

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

SLIMANE Karima

&

KHELIFI Amina

pour l'obtention du diplôme de master en Électronique option Traitement de l'information et système électronique

Thème

Etude et simulation d'une structure à base des semi-conducteurs III.V AlInN/GaN pour HEMT

Proposé par : Dr AISSAT Abdelkader & EL-BEY Moussa

Année Universitaire 2011-2012

Remerciements

Tout d'abord, tout remerciement et louange a notre Dieu, qui nous a accommodé de réaliser ce travail, puis nous remercions nos parents avec leurs soutenances permanentes.

Nous remercions vivement les membres de jury pour nous honorer d'être examinateurs de notre modeste travail.

La réalisation de cette mémoire a été possible grâce au concours d'une personne a qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.

Mr AISSAT Abdelkader notre promoteur qui nous a guidés a pour aboutir à ce travail, et surtout il avait Une patience remarquable avec nous.

Nous remercions du profond de notre cœur Mr EL-BEY Moussa.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous ceux qui ont aidé, de près ou de loin.

Enfin, nous tenons à remercier très chaleureusement nos frères et sœurs, nos familles nos collègues et nos amis.

DEDICACE

*A mes très chers parents FATIHA et AID et mes grands parents
SAAD et FATMA Pour toutes les peines endurées, toutes les
privations et sacrifices consentis.*

*A mes tendres soeurs et frères LILA, SAFIA ,
OUALID, ABDELREZAK, Pour tant de confiance, d'amour, de patience*

*A mes tantes KHADIDJA, HADJER, NORA, MSAOUDA ,ZOHRA et
à oncles,
NORDINE ,YOUCEF, SAÏD, Pour votre assistance durant notre vie est
udiantine*

*A mes cousins et cousines, DJAMILA,
AMEL ,SOUMIA ,FETEH, MOUHAMED, BILEL
Pour tant de consolation et de tendresse ;*

*A mes amies, RAZIKA, MERIEM, RIMA, HIBA, HADJER je dédie ce
travail.*

AMINA

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail affectueusement à

Ma famille, mes chères par.

ents pour leur amour,

Sacrifice et leur soutien inqualifiable,

Et que dieu les gardes

*A mes sœurs hafida,safia, nardjes,zahra,yasmina,et mes
frères farid et hakim ,ma belle sœurs et mes beau frères qui*

m'ont énormément soutenu

*moralelement pour leur sagesse,tendresse,et
compréhension.*

*A mes chères tantes ,mes oncles,mes cousins et
cousines maternels et paternels.*

*A tous les professeurs de l'institut de
électronique surtout Mr aissat .*

a tous les camarades de la promotion 2011/2012.

a mes amis intimes razika, rima ,hiba et meriem.

Et surtout a ma très cher binome amina.

A tous ceux que j'aime

Et ceux qui m'aiment.

Karima

ملخص:

أنصاف النواقل ذات التركيبة III-V، مثل الجاليوم لها العديد من المزايا المرتبطة أساسا بالهوية الكبيرة، وعلاوة على ذلك من الممكن التشكيل مع AlInN من نوع مقحل ذات حركية مرتفعة بنية متغيرة HEMT، كما تطرقنا الى تأثير الاستقطاب الذاتي و الكهربائي في تكوين الغاز الالكتروني ثنائي الأبعاد. درسنا أيضا الارتباط الاومي و الشوتكي، كما درسنا التيار الكهربائي الناجم عن الغاز الالكتروني ثنائي الأبعاد 2DEG، و قمنا بدراسة الآثار المتسببة في الحد من أداء AlInN/GaN HEMT.

كلمات المفاتيح: HEMT ; GaN ; AlInN ; 2DEG

Résumé : Les semi-conducteurs à base de composés III-V de type GaN présentent de nombreux avantages liés essentiellement à leur grand gap. De plus, il est possible de former avec AlInN une hétérojonction de type HEMT (High Electron Mobility Transistor). Nous avons étudié l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique sur la formation et la localisation du gaz d'électrons bidimensionnel 2DEG dans l'hétéro structure avec un dopage égal à 10^{18} cm^{-3} . Nous avons également étudié le contact Schottky et ohmique et nous avons calculé le courant de drain en fonction de la tension de drain et de grille. Nous avons présenté les effets limitatifs qui réduisent les performances de composant.

Mots clés : HEMT ; GaN ; AlInN ; 2DEG.

Abstract: Semiconductors based on III-V compounds like GaN have many advantages related mainly to their wide band gap. Moreover, it is possible to form a heterojunction with AlInN type HEMT (High Electron Mobility Transistor). We studied the effect of spontaneous polarization and piezoelectric training and the location of the two dimensional electron gas in the 2DEG hetero structure with a doping equal to 10^{18} cm^{-3} . We also studied the Schottky contact and ohmic and we calculated the drain current as a function of drain voltage and gate. We presented the limiting effects that reduce the performance component.

Keywords : HEMT; GaN; AlInN; 2DEG

Liste d'abréviation

a	paramètre de maille
E_g	le gap
E_c	le champ de claquage
μ	la mobilité
ε	le désaccord de maille
E_{HH}	Energie de la bande de trous lourds
E_{LH}	Energie de la bande de trous légers
Δ_0	Energie de décalage des bandes des trous spin-splittée
E_c	l'énergie du bas de la bande de conduction
E_v	l'énergie du haut de la bande de valence
L_c	l'épaisseur critique
P_s	polarisation spontanée
P_{pz}	polarisation piézoélectrique
σ_{int}	densité de charge
ΔE_c	discontinuité de la bande de conduction
ΔE_v	discontinuité de la bande de valence
n_s	concentration des électrons
ϕ_b	La hauteur de la barrière
ε_0	la permittivité de vide
ε	la permittivité d'alliage
V_{th}	la tension de seuil
I_{ds}	courant drain source
Z	représente la largeur de grille
L	la longure de la grille

V_{gs}	tension de grille source
V_{dsat}	tension de drain de saturation
τ	temps de relaxation
m^*	masse effective des porteurs
j_{fuit}	courant de fuite
K	constante de Boltzmann

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Les matériaux semi conducteurs IIIV.....	3
1.3 Le nitrure de gallium	3
1.3.1 Structure cristalline	4
a. Structure de type wurtzite.....	4
b. Structure de type zinc de blende	6
c. Comparaison entre les deux structures	7
1.3.2 Propriétés électriques du GaN.....	7
a. Structure de bande.....	7
b. Champ de claquage	8
c. Mobilité du porteur	9
1.3.3 Propriétés mécaniques.....	9
a. Coefficients élastiques.....	9
b. coefficients de dilatation thermique	10
1.3.4 Les inconvénients du GaN	10
1.4 Paramètre de maille	10
1.5 Effet de la contrainte	11
1.6 Effet de la contrainte sur le gap	13
1.7 Construction de la structure d'un HEMT	16
1.7.1 Substrat	16
1.7.2 Couche tampon.....	16
1.7.3 Le canal	16
1.7.4 L'espaisseur	17
1.7.5 Couche donneuse	17
1.7.6 Cap layer	17

1.8 Choix d'un substrat pour le nitrure	18
1.9 Epaisseur critique	18
1.10 Conclusion	20
Chapitre 2.....	21
2.1 Introduction	21
2.2 Impact de la polarisation sur l'hétéro structure	21
2.2.1 La polarisation spontanée	21
2.2.2 La polarisation piézoélectrique.....	22
2.2.3 La polarisation sur l'hétéro jonction AlInN.....	23
2.2.4 Calcul de la densité de charge due a la polarisation.....	24
2.3 L'effet fondamental de transistor.....	25
2.3.1 L'hétérojonction	26
a. La formation de gaz d'électrons bidimensionnel 2DEG	27
b. Contact schottky et ohmique	29
2.4 Fonctionnement du HEMT	31
2.4.1 Le courant drain source	33
a. Fonctionnement en régime linéaire.....	33
b. Fonctionnement en régime saturé	34
2.5 La mobilité dans le HEMT basés sur GaN	34
2.6 Courant de fuite des porteurs aux hétéro interfaces.....	35
2.7 Phénomènes limitatifs du HEMT	36
2.7.1 Les pièges	36
a. Le mécanisme de drain-lag	36
b. Le mécanisme de gate-lag	38
c. Comment minimiser les effets de piégeage	39
2.7.2 Les effets thermiques	41
2.7.3 L'ionisation par impact	41
2.7.4 L'effet de kink	42

2.8 La technologie d'amplification	42
2.9 Conclusion	44
Chapitre 3.....	45
3.1 Introduction	45
3.2 L'influence de la concentration d'aluminium (Al) sur le paramètre de maille	45
3.3 L'influence de la concentration d'aluminium (Al) sur la contrainte.....	46
3.4 L'influence de la concentration d'aluminium (Al) sur l'énergie de gap	47
3.5 l'effet de la contrainte sur le gap	48
3.6 L'influence de la concentration de l'aluminium sur Epaisseur critique	50
3.7 L'influence de la concentration de l'aluminium sur la densité d'interface	51
3.8 L'influence de la concentration de l'aluminium sur la discontinuité de la bande de conduction	52
3.9 L'influence de variation de tension V_{gs} sur le courant de sortie $I_{ds}(V_{ds})$	54
3.10 L'effet de l'effet de kink sur le courant de sortie $I_{ds}(V_{ds})$	56
3.11 L'influence de la concentration de l'aluminium sur puissance de sortie	58
3.12 la mobilité d'électrons dans le gaz bidimensionnel	57
3.13 La puissance de sortie en fonction de courant de drain	58
Conclusion générale	61
Annexe	63
Bibliographie	66

Liste des figures

Figure 1.1 la structure hexagonale du GaN	4
Figure 1.2 : l'arrangement atomique suivant les deux faces de croissance du GaN	5
Figure 1.3 : la structure cristalline de type zinc blende pour GaN.....	6
Figure 1.4 : maille primitives	8
Figure 1.5 : déformation tétragonale d'une couche épitaxie sur un substrat de paramètre de maille différent	12
Figure 1.6 : structure de bande d'un semi conducteur a gap direct.....	13
Figure 1.7 : structure physique de base d'un HEMT	17
Figure 1.8 : schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et une couche contrainte relaxée(b).....	19
Figure 2.1 : polarité des couches hexagonales	22
Figure 2.2: polarisation spontanée et piézoélectrique dans l'hétéro structure.....	24
Figure 2.3 : la densité de charge présentée a l'interface de l'hétéro structure AlInN/GaN	25
Figure 2.4 : niveaux d'énergie des matériaux mis en jeu dans l'hétérojonction	26
Figure 2.5: formation du gaz bidimensionnel a l'interface de deux matériaux a grand et petite gap	27
Figure 2.6 : diagramme des densités de charges présentes a l'hétérojonction	28
Figure 2.7 : schémas des diagrammes de bandes pour $\phi_M > \phi_{Sc}$	30
Figure 2.8: le diagramme de la bande d'énergie du contact ohmique	31
Figure 2.9 : schématisation de passage de courant dans 2DEG	32
Figure 2.10 : schématisation de la fuite des électrons vers la barrière ou vers la couche GaN	35
Figure 2.11 : mise en évidence du phénomène de drain -lag	37
Figure 2.12: mise en évidence du phénomène de gate-lag	38
Figure 2.13 : les pièges a la surface de grille drain	39
Figure 2.14 : HEMT AlInN avec couche de passivation	40
Figure 2.15 : HEMT AlInN avec couche de passivation et field plate.....	40
Figure 2.16 : création de paire électrons/trous par ionisation par impact dans le canal d'un transistor	42

