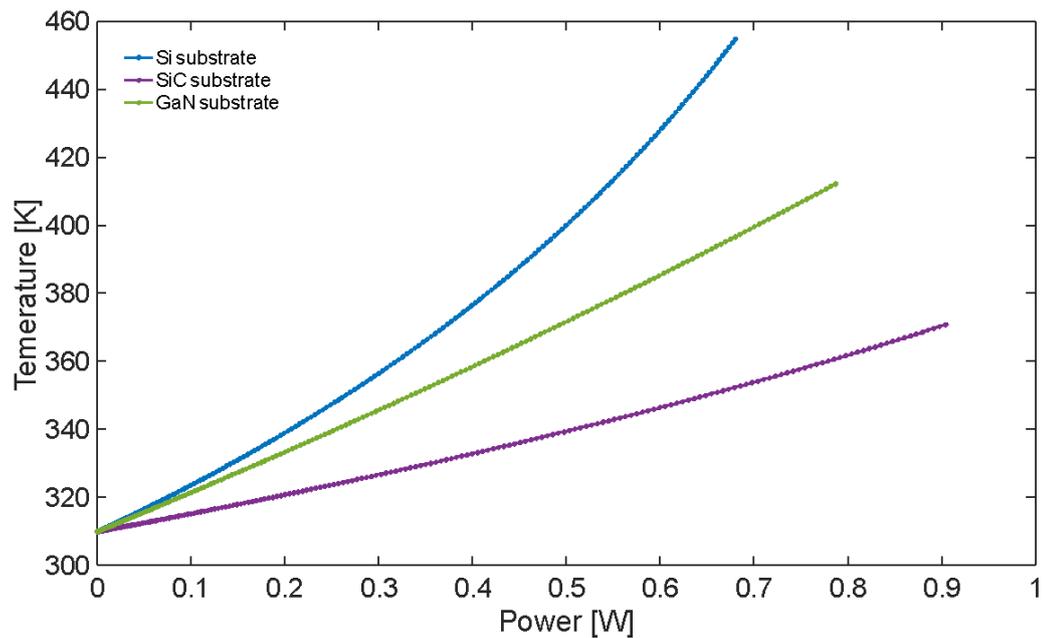


Figure III.5 : Température en fonction de la dissipation de puissance

Conclusion générale

L'étude des nitrures III-V, tels que le nitrure de gallium (GaN), dans des conditions de champ électrique élevé et de température accrue est cruciale pour la conception des futurs dispositifs électroniques à haute performance. Les résultats obtenus au cours de cette analyse mettent en évidence l'impact direct de la température sur plusieurs paramètres clés des dispositifs HEMT (High Electron Mobility Transistor) AlGaN/GaN, notamment la mobilité des porteurs, la vitesse de dérive des électrons et la conductivité thermique.

En particulier, il a été démontré que l'augmentation de la température dans la plage de 300 K à 700 K entraîne une diminution de la mobilité à faible champ, de la vitesse de dérive des électrons, et de la vitesse de saturation. Ce phénomène est principalement dû à l'amplification des vibrations du réseau cristallin et à la diffusion accrue des porteurs, résultant en une dégradation des performances des dispositifs. Par ailleurs, l'étude des substrats montre que le carbure de silicium (SiC) se distingue par une conductivité thermique bien supérieure à celle des autres matériaux tels que le silicium (Si) ou le GaN, faisant de lui le substrat privilégié pour la dissipation thermique dans les dispositifs haute puissance.

Les simulations effectuées montrent également que l'auto-échauffement, résultant de la dissipation de puissance, accentue les effets négatifs de l'augmentation de température, en particulier sur le courant de drain et la température du dispositif. Ce phénomène limite la fiabilité et la durée de vie des dispositifs électroniques, soulignant l'importance d'une gestion thermique optimisée pour ces systèmes.

En résumé, cette étude démontre que, pour améliorer la performance et la fiabilité des futurs composants électroniques basés sur les nitrures III-V, il est essentiel de

prendre en compte les effets de la température, ainsi que de choisir judicieusement les matériaux et substrats. L'intégration de solutions de gestion thermique efficaces, comme l'utilisation du carbure de silicium, pourrait atténuer les effets délétères de l'auto-échauffement et prolonger la durée de vie des dispositifs, tout en optimisant leurs performances sous des conditions de champ électrique élevé.

