



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : de Technologie

DEPARTEMENT : Electronique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : ASSAMEUR Tahar Abdelhak

AMOURAT Brahim

DOMAINE :...Science et Technologie...

FILIERE :Electronique.....

OPTION :Microélectronique...

Thème

***Conception d'un simulateur dédié aux
dispositifs microélectroniques : Application à
l'étude des propriétés électriques d'un transistor
HEMT AlGa_N/Ga_N***

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
BIRANE Mouhoub	MCB	Président
SELMANE Naceur	MCB	Examinateur
BELAKHDAR Aissa	MAA	Rapporteur

Promotion : Septembre - 2020

DEDICACE

A

Nos très chers parents

En témoignage de notre reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils
ont fait pour notre éducation

A

Nos chers amis

Pour leur patience et leur encouragement

A

Nos enseignants et collègues

Pour leurs précieux conseils et qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, le tout puissant, l'omnipotent, pour le courage et la volonté qu'il nous a inspiré.

On exprime toute notre gratitude à monsieur Bellakhdar Aissa, pour ces conseils éclairés, sa disponibilité et de nous avoir guidé pendant toute cette recherche en nous incitant à développer plus d'effort.

On remercie vivement les membres du jury pour nous faire l'honneur d'examiner notre travail.

On tient à remercier sincèrement, tous les membres de la faculté de Technologie et aussi tous nos collègues de la branche Microélectronique pour leurs encouragements.

ملخص

تعتبر الترانزيستورات عالية الحركة الالكترونية غير متجانسة البنية (HEMT) ذات أساس آزوتي من نوع AlGaN/GaN من بين أفضل الأنواع المستخدمة في الترددات المرتفعة، الاستطاعة، و الحرارة المرتفعة. لهذا المركب فوائد ذاتية تكمن في الاستقطاب الكهروضغطي و العفوي. يعتمد عملنا على الدراسة بالمحاكاة للترانزيستور HEMT، مع الأخذ بالاعتبار الاستقطاب الكهروضغطي و العفوي على النتائج. كذلك يمكننا تحسين المركب. و لهذا قينا بانشاء برنامج قادر على دراسته بعد نمذجة هذه البنية رياضيا.

Resume

A l'heure actuelle, les transistors à hétéro-structures HEMT (High Electron Mobility Transistor) à base AlGaN/GaN apparaissent comme les meilleurs candidats pour les applications hyperfréquences, de puissance, et haut température. Les avantages intrinsèques de ces transistors résident dans la contribution des polarisations spontanée et piézoélectriques donnant un gaz d'électron bidimensionnel à l'interface AlGaN/GaN qui est à la cause d'une concentration d'électron grande de l'ordre de 1.10^{13} C/m². Notre travail consiste à simuler un transistor HEMT AlGaN/GaN, en tenant compte des polarisations spontanées et piézoélectriques. Ainsi, nous avons développé un logiciel permettant de le simuler après la modélisation mathématique de cette structure.

Abstract

At present, the hetero-structures HEMT transistors (High Electron Mobility Transistor) of AlGaN/GaN type are the best candidates for the ultra-high frequencies applications, high power, and high temperature. The intrinsic advantages of these transistors lie in the contribution of the piezoelectrical and spontaneous polarizations, which causes high electrons concentration in the order of 1.10^{13} C/m². Our work consists in simulating a transistor HEMT AlGaN/GaN, while taking into account the piezoelectrical and spontaneous polarizations. Thus, we could optimize our device. For that, we have developed a software allowing us to simulate it after modeling mathematically that structure.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur le nitrure de gallium	3
I-1. INTRODUCTION	3
I-2. PRESENTATION DES COMPOSEES III-N	3
I-3 HISTORIQUE DU GAN	4
I-4 AVANTAGE DU GAN.....	5
I-5. PROPRIETES DU GAN.....	6
<i>I-5-1. Propriétés structurales</i>	<i>6</i>
I-5-1-1. La structure blende de zinc	6
I-5-1-2. La structure wurtzite.....	7
<i>I-5-2. Propriétés électroniques.....</i>	<i>9</i>
I-5-2-1. Bande interdite.....	9
I-5-2-2. Mobilité des porteurs	10
I-5-2-3. Rigidité diélectrique (Champ de claquage)	10
<i>I-5-3. Propriété thermique</i>	<i>10</i>
<i>I-5-4. Effet de polarisation.....</i>	<i>11</i>
I-5-4-1. La polarisation spontanée	11
I-5-4-2. La polarisation piézoélectrique.....	12
<i>I-5-5. Propriétés optiques</i>	<i>14</i>
I-6. <i>Substrat de croissance du GaN.....</i>	<i>15</i>
I-7. CONCENTRATION DES PORTEURS DANS UNE HETEROJONCTION ALGAN/GAN	17
I-8. CONCLUSION	18
Chapitre II : Modélisation électrique du transistor HEMT à base D'AlGaN/GaN.....	19
II-1. INTRODUCTION.....	19
II-2. TRANSISTOR HEMT (HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS).....	19
<i>II-2-1. Structure d'un HEMT.....</i>	<i>20</i>
<i>II-2-2. Transistor HEMT AlGaN/GaN.....</i>	<i>22</i>
<i>II-2-3. Principe de fonctionnement du HEMT AlGaN/GaN</i>	<i>23</i>
<i>II-2-3. Modélisation électrique du HEMT AlGaN/GaN.....</i>	<i>24</i>
II-2-3-1. Résolution par l'équation de poisson	25
II-2-3-2. Résolution de l'équation de Schrödinger	29
II-2-3-3. Détermination de la relation $n_s(V_G)$	31
<i>II-2-4. Caractéristique Courant-Tension du HEMT AlGaN/GaN.....</i>	<i>33</i>

II-3. EFFETS LIMITATIFS DES PERFORMANCES D'UN HEMT ALGAN/GAN « L'EFFET THERMIQUE »	36
II-3-1. <i>Modèle de mobilité en fonction de la température</i>	36
II-4. CONCLUSION	37
Chapitre III : Présentation du logiciel et résultat de simulation	38
III-1. INTRODUCTION	38
III-2. PRESENTATION DU LOGICIEL	38
III-2-1. <i>Introduction du logiciel</i>	38
III-2-2. <i>Utilisation du logiciel</i>	40
III-2-2-1. <i>Ajouter une structure</i>	40
III-2-2-2. <i>Configurer une structure</i>	42
III-2-2-3. <i>Simuler une structure</i>	45
III-3. RESULTAT DE LA SIMULATION	49
III-3-1. <i>Etude de la concentration de n_s en fonction de V_{gs}</i>	49
III-2-2. <i>Etude de la concentration de n_s en fonction de l'épaisseur d_d</i>	51
III-2-3. <i>Etude de la tension de seuil V_{th} en fonction de la concentration n_s</i>	52
III-2-4. <i>Etude de la tension de seuil V_{th} en fonction de l'épaisseur d_d</i>	53
III-2-5. <i>Etude de la tension de seuil V_{th} en fonction de la concentration d'aluminium</i>	54
III-2-6. <i>Etude du courant drain source I_{ds} en fonction de la tension V_{ds}</i>	55
III-2-7. <i>Dépendance du courant drain source I_{ds} en fonction de la température</i>	57
III-2-8. <i>Dépendance de la mobilité des porteurs en fonction de K°</i>	58
III-3. CONCLUSION.....	59
Conclusion générale	60
Bibliographie	61

LISTE DES FIGURES

Figure I-1. Énergie de gap pour quelques semi-conducteurs.....	4
Figure I-2. Structure Zinc blend.....	6
Figure I-3. Structure Wurtzite.....	7
Figure I-4. Schéma des deux polarités possibles (Ga et N) pour le binaire GaN dans la phase wurtzite	8
Figure I-5. Polarisation spontanée dans le GaN.....	12
Figure I-6. Polarisation piézoélectrique dans le GaN	14
Figure I-7. Energie de bande interdite des principaux III-N en fonction du paramètre de maille a	15
Figure I-8. Structure AlGaIn/GaN à face Ga, où GaN est relaxé et.....	17
AlGaIn contraint en tension	17
Figure II-1. Structure et différentes couches du HEMT AlGaIn/GaN	20
Figure II-2. Diagramme énergétique de la bande de conduction de l' hétérostructure AlGaIn/GaN	23
Figure II-3. Schéma de la structure AlGaIn/GaN.....	24
Figure II-4. Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGaIn/GaN	25
Figure II-5. Les états électroniques distribués dans l'espace.....	30
Figure III-1. Fenêtre principale du logiciel sans structure configuré.....	39
Figure III-2. Fenêtre principale du logiciel avec 2 model configurer	39
Figure III-3. Menu « Add Model »	40
Figure III-4. Menu principal avec des structures ajoutées.....	41
Figure III-5. Menu « Config »	42
Figure III-6. Configuration du model de l'AlGaIn/GaN.	44
Figure III-7. Exemple de la syntaxe des expressions mathématiques	44
Figure III-8. Menu principal avec un model préconfiguré en sélection	45
Figure III-9. Menu « Select Plots ».....	46
Figure III-10. Graph de visualisation avec le plot d' I_{ds} Sélectionner	46
Figure III-11. Sous Menu des variables d'entre dans le menu principal	47
Figure III-12. Menu principal après exécution	48
Figure III-13-a. N_s en fonction de V_{gs} pour différent valeur de d_d et $m=0.2$	49
Figure III-13-b. N_s en fonction de V_{gs} pour différent valeur de dd et $m=0.25$	50
Figure III-14. N_s en fonction de d_d pour différent valeur de N_d	51
Figure III-15. V_{th} en fonction de N_d pour différent valeur de dd	52
Figure III-16. Tension de seuil en fonction de l'épaisseur d'AlGaIn dd pour plusieurs concentration d'aluminium m	53
Figure III-17. Tension de seuil en fonction de la concentration d'aluminium m pour plusieurs épaisseur d'AlGaIn d_d	54
Figure III-18-a. Caractéristique courant tension pour différentes V_{gs} et $m=0.25$	55

Figure III-18-b. caractéristique courant tension pour différentes V_{gs} et $m=0.65$	56
Figure III-19. Dépendance du courant drain source I_{ds} en fonction de la température pour différent valeur de V_{gs}	57
Figure III-20. Dépendance de la mobilité en fonction de la température du canal.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Propriétés électroniques et thermiques concernant plusieurs semi-conducteurs connus en comparaison avec le GaN	9
Tableau I-2. Principales propriétés des III-N, à température ambiante (300K).....	12
Tableau I-3. Coefficients élastiques et piézoélectriques des principaux nitrides d'éléments III en comparaison avec le GaN	13
Tableau I-4. Propriétés des principaux substrats pour le GaN.....	16
Tableau II-1. Valeurs des paramètres du modèle.....	37

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

HEMT	Hight Electron Mobility Tronsistor
Al	Aluminium
AlGaN	Alliage nitrure gallium aluminium
AlN	Nitrure d'Aluminium
GaN	Nitrure de gallium
SiC	Carbure de silicium
m_0	masse de l'électron dans le vide
m^*	masse effective
h	Constant de Planck
E_g	Energie de gap
E_c	Energie de la bande de conduction
E_v	Energie de la bande de valence
K	Vecteur d'onde
$q\chi_s$	L'affinité du semi-conducteur
a	Paramètre de maille du substrat
a_0	Paramètre de maille de la couche active
BC	Bande de conduction
BV	Bande de valence
n_s	Densité de porteur au seuil
μ	Mobilité
E	Champ électrique
T	Température
V_{ds}	Tension drain source
V_{gs}	Tension grille source
I_{ds}	Courant drain source
I_{dssat}	Courant de drain de saturation
V_{dssat}	Tension de drain de saturation
ΔE_c	Discontinuité de bande de conduction
ΔE_v	Discontinuité de bande de valence
τ	Temps de relaxation
P_{SP}	Polarisation spontanée
P_{PZ}	Polarisation piézoélectrique
q	La charge d'électrons
$e_{11}, e_{33}, e_{13}, e_{31}$	les constantes piézoélectriques
$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}$	les constantes élastiques
σ_{int}	La densité de charge
E_i	Le niveau d'énergie de chaque sous bande
E_F	Le niveau de Fermi
NV	Niveau de Vide
d_d	Epaisseur de la couche donneuse

d_i	Epaisseur de la couche espaceur
$q\phi_m$	Le travail de sortie du métal
$q\phi_s$	Le travail de sortie du semi-conducteur
K_B	La constante de Boltzmann
σ	Conductivité électrique
ρ	La résistivité d'un matériau
MESFET	Metal Semi-conductor Field Effect Transistor
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
MODFET	Modulation Doped Field Effect Transistor
TCAD	Technology Computer Aided Design

Introduction générale

Introduction générale

Le développement des composants III-N comme le nitrure de gallium (GaN) devient aujourd'hui spectaculaire dans le marché des semi-conducteurs. En effet, ces composants présentent des performances bien supérieures à celles des semi-conducteurs plus classiques comme le silicium et l'GaAs. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications microélectroniques et optoélectroniques.

Le nitrure de gallium (GaN) admet une bande interdite large et directe, une grande stabilité chimique et thermique et des propriétés physiques très intéressantes pour opérer en haute température, haute puissance et haute fréquence. Outre ces propriétés physiques, GaN présente la particularité d'être un matériau pyroélectrique et piézoélectrique. Cette spécificité permet de réaliser des transistors HEMT type AlGaN/GaN dont la densité d'électrons à l'interface peut aisément dépasser 10^{13} cm^{-3} sans dopage intentionnel de la barrière AlGaN.

Durant ces dernières années, et à cause des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se sont orientés vers la simulation. La simulation est donc largement utilisée dans le domaine électronique et permet en effet de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des dispositifs, de minimiser les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de ces dispositifs.

L'objectif de ce travail est d'étudier la modélisation électrique d'un HEMT AlGaN/GaN et de concevoir un simulateur ou logiciel TCAD « Technology Computer Aided Design » qui va nous permettre de simuler les propriétés électriques de ce dernier.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, on rappelle les propriétés structurales et physiques du nitrure de gallium GaN, en tenant compte des polarisations spontanées et piézoélectriques. La détermination de la densité des porteurs dans le 2DEG et du courant dans les HEMT AlGaN/GaN est l'objet du second chapitre où on va établir la relation $n_s(V_{gs})$. Plusieurs approximations ont été prises en compte pour pouvoir calculer cette densité telle que, l'approximation du puits triangulaire et hauteur de la barrière AlGaN/GaN infinie. Même avec ces approximations, le système d'équations obtenu ne peut pas donner une solution analytique exacte. C'est pour cela que, nous avons développé un logiciel réalisé en C++ afin de pouvoir résoudre ce système d'équations numériquement et nous permettre de mieux simuler la structure étudiée durant ce travail. En plus du calcul de la densité des électrons dans le canal, nous avons aussi calculé le courant I_{ds} et la

Introduction générale

mobilité μ . Dans le dernier chapitre, on a présenté les résultats de simulation des propriétés électriques du HEMT AlGa_xN/GaN obtenus étudiés.

Chapitre I : Généralité sur le nitrure de gallium

I-1. Introduction

Les composés III-N présentent un intérêt fondamental pour les applications en électronique de puissance, haute température et haute fréquence ; ainsi qu'en optoélectronique dans les domaines spectraux qui couvrent tout le spectre visible aussi bien que l'ultraviolet proche et l'ultraviolet lointain (LED, Lasers, Photo-détecteurs), du fait de leurs exceptionnelles propriétés électroniques, physiques et optiques. Dans ce premier chapitre, nous présentons d'abord les composés III-N, nous donnons en suit un bref historique du nitrure de gallium, et nous présentons ses avantages sur ceux des autres semi-conducteurs III-V. Puis, nous donnons ses principales propriétés physiques : thermiques, chimiques, structurales, optiques et électroniques. Enfin, nous donnons les propriétés fondamentales de GaN, AlN et leurs alliages.

I-2. Présentation des composées III-N

Les nitrures III-N peuvent cristalliser suivant deux structures cristallines, dont l'une de maille hexagonale (wurtzite) et l'autre de maille cubique (zinc blinde). La forme la plus utilisée est la maille de type wurtzite à cause de ses propriétés physiques avantageuses et pour sa facilité de croissance par rapport à l'autre structure. Les semi-conducteurs III-N présentent un grand intérêt en raison de leurs propriétés

- Ils sont robustes
- Ils possèdent une conductivité thermique élevée
- Leur point de fusion est élevé
- Ils ont une bande interdite directe

I-3 Historique du GaN

Les nitrures d'éléments III ont été synthétisés pour la première fois entre la fin des années 1920 et le début des années 1930 par Johnson et al. [5]. Johnson a décrit la conversion du gallium (Ga) sous forme de métal en nitrure de gallium (GaN) dans une cuve d'ammoniac (NH_3).

- Les premiers cristaux étaient produits en 1932, à haute température (1173-1273K) soit (900-1000°C) [6].
- Tiede et al. ont synthétisé AlN à partir de l'aluminium (Al) métallique.
- Par la même technique, Juza et hahn ont obtenu InN à partir de $\text{InF}_6(\text{NH}_4)_3$. Presque tous les échantillons en poudre de GaN et AlN étaient synthétisés en plaçant un matériau convenable dans un four, sous un flux d'ammoniac.
- Plusieurs techniques de croissance épitaxiale, utilisées dans l'élaboration des III-N, ont évolué de cette approche. Cependant, ce n'est qu'en 1971 que Pankove et al. [7], ont pu obtenir des monocristaux de GaN de grande surface sur substrat saphir ; ce qui, entre autres, a permis de mesurer la valeur de la bande interdite du GaN [8]. Une année plus tard, le premier dispositif électro-luminescent à base de GaN était né [9].

La figure I-1. Illustre l'énergie de gap pour quelques semi-conducteurs.

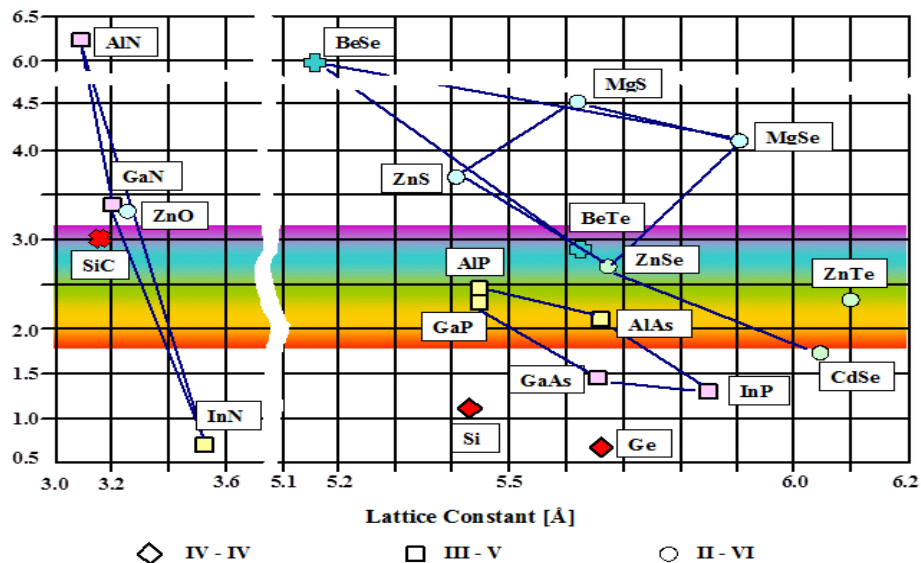


Figure I-1. Énergie de gap pour quelques semi-conducteurs [3]

I-4 Avantage du GaN

- Le GaN a l'avantage d'avoir une bande interdite directe et large de 3,4 eV à 300K [10].
- Par le fait de sa structure cristalline wurtzite et sa forte ionicité, il exhibe une variété de propriétés qui n'est pas présente (ou d'une façon moins importante) dans les semiconducteurs conventionnels. L'élément principal est l'effet de la polarisation spontanée et de la polarisation piézoélectrique dont plusieurs études expérimentales et théoriques ont révélé leurs importances dans les performances des composants à base d'hétérostructures de nitrures [10].
- Un champ de claquage élevé associé à un faible taux d'ionisation par impact, permet d'obtenir des puissances de sortie élevées (8 fois plus par rapport aux technologies III-V GaAs) [11].
- La forte conductivité thermique du GaN ($1.3 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ contre $0.5 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le GaAs) et de certains substrats (diamant $>9 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$, SiC : $5 \text{ W.cm}^{-1}.\text{K}^{-1}$) est avantageuse pour l'évacuation des calories [11].
- De plus, des densités d'électrons supérieures à 10^{13} cm^{-2} (gaz d'électrons à 2 dimensions '2DEG' avec hétérostructure AlGaIn) grâce à de fortes polarisations spontanée et piézoélectrique sans dopage intentionnel, sont un atout pour l'amplification des signaux [11].
- Une autre figure importante de mérite pour les dispositifs électroniques à base de GaN, c'est leur grande vitesse électronique de saturation qui est de l'ordre de 3.10^7 cm.s^{-1} [11].
- On note aussi que les III-N forment des hétérostructures ayant un gap direct, et des contacts ohmiques meilleurs que les autres semi-conducteurs III-V. Les composés III-N sont alors très prometteurs [11].
- GaN présente de nombreuses applications vouées à un grand développement, parmi ses applications commerciales on note les LED bleues ou vertes pour l'affichage couleur ou la signalisation, les LED blanches pour l'éclairage, les LD bleues ou violettes pour l'impression (laser) ou le stockage optique de données (CD et DVD) ...etc.