Figure 3.1 : le paramètre de maille de AlInN en fonction de la concentration d'Al	46
Figure 3.2 : variation de la contrainte en fonction de concentration de l'aluminium.....	47
Figure 3.3: L'énergie de la bande interdite E_g de la structure AlInN en fonction de paramètre de composition	48
Figure 3.4 : Variation de l'énergie de bande interdite de la structure contrainte sur $Al_{(1-x)}In_xN / GaN$ En fonction de la concentration de l'aluminium.....	49
Figure 3.5 : Variation de l'énergie de bande interdite de la structure contrainte et non contrainte sur $Al_{(1-x)}In_xN / GaN$ En fonction de la concentration de l'aluminium	49
Figure 3.6 : Variation de l'épaisseur critique de la structure contrainte sur $Al_{(1-x)}In_xN / GaN$ En fonction de la concentration de l'aluminium.....	50
Figure 3.7: Variation de la polarisation en fonction de la concentration de l'aluminium.	51
Figure 3.8: Variation de la densité de l'interface en fonction de la concentration de l'aluminium face Ga.....	52
Figure 3.9 : Variation de la discontinuité de bande de conduction En fonction de la Concentration de l'aluminium	53
Figure 3.10: courant de sortie drain source en fonction de tension V_{ds} pour différentes valeurs de V_{gs} avec $x=0.2$	54
Figure 3.11: courant de sortie drain source en fonction de tension V_{ds} pour différentes valeurs de V_{gs} avec $x=0.9$	55
Figure 3.12: courant de sortie drain source en fonction de tension de grille pour différentes tensions de drain avec $x=0.2$	56
Figure 3.13: l'effet de kink sur le courant de sortie drain_source en fonction de tension de grille pour différentes tensions de drain avec $x=0.2$	57
Figure 3.14: la mobilité des porteurs dans le gaz en fonction de x	57
Figure 3.15: la puissance de sortie en fonction de courant	58

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : les paramètres de la maille wurtzites pour les nitrures IIIV a 300k.....	6
Tableau 1.2 : comparaison des paramètres entre les deux structures.....	7
Tableau 1.3 : mobilité min et max des porteurs dans GaN et les paramètre permettant d'estimer la mobilité de ces porteurs en fonction de la température	9
Tableau 1.4 : coefficients de dilatation thermiques des III-nitrure en phase hexagonale	10
Tableau 2.1 :liste des paramètre usuellement utilisés pour le h-GaN et InN et AlN	23
Tableau 2.2 : les paramètre de la permittivité relative de AlN et InN.....	29
Tableau 2.3 : caractéristiques des transistors HEMTs GaN.....	43

Introduction générale

Les technologies de l'information et des communications ,ainsi que l'électronique de puissance ,nécessitent l'apport de nouvelles technologies afin d'améliorer les performances des système.Les matériaux tels que le silicium ou l'arséniure de gallium (GaAs) sont déjà largement employés dans grand nombre d'applications ,mais leurs limites physiques ne permettent pas de satisfaire aux besoins créés par la société moderne.Les matériaux tels que le nitrure d'aluminium (AlN)ou le nitrure de galium (GaN) sont très attirants car leur utilisation permet d'atteindre simultanément de forts courants et de fortes tensions et donc de forte puissances. C'est en particulier la conséquence des propriétés remarquables des composés III-V, le fort champ de claquage, la forte vitesse de saturation, particulièrement pour GaN , et la possibilité de réaliser d'hétéro structure de type AlInN/GaN de bonne qualité structurale et électrique . L'objectif est de maîtriser leur réalisation et de comprendre l'origine physique de ces caractéristiques qui dépendent essentiellement du procédé d'élaboration du matériau à base de nitrure et aussi du procédé technologique utilisé, notamment pour les contacts ohmiques et Schottky. Alors que le contact ohmique optimisé jusqu'à présent s'avère être stable et opérationnel à haute température. De nombreux travaux restent à effectuer sur l'électrode de commande et les perspectives d'étude sont nombreuses.

La découverte au début des années 80 de la possibilité de former un gaz bidimensionnel d'électrons a une interface entre semi-conducteurs, d'abord appliquée avec succès a l'arséniure de gallium ,a permis en 1991 a l'équipe de M.A.Khandu Bell labs d'obtenir pour la première fois un gaz bidimensionnel d'électrons dans un système a base de GaN. Cette avancée a été le point de départ d'un grand champ de recherches qui connaît encore aujourd'hui un développement très important .Les nouveaux efforts de recherche concernant les HEMTs(High Electron Mobility Transistors) AlInN ont été fortement motivés

par les intérêts commerciaux et militaires envers les applications électroniques liées aux hautes puissances ,aux hautes fréquences et hautes températures .

Dans ce contexte nous nous intéresserons à l'étude des propriétés électriques de hétéro structure $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ à différentes faces N et Ga afin d'analyser l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique sur la formation et la localisation du 2DEG et principe de fonctionnement de transistor HEMT et les effets limitatifs.

Ce mémoire comporte trois chapitres, le premier étant destiné à la description du nitrure de Gallium, matériau de base servant à cette étude, et où on a abordé ses propriétés structurales, électriques et électroniques et nous avons étudié la structure physique et la contrainte de substrat GaN avec l'alliage AlInN .

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation des transistors HEMTs, avec les notions fondamentales de fonctionnement de transistor ensuite viendra l'analyse des caractéristiques électriques, spécialement les courbes $I(V)$. Par ailleurs, on mènera aussi une étude sur la mobilité et le courant de fuite et on termine par les effets limitatifs et une des applications de HEMT.

Le troisième chapitre sera concernera l'analyse des différents résultats expérimentaux. On termine par une conclusion générale.

Chapitre 1 Le nitrure de gallium en application aux transistors a haute mobilité

1.1 Introduction :

Au cours des quinze dernières années, de grands efforts de recherche ont été investis dans l'étude des semi-conducteurs à base de composés III-N. Ceci vient évidemment des avantages physico-chimiques que présentent le GaN et ses alliages. En particulier, sa large bande interdite, son fort champ de claquage et sa forte vitesse de saturation ont permis à ce matériau d'être considéré comme un candidat très intéressant et très prometteur pour les applications optiques, électroniques hyperfréquence et de puissance[01].

1.2 Les matériaux semi conducteurs III V:

Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev. Parmi tous les composés possibles, les composés les plus légers comme le bore, l'aluminium ou l'azote présentent une structure de bandes à large bande interdite ; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide qui demande des semi-conducteurs a forte mobilité de porteurs.

A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique. L'intérêt de ces composés est encore renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par la combinaison d'éléments appartenant à ces colonnes III et V.

On obtient ainsi des alliages ternaires de type $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$, $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$, ou $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ et même quaternaires du type $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. Il est possible de réaliser des matériaux dont la largeur de bande interdite, et donc les propriétés optiques, varient dans une très large gamme de longueurs d'ondes.

On considérera donc essentiellement les composés à base de gallium, ou d'indium, dont les propriétés sont les plus intéressantes [02].

1.3 Le nitrure de gallium :

Le GaN présente les avantages d'une bande interdite large et directe, d'une grande stabilité thermique, ses propriétés physiques intéressantes le rendent non seulement attractif pour les émetteurs bleus, mais également pour l'électronique haute température, haute puissance et haute fréquence.

1.3.1 Structure cristalline :

Le nitrure de gallium se cristallise sous deux formes différentes. Le poly type thermodynamiquement stable est la phase hexagonale (structure Wurtzite). Le poly type cubique (structure blende de zinc) est thermodynamiquement métastable. Nous présentons ici les deux structures cristallographiques et les constantes de maille de chacune des deux phases du GaN.

a. Structure de type Wurtzite :

Elle est constituée de deux réseaux hexagonaux étroitement espacés : l'un avec les atomes de gallium Ga, l'autre avec les atomes d'azote, interpénétrés et décalés suivant l'axe c de $\frac{5}{8}$ ème de la maille élémentaire (l'hexagonale simple avec une base de quatre atomes). Chaque atome de Ga est lié à quatre atomes de Nitrogène et vis versa comme montré à la figure 1.1.

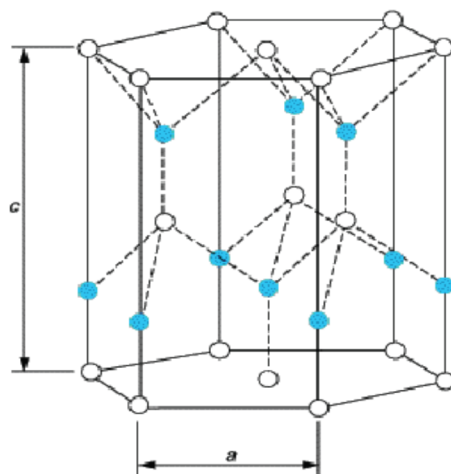


Figure 1.1 : la structure hexagonale du GaN

Il n'y a pas une inversion symétrique dans cette maille le long de la direction de croissance $[0001]$. Le GaN a deux faces distinguées : la face Ga si les atomes de Ga sont placés à la surface supérieure du cristal et correspondant à une polarité $[0001]$, alors que si les atomes de Ga sont remplacés par les atomes N on dit que c'est la face N et elle a une polarité $[000\bar{1}]$, comme il a été représenté sur la figure 1.2. Il est important de noter que les deux configurations ne sont pas équivalentes.

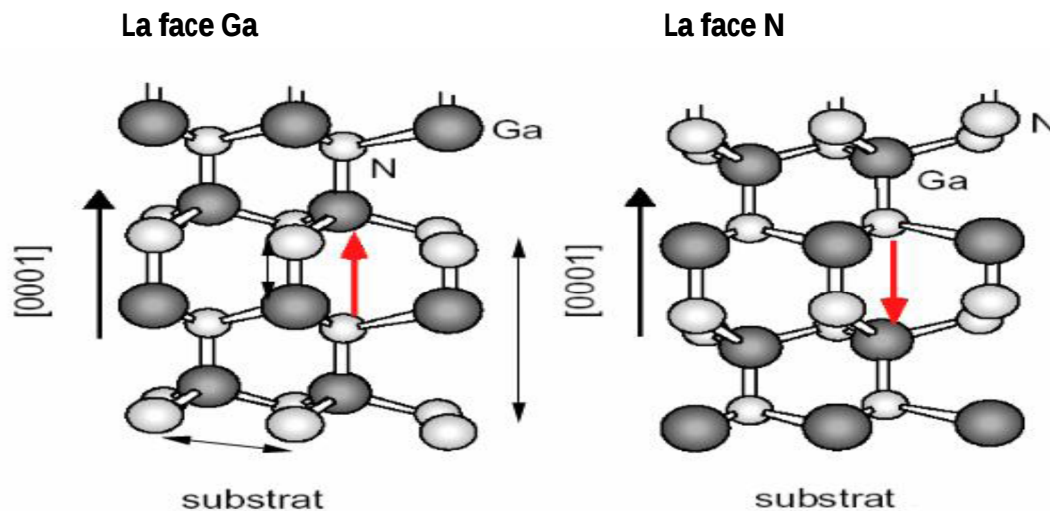


Figure 1.2 : l'arrangement atomique suivant les deux faces de croissance du GaN.

La maille Wurtzite est caractérisée par trois paramètres : a représente la longueur limite de l'hexagone de base, c est la hauteur de la maille élémentaire, et u est la longueur de la liaison Ga-N suivant l'axe c . Les paramètres de maille de GaN comparés à d'autres matériaux à base de nitrure sont présentés sur le tableau 1.1 où l'indice '0' correspond à la maille équilibrée non contrainte à la température ambiante [03].

Matériaux	GaN	InN
a (Å)	3.189	3.54
c_0 (Å)	5.185	5.707
a_0/c_0	1.6259	1.6116
c_0/a_0	1.6336	1.627
u_0	0.376	0.377

Tableau 1.1 : les paramètres de la maille Wurtzites pour les nitrures III-V à 300K.

b. Structure de type zinc blende :

Dans la structure zinc blende le réseau cristallin peut se décomposer en deux sous-réseaux cubiques à faces centrées interpénètrents, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément V (fig1.3). Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube, d'une quantité $(a/4, a/4, a/4)$, à partir du paramètre cristallin, c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire. Chaque atome se trouve donc au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce. La maille élémentaire, à partir de laquelle on peut reconstruire le cristal entier par un ensemble de translations, est formée par un atome de chaque type. Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille a , il varie entre 4.51 et 4.52 Å [03]

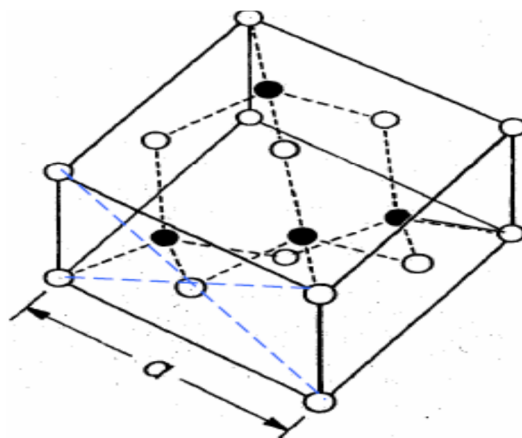


Figure 1.3 : la structure cristalline de type zinc blende pour le GaN.

c. Comparaison entre les deux structures :

Les deux structures cristallines sont similaires dans le cas où chaque atome de Ga est lié par quatre atomes de N et vis versa. La différence principale est la séquence d'empilement des plans cristallins, pour la structure hexagonale la croissance est suivant l'axe c (0001), pour la structure zinc blende, la croissance est suivant l'axe (111). Il en résulte que l'entourage cristallographique de chaque atome ne diffère d'une structure à l'autre, qu'à partir de la position de troisième voisin [03].