Références bibliographiques

- [01] MECHGOUG Amina , simulation d'un transistor algan/ingan/gan a effet de champ (hemt) Université Med Khider Biskra Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
- [02] . https://en.wikipedia.org/wiki/Gallium_nitride
- [03]. Dalvir K. Saini Wright State University Gallium Nitride: Analysis of Physical Properties and Performance in High-Frequency Power Electronic Circuits 2015
- [04] .Shrawan Jha CENSIS, UK AlGaN/GaN based HEMT structures and applications Article · April 2008
- [05].https://en.wikipedia.org/wiki/Gallium_nitride
- [06] .Li, Hongwei 1975-, "Novel processes for large area gallium nitride single crystal and nanowire growth." (2005). Electronic Theses and Dissertations. Paper 825.
- [07] .https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_band_structure
- [08].https://en.wikipedia.org/wiki/Two-dimensional_electron_gas
- [09]. G. J. Sullivan Rockwell Science Center, Thousand Oaks, California 91358~received 19 January 1999; accepted 3 May 1999!
- [10].B. E. Foutz, M. J. Murphy, The Influence of Spontaneous and Piezoelectric Polarization on Novel AlGaN/GaN/InGaN Device Structures Published online by Cambridge University Press: 10 February 2011
- [11]. ABDELMOUMENE Mestaria , Etude et modélisation d'un transistor HEMT AlGaN/GaN, Université Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique
- [12]. https://en.wikipedia.org/wiki/Gallium_nitride
- [13].<https://site.unibo.it/semiconductor-physics/en/research/low-dimensional-iii-nitridealloys-for-high-frequency-electronics>
- [14] .CHIN-PHYS-LETT Growth and Characterization of Modulation Doped Al_xGa_{1-x}N/GaN Heterostructures
- [15] Gaudenzio Meneghesso et al 2014 Jpn. J. Appl. Phys. 53 100211
- [16]. https://en.wikipedia.org/wiki/High-electron-mobility_transistor
- [17]. del Alamo, Jesus A. "The High-Electron Mobility Transistor at 30: Impressive Accomplishment and Exciting Prospects." 2011 International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, May 16-19, 2011, Indian Wells, California.
- [18].Tao Sun, Anbang Zhang, Dongfa Ouyang, Siyu Deng, Jie Wei & Bo Zhang Nanoscale Research Letters volume 14, Article number: 191 (2019)
- [19].Stanislav Vitanov Württemberggasse 3 A-1200 Wien, Österreich Matr. Nr. 0527757 geboren am 10. Jänner 1981 in Sofia Wien, im Dezember 2010
- [20].Muhammad Navid Anjum Aadit, Sharadindu Gopal Kirtania, Farhana Afrin, Md. Kawsar Alam and Quazi Deen Mohd Khosru (June 7th 2017). High Electron Mobility Transistors

- [21].P Vimala Dayananda Sagar Institutions Gallium Nitride (GaN) High Electron Mobility Transistors (HEMT) P Vimala Dayananda Sagar Institutions.Shanthi Jeyabal Thiagarajar College of Engineering.High electron mobility transistor-a review on analytical models Article · October 2016
- [22].Muhammad Navid Anjum Aadit, Sharadindu Gopal Kirtania, Farhana Afrin, Md.Kawsar Alam and Quazi Deen Mohd Khosru Submitted: October 27th 2016Reviewed: February 9th 2017Published: June 7th 2017
- [22].Mohammed LAREDJ modélisation électrothermique de transistors en technologie gan montréal, le 25 mars 2011
- [23].SA Kukushkin · 2008 · Cité 196 fois — The best effect has application. SiC and AlN. Unfortunately, the thermal expansion coefficient of Si is more than two times lower as compared to that of GaN, 32 pages
- [24].ABDELMOUMENE Mestaria Etude et modélisation d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN niversité Abou-Bakr Belkaïd-Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique
- [25].https://compoundsemiconductor.net/article/113362/AlN_Substrates_Show_Much_Promise_For_GaN_HEMTs
- [26] . Anwar Hasan Jarndal Large-Signal Modeling of GaN Device for High Power Amplifier Design
- [27] . AYÇA EMEN in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Micro and Nanotechnology Department, Middle East Technical University by,
- [28]. David J. Cheney, Erica A. Douglas, Lu Liu, Chien-Fong Lo,Brent P. Gila, Fan Ren,and Stephen J. Pearton Degradation Mechanisms for GaN and GaAs High Speed Transistors
- [29] Gaudenzio Meneghesso et al 2014 Jpn. J. Appl. Phys. 53 100211
- [30]MORDI Nasserredine simulation, modélisation et caractérisations électriques des transistors hemt's
base de composés iii-v nitrurés / faculté de génie électrique département d'électronique soutenue le 17 décembre 2018
- [31] ALLAF Mohammed thème etude du comportement du transistor hemt en hf universite mouloud mammeri de tizi-ouzou faculte du genie électrique et d'informatique departement d'automatique
- [32] Kuball M, Hayer JM, Uren MJ, Martin T, Birbeck JCH, Balmer RS, et al.Measurement of temperature in active high-power AlGaIn/GaN HFETs using Raman spectroscopy. IEEE Electron Dev Lett 2002;23:7–9.
- [33] Kuzmik J, Javorka P, Alam A, Marso M, Heuken M, Kordos P. Determination of channel temperature in AlGaIn/GaN HEMTs grown on Sapphire and silicon substrates using DC characterization method. IEEE Trans Electron Dev 2002;49:1496–8.
- [34] Islam SS, Anwar AFM. Self-heating and trapping effects on the RF performance of GaN MESFETs. IEEE Trans Microwave Theory Tech 2004;52:1229–36.