I-5. Propriétés du GaN

I-5-1. Propriétés structurales

Le GaN se cristallise sous deux formes différentes, la structure hexagonale ou wurzite (h-GaN), et la structure cubique appelé blende de zinc (c-GaN).

I-5-1-1. La structure blende de zinc

Cette structure est formée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées comprenant chacun un type d'atome décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille. Cette structure est thermodynamiquement instable et est moins exploitée par rapport à l'autre type, la valeur de sa maille élémentaire est de $a = 4.511 \text{ \AA}$ à 300K [12].

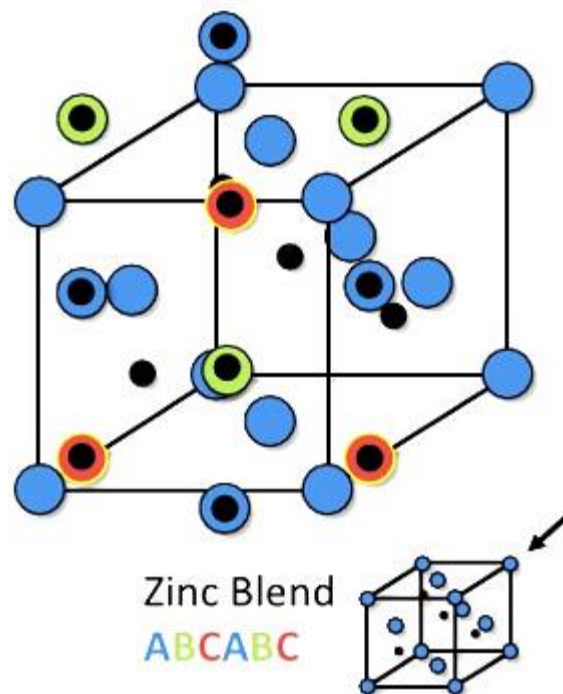


Figure I-2. Structure Zinc blend [12]

I-5-1-2. La structure wurtzite

Celle-ci par contre est constituée de deux réseaux hexagonaux, l'un avec les atomes de gallium et l'autre avec les atomes d'azote, interpénétrés et décalés entre eux de $5/8$ de la maille élémentaire [12]. (Figure I-3) La structure wurtzite possède deux paramètres principaux, a_0 le paramètre de maille latérale et c_0 le paramètre de maille verticale. Leurs valeurs ainsi que celles d'autres semi-conducteurs sont portées sur la figure I-6.

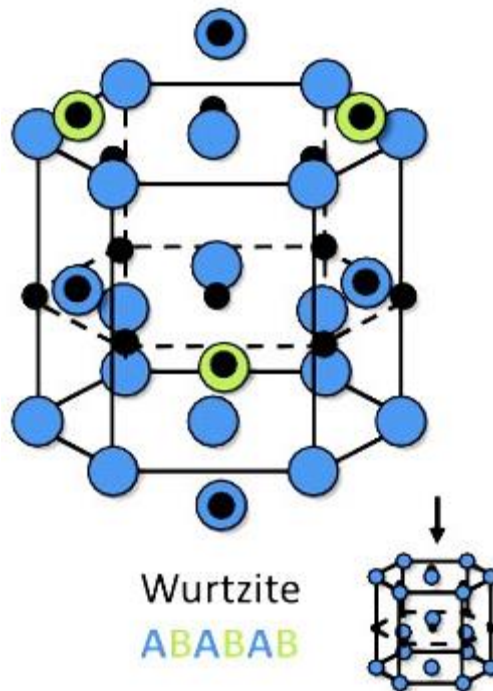


Figure I-3. Structure Wurtzite [12]

La croissance de la structure hexagonal du GaN se fait sur l'axe de croissance $[0001]$ ou $[000\bar{1}]$, les atomes sont rangés en deux couches interpénétrées, décalées et formant deux espaces hexagonaux, l'un avec des cations c'est à dire des atomes de gallium (Ga) et l'autre par des anions c'est-à-dire les atomes d'azote (N). Si l'axe de polarité de la surface est $[0001]$ le sommet de la structure sera formé uniquement par des atomes de gallium, on l'appelle alors à face Ga, par contre l'axe de polarité $[000\bar{1}]$ contient uniquement des atomes d'azote à la surface, on l'appelle alors à face N (figure I-4) [13].

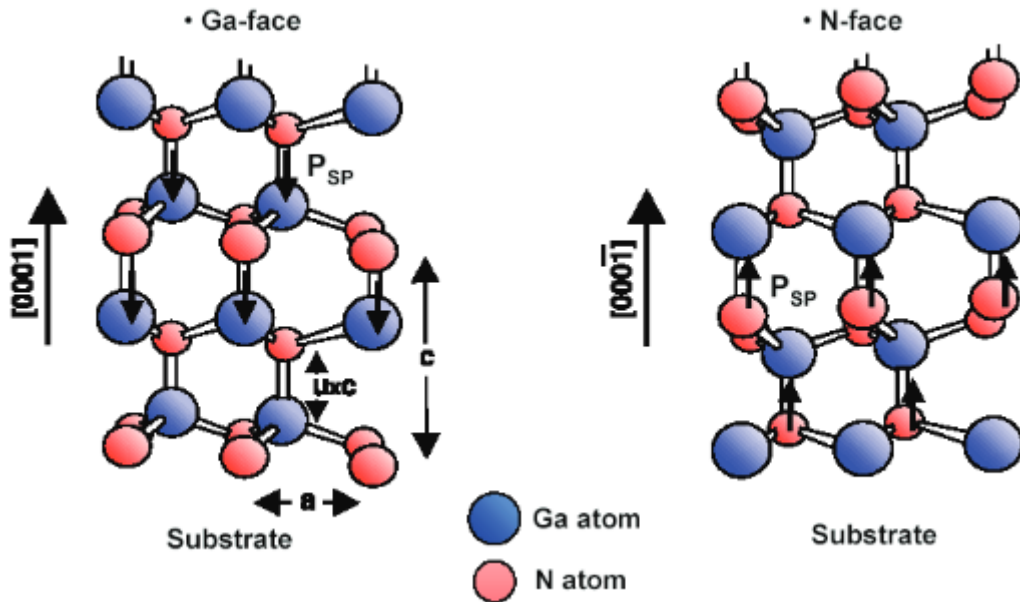


Figure I-4. Schéma des deux polarités possibles (Ga et N) pour le binaire GaN dans la phase wurtzite [13]

L'effet des deux surfaces (face N) et (face Ga) du GaN n'est pas équivalent, et elles sont très différentes chimiquement et physiquement. La méthode de croissance est un facteur déterminant pour le type de face à obtenir, une croissance par MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) sur saphir est toujours à face Ga alors que par MBE (Molecular Beam Epitaxy) est soit à face Ga ou à face N, selon l'existence ou pas de la couche AlN de nucléation. De plus et grâce à leur polarité elles jouent un rôle important dans la formation et la position du gaz bidimensionnel existant dans les hétérostructures à base de nitrures [13].

I-5-2. Propriétés électroniques

Les nombreuses propriétés mécaniques, thermodynamiques, optiques, électroniques, structurales, thermiques et électriques du GaN, font de ce semi-conducteur un élément attractif dans plusieurs domaines d'utilisation. Nous citerons dans ce paragraphe un ensemble de propriétés jugées utiles pour la suite de notre étude.

Le tableau I-1. Présente les propriétés électroniques et thermiques concernant plusieurs semi-conducteurs connus en comparaison avec le GaN.

Tableau I-1. Propriétés électroniques et thermiques concernant plusieurs semi-conducteurs connus en comparaison avec le GaN [2]

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

I-5-2-1. Bande interdite

Le GaN présente comme la plupart des matériaux III-V, une bande interdite directe. La largeur de cette bande a été estimée à 3.4 eV à température ambiante.

I-5-2-2. Mobilité des porteurs

En comparaison au GaAs et au Si, les matériaux SiC et GaN ont des mobilités électroniques plus faibles : respectivement 800 et $1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Néanmoins, la possibilité des matériaux III-nitride de créer un gaz d'électrons à deux dimensions (2DEG) rend le GaN très intéressant pour les applications haute fréquence et haute tension. En effet, les HEMT utilisent une hétérojonction afin de confiner les porteurs dans un puits de potentiel et créer un canal bidimensionnel sans qu'aucun dopage du GaN ne soit nécessaire. De cette façon, les effets de diffusion de la mobilité d'un matériau dopé tel que la diffusion par impuretés ionisées sont supprimés et la mobilité est considérablement augmentée. On peut ainsi obtenir sur un HEMT AlGaN/GaN une mobilité supérieure à $1200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

I-5-2-3. Rigidité diélectrique (Champ de claquage)

Le champ de claquage d'un matériau représente le champ électrique maximal qu'il peut supporter. Sa valeur est proportionnelle à $E_g^{3/2}$, où E_g est l'énergie de gap [14]. Il est mesuré à $3 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$ à 300 K . Le GaN possède un champ de claquage plus élevé que pour le Si et SiC, ce qui le rend donc le plus adapté pour les applications haute tension.

I-5-3. Propriété thermique

Les paramètres qui permettent de définir les propriétés thermiques :

- **La Dilatation thermique :** Tout matériau soumis à un changement de température se déforme : c'est le phénomène de la dilatation thermique. Il convient d'en tenir compte lorsque l'on étudie les propriétés des semi-conducteurs à des températures différentes, elle a été calculée par Krukowski et al [16], à $5.59 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ pour l'axe a et de $4.47 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ pour l'axe c.
- **La température de Debye :** Elle caractérise la valeur maximale des énergies de vibrations, elle a été calculée par Kim et al [15]. Et autre qui la prédit entre 620 et 690 K .
- **Conductivité thermique :** La conductivité thermique est la propriété cinétique qui est déterminée par les contributions des degrés de liberté électronique : de rotation et de

vibration. Dans les semi-conducteurs, à cause des faibles densités d'électrons et de trous de conduction, la contribution principale au transport de chaleur vient des phonons. Dans un cristal pur, la conductivité thermique est déterminée uniquement par le processus de la diffusion des phonons. Dans un cristal réel, elle est déterminée aussi par les défauts ponctuels. De toutes les propriétés thermiques, la conductivité thermique est la plus affectée par les défauts de structure, la valeur obtenue par porowski et al [17], et de $1.7 \text{ W.cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour concentration d'impunité de 10^{18} cm^{-3} .

I-5-4. Effet de polarisation

La présence d'un champ de polarisation spontanée et piézoélectrique est l'une des propriétés physiques originales des composés semi-conducteurs III-N de structure wurtzite, crû par épitaxie le long de la direction $\langle 0001 \rangle$, qui a des conséquences pour les applications électroniques. L'importance de la polarisation totale dans les composés nitrures présente un grand intérêt comparativement à d'autres semi-conducteurs composés III-V tel que le GaAs.

I-5-4-1. La polarisation spontanée

Compte tenu de l'électronégativité, que possède l'azote par rapport aux autres éléments du groupe V tels que le gallium et l'indium, lui permet d'attirer plus fortement vers lui les électrons dans la liaison Ga-N. Le nuage électronique ne sera plus symétrique et le barycentre des charges électriques ne sera plus situé au centre des deux atomes (Ga, N). On dit d'une telle liaison qu'elle est polarisée car elle agit comme si elle possédait un pôle positif et un pôle négatif. L'atome de gallium associé aux quatre atomes d'azote voisins forment des dipôles illustrés par la figure I-5 tel que [31]:

$$\sum_{i=1}^{i=4} \vec{P}_i = \vec{P}_{sp} \quad \text{I-1}$$

Il y a apparition d'une succession de dipôles orientés dans la direction $\langle 0001 \rangle$ et création d'un champ électrique dans le sens opposé à cette polarisation, le matériau possède ainsi une polarisation suivant l'axe c . A contrainte nulle, une polarisation spontanée P_{SP} existe, mentionnée dans le tableau I.2 [31].

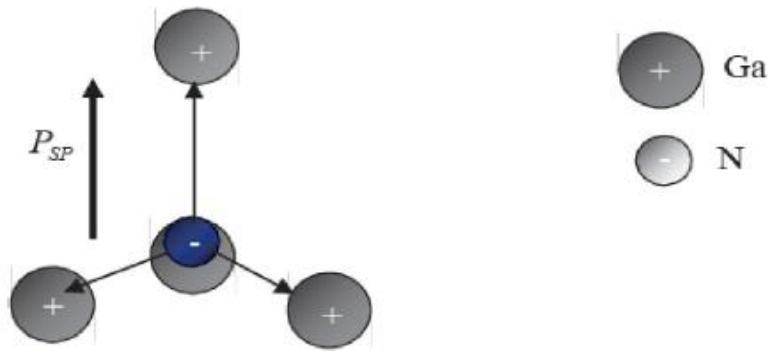


Figure I-5. Polarisation spontanée dans le GaN [31]

La structure cristalline du GaN possède une symétrie suivant l'axe c faisant que le gradient de polarisation $\nabla \vec{p} = -\sigma = 0$ et la densité de charge en volume soient nuls.

La valeur numérique de la polarisation spontanée du GaN ainsi que quelques éléments III-N est reportée sur le Tableau I-2.

Tableau I-2. Principales propriétés des III-N, à température ambiante (300K) [2]

Wurtzite	a (Å)	c (Å)	P_{sp} (C/m ²)
GaN	3,189	5,185	-0,029
AlN	3,112	4,982	-0,081
InN	3,538	5,703	-0,032

Une loi linéaire représentant l'évolution de la polarisation spontanée du composé ternaire $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$ en fonction du taux d'aluminium m peut être établie à partir des valeurs de polarisation spontanée de AlN et GaN.

$$P_{sp}(m) = (-0.052m - 0.029) \text{ C/m}^2 \quad \text{I-2}$$

I-5-4-2. La polarisation piézoélectrique

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux à produire un dipôle électrique proportionnel à la contrainte mécanique (traction ou compression) qui les déforme. En appliquant une pression sur les cristaux des nitrures, on oblige la structure à s'accommoder aux

contraintes et ceci par une variation de ses paramètres de maille, soit a_0 et c_0 . Il en résulte une variation de la polarisation qui n'est pas dû à la variation de la polarisation spontanée, puisqu'elle existe toujours dans le cristal et ne dépend d'aucun effet externe, mais à un autre type qu'on nommera la polarisation piézoélectrique. La valeur de cette polarisation sera calculée à partir de la formule suivante [1]:

$$P_{pz} = \left(\frac{a(0)-a(m)}{a(m)} \right) \cdot \left(e_{31}(m) - \frac{e_{33}(m)c_{13}(m)}{c_{33}(m)} \right) \quad \text{I-3}$$

Avec :

e_{31} et e_{33} : les constantes piézoélectriques.

c_{13} et c_{33} : les constantes élastiques.

$a(0)$ et $a(m)$: les constantes de maille latérale à l'équilibre et sous contrainte..

Le Tableau I-3. Illustre les coefficients élastiques et piézoélectriques des principaux nitrures d'éléments III en comparaison avec le GaN.

Tableau I-3. Coefficients élastiques et piézoélectriques des principaux nitrures d'éléments III en comparaison avec le GaN [2]

Wurtzite	C_{11} (GPa)	C_{13} (GPa)	C_{33} (GPa)	e_{31} (C/m ²)	e_{33} (C/m ²)
GaN	367	103	405	-0,49	0,73
AlN	396	108	373	-0,6	1,46
InN	223	92	224	-0,57	0,97

Il faut noter que les coefficients e_{33} , C_{13} , C_{33} sont toujours positifs, alors que e_{31} est négatif : le terme $(e_{31}-e_{33}(C_{13}/C_{33}))$ sera donc négatif, il en résulte que pour une déformation en tension biaxiale du cristal, (couches de GaN soumises à une contrainte extensive $a > a_0$), la polarisation piézoélectrique est négative comme la polarisation spontanée (figure I.6.a) et pour une déformation en compression, la polarisation piézoélectrique est positive contrairement à la polarisation spontanée (figure I.6.b).

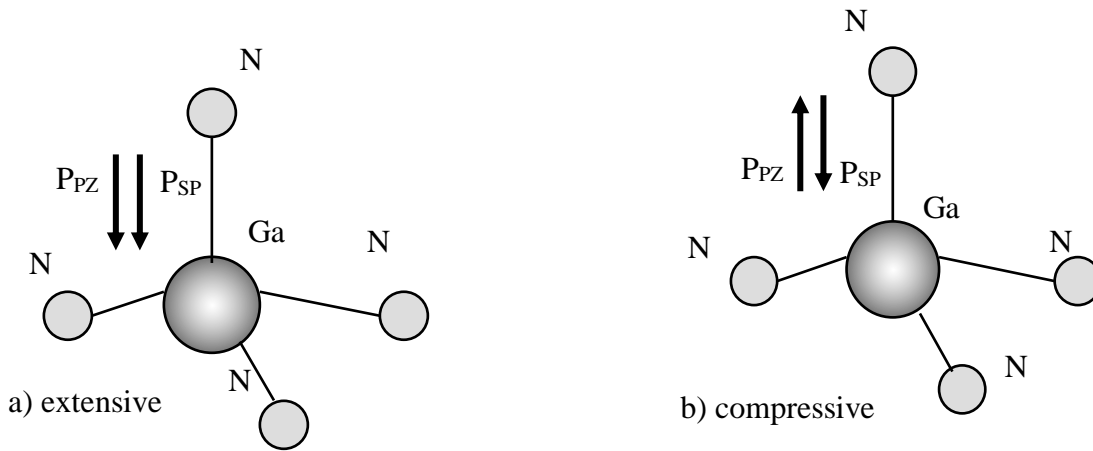


Figure I-6. Polarisation piézoélectrique dans le GaN

I-5-5. Propriétés optiques

Les nitrures d'éléments III présentent une grande variété de structure de bande. A température ambiante ($T=300K$), leur énergie de bande interdite directe est de 3,43eV pour le GaN et 6eV pour l'AlN, ce qui permet de couvrir un large spectre de longueur d'onde allant de l'infrarouge (1,85 μm) à l'ultraviolet profond (200nm. Les énergies de bande interdite des alliages ternaires de type $A_xB_{1-x}N$ peuvent être décrites par l'équation suivante [1] :

$$E_g^{A_xB_{1-x}N} = E_g^{AN} x + E_g^{BN} (1 - x) + b^{A,B} x(1 - x) \quad \text{I-4}$$

$b^{A,B}$ Est le terme de non linéarité (bowing) représentant la déviation par rapport à la loi linéaire de type Vegard. Il vaut 1eV pour l'AlGa_xN, 1,4eV pour l'InGa_xN et 2,5eV pour l'InAlN [1].