	Zinc Blende	Wurtzite
Bande interdite [EV]	3.2	3.39
Affinité électrique [EV]	4.1	4.1
Constante diélectrique	9.7	8.9
Champ critique [Vcm^{-1}]	$\sim 5 \cdot 10^6$	$\sim 3.3 \cdot 10^6$
Vitesse MAX de saturation [cm s^{-1}]	$\sim 2.5 \cdot 10^7$	$\sim 2.5 \cdot 10^7$

Tableau 1.2 : comparaison des paramètres entre les deux structures

1.3.2 Propriétés électriques du GaN:

a. La structure de bande :

Le nitrure de gallium est un semi-conducteur qui présente un gap direct, ce qui signifie que le minimum de la bande de conduction (E_c) et le maximum de la bande de valence (E_v) se situent à une valeur presque identique de vecteur d'onde k sur le diagramme représentant l'énergie E en fonction du vecteur d'onde k . Pour le GaN, ce gap se situe au point Γ , centre de la zone de Brillouin ($k=0$). Les premières zones de Brillouin sont représentées dans la figure 1.4.

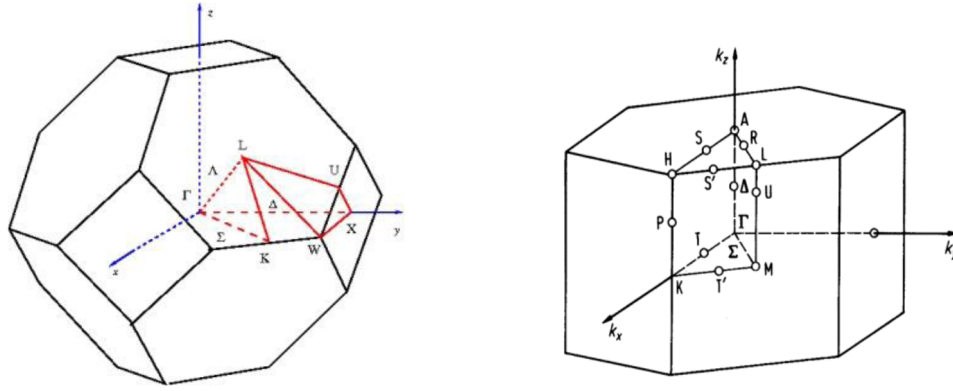


Figure 1.4 : Mailles primitives (premières zones de Brillouin)

Les structures hexagonales et cubiques présentent une largeur de bande interdite de 3,43eV et 3,20eV respectivement à 300K. Ces valeurs augmentent lorsque la température diminue. Pour décrire la variation du gap en fonction de la température, on utilise généralement la loi de Varshni qui s'écrit :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1.1)$$

Où α et β sont des paramètres ajustables qui dépendent de la nature du semi-conducteur. Le gap du composé ternaire nitrure de gallium-indium $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ reste également direct quelque soit la teneur en l'aluminium [04]. La variation du gap en fonction du paramètre de composition x peut être représentée simplement par la loi classique de Vegard :

$$E_g^{\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}} = E_g^{\text{InN}}(1 - x) + E_g^{\text{AlN}}x - x(1 - x)*b \quad (1.2)$$

avec

b : paramètre de bowing de AlInN égal à 2.53.

b. Champ de claquage :

Une autre caractéristique qui a son importance lorsque l'on s'intéresse à l'électronique de puissance est le champ de claquage ou champ critique. De ce paramètre va dépendre la tension maximale de fonctionnement du composant. En effet, plus sa valeur sera élevée, plus il sera aisé de fabriquer des composants avec un fort dopage et de taille réduite, avec les conséquences bénéfiques que cela a sur les caractéristiques de ce dispositif, comme des résistances d'accès plus faibles [04]. Le champ de claquage et la largeur de bande interdite sont liés, notamment par la formule suivante :

$$E_c \propto E_g^{\frac{3}{2}} \quad (1.3)$$

Cette relation signifie que plus le gap est important, plus le champ de claquage théorique sera élevé. Cela signifie aussi que le champ critique diminue quand la température augmente.

c. Mobilité du porteur :

Sous l'effet d'un champ, les porteurs de charge (électrons et trous) vont se déplacer dans le matériau. Le libre parcours moyen sans choc va conditionner le mouvement des porteurs dans le cristal. Or, toute modification dans ce réseau, comme l'élévation de la température ou le dopage, va modifier la mobilité des porteurs notée généralement μ [05]. Ces dépendances de la mobilité sont calculables à l'aide de la formule suivante :

$$\mu = \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} + \frac{\mu_{\max} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha} - \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta}}{1 + \left(\frac{N_{\text{tot}}}{N_{\text{ref}}} \right)^{\gamma}}$$

(1.4)

Où T est la température, N la concentration des porteurs, α , β et γ des paramètres propres à chaque semi-conducteur dont les valeurs sont reportées dans le tableau suivant dans le cas du GaN.

Porteurs	$\mu_{\min} (cm^2 \cdot v^{-1} \cdot s^{-1})$	$\mu_{\max} (cm^2 \cdot v^{-1} \cdot s^{-1})$	$N_{\text{ref}} (cm^{-3})$	α	β	γ
électrons	55	1000	$2 \cdot 10^{17}$	-2	-3.8	1
trous	30	170	$3 \cdot 10^{17}$	-5	-3.7	2

Tableau 1.3 : Mobilités min et max des porteurs dans le GaN et les paramètres permettant d'exprimer la mobilité de ces porteurs en fonction de la température

1.3.3 Propriétés mécaniques:

a. Coefficients élastiques :

Les propriétés des semi-conducteurs dépendent dans une large mesure de leur état de contrainte et des déformations locales ou globales du réseau cristallin aux quels ils sont liés.

En effet, toute déformation entraîne une modification des positions relatives des atomes les uns par rapport aux autres .Il s'ensuit alors une modification des propriétés des semi conducteurs : par exemple les propriétés vibrationnelles ou électroniques (largeur de la bande interdite) [06].

b. Coefficients de 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 mais également lors de la croissance du matériau car celle-ci se fait à haute température.

Les coefficients de dilatation thermique permettent d'évaluer la déformation de la maille cristalline en fonction de la variation de température [06].

	<i>GaN</i>	<i>AlN</i>
$\Delta a / a(10^6 K^{-1})$	5.59	4.2
$\Delta c / c(10^{-6} K^{-1})$	3.17	5.3

Tableau 1.4 : Coefficients de dilatation thermique des III-nitrures en phase hexagonale.

1.3.4 Les inconvénients du GaN :

Les inconvénients du GaN sont d'une part la difficulté à réaliser le dopage de type P, et d'autre part le fait que la masse effective des électrons est assez élevée. Par comparaison avec GaAs, la masse effective des électrons dans GaN est trois fois plus élevée, et la mobilité à faible champ des électrons est six fois plus faible (μ_0 de l'ordre de 1350 contre 8000 $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ à 300K)[02].

1.4 Paramètre de maille :

Le paramètre de maille définit la distance entre les atomes dans les réseaux cristallins. C'est un indicateur de compatibilité structurelle entre différents matériaux.

L'adaptation de la constante de maille est importante pour la croissance de couches minces de matériaux sur l'autre. Lorsque les deux constantes sont trop différentes, la couche subira des contraintes provoquant les défauts cristallins dans les couches épitaxiés.

Lors de la réalisation d'alliages avec des semi-conducteurs différents, le paramètre de maille de l'alliage peut être considéré comme évoluant linéairement en fonction de la composition des différents binaires suivant la loi de Vegard [07]. Pour un alliage ternaire de type $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$, le paramètre de maille s'écrira ainsi:

$$a_{\text{AlInN}} = xa_{\text{AlN}} + (1-x)a_{\text{InN}} \quad (1.5)$$

Où a_{AlN} et a_{InN} sont respectivement les paramètres de maille des deux binaires GaN et InN.

1.5 Effet de la contrainte :

Lors d'une croissance hétéroépitaxiale, la couche peut être déformée au-delà d'une certaine épaisseur à cause du désaccord de paramètre de maille entre la couche et le substrat, le même phénomène peut se manifester si un désaccord entre les coefficients de dilatation thermique entre la couche épitaxiale et le substrat est présent.

Si l'épaisseur de la couche active est supérieure à une certaine épaisseur appelée épaisseur critique, les déformations induites par le désaccord de maille sont telles que la génération de dislocations au sein de la couche AlInN devient énergiquement favorable, autorisant ainsi la relaxation de la contrainte. Cette situation est catastrophique quant aux propriétés électroniques du matériau.

Si l'épaisseur de la couche active reste inférieure à l'épaisseur critique, le paramètre de maille du matériau AlInN peut s'adapter à celui du substrat dans le plan de croissance grâce à une déformation élastique de sa maille cristalline. La couche substrat, plus épaisse, reste non déformée.

Dans les paragraphes qui suivent, il sera tout d'abord calculé la déformation de la couche épitaxiée sur substrat. Il sera ensuite analysé l'influence de cette déformation sur les bandes de valence et de conduction de ce matériau.

La condition nécessaire à une bonne hétéro-épitaxie est évidemment que les deux matériaux aient d'une part la même structure cristalline et, d'autre part, des paramètres de mailles voisins.

Lorsque les paramètres de mailles sont différents, le matériau constituant la couche de plus grande épaisseur impose sa maille à l'autre, au moins au voisinage de l'interface. Ceci

entraîne l'existence, dans le matériau de faible épaisseur, d'une contrainte biaxiale dans le plan des couches. Prenons le cas de deux cristaux comme le montre la figure 1.5 [08]. Les différentes contraintes induites par le désaccord de maille sont calculées à partir des équations suivantes :

Le désaccord de maille entre la couche et le substrat est défini comme suit :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{a_0 - a_s}{a_s} \quad (1.6)$$

Où a_0 et a_s représentent les paramètres de maille hors plan de la couche entièrement relaxée et du substrat respectivement.

$$a_0 = \frac{a_{\perp} + \left(\frac{2\nu}{1-\nu}\right)a_{\parallel}}{1 + \left(\frac{2\nu}{1-\nu}\right)} \quad (1.7)$$

avec le coefficient de poisson dans l'axe de croissance (la direction $\langle 100 \rangle$) donné par :

$$\nu(100) = \frac{C_{12}}{(C_{11} + C_{12})} \quad (1.8)$$

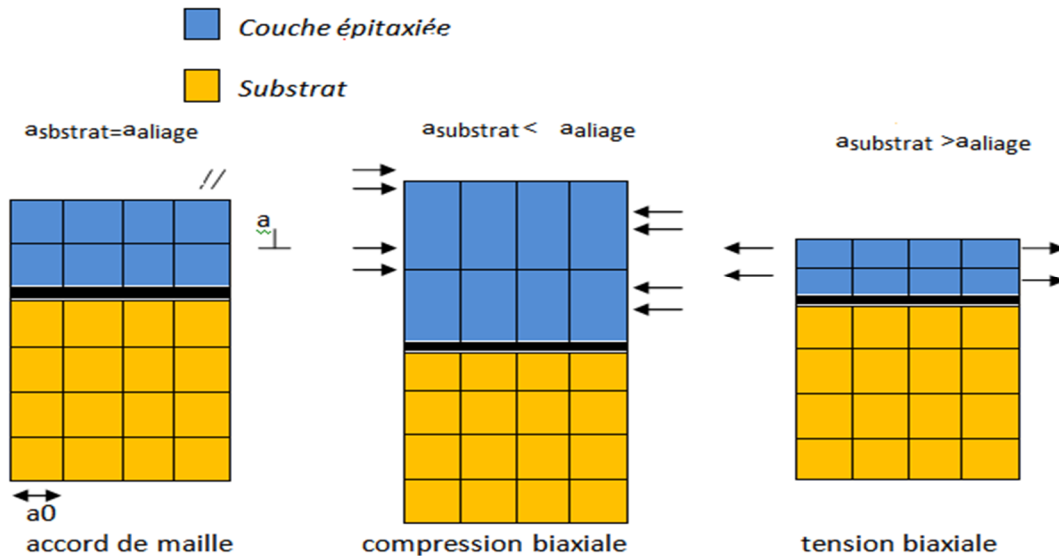


Figure 1.5 : déformation tétragonale d'une Couche épitaxiée sur un substrat de paramètre de maille différent : compression biaxiale ($a_{\text{substrat}} < a_{\text{alliage}}$) et tension biaxiale ($a_{\text{substrat}} > a_{\text{alliage}}$) et accord de maille ($a_{\text{substrat}} = a_{\text{alliage}}$)

1.6 Effet de la contrainte sur le gap :

Pour la description de l'effet de la contrainte sur la structure de bande nous avons utilisé le modèle de Van et Walle et utilisé le formalisme de Krijin. Les deux composantes parallèle et perpendiculaire du tenseur de la déformation peuvent être définies de la manière suivante

La contrainte résiduelle dans le plan et hors plan par

$$\varepsilon_{\text{dans le plan}} = \frac{a_{||} - a_0}{a_0} \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_{\text{hors le plan}} = \frac{a_{\perp} - a_0}{a_0} \quad (1.10)$$

$a_{||}$ et $a_{\perp}$ sont les valeurs du paramètre de maille dans le plan et hors du plan de la couche non relaxée.