- [35] Ambacher O, Smart J, Shealy JR, Weimann NG, Chu K, Murphy M, 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;85:3222–33.
- [36] Gaska R, Chen Q, Yang J, Osinsky A, Khan MA, Shur MS. High-temperature performance of AlGa_N/Ga_N HFET's on SiC substrates. *IEEE Electron Dev Lett* 1997;18:492–4.
- [37] Freeman JC. Channel temperature model for microwave AlGa_N/Ga_N power HEMTs on SiC and Sapphire. *IEEE MTT-S Dig* 2004:2031–4.
- [38] Schwierz F. An electron mobility model for wurtzite Ga_N. *Solid-State Electron* 2005;49:889–95.
- [39] Chattopadhyay MK, Tokekar S. Thermal model for dc characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs including self-heating effect and non-linear polarization. *Microelectron J* 2008;39:1181–8.
- [40] Dang XZ, Asbeck PM, Yu ET, Sullivan GJ, Chen MY, McDermott BT. Measurement of drift mobility in AlGa_N/Ga_N heterostructure field-effect transistor. *Appl Phys Lett* 1999;74:3890–2.
- [41] Li M, Wang Y. 2-D analytical model for current–voltage characteristics and transconductance of AlGa_N/Ga_N MODFETs. *IEEE Trans Electron Dev* 2008;55:261–7.
- [42] Lee K, Shur MS, Drummond TJ, Morkoc H. Current–voltage and capacitance–voltage characteristics of modulation-doped field-effect transistors. *IEEE Trans Electron Dev* 1983;30:207–12.
- [43] Tisch U, Meyler B, Katz O, Finkman E, Salzman J. Dependence of the refractive index of Al_xGa_{1-x}N on temperature and composition at elevated temperatures. *J Appl Phys* 2001;89:2676–85.
- [44] Chattopadhyay MK, Tokekar S. Temperature and polarization dependent polynomial based non-linear analytical model for gate capacitance of AlGa_{1-m}N/Ga_N MODFET. *Solid-State Electron* 2006;50:220–7.
- [45] Shur M, Gelemont B, Asif Khan M. Electron mobility in two-dimensional electron gas in AlGa_N/Ga_N hetero-structures and in bulk Ga_N. *J Electron Mater* 1996;24:777–85.
- [47] Albrecht JD, Ruden PP, Binari SC, Ancona MG. AlGa_N/Ga_N heterostructure field-effect transistor model including thermal effects. *IEEE Trans Electron Dev* 2000;47:2031–6.
- [48] Grebene A, Ghandhi SK. General theory for pinched operation of the junction-gate FET. *Solid-State Electron* 1969;12:573–89.
- [49] Kola S, Michael golio J, Maracas George N. An analytical expression for Fermi level versus sheet carrier concentration for HEMT modeling. *IEEE Electron Dev Lett* 1988;9:136–8.

Liste Des abréviations

1. GaN: Gallium Nitride
2. SiC: Silicon Carbide
3. HEMT: High Electron Mobility Transistor
4. 2DEG: Two-Dimensional Electron Gas
5. AlGaN: Aluminum Gallium Nitride
6. DC: Direct Current
7. Vds: Drain-Source Voltage
8. Vgs: Gate-Source Voltage
9. RF: Radio Frequency
10. BV: Breakdown Voltage
11. MODFET: Modulation-Doped Field-Effect Transistor
12. AlN: Aluminum Nitride
13. InN: Indium Nitride
14. InGaN: Indium Gallium Nitride
15. MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
16. FET: Field-Effect Transistor
17. Si: Silicon
18. Ids: Drain-Source Current
19. 2DHG: Two-Dimensional Hole Gas
20. MESFET: Metal Semiconductor Field-Effect Transistor
21. FBL: Fluoride Barrier Layer
22. GaAs: Gallium Arsenide
23. Vpinch: Pinch-off Voltage
24. Vknee: Knee Voltage
25. ARL :Army research laboratory
26. HCP :Hexagonal close-packed
27. FCC :Face-Centered Cubic
28. LEDs. Light emitting diodes
29. HFET. Heterojunction field effect transistor
30. MOCVD :Metal-organic chemical vapor deposition
31. IMD. Intermodulation distortion