Note : les autres grandeurs physiques comme les coefficients piézoélectrique et élastique aussi suite la même formule à l'exception du terme de bowing.

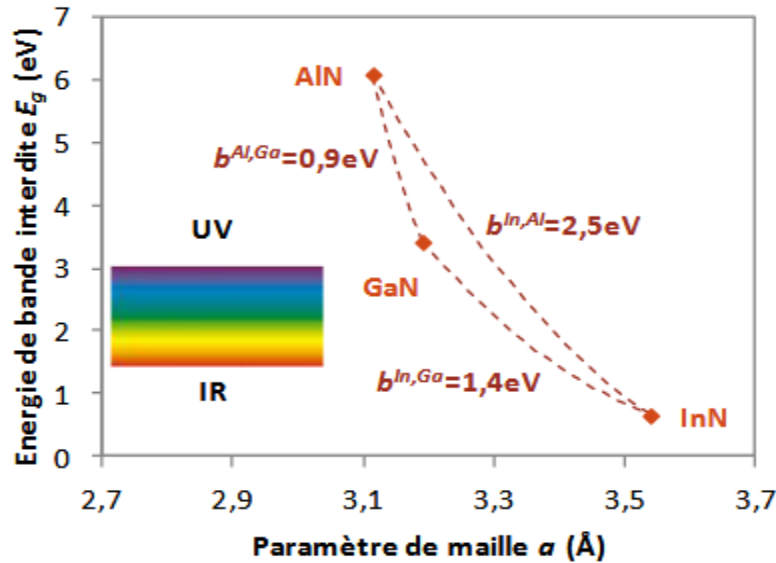


Figure I-7. Energie de bande interdite des principaux III-N en fonction du paramètre de maille a [2]

I-6. Substrat de croissance du GaN

Idéalement, le substrat et les couches basses du composant sont réalisés dans le même matériau, éliminant ainsi une interface entre des matériaux présentant des différences. Malheureusement, la croissance du GaN massif étant très difficile, l'épitaxie du GaN est effectuée sur des substrats de substitution. Les substrats, les plus fréquemment, utilisés sont le saphir, le silicium, et le carbure de silicium.

Le saphir Al_2O_3 , est semi-isolant, sa qualité cristalline est très bonne et il est disponible, à moindre coût et dans de grandes dimensions. Ce substrat révèle aussi plusieurs inconvénients, tels que : son fort désaccord de maille avec le GaN d'environ 16% et son fort désaccord de coefficient de dilatation thermique avec le GaN suivant l'axe $\langle a \rangle$. De plus, la conductivité thermique du saphir est mauvaise (0.5K/W), ce qui est un facteur hautement limitatif pour les applications aux fortes puissances. Pour atténuer l'effet de désaccord de maille, on dépose une couche mince d'AlN. Le

désaccord de maille résiduel reste important et induit une forte densité de dislocations (de l'ordre de 10^{10}cm^{-2}) [32].

Le silicium est utilisé, lui aussi, comme substrat de croissance pour le GaN. Ce substrat offre l'avantage d'être disponible et à très faible coût, ainsi qu'une meilleure conductivité thermique. C'est pourquoi, le Si est couramment utilisé comme substrat de croissance pour les couches de GaN. Les points faibles de ce substrat sont : un fort désaccord de maille de l'ordre de 17% avec le GaN, et une différence du coefficient de dilatation thermique supérieure à 35% [35], ce qui produit une plus grande densité de dislocation. Des techniques de croissance appropriée ou des couches de nucléation complexes, composées d'AlN et de GaN réalisées avant la couche GaN principale, sont déposées permettant de réduire ces risques.

Le substrat SiC, contrairement aux autres cités précédemment, présente un meilleur accord de maille avec le nitrure de gallium GaN, alors il offre des conditions d'épitaxie plus favorables à cause d'un plus faible désaccord de maille et de coefficient thermique respectivement de 3.5% et 25% [33].

De plus, il a l'avantage d'avoir de bonnes propriétés physiques telles qu'une conductivité thermique excellente (4.9W/cm.K) permettant une dissipation aisée de la chaleur. Cependant, les inconvénients majeurs de ce substrat sont principalement leur coût important et leur taille réduite disponible.

Le tableau I.4 résume les caractéristiques des substrats usuels pour GaN. Ces dernières sont données en rapport avec les paramètres de GaN, soit un paramètre de maille $a=3.189\text{Å}$ et un coefficient d'expansion thermique de $5.59 \times 10^{-6}/\text{K}$ [34].

Tableau I-4. Propriétés des principaux substrats pour le GaN [34]

Substrat	Saphir	SiC	Si
Gap (eV)	>9.0 6.22 6.31	3.3/3.0	1.12
Constante diélectrique relative	8.6	9.7	11.8
Conductivité thermique (W/K.cm)	0.5	4.9	1.5
Température de fusion	2030	2500	1410
Désaccord de maille avec GaN(%)	16	3.5	17
Désaccord de coefficient d'expansion thermique (%)	35	25	54

I-7. Concentration des porteurs dans une hétérojonction AlGaN/GaN

À partir des données précédentes, à cause des deux polarisations distinctes, nous avons calculé la densité de charges fixes σ développées à l'interface d'une hétérostructure $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$ à face Ga, en supposant que le GaN est totalement relaxé et l'AlGaN contraint en tension. La structure est représentée dans la figure I-8, où seules les charges fixes positives et négatives ont été représentées. La couche du GaN, n'étant pas contrainte, elle présente des charges positives et négatives moins importantes que dans l'AlGaN, ces dernières ne sont pas représentées sur la figure I-8.

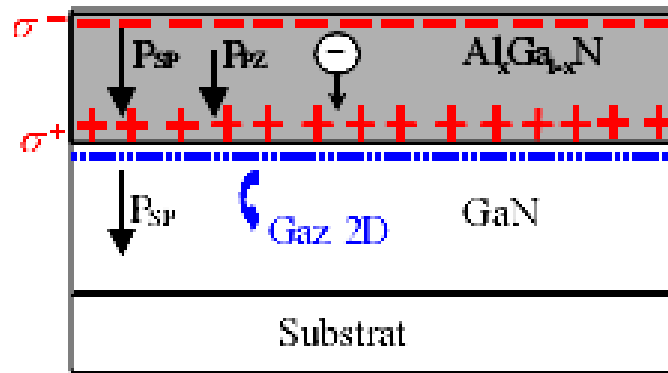


Figure I-8. Structure AlGaN/GaN à face Ga, où GaN est relaxé et AlGaN contraint en tension

La densité de charges aux interfaces est la différence entre la somme des champs de polarisation dans la couche d'AlGaN et celle de GaN :

$$\sigma = P_{SP_{\text{AlGaN}}}(m) + P_{PZ_{\text{AlGaN}}}(m) - P_{SP_{\text{GaN}}}(m) \quad \text{I-5}$$

Avec:

$$P_{PZ_{\text{AlGaN}}}(m) = 2 \frac{a - a_0(m)}{a_0(m)} \left(e_{31}(m) - e_{33}(m) \frac{C_{13}(m)}{C_{33}(m)} \right) \quad \text{C/m}^2$$

$$P_{SP_{\text{AlGaN}}}(m) = -0.052m - 0.029 \quad \text{C/m}^2$$

I-8. Conclusion

Dans ce chapitre, une comparaison des propriétés du GaN par rapport aux matériaux utilisés en microélectronique a été effectuée. L'empilement AlGaN/GaN se distingue par sa tenue en tension et sa forte mobilité, ce qui en fait de cet empilement une combinaison idéal pour les applications haute fréquence et haute puissance. On a montré que les polarisations piézoélectrique et spontanée, engendrées par la structure wurzite des matériaux GaN et AlN sont à l'origine d'une importante charge surfacique a l'interface AlGaN/GaN. afin de compenser cette charge, un gaz d'électrons a deux dimensions se crée dans le GaN. La croissance du GaN sur différents substrats tel que le Si, SiC et saphir ont été abordés.

Nous allons maintenant passer au deuxième chapitre décrivant la modélisation des propriétés électriques dans l'hétérojonction AlGaN/GaN, et le calcul de la concentration des porteurs « ns » dans le gaz 2DEG.

Chapitre II : Modélisation électrique du transistor HEMT à base D'AlGaN/GaN

II-1. Introduction

Durant ces dernières années, le développement des composées III-V a été spectaculaire. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures à celles des semiconducteurs plus classiques comme le silicium. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications microélectroniques et optoélectroniques. L'étude du fonctionnement des différents types de ses composants électroniques passe par une maîtrise préalable des phénomènes physiques régissant les propriétés des électrons dans le semiconducteur. Il est essentiel de comprendre les mécanismes de formation des hétérostructures et des nanostructures pour maîtriser au mieux la technologie des composants réalisés, à l'heure où les nanotechnologies ouvrent de nouvelles voies.

Le nitride de gallium, grâce à sa bande d'énergie interdite importante et à son champ de claquage élevé (supérieur à 3.10^6 V/cm c'est-à-dire 7 à 8 fois supérieur à celui de GaAs), permet de réaliser des transistors possédant des tensions de claquages importantes de l'ordre de 100V.

Outre ces propriétés physiques, le GaN présente la particularité d'être pyroélectrique et piézoélectrique. Cette spécificité permet de réaliser des transistors HEMT type AlGaIn/GaN dont la densité d'électrons à l'interface peut aisément dépasser 1.10^{13} cm⁻² sans dopage intentionnel de la barrière AlGaIn.

Ce deuxième chapitre décrit formellement une étude générale d'une hétérojonction. Nous expliquons aussi la formation de 2DEG dans l'hétérostructure AlGaIn/GaN, la polarisation spontanée et piézoélectrique. Après ; nous présentons le transistor HEMT à base de AlGaIn/GaN la structure physique, le principe de fonctionnement et les caractéristiques électriques. Puis, nous expliquons les effets limitatifs du HEMT. Enfin, nous citons l'état de l'art du transistor HEMT à base de AlGaIn/GaN.

II-2. Transistor HEMT (High Electron Mobility Transistors)

Appartient à la famille des transistors à effet de champ. Il est un cas particulier du MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). Ce composant possède plusieurs dénominations dans la terminologie anglo-saxonne, TEGFET (Two-dimensional Electron Gas

Field Effect Transistor), MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor) mais également HFET (Heterojunction Field Effect Transistor). Ce dernier terme est toutefois généralement plutôt réservé à un autre composant à hétérostructure dans lequel le transport s'effectue dans un matériau dopé alors qu'il est non dopé pour le HEMT. [18]

II-2-1. Structure d'un HEMT

La structure d'un HEMT est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite. La jonction de ces deux derniers matériaux engendre la formation du gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface, dont la densité est modulée par la tension appliquée à la grille du composant. L'autre phénomène caractéristique du fonctionnement d'un HEMT, outre l'existence d'un gaz d'électrons, c'est la jonction Schottky créée par la jonction métal de grille et semiconducteur du substrat.

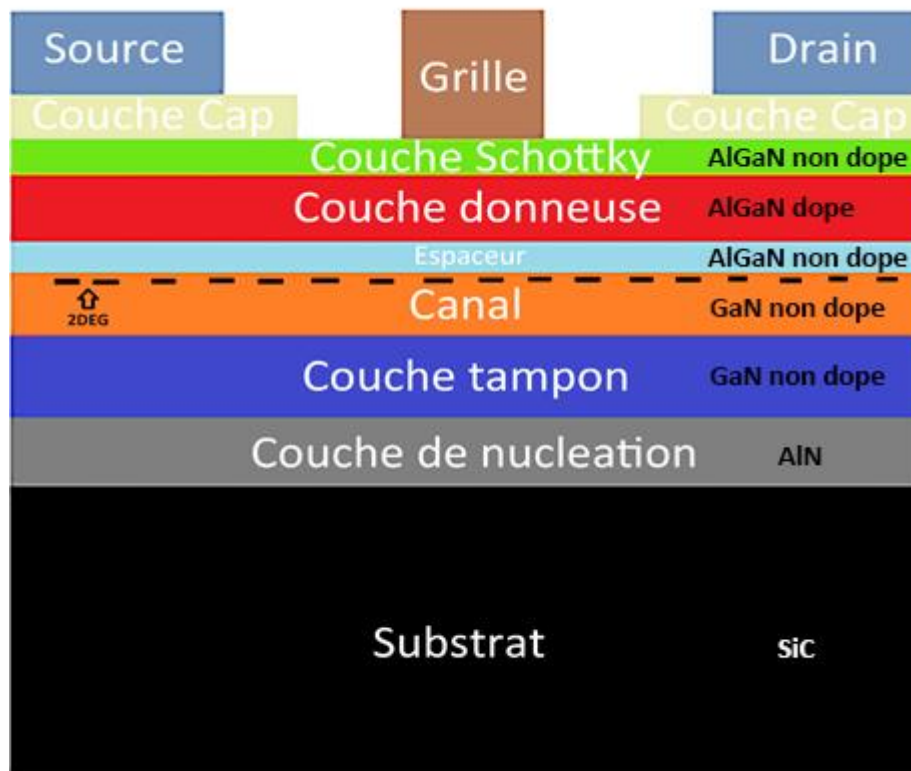


Figure II-1. Structure et différentes couches du HEMT AlGaN/GaN

Le Substrat: C'est la couche sur laquelle on fait croître les matériaux par épitaxie. Dans notre cas un bulk GaN n'est pas à ce jour disponible à faible coût et en grande taille, les substrats de nitrure de gallium sont encore très peu utilisés, on a alors recours à des substrats autres que le GaN. Un mauvais choix de substrat peut causer des dislocations lors de la croissance qui peuvent rendre le composant non fonctionnel. Les matériaux souvent utilisés sont le silicium (Si), le saphir (Al_2O_3) et le carbure de silicium (SiC). [26]

La couche de nucléation: C'est une couche mince d'un matériau qui sert à minimiser le désaccord de maille entre la couche tampon et le substrat, et pour s'assurer d'avoir une bonne qualité cristallographique afin de faire croître la couche du cristal dans le cas du GaN la Couche de nucléation utiliser est souvent AlN. [19] [20]

Couche tampon ou « buffer » : Cette couche est constituée du matériau de plus faible largeur de bande interdite, dans notre cas il s'agit du nitrure de gallium (3.4eV); c'est dans la partie supérieure de cette couche que le gaz bidimensionnel est formée. Elle permet d'améliorer le confinement des électrons dans le canal en réduisant l'injection des porteurs vers le substrat.

Le Canal : Le canal est situé dans la couche de matériau à petit gap non intentionnellement dopée. C'est la plus importante partie du HEMT, c'est là où se crée le gaz bidimensionnel d'électrons. C'est la région qui détermine les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau.

L'espacer : Cette couche est réalisée par un matériau de plus large gap qui est souvent l'AlN. Ce film non intentionnellement dopé possède une épaisseur de quelques nanomètres et permet de réduire les interactions électrons/donneurs entre le gaz d'électrons et la couche dopée (donneuse). En effet, la proximité de ces particules entraînerait une interaction électrostatique connue sous le nom de « Coulomb scattering ». Sans cette couche, les électrons du canal seraient fortement attirés par les atomes donneurs de la couche donneuse et seraient donc confinés à l'interface. Cette zone d'interface présente des défauts cristallins qui limitent la mobilité des électrons. Plus cette couche est fine plus la concentration des charges dans le canal augmente, présentant ainsi une forte densité de courant, et réduisant aussi la résistance de source. Plus elle est épaisse, plus la densité des porteurs de charge diminue, augmentant ainsi la mobilité des électrons. Il y a donc un compromis par rapport à son épaisseur. [21]

La couche donneuse : C'est dans cette couche que la zone d'espace de charge se forme au niveau de la jonction Schottky de grille ainsi qu'aux abords de l'hétérojonction. C'est une couche de matériau grand gap qui est dans notre cas l'AlGaIn dopée et qui fournit des électrons libres à la structure. Son dopage est généralement élevé, en utilisant le silicium qui y joue un rôle important car il contribue à l'augmentation de la concentration des électrons fournis.

Couche Schottky : cette couche à grand gap non dopée réalise le contact Schottky de la grille, dans notre cas c'est de l'AlGaIn non dope qui est utilisé.

Couche Cap : C'est une couche superficielle fine, formée par un matériau de faible bande interdite, sur laquelle sont réalisés de bons contacts ohmiques de drain et de source. Cette couche est généralement fortement dopée, la finesse de son épaisseur permet de réduire la valeur des résistances de contact et donc celle des résistances d'accès. Elle permet aussi d'empêcher l'oxydation de la couche donneuse.

II-2-2. Transistor HEMT AlGaIn/GaN

Un point fort du HEMT AlGaIn/GaN est la facilité de réaliser un gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface avec une concentration d'électrons supérieure à 10^{13} cm^{-2} sans doper intentionnellement la couche AlGaIn. Cette forte densité s'obtient grâce aux polarisations spontanée et piézoélectrique. Ces concentrations d'électrons dans le gaz 2D ne peuvent être atteintes avec les semi-conducteurs conventionnels comme le GaAs, même si la couche donneuse est fortement dopée. Un autre point fort de ce composant est la vitesse de saturation des porteurs libres dans le GaN qui est par exemple beaucoup plus importante que dans le GaAs, ce qui est parfaitement adapté pour des applications de puissance en hyperfréquence. Les transistors HEMTs AlGaIn/GaN permettent de fournir une puissance importante jusqu'à (40GHz) et au-delà [5]. Le point faible de ce type de composant par rapport aux autres filières est son prix. Les hétérostructures à base de GaN sont fabriquées sur des substrats en carbure de silicium SiC ou en saphir Al_2O_3 qui sont très coûteux. Cependant des couches d'AlGaIn/GaN ont été réalisées sur des substrats silicium de type Si (111) ou Si (001) qui sont moins chers. [22]

II-2-3. Principe de fonctionnement du HEMT AlGaN/GaN

Le principe de fonctionnement du HEMT est basé sur la modulation de la conductance entre les deux contacts ohmiques source et drain, par l'action électrostatique d'une électrode de commande dénommée grille (jonction de type Schottky) pouvant contrôler en nombre la densité de porteurs présents dans le gaz bidimensionnel. La variation de cette conductance est proportionnelle au nombre de porteurs libres dans le canal, et donc au courant entre source et drain. C'est l'effet d'amplification du transistor qui permet de transformer un faible signal appliqué sur la grille en un signal plus fort récupéré sur le drain. La différence avec le transistor classique est que le HEMT utilise une hétérojonction. L'hétérojonction repose sur le principe de création et de contrôle d'un gaz d'électrons dans un matériau faiblement dopé où les électrons peuvent se déplacer plus rapidement (mobilité d'électrons élevée). Cette couche appelée gaz d'électrons à deux dimensions est la conséquence des polarisations spontanée et piézoélectrique. La qualité de la commande dépend en grande partie de la qualité du contact Schottky, à l'interface entre la barrière AlGaN et le métal de grille. On a donc intérêt à rechercher les alliages métalliques présentant les meilleures caractéristiques, et se prêtant au mieux à leur dépôt sur le semi-conducteur. Cet effet de contrôle du gaz bidimensionnel à l'hétérojonction trouve son explication physique dans l'exploitation des diagrammes de bandes d'énergie suivant la direction verticale.