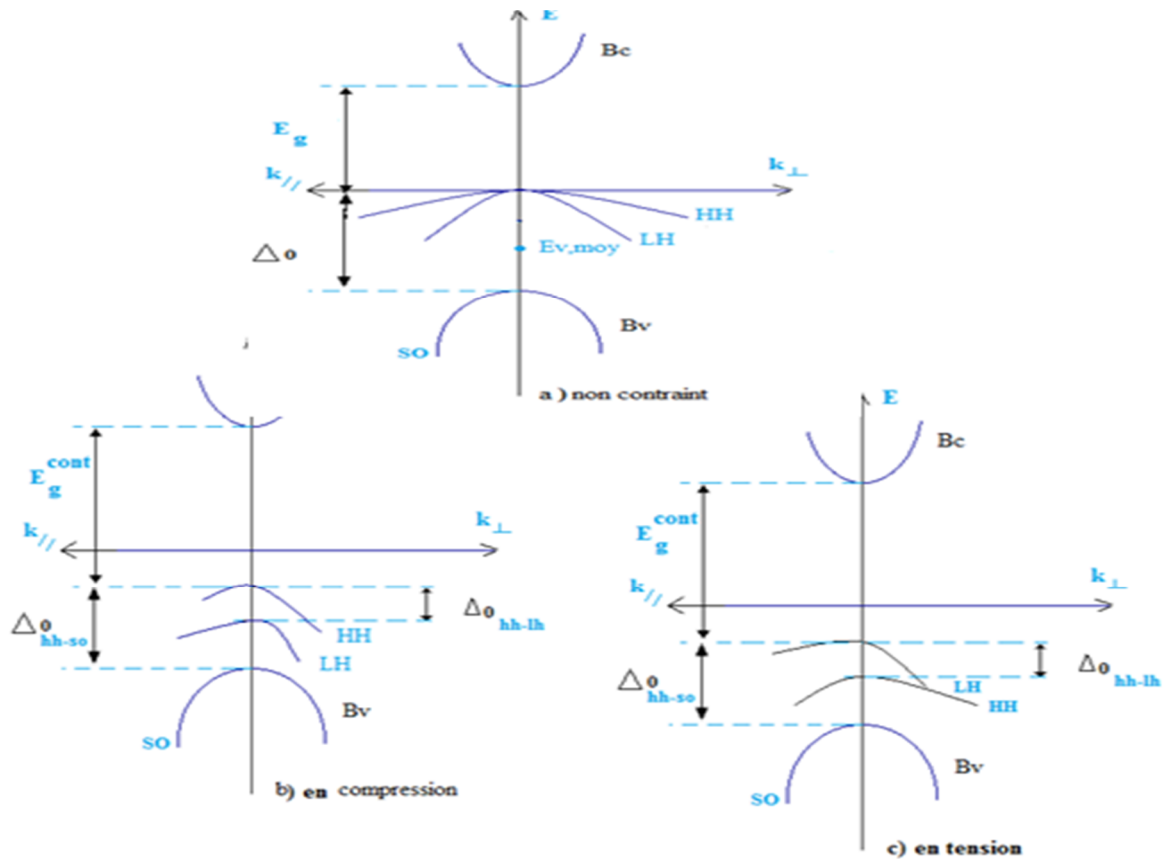


Figure 1.6: structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct ,a) non contraint

b) en compression ,c) en tension

Pour une structure totalement contrainte:

$$a_{\parallel} = a_{sub} \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_{\perp} = -2 \times \frac{c_{12}}{c_{11}} \times \varepsilon_{\parallel} \quad (1.12)$$

L'effet de la contrainte sur la structure de bandes de la couche épitaxie est illustré sur la (figure 1.6). Cette figure présente la structure de bandes d'un semi-conducteur à Gap direct dans les trois cas possibles, non contraint, contraint en compression et finalement contraint en tension.

En absence de contrainte, les bandes de trous lourds et de trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin, et la bande de trous spin-splittée est située à une énergie Δ_0 en dessous de ces deux bandes. Le centre de gravité de la bande de valence d'énergie moyenne $E_{V,moy}$ se trouve par conséquent à $\frac{\Delta_0}{3}$ au dessous du haut de la bande de valence en $k=0$ (figure 1.6.a).

$$E_{V,moy} = \frac{E_{HH} + E_{LH} + \Delta_0}{3} \quad (1.13)$$

E_{HH} : Energie de la bande de trous lourds.

E_{LH} : Energie de la bande de trous légers.

Δ_0 : Energie de décalage des bandes des trous spin-splittée.

L'effet de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être décomposé en deux parties :

La composante hydrostatique, liée à la déformation selon l'axe de croissance, provoque un décalage du centre de gravité de la bande de valence ainsi que le centre de gravité de la bande de conduction. La contrainte de cisaillement, qui lève la dégénérescence des états énergétiques des trous lourds et des trous légers en $k = 0$ (typiquement d'une valeur Δ_{hh-lh} de l'ordre de 60-80 meV pour un désaccord paramétrique de 1%).

Pour une couche épitaxiée soumise à une contrainte bi-axiale de compression, la composante hydrostatique augmente l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction, et la contrainte de cisaillement rend les bandes de valence fortement anisotropes ; la bande de plus haute énergie devient lourde selon $k_{\perp}$ et légère selon $k_{\parallel}$ (bande HH). La bande d'énergie inférieure devient elle légère selon $k_{\perp}$ et lourde selon $k_{\parallel}$ (bande LH) (figure 1.6.b).

Si la couche est soumise à une contrainte bi-axiale de tension (figure I1.6.c), le gap moyen diminue et les bandes de valences sont inversées par rapport à celles d'une couche en compression ; la bande de plus haute énergie (bande LH) restant légère selon $k_{\perp}$ et lourde selon $k_{\parallel}$.

Les décalages énergétiques des centres de gravité de la bande de valence et de la bande de conduction en $K=0$ induits par la contrainte hydrostatique, varient proportionnellement à la contrainte :

$$\Delta E_{v,moy}^{hyd} = a_v(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (1.14)$$

$$\Delta E_c^{hyd} = a_c(2\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (1.15)$$

avec a_c et a_v les potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de conduction et la bande de valence respectivement.

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement dans chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants, dans le cas d'une croissance sur substrat(100) .

$$\Delta E_{hh}^{cisa} = -\frac{1}{2} \times \delta E^{cisa} \quad (1.16)$$

$$\Delta E_{lh}^{cisa} = -\frac{1}{2} \Delta_0 + \frac{1}{4} \delta E^{cisa} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (1.17)$$

$$\Delta E_{so}^{cisa} = -\frac{1}{2} \Delta_0 + \frac{1}{4} \delta E^{cisa} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (1.18)$$

avec :

$$\delta E^{cisa,100} = 2 \cdot b \cdot (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (1.19)$$

où b est le potentiel de déformation tétragonale.

On peut définir l'énergie du haut de la bande de valence et l'énergie du bas de la bande de conduction.

E_v : l'énergie du haut de la bande de valence est :

$$E_v = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{v,moy}^{hyd} + \max(\Delta E_{hh}^{cisa}, \Delta E_{lh}^{cisa}) \quad (1.20)$$

E_c : l'énergie du bas de la bande de conduction est :

$$E_c = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g + \Delta E_c^{hyd} \quad (1.21)$$

via les équations (I.20) et (I.21) on peut déterminer l'équation du Gap contraint E_g^{cont} :

$$E_g^{cont} = E_c - E_v = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \max(\Delta E_{hh}^{cisa}, \Delta E_{lh}^{cisa}) \quad (1.22)$$

Donc l'équation (I.22) devient pour une couche en compression :

$$E_g^{cont,com} = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{hh}^{cisa} \quad (1.23)$$

Et pour une couche en tension :

$$E_g^{cont,ten} = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{lh}^{cisa} \quad (1.24)$$

Pour le système $Al_{(1-x)}In_xN/GaN$ face Ga donne la variation de l'énergie du gap de la couche épitaxiée $Al_{(1-x)}In_xN$ dans le trois cas possibles (soumise à une contrainte en compression($x < 0.82$), à une contrainte en tension ($x > 0.82$) et sans contrainte ($x = 0.82$)), dans tout le domaine de composition[07].

1.7 constitution de la structure d'un HEMT :

1.7.1 .Substrat :

Substrat est utilisée, pour limiter la propagation des dislocations dans toute la Structure. Ces dislocations sont essentiellement dues aux désaccords de maille et de coefficient de dilatation thermique entre le GaN et le substrat [09].

1.7.2 Couche tampon :

La couche tampon est également appelée buffer. Cette couche est constituée du matériau de plus faible largeur de bande interdite, dans notre cas il s'agit du nitrure de gallium. C'est dans ce matériau[09].

1.7.3 Le canal :

Le canal est constitué d'un matériau à petit gap non dopé. cette couche est importante dans la mesure où elle reçoit le gaz d'électron bidimensionnel (2DEG) qui déterminera les performances du composant à travers les propriétés de transport des électrons dans le matériau [09].

1.7.4 L'espaceur :

La Couche espaceur , appelée aussi spacer, est réalisée à partir du AlN. affiche une épaisseur de un ou deux nanomètres et permet de réduire les interactions électrons-donneurs entre le gaz d'électrons et la couche dopée. En effet, la proximité de ces particules entraînerait une interaction électrostatique connue sous le nom de Coulomb scattering. [09].

1.7.5 Couche donneuse :

La couche donneuse représente une épaisseur de quelques nanomètres de matériau grand gap dopé. Une zone déplétée se forme dans cette couche au niveau de la jonction Schottky de grille ainsi qu'aux abords de l'hétérojonction [09].

1.7.6 Cap layer :

la couche superficielle, appelée cap layer, produit de bons contacts ohmiques de drain et de source. Cette fine couche de nitrure de gallium permet également de réduire les résistances d'accès[09].

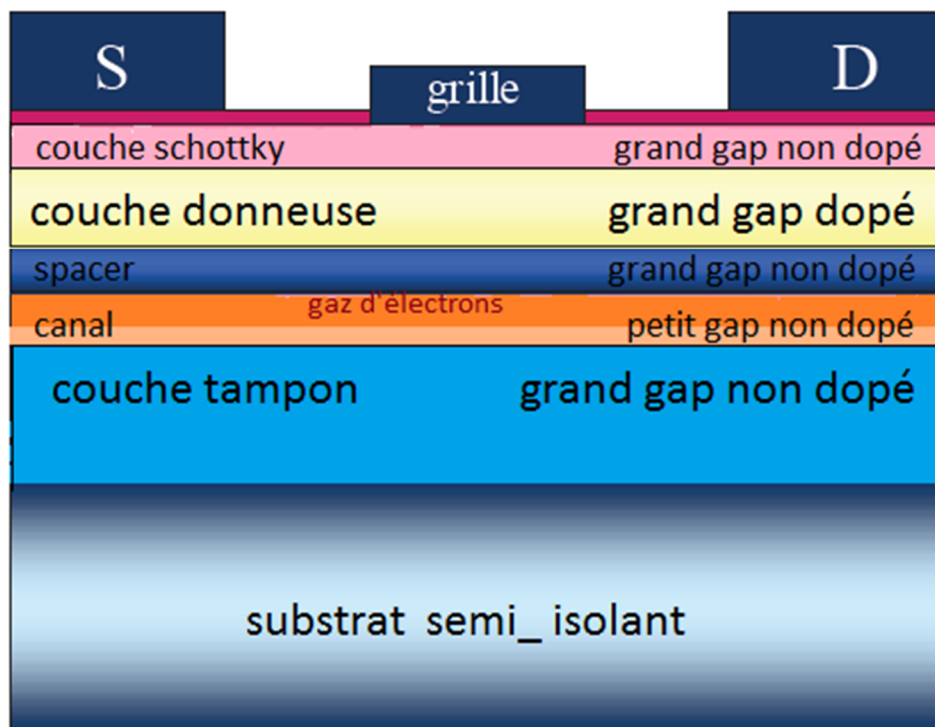


Figure1.7 : structure physique de base d'un HEMT

1.8 Choix d'un substrat pour les nitrures :

Le choix d'un substrat est un des paramètres essentiels à la réalisation de bonnes couches cristallines. Le cas idéal serait de déposer GaN sur un substrat GaN massif présentant une bonne qualité structurale (homo-épitaxie). Cette technique consiste à faire croître une couche de GaN sur un substrat, puis à la séparer de ce dernier. Les substrats en GaN de bonne qualité ont été fabriqués en utilisant le procédé de croissance de boules par HVPE (Hydrid Vapor Phase Epitaxy), avec des densités de dislocations de 5×10^6 à, c'est-à-dire environ 100 fois moins élevées que sur les meilleures couches réalisées avec substrat SiC. Des substrats en GaN sont déjà commercialisés et plusieurs équipes de chercheurs ont déjà réalisé des HEMTs prometteurs sur substrat GaN. La réalisation de substrats de nitrure de gallium représente un coût très élevé.

D'autres matériaux, comme GaAs, LiGaO₂, ou AlN, silicium, le saphir, et le carbure de silicium ont été essayés. Les hétéro-épitaxies sont délicates à réaliser du fait de la différence de paramètres de maille des différents matériaux en question, ce qui se traduit par la formation de défauts tels que des dislocations. [10] [11].

1.9 Epaisseur critique :

La croissance d'une couche contrainte sans une présence excessive de dislocations peut être obtenue si l'épaisseur de la couche est inférieure à l'épaisseur critique. Si la différence de paramètre de maille est faible et l'épaisseur de la couche n'est pas trop grande, les atomes de part et d'autre de l'interface sont en parfait alignement. Cet écart de paramètre de maille est totalement accommodé par la déformation élastique de la couche épitaxie. La croissance du film épitaxie est alors dite cohérent ou pseudo-morphique. L'énergie de déformation élastique dans la couche augmente d'une manière linéaire en fonction de l'épaisseur de la couche pseudo-morphique.

Lors de la croissance d'une couche contrainte épitaxie, des dislocations sont générées à cause de l'énergie élastique stockée dans la couche et leur création devient énergétiquement favorable si l'épaisseur du film dépasse une épaisseur supérieure à l'épaisseur de la couche pseudo-morphique thermodynamiquement stable. Cette épaisseur est définie comme l'épaisseur critique [12]. L'épaisseur critique calculée par Matthews et Blakeslee par la formule suivante :

$$L_C = \frac{a_{Couche}(1 - 0.25\nu)}{\sqrt{2\pi|e_{xx}|}(1 + \nu)} \left[\ln\left(\frac{\sqrt{2}L_C}{a_{Couche}}\right) + 1 \right] \quad (1.25)$$

Où ν le coefficient de Poisson.

$$\nu = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} \quad (1.26)$$

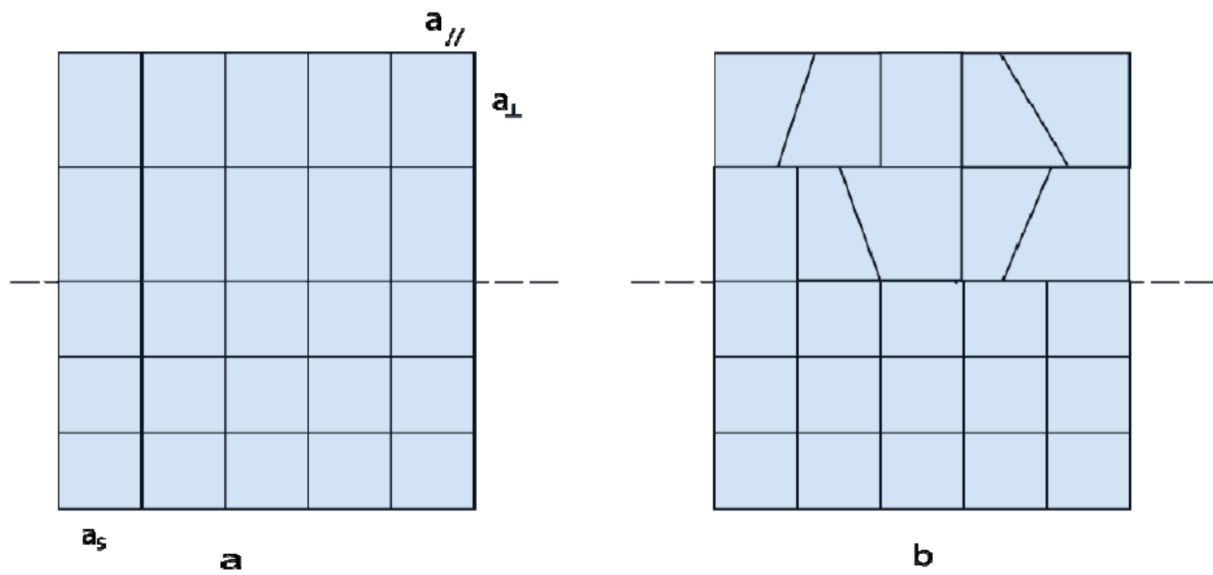


Figure 1.8 : schema montrant une couche contrainte en compression (a) et une couche contrainte relaxée(b)

1.10 Conclusion :

Nous avons introduit dans ce chapitre les principales caractéristiques du cristal GaN. Nous avons présenté dans un contexte général, les principaux paramètres physiques et électriques qui distinguent le GaN .

Les propriétés physiques du GaN, prédestinent cette filière technologique aux applications de puissance dans la gamme des hyperfréquences. En effet, ses qualités thermiques et son fort champ de claquage permettent d'utiliser des transistors à base de matériaux nitrurés pour de fortes tensions et donc de fortes puissances.

Chapitre 2 Le transistor HEMT AlInN/GaN

2.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord le composant électronique que nous allons étudier : le transistor à haute mobilité électronique (High Electron Mobility Transistor) à base de semi-conducteurs III-V grand gap. Ce composant électronique est très prometteur pour les applications de puissance hyperfréquence. Ensuite, on expliquera son principe de fonctionnement basé sur les propriétés de haute mobilité d'un gaz d'électron bidimensionnel 2DEG (Two Dimensionnel Electron Gaz.)

Les performances des HEMTs sont liées à l'utilisation des matériaux présentant des mobilités électroniques élevées.

2.2 Impact de la polarisation sur l'hétéro structure :

2.2.1 La polarisation spontanée :

Dans la structure du GaN hexagonal, il apparaît une succession des dipôles orientés dans la direction $[0001]$. Ces dipôles sont créés du fait des relations de voisinages entre les atomes d'azote et de gallium dans la structure cristalline. En effet on a un atome de gallium pour quatre d'azote pour face Ga, et un atome d'azote pour quatre atomes gallium pour face N. On en déduit l'existence d'une polarisation spontanée, qui est là en l'absence de toute influence externe, contrainte ou champ électrique, contrairement à la structure blende zinc où la polarisation spontanée se perd à cause de la forte symétrie cristalline sur l'axe c. Le sens de cette polarisation dépend de la face du GaN considérée. La valeur numérique de la polarisation spontanée du GaN ainsi que quelques éléments III-V est reportée sur le tableau 2.1 [13][14].

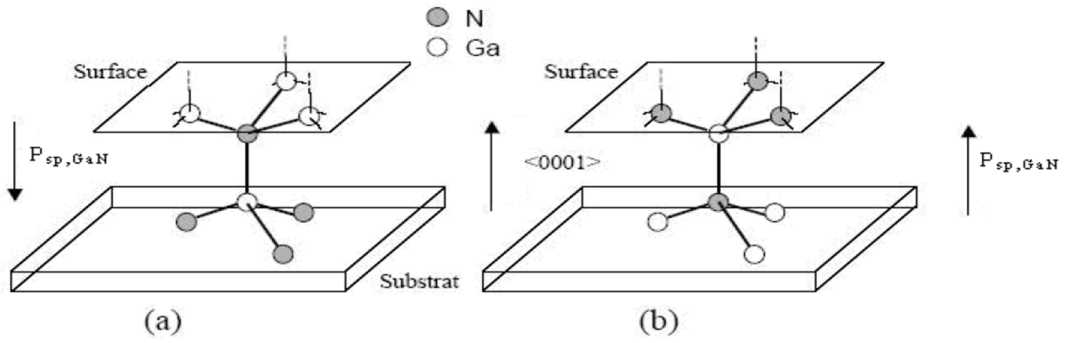


Figure 2.1 : polarité des couches hexagonales (a)polarité gallium,(b)polarité azote

L'expression de la polarisation spontanée :

$$P_s = P_s(AlN) * x + P_s(InN) * (1 - x) \quad (2.1)$$

2.2.2 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 due 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 [13]. Cette polarisation sera calculée à partir de la formule suivante :

$$P_{pz} = 2 * \frac{(a_{GaN} - a_{AlInN})}{a_{AlInN}} * \left(e_{31} - \frac{e_{33} * c_{13}}{c_{33}} \right) \quad (2.2)$$

e_{33} , e_{31} sont les constantes piézoélectriques

c_{13} , c_{33} sont les constantes élastique

Materiaux	GaN	InN	AlN
$a_0(A^\circ)$	3.189	3.540	3.112
$c_0(A^\circ)$	5.185	5.705	4.982
$P_s(c/m^2)$	-0.029	-0.032	-0.081
$e_{31}(c/m^2)$	-0.49	-0.57	-0.60
$e_{33}(c/m^2)$	0.73	0.97	1.46
$c_{13}(Gpa)$	103	92	108
$c_{33}(Gpa)$	405	224	373

Tableau 2.1: Liste des paramètres usuellement utilisés pour le (h-GaN) et InN et AlN

2.2.3 La polarisation sur l'hétéro structure AlInN/GaN :

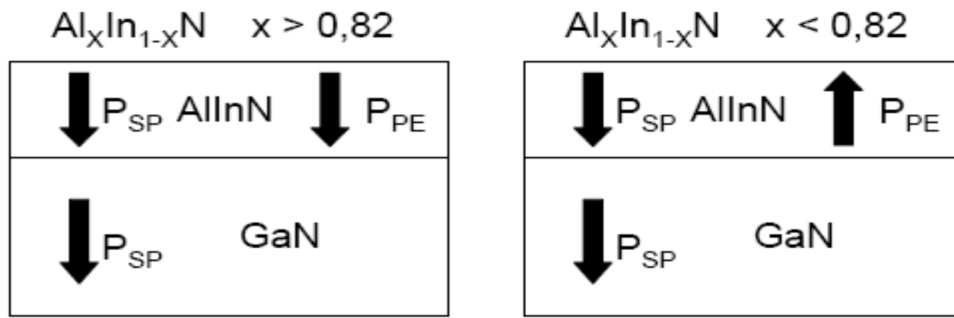
la polarisation totale de la couche de GaN ou celle de l' AlInN est la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique :

$$P_{AlInN} = P_s + P_{pz} \quad (2.3)$$

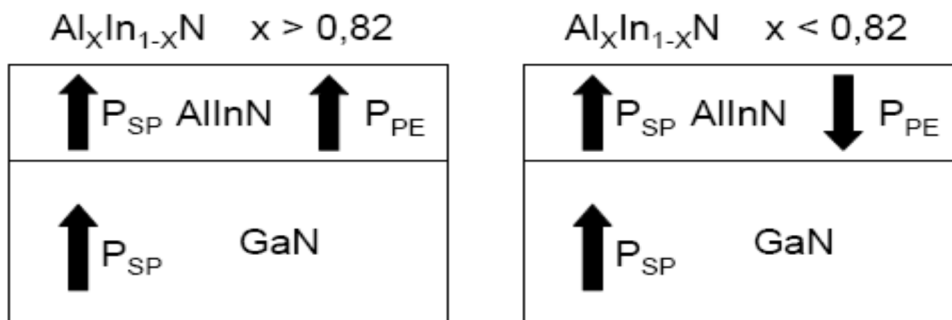
$$P_{GaN} = P_s + P_{pz} \quad (2.4)$$

La valeur positive ou négative de la polarisation de GaN dépendra du sens de l'orientation des deux polarisations. Ce sens est lui-même définit selon que la structure est sous traction ou compression. Si le cristal du GaN est sous contrainte tractive ou extensive, la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique sont de même sens et la polarisation totale s'en trouve augmentée. Par contre si le cristal est sous contrainte compressive, les deux polarisations sont de sens opposés, donc la polarisation totale diminue [12].