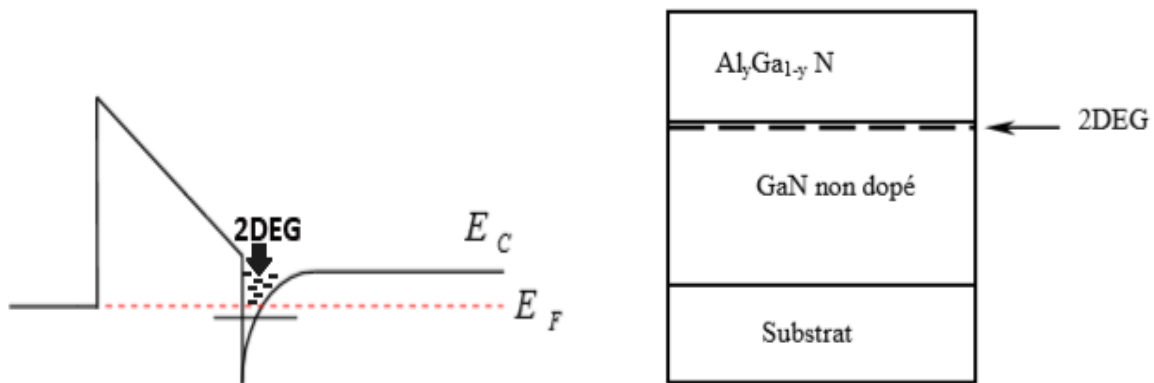


Figure II-2. Diagramme énergétique de la bande de conduction de l'hétérostructure AlGaN/GaN

II-2-3. Modélisation électrique du HEMT AlGaN/GaN

Le principe de base du HEMT est le transfert des électrons des atomes donneurs de la couche à plus grand gap vers celle à petit gap pour former le canal près de l'interface. Les HEMTs AlGaN/GaN possèdent une si grande densité de charges n_s du 2DEG qu'on ne peut attribuer cela uniquement à la grande discontinuité de bande entre le GaN et l'AlGaN mais surtout à la présence d'une forte polarisation à l'hétéro interface. La figure qui suit montre un HEMT AlGaN/GaN, où d_d et d_i sont les épaisseurs respectives de la couche donneuse et de l'espacer [23].

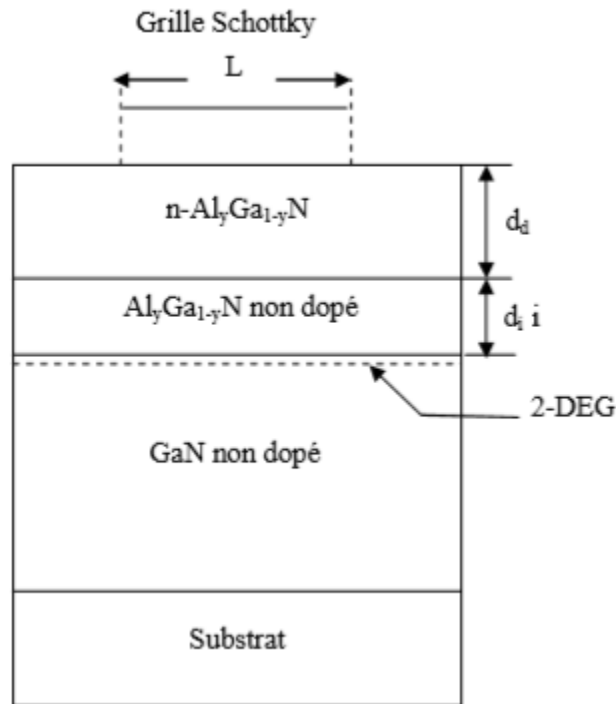


Figure II-3. Schéma de la structure AlGaN/GaN [6]

Le diagramme de bande associé à une telle structure est illustré sur la figure II-3, le principe de fonctionnement a été décrit plus haut, nous allons maintenant exprimer la densité de porteurs dans le 2-DEG, nous supposons dans l'étude qui suit que :

- Le 2-DEG est dans un puits de potentiel triangulaire à l'hétérointerface et que seules les deux premières sous bandes d'énergie E_0 et E_1 sont peuplés.
- La couche AlGaIn est très dopée (N_d) et a une épaisseur d_d .
- Le spacer est une couche d'AlGaIn non dopée et a une épaisseur d_i
- L'origine positive des distances x est l'interface entre l'AlGaIn et le GaN.

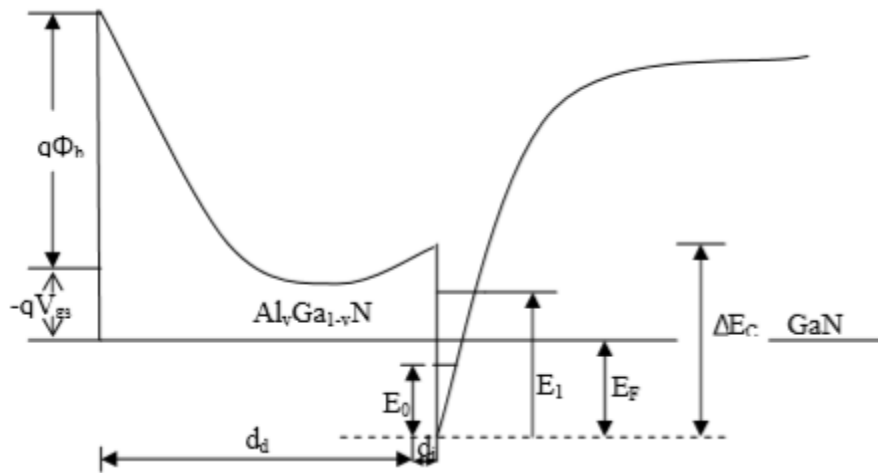


Figure II-4. Diagramme énergétique de la bande de conduction du HEMT AlGaIn/GaN [5]

II-2-3-1. Résolution par l'équation de poisson

Relation $n_s(V_G, E_F)$:

La continuité du vecteur de déplacement à l'interface AlGaIn/GaN s'écrit :

$$\varepsilon_1 E_1(0) = \varepsilon_2 E_2(0) \quad \text{II-1}$$

Avec:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: sont respectivement les constantes diélectriques du GaN et AlGaIn et dépendent de la concentration (y) de l'aluminium.

Pour atteindre $E_2(0)$ il suffit d'intégrer l'équation de poisson dans la couche AlGaIn

Successivement pour $x_i < x < 0$ et $x_d < x < x_i$

Dans l'espace non dopé, c'est-à-dire pour $x_i < x < 0$, la charge d'espace est nulle de sorte que le champ électrique est constant et en particulier est égal à $E_2(0)$.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = 0 \Rightarrow \frac{dV}{dx} = cte = -E_2(0) \quad \text{II-2}$$

En appelant V_0 , V_{xi} le potentiel en $x=0$ et $x = x_i$ respectivement, et d_i l'épaisseur de la région intrinsèque, c'est-à-dire de l'espace, une deuxième intégration donne

$$V_{xi} - V_0 = \int_0^{x_i} -E_2(0)dx = -E_2(0)x_i = E_2(0)d_i \quad \text{II-3}$$

Dans la région dopée de la couche AlGaIn, c'est-à-dire pour $x_d < x < x_i$, où la déplétion est totale et le dopage homogène, la charge d'espace est qN_d ainsi :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_d}{\epsilon_2} \quad \text{II-4}$$

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{qN_d}{\epsilon_2}x + cte = -\frac{qN_d}{\epsilon_2}(x - x_i) - E_{xi} \quad \text{II-5}$$

La continuité du vecteur de déplacement en $x = x_i$ permet d'écrire $E_{xi}=E_2(0)$, et une

Deuxième intégration entre x_d et x_i donne :

$$V_{xd} - V_{xi} = -\frac{qN_d}{2\epsilon_2}d_d^2 + E_2(0)d_d \quad \text{II-6}$$

Les expressions II-6 et II-3 permettent d'écrire l'expression de la différence de potentiel existant aux bornes de AlGaIn d'épaisseur $d = d_i + d_d$.

$$\Delta V = V_{xd} - V_0 = -\frac{qN_d}{2\epsilon_2} d_d^2 + E_2(0)d \quad \text{II-7}$$

Le diagramme énergétique de la figure permet de relier cette différence de potentiel à la tension de polarisation V_{gs}

$$\Delta V = V_{xd} - V_0 = -\frac{1}{q} (E_{c2}(x_d) - E_{c2}(0)) \quad \text{II-8}$$

En appelant ϕ_b la hauteur de la barrière de Schottky métal-AlGaIn, ΔE_c la discontinuité des bandes de conduction de l'hétérojonction AlGaIn/GaN et E_f l'énergie de dégénérescence du puits d'interface de GaN, on peut écrire les relations suivantes : [24]

$$\begin{aligned} E_{c2}(x) &= E_{c1}(0) + E_f - qV_{gs} + \phi_b \\ E_{c2}(0) &= E_{c1}(0) + \Delta E_c \end{aligned}$$

De sorte que ΔV s'écrit :

$$\Delta V = -\frac{E_f}{q} + V_g - \frac{\phi_b}{q} + \frac{\Delta E_c}{q} \quad \text{II-9}$$

Les relations (II-7 et II-8) donnent :

$$E_2(0) = \frac{1}{d} \left(V_g - \frac{E_f}{q} - V_1 \right) \quad \text{II-10}$$

Où la tension V_1 est donnée par :

$$V_1 = \phi_b - \Delta E_c - \frac{qN_d}{2\epsilon_2} d_d^2 \quad \text{II-11}$$

Nous devons maintenant calculer $E_1(0)$ dans le GaN, celui-ci étant peu ou pas dopé. La charge d'espace présente, est essentiellement constituée par les électrons de la couche d'inversion. Le théorème de Gauss appliqué à un cylindre d'axe x et de base unité dans le GaN permet d'écrire :

$$E_1(0) = -\frac{Q_1}{\epsilon_1} = \frac{qn_1}{\epsilon_1} \quad \text{II-12}$$

La continuité de vecteur de déplacement (II-1) à l'interface AlGaIn/GaN et les relations (II-10 et II-12) permettent d'établir la relation $n_1(V_g, E_F)$ [24].

$$n_1 = \frac{\epsilon_2}{qd} \left(V_g - \frac{E_F}{q} - V_1 \right) \quad \text{II-13}$$

La concentration totale des charges sera donc augmentée des charges induites par la polarisation propre au matériau. On peut donc exprimer $n_s(V_g, E_f, \sigma_{int})$.

$$n_s = \frac{\sigma_{int}}{q} + \frac{\epsilon_2}{qd} \left(V_g - \frac{E_F}{q} - V_1 \right) \quad \text{II-14}$$

Et on peut écrire :

$$n_s = \frac{\epsilon(y)}{qd} \left(V_g - \frac{E_F}{q} - V_{th}(y) \right) \quad \text{II-15 (a)}$$

ou

$$V_{th} = \phi_b(y) - E_c(y) - \frac{qN_d}{2\epsilon_2(y)} d^2 - \frac{\sigma_{int}(y)}{\epsilon_2(y)} d \quad \text{II-15 (b)}$$

II-2-3-2. Résolution de l'équation de Schrödinger

La relation $n_s = f(E_f)$

L'utilisation de la résolution de l'équation de Schrödinger a permis d'expliquer la base physique du 2DEG dans le puits quantique.

Les électrons étant confinés dans un puits de potentiel triangulaire, les porteurs se comportent ainsi comme un gaz d'électron bidimensionnel où leur mouvement est libre dans le plan de la structure (x,y) et quantifié dans la direction perpendiculaire z. une étude détaillée du comportement de ces porteurs passe par un traitement quantique du problème [24].

La résolution de l'équation de Schrödinger de ces électrons bidimensionnels montre que les états électroniques sont distribués dans des sous bandes d'énergie données par [25]:

$$E = E_i + \frac{\hbar^2 k_B^2}{2m_0} \quad \text{II-16}$$

m_0 la masse électronique au repos.

Avec :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Où h est la constante de Planck.

La quantification discrète des sous bandes d'énergie est suivant k_z et la variation pseudo continue est suivant k_b avec $k_b^2 = k_x^2 + k_y^2$, et puisque les électrons sont distribués pratiquement dans les premiers états d'énergie E_0, E_1 alors l'équation II-16 peut s'écrire de la sorte:

$$E = E_0 + E_1 + \frac{\hbar^2 (k_x^2 + k_y^2)}{2m_0} \quad \text{II-17}$$

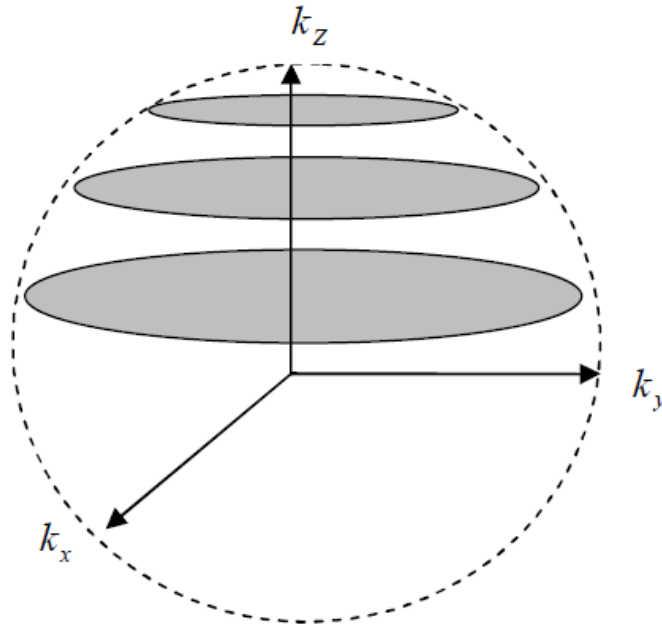


Figure II-5. Les états électroniques distribués dans l'espace [25]

L'énergie E_i du bas de chaque sous bande est donnée, dans l'approximation du potentiel Triangulaire par :

$$E_i = \left(\frac{\hbar^2}{2m_0} \right)^{1/3} \left(\frac{3 * \pi * q}{2} E_{eff} \left(i + \frac{3}{4} \right) \right)^{2/3} \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad \text{II-18}$$

E_{eff} représente le champ électrique effectif présent dans la zone de charge d'espace, sa valeur moyenne est donnée par :

$$E_{eff} = \frac{q(N_{dep} + n_s / 2)}{\epsilon_1} \quad \text{II-19}$$

ϵ_1 étant la constante diélectrique du GaN

N_{dep} la charge de déplétion, est négligeable devant n_s de sorte qu'en explicitant E_{eff} dans l'équation précédente, E_i s'écrit :

$$E_i = \gamma_i * n_s^{2/3} \quad \text{II-20}$$

Avec :

$$\gamma_i = \left(\frac{\hbar^2}{2m_0} \right)^{1/3} \left(\frac{3 * \pi * q^2}{4} \left(i + \frac{3}{4} \right) \right)^{2/3} \quad \text{II-21}$$

La population électronique de chaque sous bande est donnée par :

$$n_s(i) = \int_{E_i}^{\infty} g(E) f(E) dE \quad \text{II-22}$$

$$n_s(i) = \frac{m_0}{\pi * \hbar^2} k_B T \ln \left(1 + e^{\frac{(E_F - E_i)}{kT}} \right) \quad \text{II-23}$$

$$n_s(i) = \frac{m_0}{\pi * \hbar^2} k_B T \sum_i \ln \left(1 + e^{\frac{(E_F - E_i)}{kT}} \right) \quad \text{II-24}$$

Avec k_b la constante de Boltzmann et puisque seules les deux premières sous bandes ($i=0$ et $i=1$) sont peuplées, La densité superficielle totale d'électrons $n_s=f(E_f)$ s'écrit donc [25]:

$$n_s = D k_B T \ln \left[\left(1 + e^{\frac{(E_F - E_0)}{kT}} \right) \left(1 + e^{\frac{(E_F - E_1)}{kT}} \right) \right] \quad \text{II-25}$$

II-2-3-3. Détermination de la relation $n_s(V_G)$

La résolution simultanée des équations II-15 et II-25 permet de calculer n_s . L'utilisation de la résolution de l'équation de Schrödinger a permis d'expliquer la base physique du 2DEG dans le puits quantique et d'établir l'équation de la concentration des porteurs $n_s = f(E_F)$ tel que [25]:

$$n_s = D k_B T \ln \left[\left(1 + e^{\frac{|E_F - E_0|}{kT}} \right) \left(1 + e^{\frac{|E_F - E_1|}{kT}} \right) \right] \quad \text{II-25}$$

D'un autre côté l'équation de poisson permet d'écrire n_s en fonction de la polarisation de grille V_{gs} et de σ_{pol} et on peut écrire :

II-26

$$n_s = \frac{e(y)}{qd} \left[V_g - \frac{E_F}{q} - V_{th}(y) \right]$$

Ou :

$$V_{th}(y) = \frac{\Phi_b(y)}{q} - \frac{\Delta E_c(y)}{q} - \frac{qN_d(y)}{2e_2} d_d^2 - \frac{\sigma_{int}(y)}{e(y)} d \quad \text{II-27}$$

Avec :

$\Phi_b(y)$: la hauteur de la barrière Schottky.

$\Delta E_c(y)$: la valeur de la discontinuité des bandes entre l'AlGaIn et le GaN.

$\sigma_{int}(y)$: la densité de charge dans le puits quantique.

De cela, une estimation correcte de n_s nécessite donc une résolution simultanée des deux équations. Quand le niveau de Fermi est bien en dessous des niveaux d'énergie E_0 et E_1 , la densité n_s a une valeur très faible c'est le régime de faible inversion, dès qu'il atteint le bas du puits de potentiel, le dispositif opérera alors juste en dessous de sa tension de seuil, en approchant celle-ci le niveau de Fermi se trouve peu au-dessus de la bande de conduction et la valeur de n_s commence alors à augmenter, le dispositif opère alors en régime de moyenne inversion. Mais dès que le niveau de Fermi est loin au-dessus de E_C on a alors des valeurs considérables de n_s (c'est le régime de forte inversion), l'expression de n_s sera alors pour les trois régimes [6].

En faible inversion :

$$n_s = 2Dk_B T \exp \left[q \left(\frac{V_{gs} - V_{th}(y)}{k_{BT}} \right) \right] \quad \text{II-28}$$

En moyenne inversion :

$$n_s = n_0 \exp \left[\left(\frac{qe(y) \left(V_{gs} - V_{th}(y) - \frac{q(d_d + d_i)n_0}{e(y)} \right)}{q^2(d_d + d_i)n_0 + e(y)k_{BT}} \right) \right] \quad \text{II-29}$$

Le terme n_0 représente la densité de charge à l'équilibre.

En forte inversion :

$$n_s = \frac{2e(y)qD}{(e(y) + 2q^2D(d_d + d_i))} (V_{gs} - V_{th}(y)) \quad \text{II-30}$$

II-2-4. Caractéristique Courant-Tension du HEMT AlGaIn/GaN

L'expression du courant I_{ds} sera comme pour un transistor MOS exprimé par :

$$I_{ds} = qWn_s\mu \frac{dV_c(x)}{dx} \quad \text{II-31}$$

Avec :

W : la largeur de la grille.

μ : la mobilité.

$V_c(x)$: la tension en tout point du canal.

La mobilité sera donnée par :

$$\mu(x) = \frac{\mu_0}{\left(1 + \frac{1}{E_1} \frac{dV_c(x)}{dx}\right)} \quad \text{II-32}$$

Avec :

$$E_1 = \frac{E_c v_{sat}}{(\mu_0 E_c - v_{sat})} \quad \text{II-33}$$

Ou E_c , v_{sat} sont respectivement le champ, la vitesse de

Saturation, et m_0 la mobilité initiale.