$$P = P_{AlInN} + P_{GaN} \quad (2.5)$$



Hétéro structure AlInN /GaN face Ga



Hétéro structure AlInN /GaN face N

Figure 2.2: Polarisation spontanée et piézoélectrique dans l'hétérostructure AlInN/GaN

2.2.4 Calcul de la densité de charge due à la polarisation :

La différence des polarisations piézoélectrique et spontanée entre les couches de l'AlInN/GaN détermine la densité de charges fixes à l'interface entre les deux matériaux, cette différence de polarisation induit une charge positive dans AlInN/GaN face-Ga avec

($x > 0,82$), et AlInN/GaN face-N avec ($x < 0,82$) (figure 2.3), les électrons sont alors attirés, par cette charge et finissent par s'accumuler à l'hétéro interface formant un canal conducteur. Dans le cas des structures AlInN/GaN face-N avec ($x > 0,82$), et AlInN/GaN face-Ga avec ($x < 0,82$), la densité de porteurs fixes induite est négative. Ce sont les trous de même nature qui participeront à la conduction du courant dans ce puits [11][13] [15].

La densité de charge fixe associée à la variation de la polarisation entre ces deux couches est donnée par relation suivante:

$$\sigma_{interface}(x) = P_{GaN} - P_{AlInN} \quad (2.6)$$

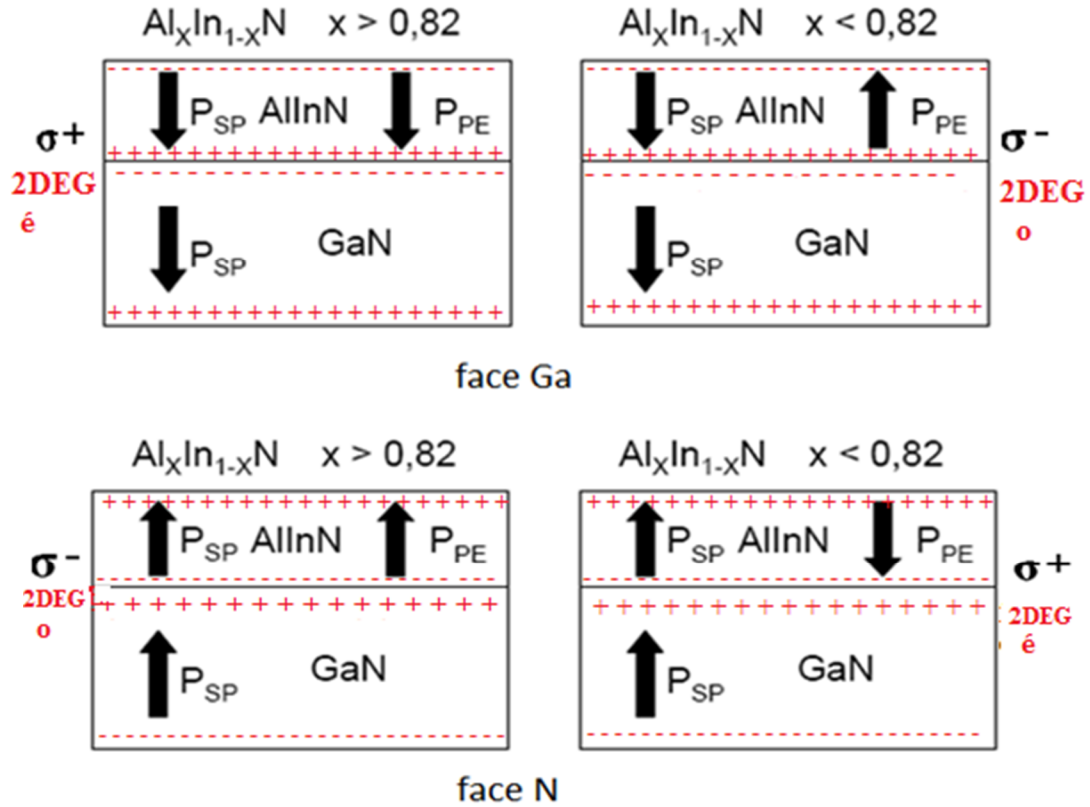


Figure 2.3: la densité de charge présentée à l'interface de l'hétéro structure AlInN/ GaN

2.3 L'effet fondamental de transistor :

Le transistor HEMT possède plusieurs dénominations : il est également appelé TEGFET (Two-dimensional Electron Gas Field Effect Transistor) ou MODFET (Modulation Doped Field Effect Transistor). Depuis son apparition. Il est désormais un élément essentiel pour les applications d'amplification aux hautes fréquences. Il présente une hétérojonction, une jonction entre deux matériaux ayant des énergies de bande interdite différentes. La conséquence de cette hétérojonction est la création d'un canal très fin dans le matériau non dopé de très faible résistance, entraînant une mobilité d'électrons élevée (origine du nom HEMT). Cette couche est appelée gaz d'électrons à deux dimensions (origine du nom TEGFET) et est la conséquence de polarisations piézoélectriques et spontanées [16].

2.3.1 L'hétérojonction :

Pour mieux comprendre son fonctionnement, nous allons étudier brièvement les structures de bande des matériaux mis en jeu dans un HEMT AlInN/GaN. L'hétérojonction formée par la juxtaposition de deux matériaux dont les largeurs de bande interdite sont différentes, l'un présentant un large gap et l'autre un plus faible gap, entraîne la formation d'une discontinuité de la bande de conduction à l'interface ΔE_c . La figure suivante présente les niveaux d'énergie mis en jeu dans chacun des matériaux de l'hétérojonction considérés séparément, c'est-à-dire avant contact.

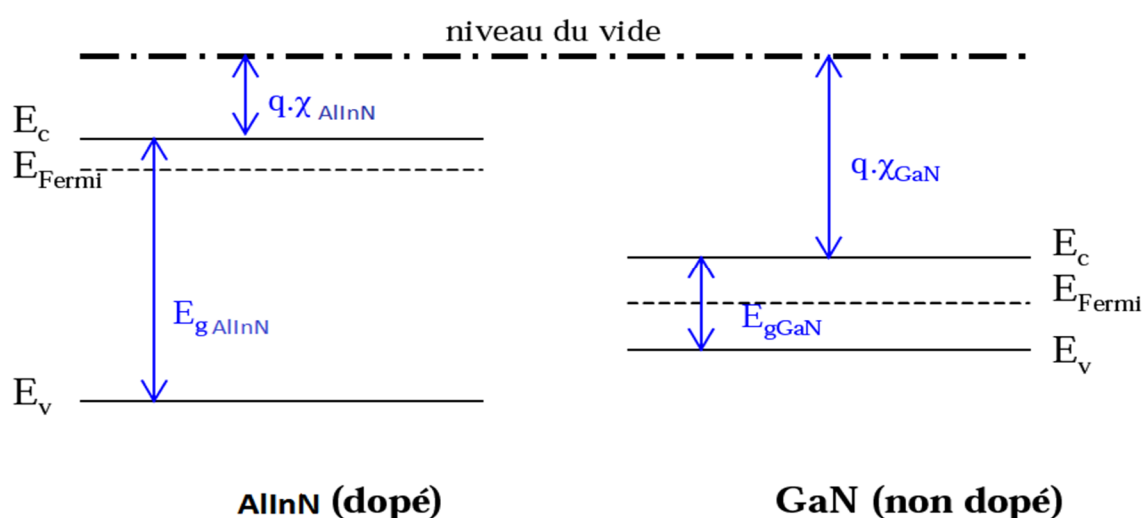


Figure 2.4: niveaux d'énergie des matériaux mis en jeu dans l'hétérojonction

Après la jonction des deux matériaux, leur niveau de Fermi s'aligne. La conservation des paramètres physiques de part et d'autre de l'interface entraîne des courbures des bandes de conduction et de valence, ainsi que des discontinuités à l'interface pour ces deux bandes. Cette hétérojonction entraîne la formation d'un puits de potentiel dans le matériau à petit gap où transférant et s'accumulent les électrons provenant de la couche donneuse dès lors qu'il existe une discontinuité de bande de conduction ΔE_c .

Nous appelons alors gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG), l'accumulation des électrons dans ce puits. finalement l'hétérojonction permet de réaliser la séparation spatiale des atomes donneurs ionisés et des électrons libres, ces électrons ne sont pas donc plus soumis aux interactions avec les impuretés ionisées [17] [18].

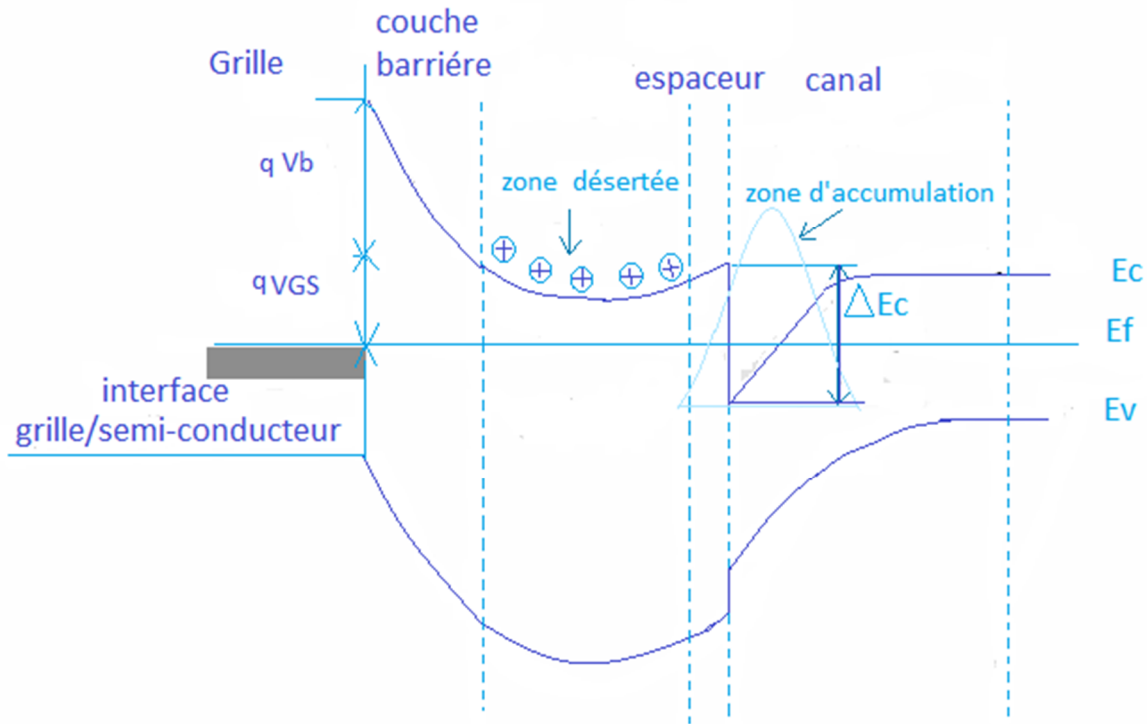


Figure 2.5 : Formation du gaz bidimensionnel à l'interface de deux matériaux à grande et à petite largeurs de bande interdite.