D'où :

$$I_{ds} = qWn_s\mu_0 \left(\frac{\frac{dV_c(x)}{dx}}{1 + \frac{1}{E_c} \frac{dV_c(x)}{dx}} \right)$$

En remplaçant n_s par sa valeur en régime de forte inversion le courant s'écrit :

$$I_{ds} \left(1 + \frac{1}{E_c} \frac{dV_c(x)}{dx} \right) = \frac{2Wq^2D\mu_0e(y)}{(e(y) + 2q^2D(d_d + d_i))} (V_{gs} - V_{th}(y) - V_c(x)) \frac{dV_c(x)}{dx} \quad \text{II-35}$$

En intégrant l'équation le long du canal avec les conditions aux limites suivantes:

$$V_c(x)|_{x=0} = I_{ds}R_s \quad \text{II-36}$$

$$V_c(x)|_{x=L} = V_{ds} - I_{ds}(R_s + R_d) \quad \text{II-37}$$

Ou : R_s et R_d sont les résistances parasites du drain et de la source

L'expression du courant dans la région linéaire sera :

$$I_{ds} = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4a_1a_3}}{2a_1} \quad \text{II-38}$$

Avec :

$$a_1 = \left(\frac{2Wq^2D\mu_0e(y)}{(e(y) + 2q^2D(d_d + d_i))} \right) (R_d^2 + 2R_sR_d) - \left(\frac{2R_s + R_d}{E_1} \right)$$

$$a_2 = L + \frac{V_{ds}}{E_1} + \left(\frac{2Wq^2D\mu_0e(y) \left((2R_s + R_d)(V_{gs} - V_{th}(y)) - V_{ds}(R_s + R_d) \right)}{e(y) + 2q^2D(d_d + d_i)} \right)$$

$$a_3 = \left(\frac{2Wq^2D\mu_0e(y)}{(e(y) + 2q^2D(d_d + d_i))} \right) \left(\frac{V_{ds}}{2} - V_{ds}(V_{gs} - V_{th}(y)) \right)$$

Par ailleurs lorsque la tension du drain devient importante, la mobilité des porteurs diminue et leur vitesse atteint la valeur V_{sat} , le courant devient constant I_{dsat} soit :

$$I_{dsat} = \left(\frac{2Wq^2D\mu_0e(y)}{(e(y) + 2q^2D(d_d + d_i))} \right) (V_{gs} - V_{th}(y) - V_{sat}) \quad \text{II-39}$$

En égalisant les deux équations précédant de I_{dsat} et I_{ds} de on obtient la valeur de V_{sat} soit :

$$V_{dsat} = \frac{-b_2 + \sqrt{b_2^2 - 4b_1b_3}}{2b_1} \quad \text{II-40}$$

Avec :

$$A = \left(\frac{2Wq^2Dm_0e(y)a_1}{(e(y) + 2q^2D(d_d + d_i))} \right)$$

$$b_1 = (4A)^2 \left(1 + \frac{R_s + R_d}{E_1} \right) + (4A) \left(\frac{E_1 - 2E_c}{E_1 E_c} \right)$$

$$b_2 = (8A) (V_{gs} - V_{th}(y)) \left(\left(\frac{E_c - E_1}{E_1 E_c} \right) - L \right) - 16A^2 \left(\frac{R_s + R_d}{a_1 E_c} + \left(2 + \frac{R_s + 2R_d}{a_1 E_c} \right) (V_{gs} - V_{th}(y)) \right)$$

$$b_3 = 16A^2 \left(1 + \frac{R_s + 2R_d}{a_1 E_c} \right) (V_{gs} - V_{th}(y))^2 + 8AL$$

II-3. Effets limitatifs des performances d'un HEMT AlGaIn/GaN « l'effet thermique »

II-3-1. Modèle de mobilité en fonction de la température

Les performances et la fiabilité d'un transistor HEMT de puissance sont fortement influencées par la température. L'aspect thermique est en effet un point clef concernant la génération de puissance [27]. L'état thermique d'un composant résulte de la température ambiante et de l'auto-échauffement du transistor.

Les effets thermiques et l'auto-échauffement sont les causes de détérioration des performances des transistors HEMT a base d'Al_mGa_{1-m}N/GaN. Les conséquences les plus manifestes de cette détérioration des performances, sont : La réduction du courant drain et la mobilité.

La mobilité des électrons dans les matériaux semiconducteurs dépend fortement de la température et du champ électrique présent. Cette mobilité tend à diminuer lorsque la température augmente.

Lorsque la température augmente à partir d'une source extérieure ou en injectant plus de courant dans le transistor, l'excès d'énergie fournie au cristal fait que les vibrations du réseau cristallin gagneront en amplitude. Ces vibrations constituent un obstacle au libre parcours moyen des porteurs dans le canal du transistor et par conséquent on observera une diminution de la vitesse de saturation des électrons et de la mobilité [30] et par conséquent on observe une décroissance de la mobilité.

Modèle de Caughey-Thomas [28,29]

Le modèle de mobilité que nous utilisons en simulation est une formulation analytique proposée par Caughey et Thomas adaptée au carbure de silicium. Elle permet de décrire la variation de la mobilité en fonction de la concentration totale de dopants ionisés et de la température.

$$\mu_i(N, T) = \mu_{\max,i}(T_0) \frac{B_i(N) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_i}}{1 + B_i(N) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\alpha_i + \beta_i}} \quad \text{Où} \quad B_i(N) = \left[\frac{\mu_{\min,i} + \mu_{\max,i} \left(\frac{N_{g,i}}{N}\right)^{\gamma_i}}{\mu_{\max,i} - \mu_{\min,i}} \right]_{T=T_0} \quad \text{II-41}$$

α_i et β_i sont données par le tableau II-2.

Tableau II-1. Valeurs des paramètres du modèle [29]

Type de porteurs	$\mu_{\max,i} (cm^2V^{-1}S^{-1})$	$\mu_{\min,i} (cm^2V^{-1}S^{-1})$	$N_{g,i} (cm^{-3})$	γ_i	α_i	β_i
Electrons	1000	55	2×10^{17}	1.0	2.0	0.7
Trous	170	3	3×10^{17}	2.0	5.0	-

II-4. Conclusion

Dans ce chapitre nous menons une étude théorique détaillée sur le transistor à hétéro-structure HEMT AlGaIn/GaN tels que sa structure, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques électriques afin d'obtenir un modèle pour le simuler, pour ce but nous avons établi la relation $n_s(V_g)$, en intégrant l'équation de Poisson, puis on a résolu l'équation de Schrödinger dans l'approximation de la masse effective en calculant la densité d'électron de chaque sous-bande d'énergie du gaz bidimensionnel d'électron en tenant compte des polarisations spontanées et piézoélectriques. Ensuite, nous avons établi la relation de courant I_{ds} dans le régime de fort inversion, et nous avons aussi établi la relation de V_{dsat} .

Chapitre III : Présentation du logiciel et résultat de simulation

III-1. Introduction

Dans le but de simuler le fonctionnement des transistors HEMTs à base d'hétérostructures, nous avons développé un logiciel écrit en C++ fonctionnant sous Windows constitué d'une interface conviviale et d'utilisation facile. En injectant les paramètres de données physiques et technologiques du transistor dans le logiciel, les résultats des caractéristiques qu'on veut simuler sont obtenus sous formes de tableaux de valeurs numériques facilement exploitables pour visualisation graphique et traçage de courbes.

Le logiciel développé permet de calculer la densité électronique dans le canal «n_s», la tension de seuil, les caractéristiques courant-tension, la mobilité et d'autres caractéristiques.

Dans ce chapitre, et dans un premier volet, nous avons présenté logiciel. Dans la deuxième partie du chapitre, en incluant les effets de la polarisation spontanée et piézoélectrique, nous avons simulé la dépendance de la concentration du gaz d'électrons bidimensionnel en fonction de la tension de grille en variant plusieurs paramètres du transistor comme l'épaisseur de la couche AlGa_N, la fraction molaire de l'aluminium et le dopage. La dépendance de la tension de seuil vis-à-vis du dopage et l'épaisseur de la couche AlGa_N est aussi explorée. Les caractéristiques courant-tension, la mobilité en fonction de la température ont été inclus.

III-2. Présentation du logiciel

III-2-1. Introduction du logiciel

Le logiciel que nous avons développé est un programme de simulation et de visualisation en C++, les figure III-1 et figure III-2 représente la fenêtre principale du logiciel.

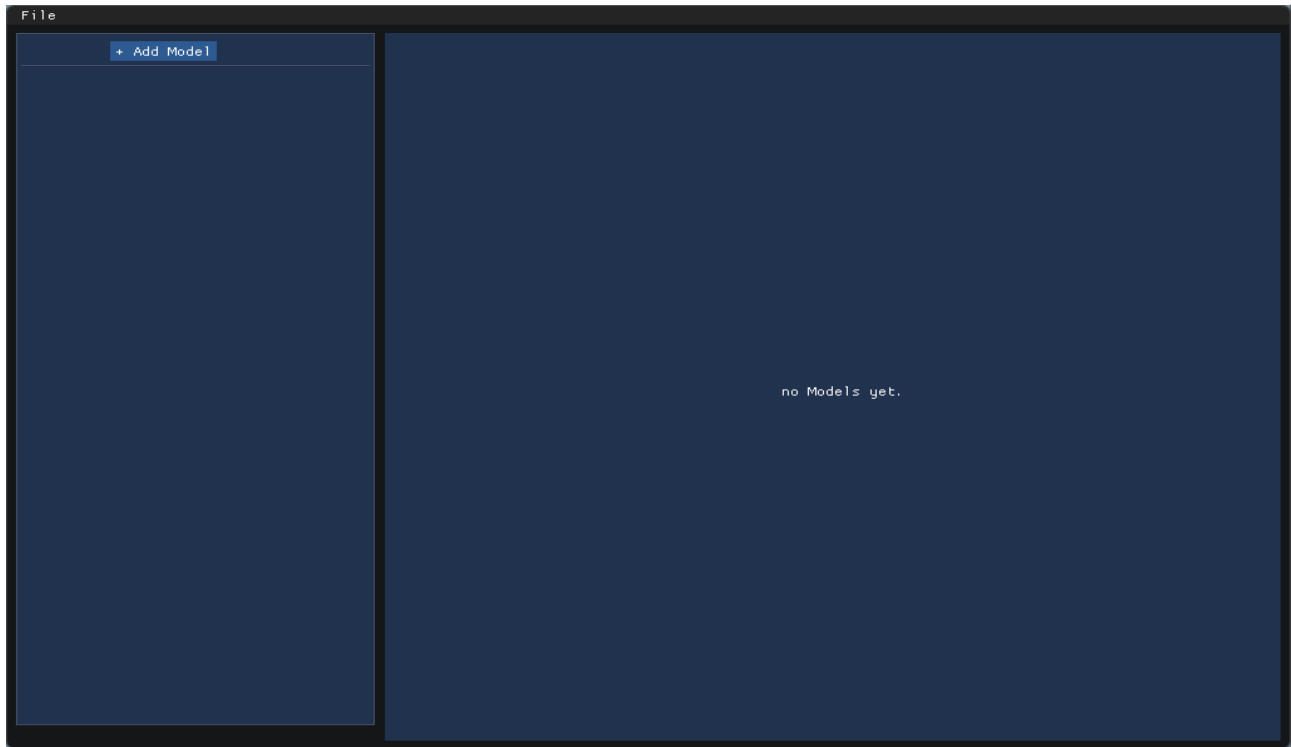


Figure III-1. Fenêtre principale du logiciel sans structure configuré

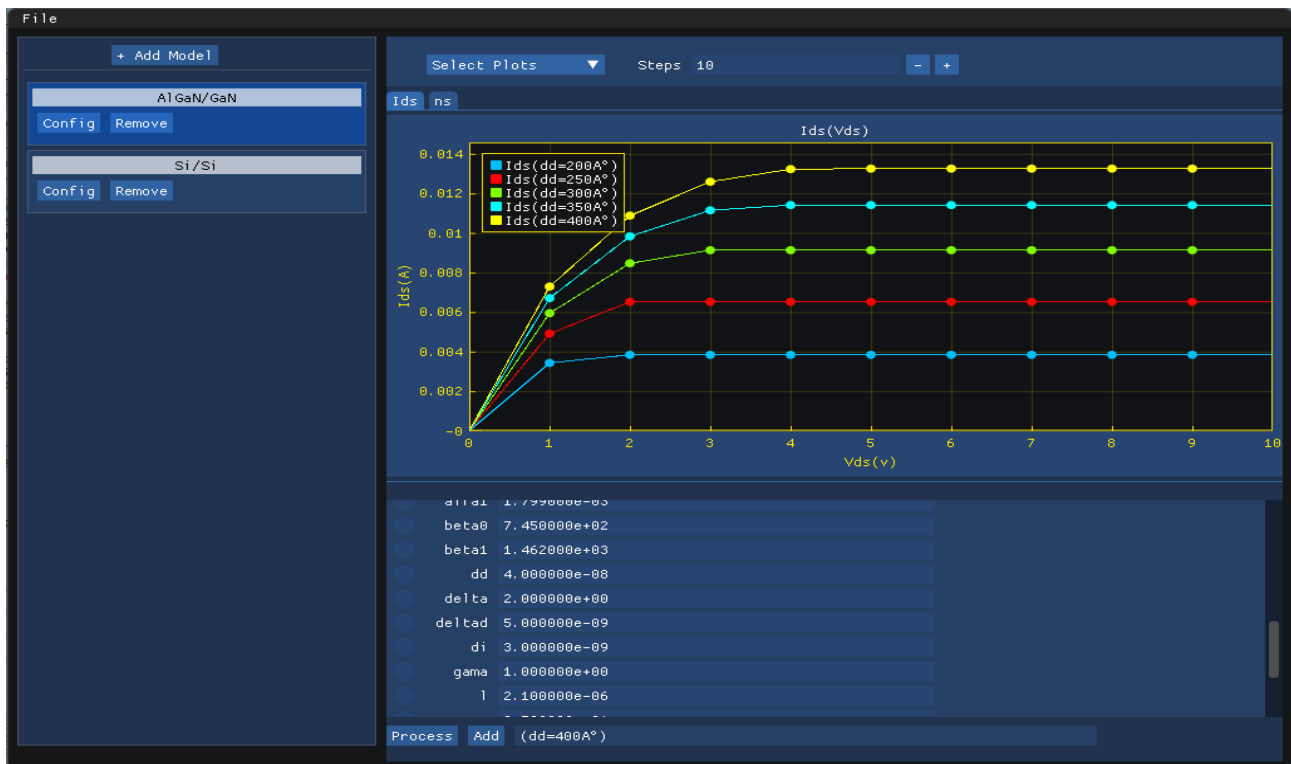


Figure III-2. Fenêtre principale du logiciel avec 2 model configurer

III-2-2. Utilisation du logiciel

L'utilisation de ce logiciel commence par l'ajout d'une structure puis la configurer afin qu'elle reflète les phénomènes physiques qu'on s'attend à simuler.

III-2-2-1. Ajouter une structure

Pour ajouter une structure il suffit de cliquer sur le bouton en haut à gauche « Add Model » montré sur la figure III-3 ci-dessous puis entrer le nom du modèle puis valider.

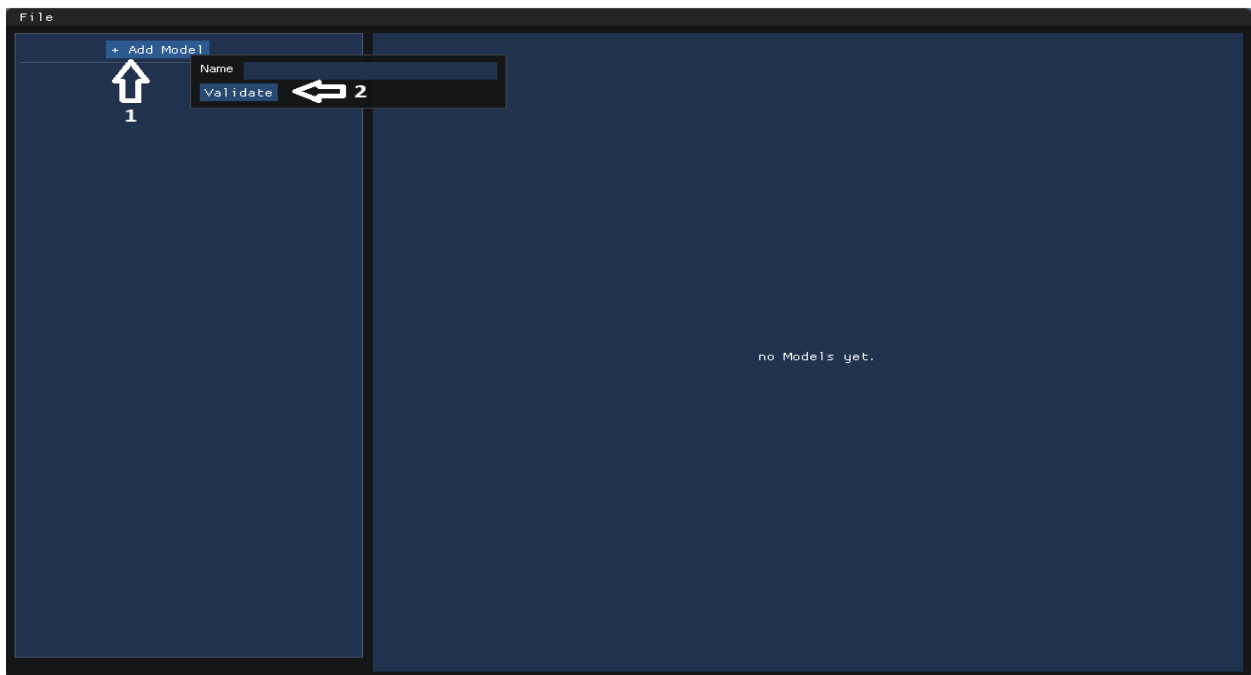


Figure III-3. Menu « Add Model »

- 1 : Ajouter une structure
- 2 : Valider

- Après l'ajout d'un modèle de nouveaux éléments vont s'afficher sur la fenêtre principale comme le montre la figure III-4, ses éléments correspondent au model sélectionner.

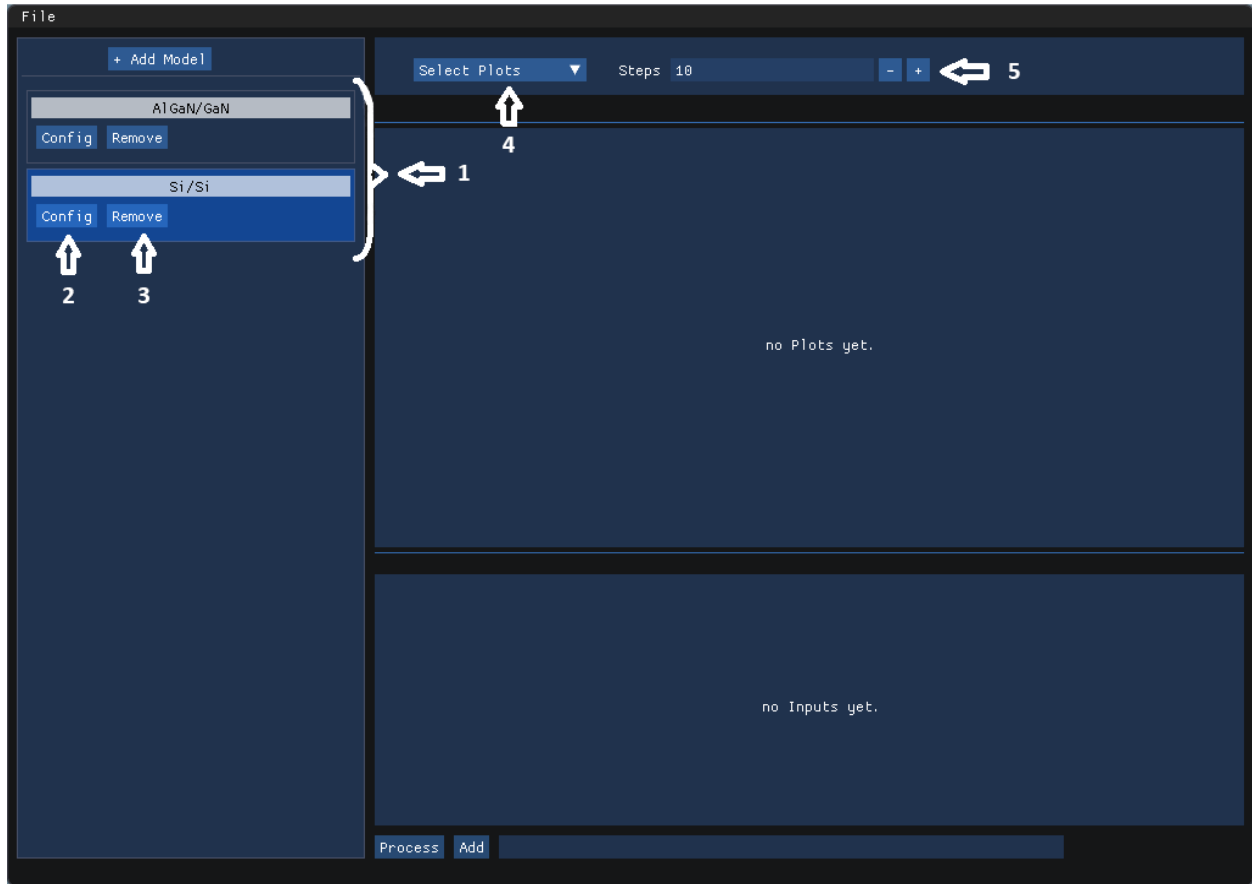


Figure III-4. Menu principal avec des structures ajoutées

- 1 : List des strcutures
- 2 : configurer la structure
- 3 : supprimer la structure
- 4 : sélectionner les variables à graphe
- 5 : préciser le nombre d'itérations lors des calculs

III-1-2-2. Configurer une structure

Pour configurer une structure tout d'abord il suffit de cliquer sur le bouton « config » une fenêtre s'affiche comme le montre la figure III-5 ci-dessous.

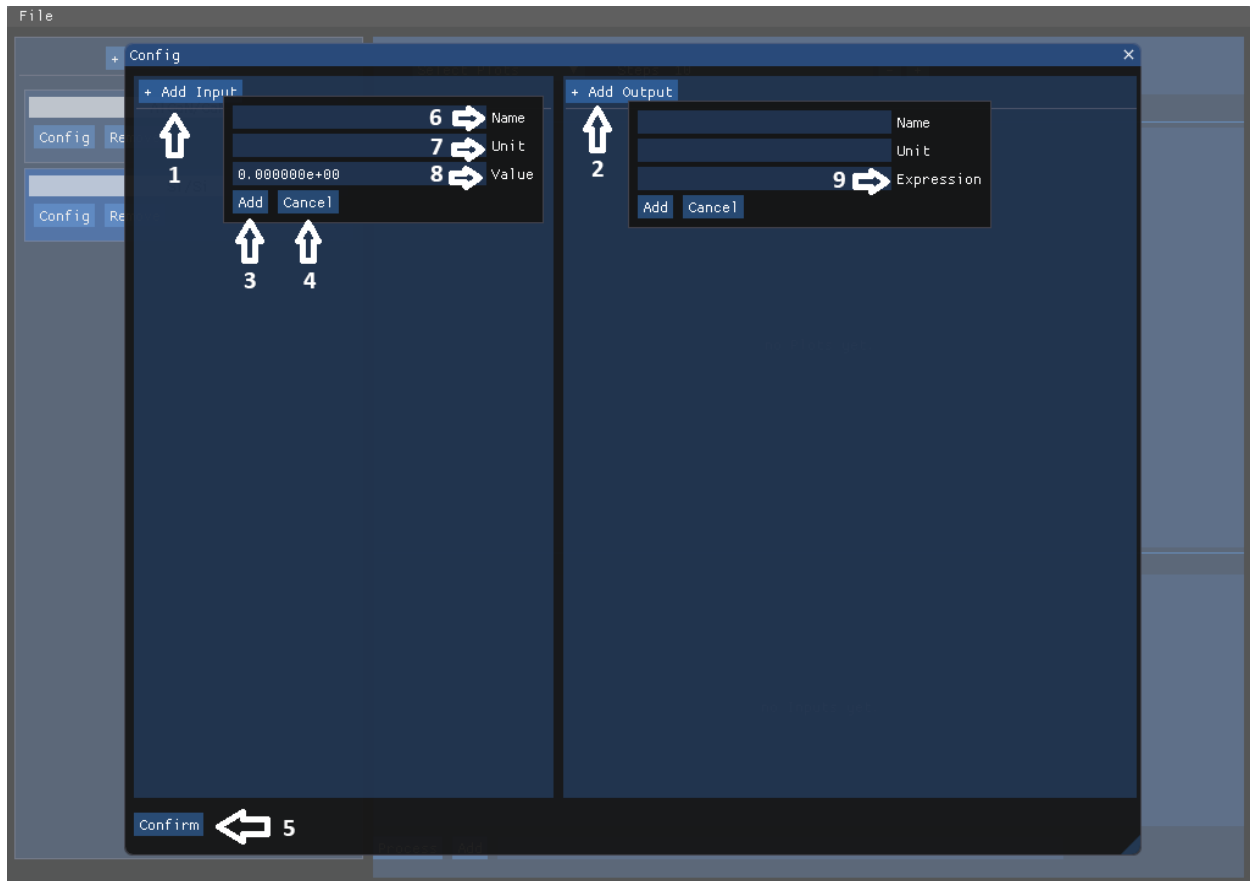


Figure III-5. Menu « Config »

- 1 : Ajouter une variable entre
- 2 : Ajouter une variable sortie
- 3 : Ajouter la variable
- 4 : annuler
- 5 : confirmer les actions
- 6 : nommé la variable
- 7 : unité de la variable

- 8 : valeur de la variable d'entrée
- 9 : expression mathématique de la variable de sortie

➤ Cette fenêtre se divise en deux parties la partie gauche permet d'ajouter les variables d'entrée et la partie droite permet d'ajouter les variables de sorties, pour ajouter une variable d'entrée ou une variable de sortie il suffit de cliquer sur « Add Input » ou « Add Output » respectivement, la figure III-6 montre la configuration du modèle de l'AlGaIn/GaN utilisé qui a été dérivé des équations du chapitre II.

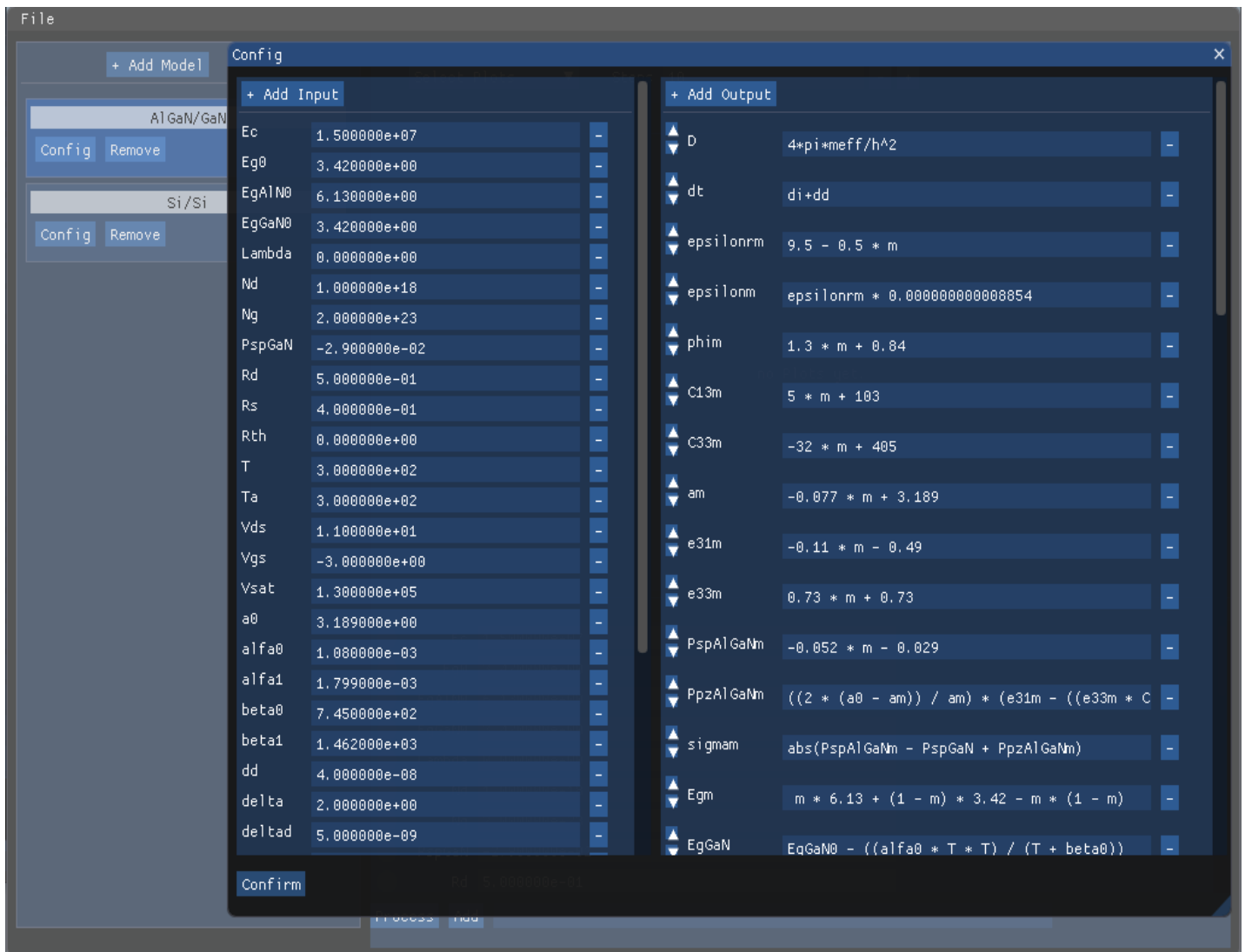


Figure III-6. Configuration du model de l'AlGaIn/GaN.

Definition :

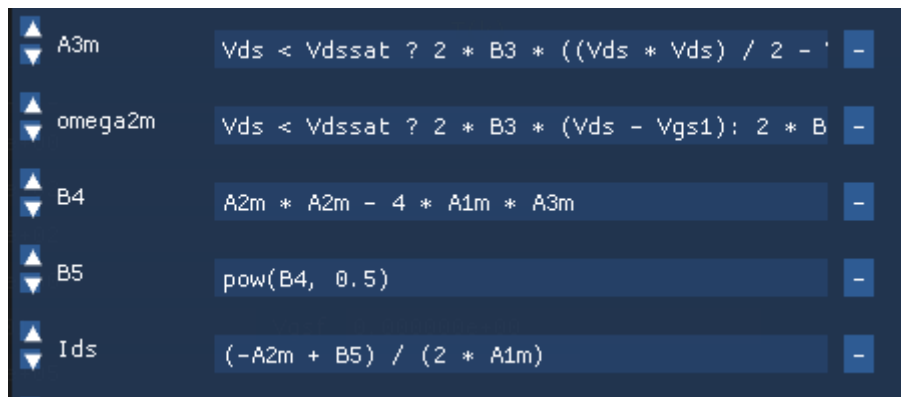
Les variables d'entre : sont les variables qui peuvent être utiliser pour littérateur pour obtenir les valeurs de sorties qu'on suette visualiser.

Les variables de sorties : sont les variables qui prene des expressions mathématiques qui sont dérive pour chaque model.

Syntax des expression mathématique :

La syntaxe des expressions mathématique offert permet une grande liberté et facilite d'utilisation puisque de nombreux operateur et fonction mathématique sont intégrés dans le simulateur.

- Operateur mathématique (+, -, *, /, ^).
- Les Fonctions (sqrt,pow,sin,cos,exp,log).
- Les opérateurs d'égalité (==,<,>, !=)
- Les operateur logique (and,or,not).
- Les parenthèses peuvent être utiliser pour ordonner les opérations.
- L'opérateur ternaire (condition ? expression1 : expression2) peut être utiliser conjointement avec les opérateurs d'égalité et les operateur logiques pour coupler une expression a différentes fonctions selon une ou plusieurs conditions.



```
A3m      Vds < Vdssat ? 2 * B3 * ((Vds * Vds) / 2 - ' -
omega2m  Vds < Vdssat ? 2 * B3 * (Vds - Vgs1) : 2 * B -
B4       A2m * A2m - 4 * A1m * A3m -
B5       pow(B4, 0.5) -
Ids      (-A2m + B5) / (2 * A1m) -
```

Figure III-7. Exemple de la syntaxe des expressions mathématiques

III-2-2-3. Simuler une structure

Pour commencer la visualisation des courbes, il suffit de sélectionner les variables que l'on souhaite visualiser, on clique sur le bouton « Select Plots », un menu déroulant s'affiche qui nous permet de les sélectionner, puis pour sélectionner la variable qui va être utilisée comme itérateur, après l'avoir identifiée dans le menu des variables d'entrée, cliquer sur le bouton radio qui est sur sa gauche, enfin pour exécuter, cliquer sur le bouton « Process », les différents outils mentionnés sont montrés sur la figure III-8 ci-dessous.

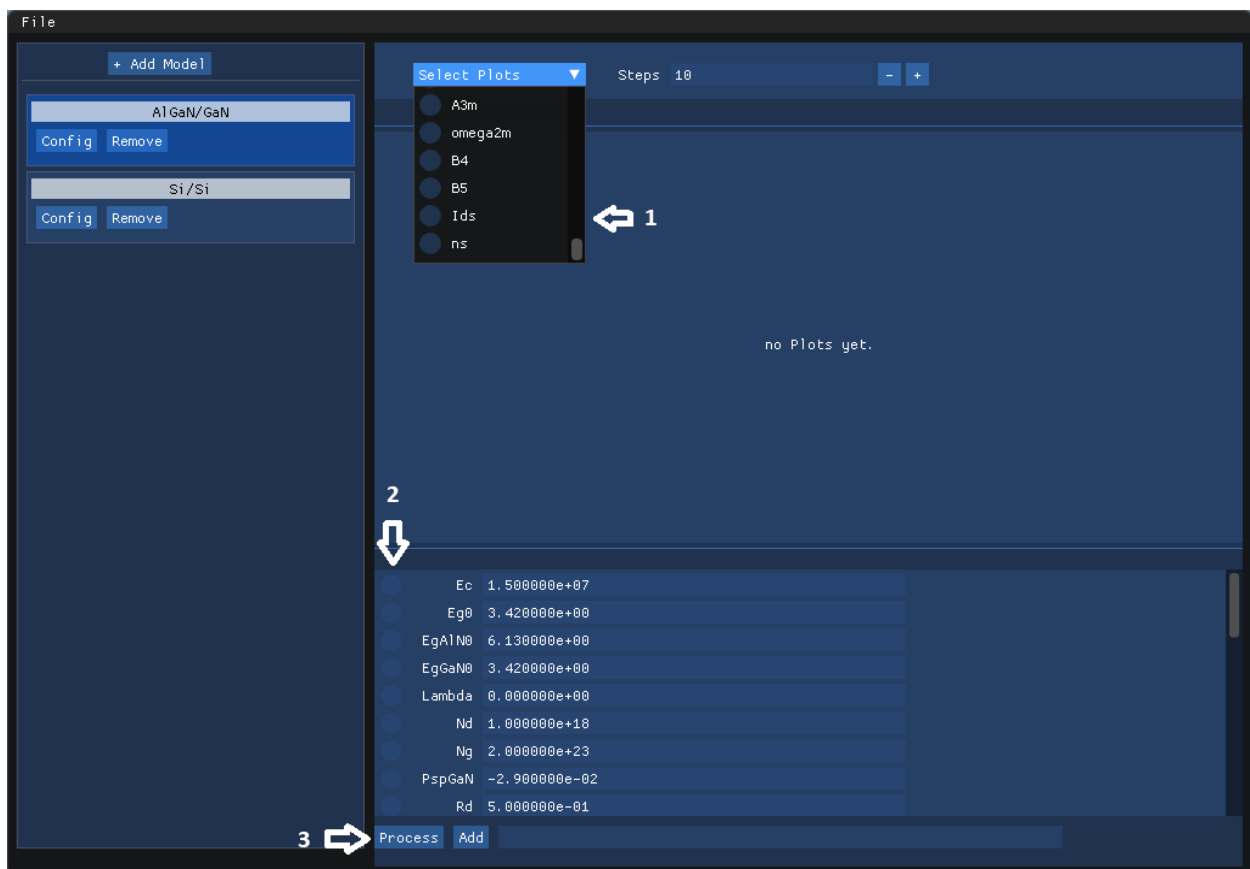


Figure III-8. Menu principal avec un modèle préconfiguré en sélection

- 1 : plusieurs variables à grapher peuvent être sélectionnées en même temps comme le montre la figure III-9.

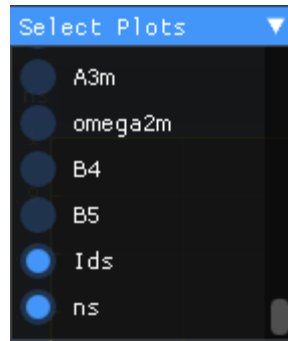


Figure III-9. Menu « Select Plots »

- Le graph à visualiser peut-être sélectionner en utilisant les onglets comme le montre figure III-10.

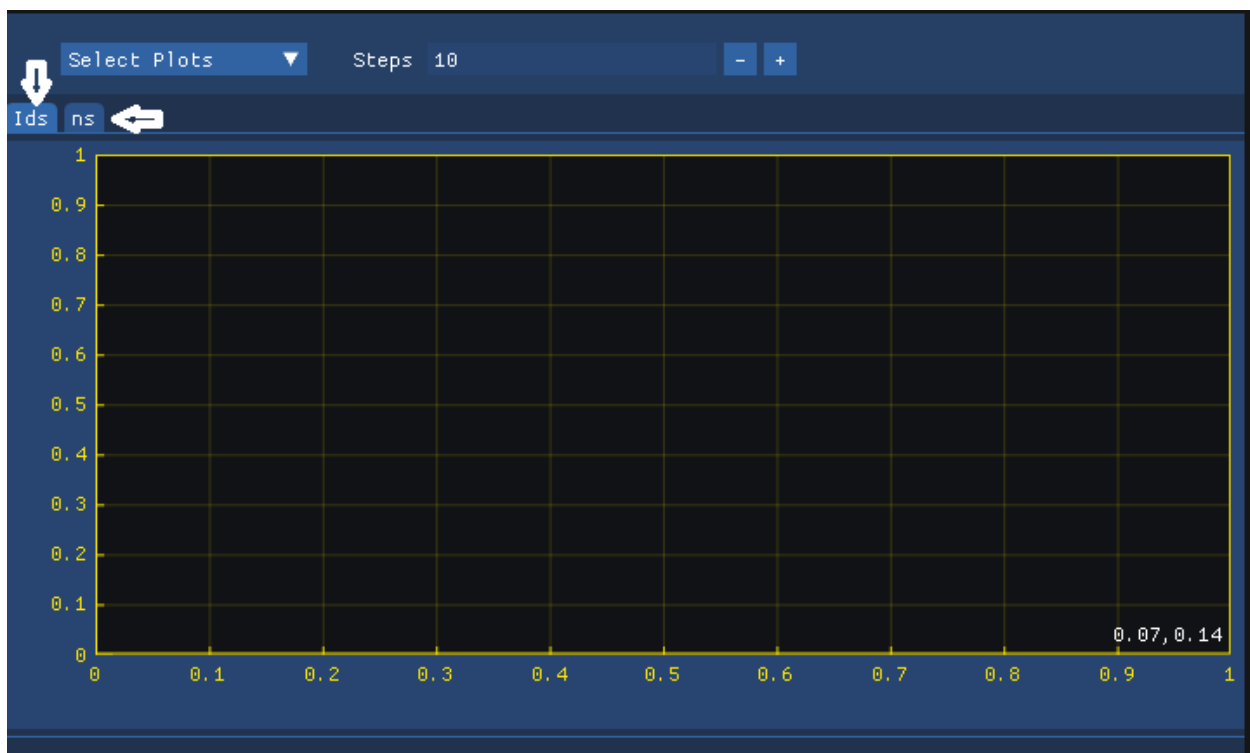


Figure III-10. Graph de visualisation avec le plot d' I_{ds} Sélectionner

- 2 : sélectionner la variable d'entre changeant comme le montre figure III-11.