Les discontinuités des bandes de conduction E_c et E_v sont calculées par les équations suivantes [14] .

$$\Delta E_c = \chi_{GaN} - \chi_{AlInN} \quad (2.7)$$

$$\Delta E_v = (\chi_{GaN} + E_{gGaN}) - (\chi_{AlInN} + E_{gAlInN}) \quad (2.8)$$

a. La formation de gaz d'électrons bidimensionnel 2DEG :

La polarisation spontanée peut générer des champs électriques de 3MV/cm dans les matériaux de type III-V et la contrainte de la couche supérieure des hétéro structures AlInN/GaN ou AlGaIn/GaN peut générer un champ piézoélectrique additionnel d'environ 2MV/cm. Ces très fortes polarisations engendrent des champs électriques permettant la formation d'un gaz bidimensionnel d'électrons avec des densités de porteurs très élevées [19].

➤ Calcul de la concentration n_s du 2-DEG :

La charge fixe induite par le changement de la polarisation des deux couches attirera à l'interface, une charge mobile compensatrice de signe opposée (Figure 2.6).

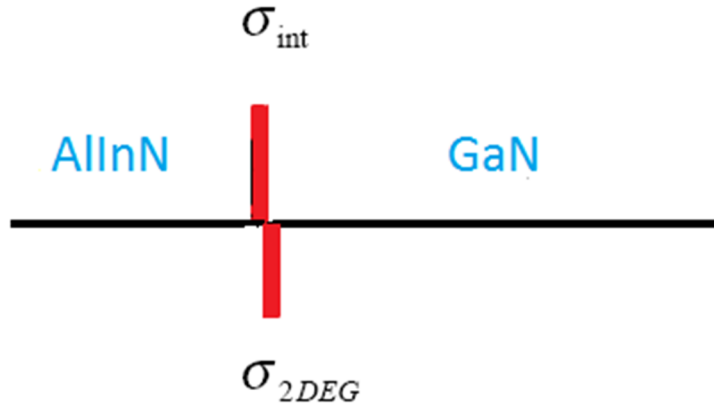


Figure 2.6 : Diagramme des densités de charges présentes à l'hétérojonction

La concentration n_s des électrons attirés par cette densité de charge pour une structure AlInN/GaN sera donnée par l'expression [13] :

$$n_s = \frac{\sigma_{int}(x)}{q} - \left[\frac{\varepsilon_0 \varepsilon(x)}{dq^2} \right] (q\phi_b(x) + E_F(x) - \Delta E_c(x)) \quad (2.9)$$

où :

$\sigma_{int}(x)$: la densité de charges fixée à l'interface.

$\Delta E_c(x)$: La discontinuité entre les couches du GaN et AlInN.

$\phi_b(x)$: La hauteur de la barrière du AlInN qui est de la forme :

$$\phi_b = \phi_{AlN} * x + (1 - x) * \phi_{InN} \quad (2.10)$$

E est approximé par :

$$E_F(x) = E_0(x) + E_1(x) + \hbar^2 / (4\pi * m^*(x)) * n_s(x) \quad (2.11)$$

$E_0(x)$ et $E_1(x)$ sont les niveaux d'énergie du puits quantique formé entre les deux Semi-conducteurs et sont exprimés par :

$$E_0(x) = \gamma_0 n_s^{2/3} (\text{ev}) \quad (2.12)$$

$$E_1(x) = \gamma_1 n_s^{2/3} (\text{eV}) \quad (2.13)$$

$$\gamma_0 = 2.123 \cdot 10^{-12} \text{ et } \gamma_1 = 3.734 \cdot 10^{-12}$$

ϵ_0 : la permittivité de vide est égale à $8.854 \cdot 10^{-14} (\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$.

$\epsilon(x)$: la permittivité de AlInN qui sous la forme :

$$\epsilon(x) = \epsilon_{rAlN} * x + (1 - x) * \epsilon_{rInN} \quad (2.14)$$

	AlN	InN
$\epsilon_r \text{ (Cm}^{-1} \text{ V}^{-1}\text{)}$	9.14	15

Tableau 2.2 : Les paramètres de la permittivité relative de AlN et InN

b. Contacts Schottky et Ohmiques :

Les contacts utilisés sur le semi-conducteur pour la réalisation des connexions, nécessitent généralement une métallisation préalable des zones concernées. En effet, la réalisation d'une jonction M-S forme une barrière Schottky qui présente un effet redresseur, mais le niveau du potentiel de cette barrière peut être rendu pratiquement négligeable, par un choix correct du métal utilisé et un dopage suffisamment élevé du semi-conducteur. On obtient alors un contact à faible résistance et de caractéristique symétrique que l'on appelle contact ohmique [03].

1. Le Contacts Schottky :

Le contrôle de la charge du gaz-2D d'électrons se fait en faisant varier la position du puits de potentiel par rapport au niveau de Fermi, soit en faisant varier la densité électrique de porteurs dans le puits. La modulation du gaz bidimensionnel d'électrons de l'hétérostructure est obtenue par l'action d'une tension négative sur un contact Schottky. Il est formé par un dépôt métallique (la grille du transistor) sur un matériau semi-conducteur.

Le contact métal/semi conducteur prévoit l'établissement d'une barrière de potentiel associée à une zone de charge d'espace qui dépend de la différence des travaux de sortie de métal ϕ_M et du semi conducteur ϕ_{SC} .

Considérons un semi-conducteur pour lequel $\phi_M > \phi_{SC}$, condition nécessaire pour créer un contact redresseur. Lorsque les deux matériaux sont mis en contact, les électrons du semi-conducteur transitent facilement vers le métal. Le diagramme de bandes résultant de ce transfert qui évolue jusqu'à l'alignement des niveaux de Fermi.

L'augmentation en négatif de la tension de commande appliquée sur la grille a pour effet d'augmenter la surface de la zone de charge d'espace venant obturer le canal pour une tension dite de pincement V_p . La figure 2.7 représente la forme des bandes de conduction théoriques d'un contact de type Schottky

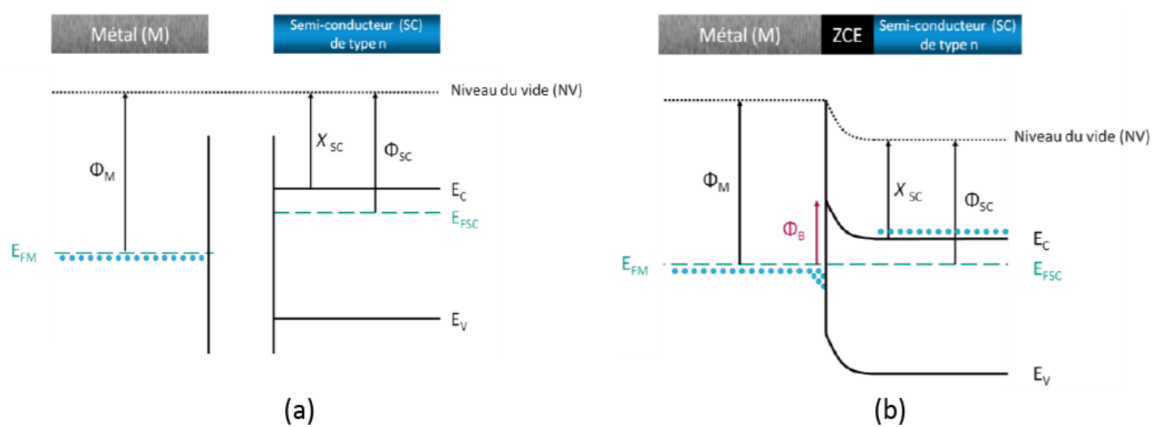


Figure 2.7: Schémas des diagrammes de bandes pour $\phi_M > \phi_{SC}$, (a) avant et (b) après réunion des deux matériaux[05].

La difficulté de réalisation d'un contact Schottky est d'obtenir une bonne modulation du gaz bidimensionnel du transistor tout en ayant peu de courant de fuite pour le contact, et une migration intermétallique nulle, afin de garantir la fonctionnalité du composant au cours du temps.

En réalité, il existe des états d'interface à la surface du semi-conducteur. Ces états énergétiques sont localisés à la surface du semi-conducteur et uniformément répartis dans la bande interdite du matériau. Leur origine physique peut être la présence d'une couche d'oxyde [14] [20].

2 Le contact ohmique :

Pour obtenir un contact ohmique, il faut que le travail de sortie des électrons du semi-conducteur soit supérieur à celui du métal. Si l'on met en contact un métal et un semi-

conducteur, un transfert de charge va se produire, jusqu'à ce que les niveaux de Fermi coïncident. La répartition des charges induit un champ électrique à l'interface, ce qui se traduit par une courbure des bandes d'énergie (figure 2.8).

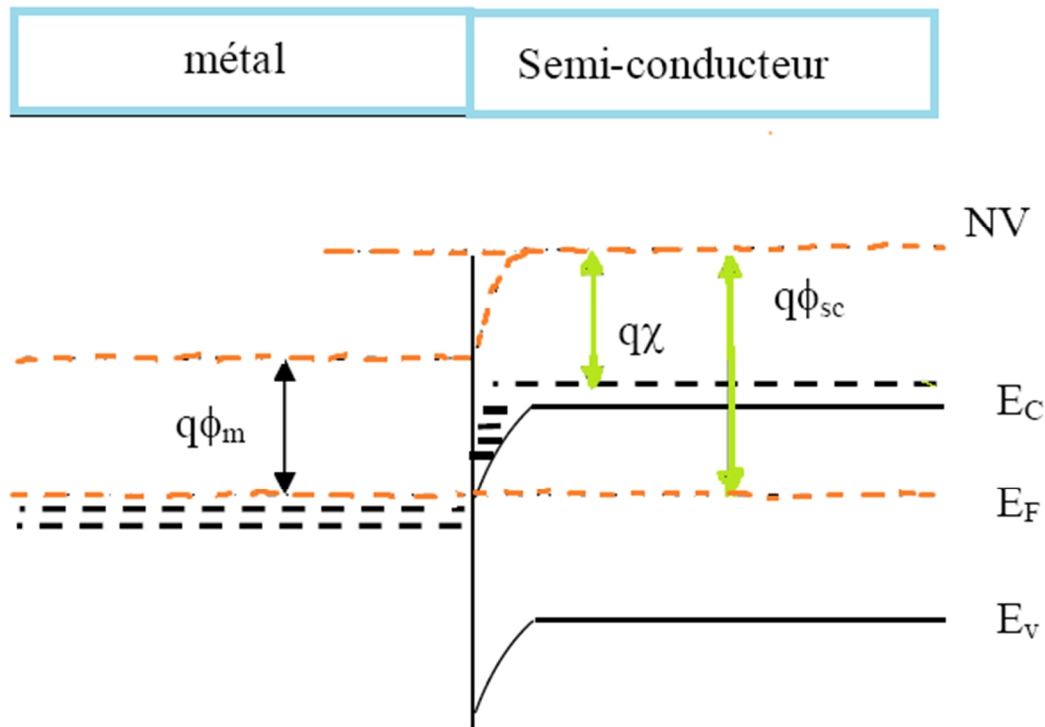


Figure 2.8 : le diagramme de bande d'énergie du contact ohmique.

La qualité du contact ohmique est contrôlée par la résistance spécifique qui doit être faible que possible puisque la résistance des contacts ohmiques peut limiter les performances du composant.[03][20][21].

2.4 Fonctionnement du HEMT :

Nous considérons maintenant une structure plus complète du transistor en l'hétérojonction et le contact métal/semi conducteur décrits précédemment.

La commande du gaz d'électrons bidimensionnel se fait en polarisant la jonction Schottky de grille réalisée sur la couche AlInN fortement dopée .Lorsqu'une tension V_{gs} est appliquée sur la grille l'équilibre thermodynamique est cassé, ce qui traduit par la déformation de la structure de bande [14].