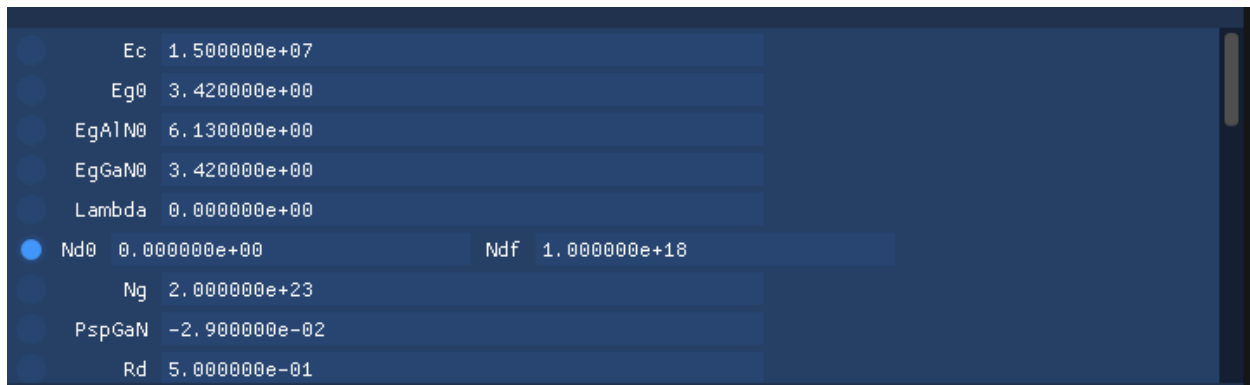


Figure III-11. Sous Menu des variables d'entre dans le menu principal

- 3 : Ajouter la variable
 - 4 : annuler
 - 5 : confirmer les actions
- Pour visualiser plusieurs graphs sur le même diagramme il suffit d'exécuter en utilisant le bouton « Add » au lieu du bouton « Process » comme le montre la figure III-12.



Figure III-12. Menu principal après exécution

- 1 : Exécuter.
- 2 : Visualiser le prochain trace après exécution dans le même diagramme.
- 3 : dans le cas de traçage de plusieurs graphes dans le même diagramme le préfix de la légende peut être écrit ici.
- 4 : légende

- 5 : qu'on la souris est sur le diagramme, le point en dessous en (x,y) est afficher ici.

III-3. Résultat de la simulation

Cette partie est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats de simulation obtenue en utilisons le logiciel que nous avons développé en tenant compte des différents effets sue les caractéristiques du dispositif.

III-3-1. Etude de la concentration de n_s en fonction de V_{gs}

a) $d_i=3\text{nm}$, $m=0.20$ et d_a varie de 10 nm à 35 nm :

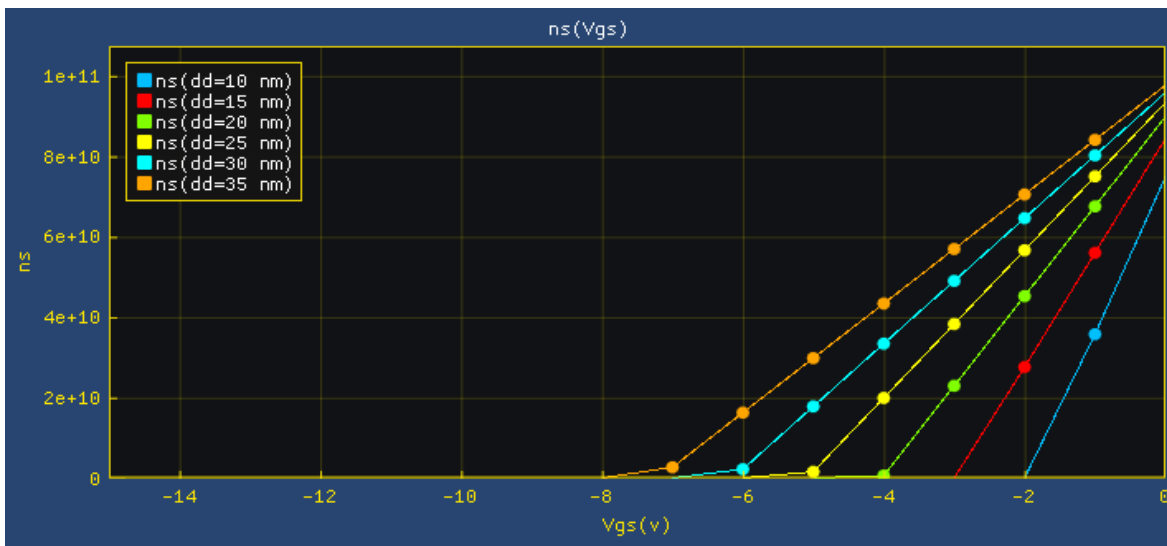


Figure III-13-a. N_s en fonction de V_{gs} pour différent valeur de d_a et $m=0.2$

b) $d_i=3\text{nm}$, $m=0.25$ et d_d varie de 10 nm à 35 nm :

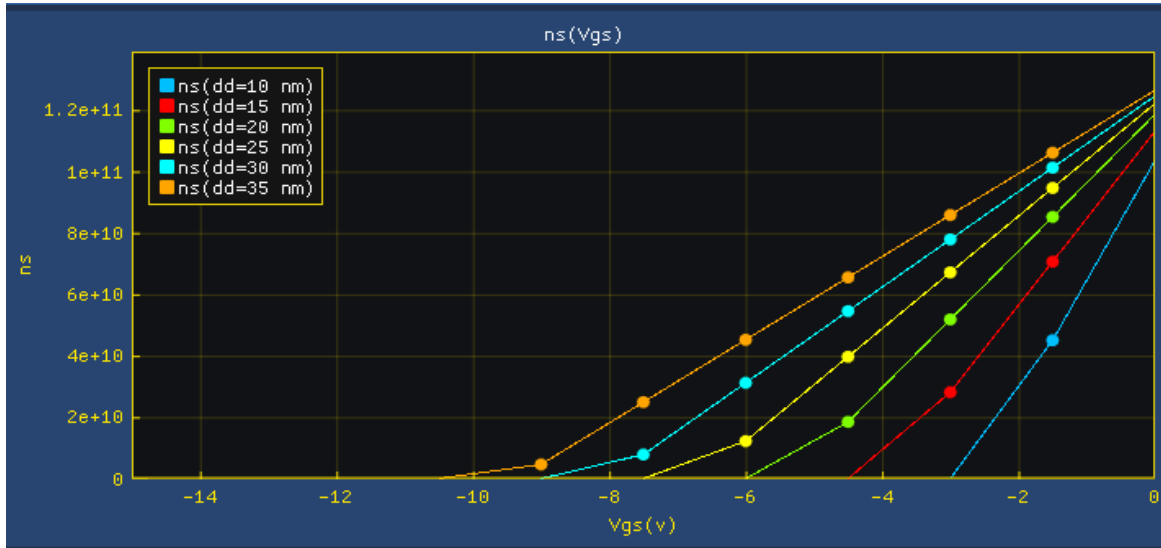


Figure III-13-b. N_s en fonction de V_{gs} pour différent valeur de dd et $m=0.25$

On remarque que la densité n_s devient de plus en plus grande lorsque l'épaisseur dd augment et que la tension de seuil du transistor se déplace vers des valeurs négatives.

Les grandes valeurs de n_s preuve être attribue à la présence des charges induite par la polarisation totale dans l'interface de l'heterostructure, la pente des courbe $n_s(V_{gs})$ décroît quand l'épaisseur de la couche AlGaN d_d augment, ceci est dû au faut que la capacité de la grille décroît quand en augment d_d .

III-2-2. Etude de la concentration de n_s en fonction de l'épaisseur d_a

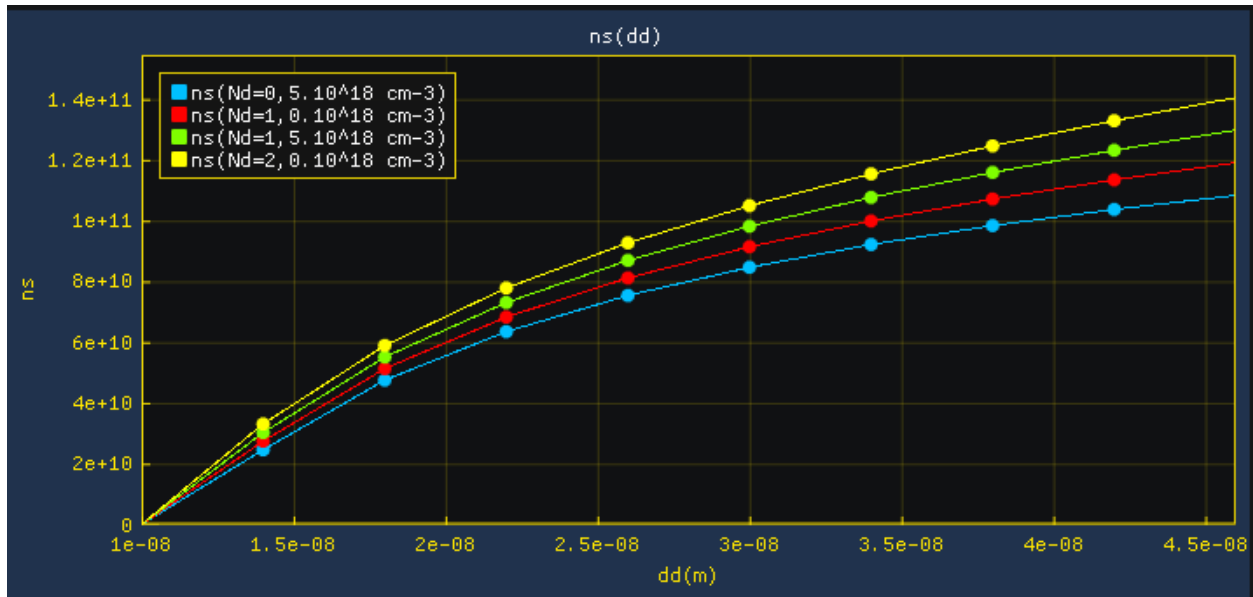


Figure III-14. N_s en fonction de d_a pour différent valeur de N_d

On observe que lorsque l'épaisseur de la couche AlGaIn et la concentration du dopant N_d augmentent, la densité n_s du gaz d'électrons bidimensionnel augmente à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres qui se confient dans le puits de potentiel et forment le gaz d'électrons.

III-2-3. Etude de la tension de seuil V_{th} en fonction de la concentration n_s

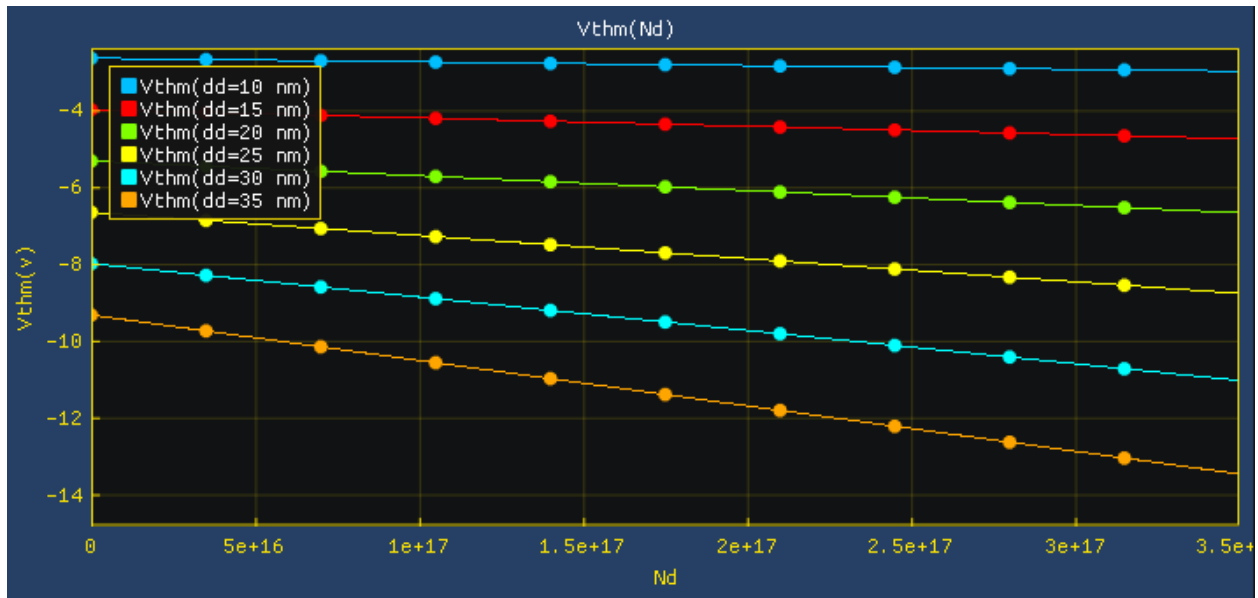


Figure III-15. V_{th} en fonction de N_d pour différent valeur de dd

On observe que la tension de seuil augmente avec la valeur absolue lorsque l'on augmente la concentration des atomes dopants et l'épaisseur de la couche $Al_mGa_{(1-m)}N$ dans le transistor, la tension de seuil est dominée par la densité de charge induite par les polarisations internes et non pas par la concentration des atomes donneurs.

III-2-4. Etude de la tension de seuil V_{th} en fonction de l'épaisseur d_d

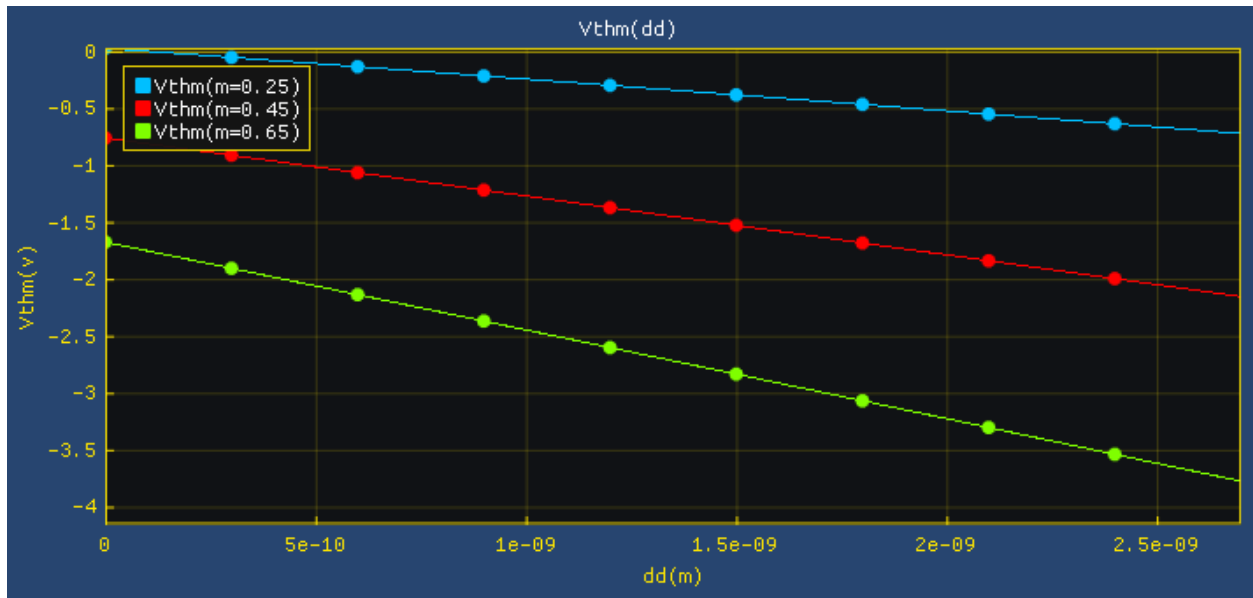


Figure III-16. Tension de seuil en fonction de l'épaisseur d'AlGaN dd pour plusieurs concentration d'aluminium m

On observe que la tension de seuil V_{th} va pour des valeur plus négative pour des épaisseur d_d plus important, ce résultat est expliquer par l'augmentation du potentiel de de la région polariser ou ce potentiel égal $\frac{\sigma_{int}}{\epsilon} d$ la relation de ce potentiel avec V_{th} est montre dans l'équation II-15-b.

III-2-5. Etude de la tension de seuil V_{th} en fonction de la concentration d'aluminium

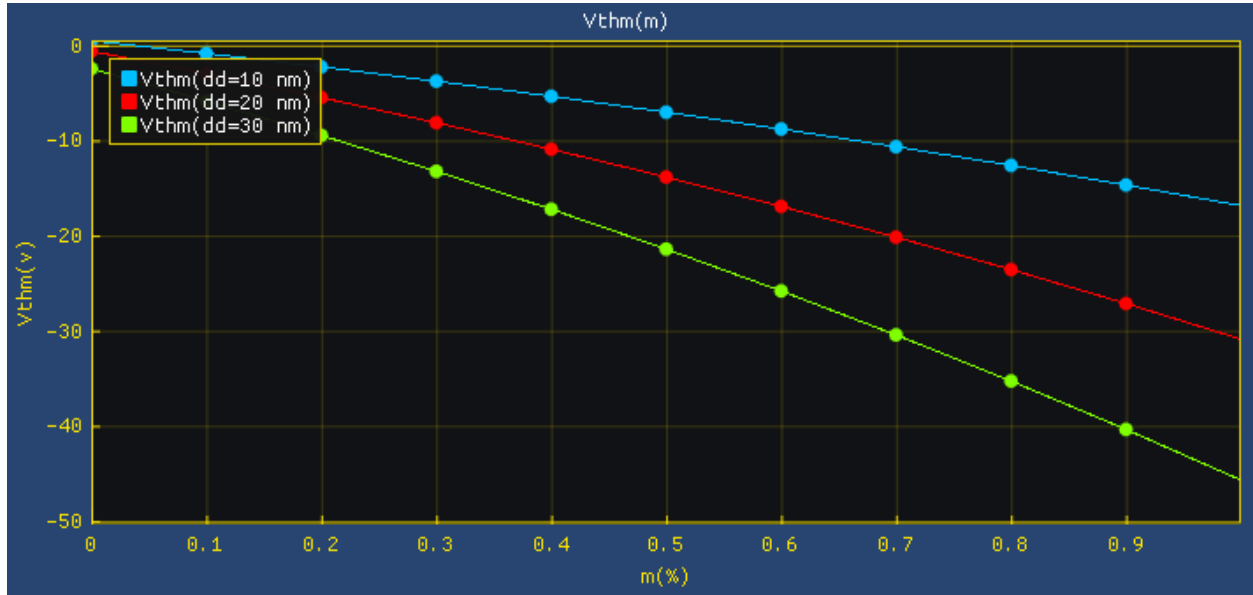


Figure III-17. Tension de seuil en fonction de la concentration d'aluminium m pour plusieurs épaisseur d'AlGaN d_d

On remarque que l'augmentation de la polarisation électrique lie à l'augmentation du taux d'aluminium conduit à la décroissance de la tension de seuil V_{th} , ce résultat est en raccord avec le résultat précédent qui montre la relation de V_{th} à l'épaisseur d_d .

III-2-6. Etude du courant drain source I_{ds} en fonction de la tension V_{ds}

Les figures III-18-a et III-18-b montrent les caractéristiques courant-tension du transistor étudié pour deux valeurs de taux d'aluminium.

a) $m=0.25$, $d_d= 50\text{nm}$, $N_d=10^{18}$:

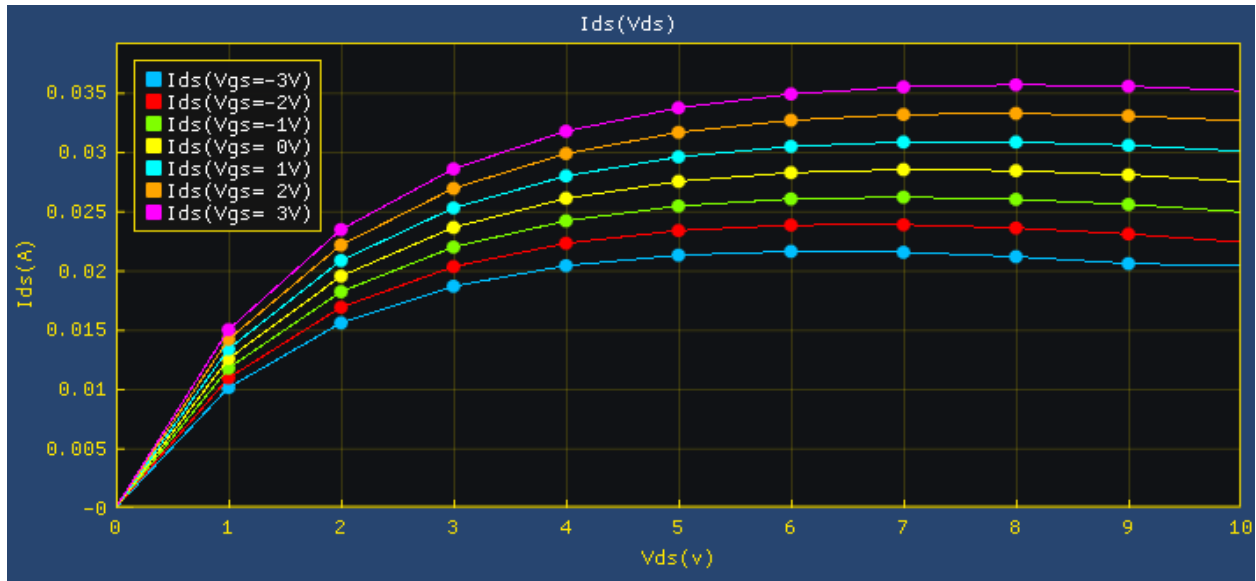


Figure III-18-a. Caractéristique courant tension pour différentes V_{gs} et $m=0.25$

b) $m=0.65$, $d_d= 50\text{nm}$, $N_d=10^{18}$:

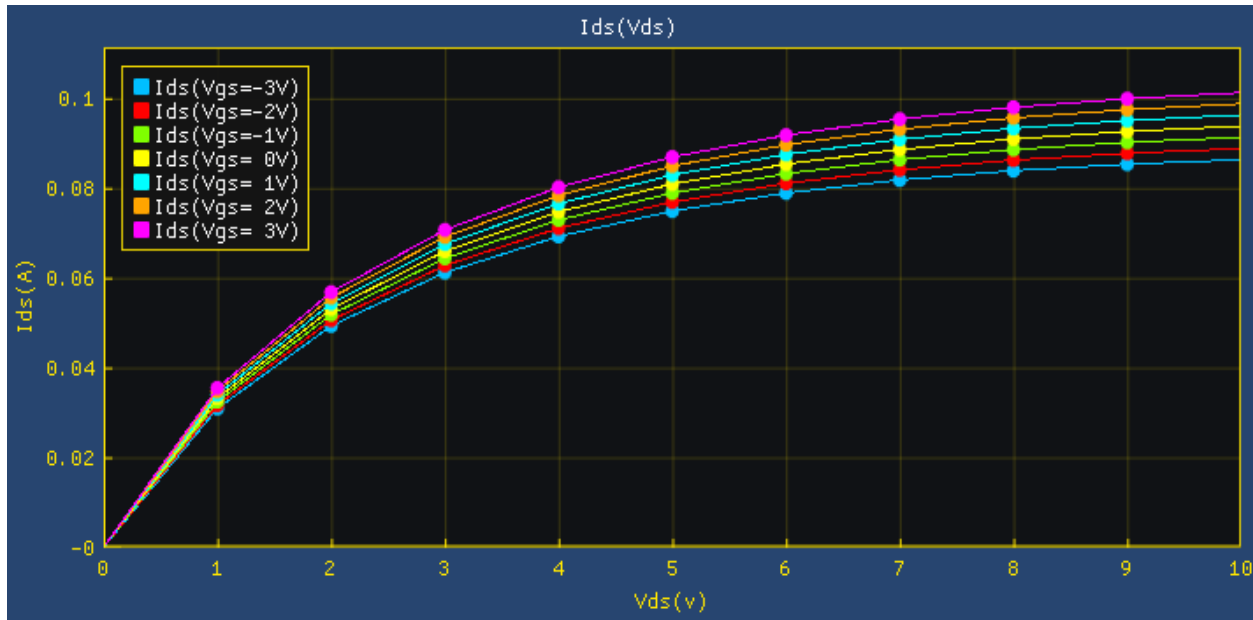


Figure III-18-b. caractéristique courant tension pour différentes V_{gs} et $m=0.65$

La structure exhibe un courant élevé à cause des bonnes propriétés de transport et le meilleur confinement des charges dans les structures à base d'AlGaIn.

On remarque que le taux d'aluminium a un effet positif sur le courant de saturation.

III-2-7. Dépendance du courant drain source I_{ds} en fonction de la température

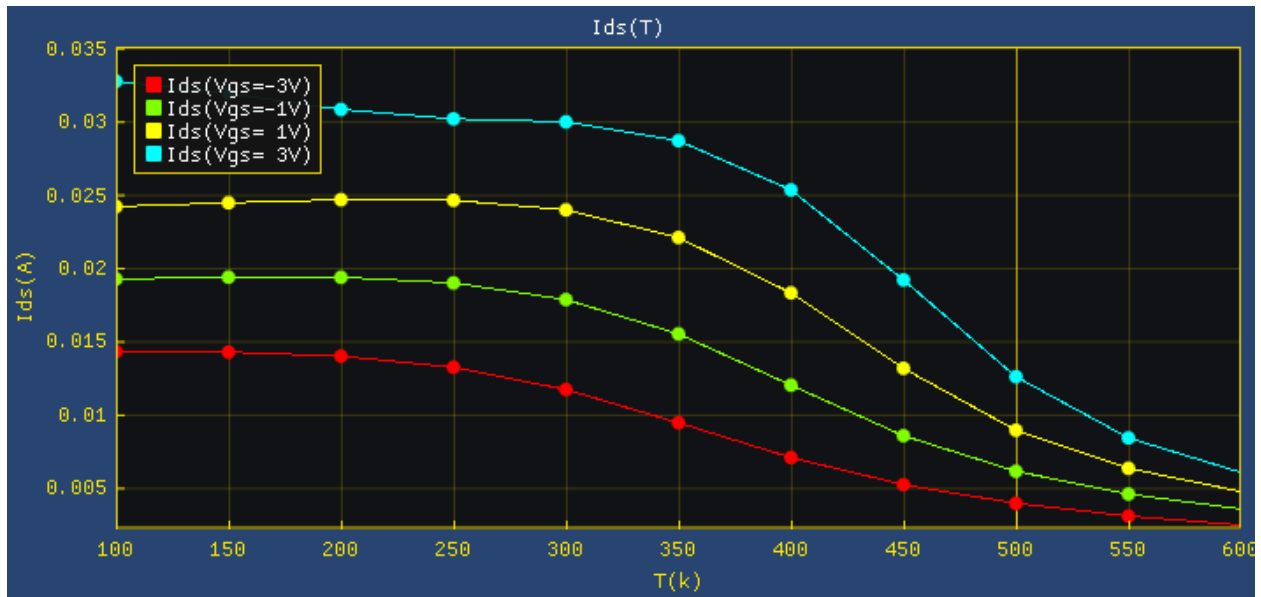


Figure III-19. Dépendance du courant drain source I_{ds} en fonction de la température pour différent valeur de V_{gs}

On observe une diminution rapide du courant lorsque la température dépasse $300K^{\circ}$ et qui est la température ambiante.

III-2-8. Dépendance de la mobilité des porteurs en fonction de K°

La figure III-2.8 est obtenue à partir de la relation II-32, et représente la dépendance de la mobilité en fonction de la température du canal.

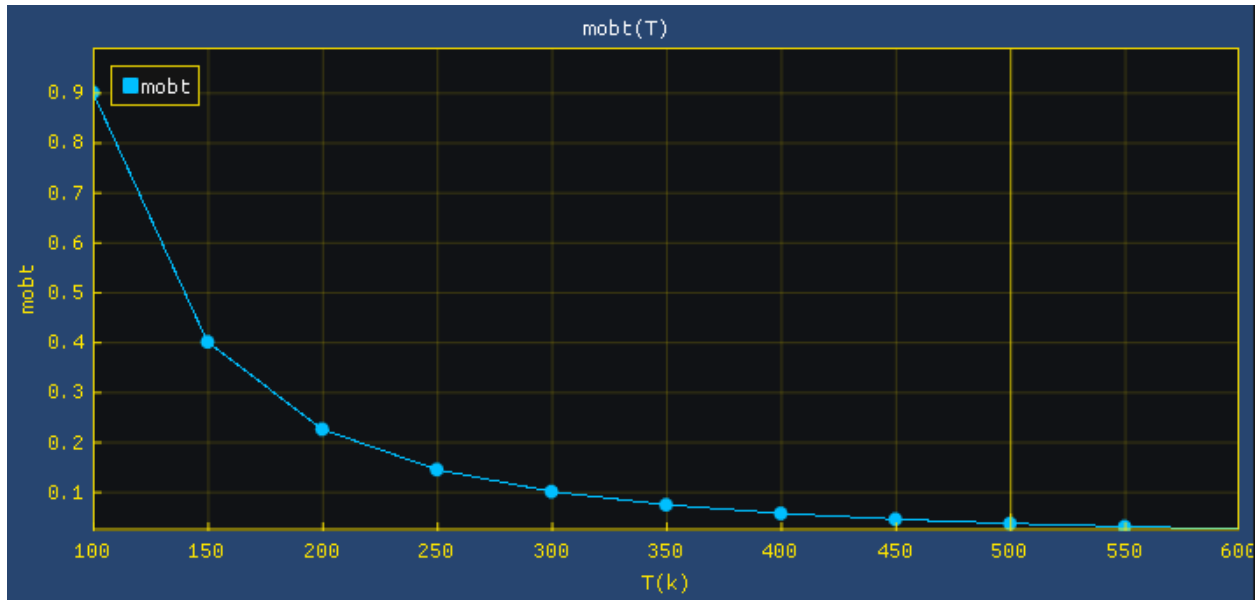


Figure III-20. Dépendance de la mobilité en fonction de la température du canal

On remarque que lorsque la température augmente à partir d'une source extérieure ou en injectant plus de courant dans le transistor, l'excès d'énergie fournie au cristal fait que les vibrations du réseau cristallin gagneront en amplitude. Ces vibrations constituent un obstacle au libre parcours moyen des porteurs dans le canal du transistor et par conséquent on observera une diminution de la vitesse de saturation des électrons et de la mobilité et par conséquent on observe une décroissance de la mobilité

On remarque que l'augmentation de la température du canal diminue exponentiellement la mobilité des porteurs qui explique le phénomène aperçue dans la figure III-19 est qui est la diminution du rapide du courent lorsque la température atteint un certain point.

III-3. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un logiciel écrit en C++ fonctionnant sous Windows constitué d'une interface conviviale et d'utilisation facile qui permet de calculer la densité électronique dans le canal « n_s », la tension de seuil, les caractéristiques courant-tension la mobilité et d'autres caractéristiques.

Dans la deuxième partie, en incluant les effets de la polarisation spontanée et piézoélectrique, nous avons simulé la dépendance de la concentration du gaz d'électrons bidimensionnel en fonction de la tension de grille en variant plusieurs paramètres du transistor comme l'épaisseur de la couche AlGa_N, la fraction molaire de l'aluminium et le dopage. La dépendance de la tension de seuil vis-à-vis du dopage et l'épaisseur de la couche AlGa_N est aussi explorée. Les caractéristiques courant-tension, la mobilité en fonction de la température ont été inclus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire avait pour but la modélisation électrique des transistors HEMTs à base d'AlGaN/GaN. L'objectif visé était de concevoir un logiciel TCAD pour simuler un tel dispositif.

Dans le premier chapitre on a parlé sur les généralités du nitrure de gallium, on a présenté les propriétés structurales et physiques ainsi que l'effet de polarisation spontanées et piézoélectrique dans le GaN.

Dans le deuxième chapitre le calcul de la densité d'électron n_s et le courant drain du transistor HEMT a base AlGaN/GaN ont été abordés.

Enfin, Dans le dernier chapitre on a utilisé le logiciel développé pour simuler les propriétés électriques du HEMTs AlGaN/GaN comme la densité d'électron n_s , le courant drain et la mobilité.

Bibliographie

- [1] S. O’Leary, B. Foutz, M. Shur, and L. Eastman, "The sensitivity of the electron transport within bulk wurtzite indium nitride to variations in the crystal temperature, the doping concentration, and the non-parabolicity coefficient: an updated Monte Carlo analysis," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 21, pp. 218-230, 2010.
- [2] N. Grandjean « Composants optiques à base de GaN », CNRS-CRHEA, Sophia Antipolis, 2002.
- [3] H. Foell « Semiconductor Technology and Nano Electronics », U.Kiel, 2009.
- [4] O. Bonnaud « Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs », IETR, 2003.
- [5] Warren C. Johnson, James B. Parsons, and M. C. Crew, *J. Phys. Chem.* 36, 2651 (1932).
- [6] S.N. Mohammad, Arnel A. Salvador, and H. Morkoc « Emerging gallium nitride based Devices », *Journal paper, Res. Lab., Illinois Univ., Urbana, IL, USA. Vol. 83, n°10 (Oct. 1995)*, p. 1306-1355.
- [7] J. I. Pankove, E. A. Miller, and J. E. Berkeyhe, « GaN electroluminescent diodes » *RCA Review*, 32, 383, (1971).
- [8] R. Dingle, D. D. Sell, S. E. Stokowski, M. Ilegems, Absorption, Reflectance, and Luminescence of GaN Epitaxial Layers, *Phys. Rev. B*, 4, 1211 (1971).
- [9] J. I. Pankove, E. A. Miller and J. E. Berkeyheiser, GaN blue light-emitting diodes *Journal of Luminescence*, 5, 84, (1972).
- [10] S.J. Pearton, F. Ren, A.P. Zhang and K.P. Lee « Fabrication and performance of GaN electronic devices », *Mat. Sci. Eng. R*, Vol. 30 (2000), p. 55-212.
- [11] J. Y. Duboz « GaN as seen by the industry », *Acad. Sci. Paris*, t. 1, Série IV (2000), p. 71-80.
- [12] Frentrup, Martin & Lee, Lok Yi & Sahonta, Suman-Lata & Kappers, Menno & Massabuau, F. & Gupta, Priti & Oliver, R. & Humphreys, Colin & Wallis, David. (2017). X-ray diffraction

analysis of cubic zincblende III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 50. 433002. 10.1088/1361-6463/aa865e.

[13] Park, Sh & Chuang, Shun-Lien. (2000). Comparison of zinc-blende and wurtzite GaN semiconductors with spontaneous polarization and piezoelectric field effects. *Journal of Applied Physics*. 87. 353 - 364. 10.1063/1.371915.

[15] K. Kim, R. L. Lambrecht and B. Segall « Elastic constants and related properties of tetrahedrally bonded BN, AlN, GaN and InN », *Phys. Rev. B*, Vol. 53 (1996), p. 1631016326.

[14] Kaplar R, Allerman AA, Armstrong A, Wierer JJ, Fischer AJ, Baca AG, Neely JC. Ultra-Wide-Bandgap Semiconductors for Power Electronics. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); 2015 Jul 1.

[16] S. Krukowski, M. Leszczynski and S. Porowski « Thermal properties of the group III Nitrides », publication INSPEC, Datareview series n°23 (1998), p. 21-28.

[17] S. Porowski and I. Grzegory « Thermodynamical properties of III–V nitrides and crystal growth of GaN at high N₂ pressure », *J. Cryst. Growth*, 1-2, Vol. 178 (1997), p. 174-188.

[18] MODFET. (2013, juillet 9). Wikipédia, l'encyclopédie libre. Page consultée le 13:14, juillet 9, 2013 à partir de <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=MODFET&oldid=94817036>

[19] N. Gao et al., "Comparison of AlGa_N/Ga_N HEMTs grown and fabricated on sapphire substrate with AlN and GaN nucleation layers," 2017 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), Beijing, 2017, pp. 195-199, doi: 10.1109/IFWS.2017.8246009.

[20] Ranjan, Rahul & Mistri, Raj Kumar. (2017). AlGa_N/Ga_N HEMT on SiC-substrate Using AlNspacer & Nucleation Layer For Improvement Over- Pinch-Off, Saturation & Breakdown Characteristics. 4. 22-28. 10.20247/IJARTET.2017.0405004.

[21] Dragica Vasileska (2011), "Coulomb Scattering," <https://nanohub.org/resources/11642>.

[22] Jia, Shuo & Dikme, Yilmaz & Wang, Deliang & Chen, K.J. & Lau, Kei & Heuken, Michael. (2005). AlGa_N-Ga_N HEMTs on patterned silicon (111) substrate. *Electron Device Letters, IEEE*. 26. 130 - 132. 10.1109/LED.2004.842647.

- [23] Rashmi, A.Kranti, S.Haldar, R.s.Gupta, “An accurate charge control model for spataneous and piezoelectric polarization dependent two-dimensional electon gas sheet charge density of lattice-mismatched AlGa_N/Ga_N HEMTs ”.solid state electronics 46 (2002).621-630.
- [24] P.Agnès,“Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique, en vue de L’obtention d’émetteur bleus, thèse doctorat, INSA Lyon, 1999.
- [25] H. Mathieu, “physique des semi-conducteurs et des composants électroniques”. Edition Masson, France 1998.
- [26] Lardeau-Falcy, Aurélien. (2018). Dopage de couches de GaN sur substrat silicium par implantation ionique.
- [27] C. Lagarde, « Modélisation de transistor de puissance en technologie GaN : conception d’un amplificateur de type doherly pour les émetteurs à puissance adaptative ». Thèse de doctorat, 2006, Université de Limoges.
- [28] J. D. Albrecht, R. P. Wang, R. P. Ruden, M. Farahmand, and K. F. Brennan; « Electron transport characteristics of GaN for high temperature device modiling ». J. Appl. Phys. 83 (1998), pp.369-372.
- [29] Yuancheng Chang,a_ Yimen Zhang, and Yuming Zhang « A thermal model for static current characteristics of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors including self-heating effect ». Journal of applied physics 99, (2006) 044501,
- [30] T. T. Mnatsakanov , M. E. Levinshtein , L. I. Pomortseva , S. N. Yurkov , G. S. Simin , M. A. Khan « Carrier mobility model for GaN ». Solid-State Electronics 47 (2003), pp 111–115
- [31] N. Vellas, « Etudes Expérimentales de Transistors HFET de La Filière De nitrure Galium Verser Des Applications De Puissance hyperfréquences », Thèse de doctorat le 18 Décembre soutenue 2003, Université de Lille.
- [32] C. Charbonniaud, « Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistor à effet de champ GaN pour l’amplification de puissance micro-onde », Thèse de doctorat soutenue 2005, université de limoges.
- [33] J. Y.Duboz « Matériaux semi-conducteurs a grand gap III-V à base de GaN ».

[34] M. Werquin, « Etude théorique et expérimentales de transistor HEMT's de la filiere nitrure de gallium pour les applications de puissance hyperfréquences »

Thèse de doctorat soutenue le 14 decembre 2005, université de Lille.

[35] C. Djimli, « étude par simulation des phénomènes de polarisation et les contacts ohmiques dans les transistor HEMT à base de GaN », Mémoire de magister en électronique, université Mentouri – constantine,2005