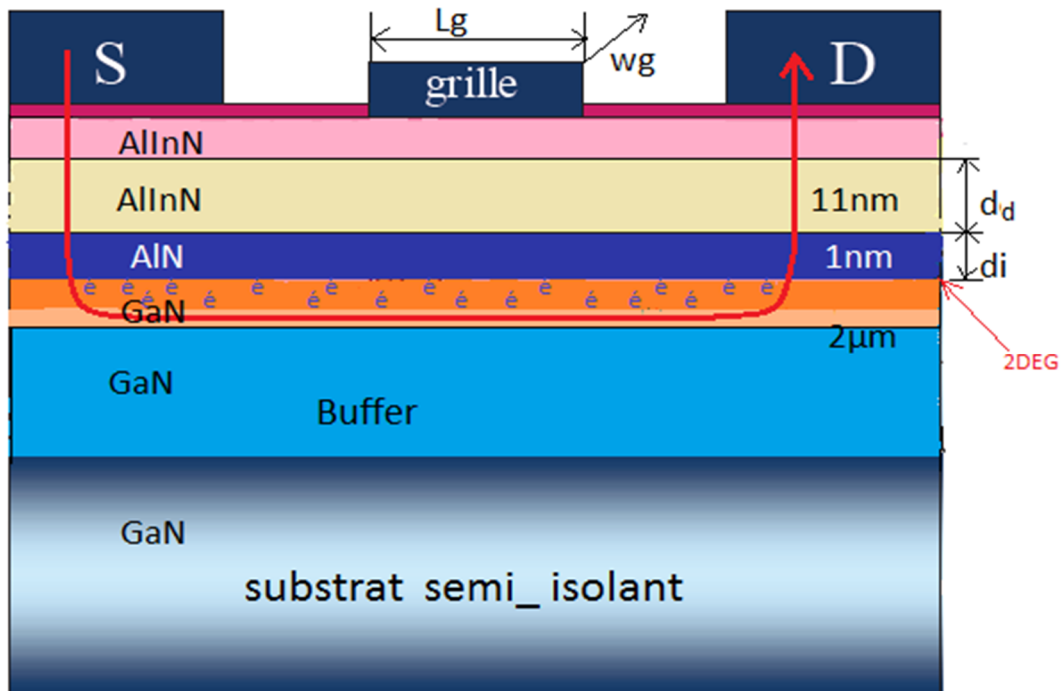


Figure 2.9: Schéma de passage de courant dans 2DEG.

On définit la tension de seuil du HEMT V_{th} , comme la tension de polarisation qu'il faut appliquer à la grille pour amener la surface du GaN au seuil d'inversion. on obtient l'expression de la tension de seuil V_{th} dans le cas de l'hétéro-structure AlInN/AlN/GaN avec couche espaceur AlN [22] :

$$V_{th} = \frac{\phi_b}{q} - \frac{\Delta E_c}{q} - \frac{qN_d}{2\varepsilon} d_d^2 - \frac{\sigma_{int}}{\varepsilon} d \quad (2.15)$$

N_d : le dopage de la couche .

$d = d_d + d_i$ avec d_d épaisseur de AlInN dope (la couche donneuse)

et d_i épaisseur de la couche espaceur .

ε : la permittivité de AlInN.

2.4.1 Le courant drain source :

En appliquant une tension entre la source et le drain, les porteurs libres du canal 2DEG sont soumis à un champ électrique et acquièrent alors une vitesse $v(x)$, qui dépend du champ électrique en x .

Il se crée alors un courant I_{ds} égal a:

$$I_{ds} = qn_s v(E)Z \quad (2.16)$$

Z : représente la largeur de grille.

$v(x)$: est la vitesse de déplacement des électrons à la position x .

n_s : concentration du 2-DEG .

On obtient une relation générale de I_{ds} en fonction de la polarisation :

$$I_{ds} = \frac{\epsilon}{d} \frac{Z}{L} \mu_n (V_{gs} - V_{th}) (V(L) - V(0)) \quad (2.17)$$

avec

μ_n : la mobilité des électrons .

L : la longueur de la grille.

En fait , quand on polarise simultanément le drain et la grille du transistor on obtient un réseau de caractéristique donnant l'évolution du courant I_d en fonction de la polarisation V_{ds} pour différentes tensions de grille V_{gs} .On distingue deux zones dans cette caractéristique : Une région de fonctionnement linéaire pour de faibles valeurs de V_{ds} et une région de fonctionnement saturé[12][14][17].

a. Fonctionnement en régime linéaire :

Pour de faibles valeurs de la tension drain-source V_{ds} , plus cette tension augmente et plus la mobilité des électrons dans le canal augmente, induisant un accroissement du courant I_{ds} . C'est-à-dire le courant de drain varie linéairement avec la tension de polarisation V_{ds} [17][22]. Le courant drain –source en régime linéaire :

$$I_{d \text{ lin}} = \frac{\epsilon}{d} \frac{Z \mu_n}{L} [(V_{gs} - V_{th}) V_{ds}] \quad (2.18)$$

b. Fonctionnement en régime saturée :

La saturation du courant se produit lorsque la tension drain-source devient importante. la population d'électrons est réduite coté drain en raison du fort champ électrique régnant a cet endroit ,le courant arrête son augmentation .cela s'explique par deux phénomènes :

➤ La tension de pincement :

La saturation du courant de drain est causé par le pincement du canal coté drain. Lorsque V_{ds} augmente ,on observe une extension de la zone de charge d'espace sous la grille coté drain qui ralentit le passage des électrons .on atteint ensuite le pincement du canal .le flux d'électrons est donc bloqué par cette barrière de potentiel ,qui est constant d'une valeur I_{dssat} qui dépend de V_{gs} [22].

➤ La saturation de la vitesse électronique :

la saturation de la vitesse électronique est liée au champ électrique .les électrons sont accélérés dans le canal par le champ électrique.

Donc, lorsque le champ électrique ne croit pas trop rapidement, les électrons circulent en régime stationnaire. Lorsque le champ sous la grille dépasse une valeur critique, les électrons ralentissent et s'accumulent dans le canal. En sortie de grille, le champ décroît et ils reprennent alors de la vitesse.

Le canal peut être découpé en deux zones : une partie libre où les électrons circulent en régime stationnaire et une partie saturée où ils ont une vitesse limitée [14].

Expression du courant de drain en régime saturé :

$$I_{sat} = \frac{\varepsilon}{d} \frac{Z\mu_n}{L} \left[\left(V_{gs} - V_{th} - \frac{V_{dsat}}{2} \right) V_{dsat} \right] \quad (2.19)$$

avec

$$V_{dsat} = V_{gs} - V_{th} \quad (2.20)$$

2.5 La Mobilité dans les HEMTs basés sur GaN :

La mobilité des porteurs dans le canal dépend avant tout de la qualité cristallographique de l'hétéro-structure, notamment au niveau de l'interface où se forme le puits de potentiel. Les densités de dislocations sont un facteur limitant la mobilité. Dans le cas de l'hétéro-structure AlInN/GaN, une augmentation de la fraction molaire d'aluminium engendre une augmentation de la densité des porteurs dans le canal. Cependant, cette augmentation de la densité des porteurs va de paire avec une augmentation de l'épaisseur du canal.

Des études portant sur les processus d'interaction limitant la mobilité électronique du gaz électronique bidimensionnel dans une structure AlInN/GaN en fonction de la densité de porteurs dans le canal et de la densité de dislocations. Pour les faibles valeurs de densité de porteurs, la mobilité est principalement limitée par les interactions avec les dislocations, qui d'une part piègent des charges, et d'autre part induisent un champ électrique associé aux contraintes que ces défauts exercent dans le cristal. Pour les plus fortes valeurs de densité de porteurs, la rugosité d'interface est le processus d'interaction déterminant la mobilité des porteurs[12] [23]. La mobilité s'écrit donc :

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad (2.21)$$

avec :

τ : est le temps de relaxation.

m^* : la masse effective des porteurs.

2.6 Courant de fuite des porteurs aux hétéro interfaces :

Le courant de fuite J_{fuite} est lié à la diffusion et à la dérive des porteurs au niveau des hétéro interfaces. Dans une structure laser à multi-puits quantiques, il correspond à la fuite des porteurs vers les barrières et/ou vers les couches de confinement résultant d'une faible discontinuité de bande de conduction [24]. Cette fuite des porteurs à travers les hétéro interfaces est représentée en figure 2.10.

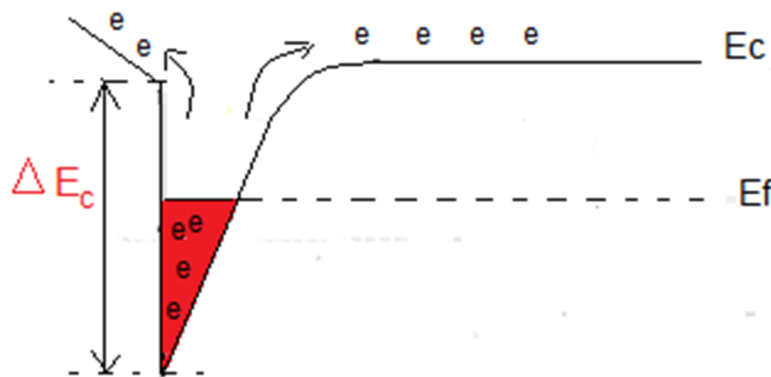


Figure 2.10 : Schématisation de la fuite des électrons vers les barrières ou vers la couche GaN

L'expression du courant de fuite des porteurs s'exprime par :

$$j_{\text{fuit}}(T) = (kT)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-\Delta E_c}{kT}\right) \quad (2.22)$$

avec :

K : la constante de Boltzmann.

ΔE_c : la discontinuité de bande de conduction.

Plus la discontinuité de bande de conduction ΔE_c est grande, plus le courant de fuite diminue.

2.7 Phénomènes limitatifs du HEMT :

Les performances des HEMTs AlInN/GaN sont fortement influencées par Les phénomènes limitatifs de fonctionnement du HEMT, et ils peuvent conduire à une limitation de la puissance de sortie. Ces effets peuvent être d'origine thermique, ou physique.

2.7.1 Les pièges :

L'existence d'impuretés ou de défauts dans le réseau cristallin et sur la surface entraîne des phénomènes de pièges. ces impuretés génèrent des états énergétiques qui peuvent être occupés par des porteurs dans la bande interdite du matériau. Ces phénomènes se caractérisent par des vitesses de captures rapides (quelques nanosecondes à quelques centaines de nanosecondes) et des vitesses d'émissions très lentes (de quelques microsecondes à plusieurs secondes). D'un point de vue électrique, les pièges peuvent être séparés en deux familles : ceux qui réagissent à des changements de polarisation de grille, générant les effets dits de « gate-lag », et ceux qui réagissent à des changements de polarisation de drain, générant les effets dits de « drain-lag » [25][26].

a. Le mécanisme de drain-lag :

Le phénomène de drain-lag se traduit par une chute brutale du courant de drain. Le piège capture donc l'électron au cours de l'élévation de tension drain pour le réémettre lorsque V_{DS} diminue (figure 2.11). cet effet est en rapport avec le champ électrique généré par la tension de drain. la chute de courant est due à l'injection d'électrons lors de l'application de d'une impulsion de drain.

La localisation des pièges à la surface du composant ou dans la couche tampon n'élimine pas l'hypothèse que certains porteurs peuvent aussi être piégés dans la couche barrière. sous un

champ électrique moyennement fort, appliqué entre la grille et le drain, les électrons du canal peuvent être injectés dans la couche barrière d'AlInN. Piégés dans cette couche, les porteurs désertent davantage le canal et conduisent à une réduction du courant I_{DS} . D'autres travaux ont étudié l'effet du champ électrique sur le mécanisme de piège des porteurs dans la couche barrière. Ils ont montré l'existence de certains mécanismes de conduction assistés par les défauts dans la couche barrière lorsque les électrons sont injectés par la grille sous une polarisation négative[25][26][27].

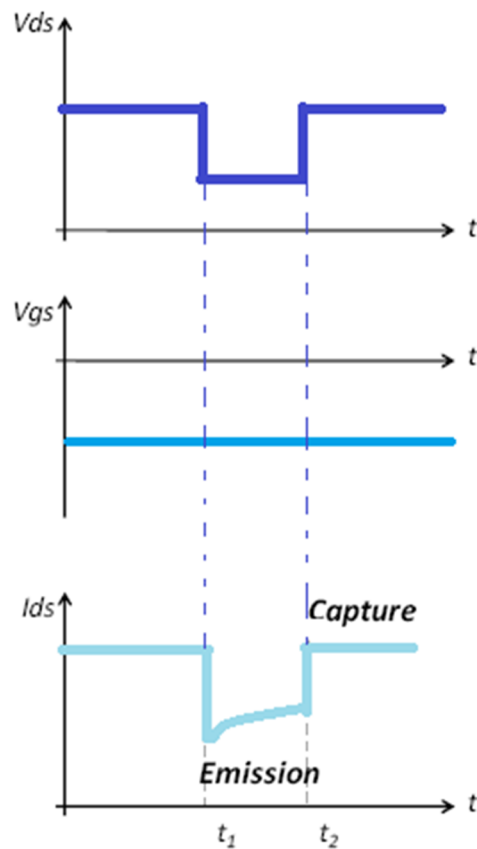


Figure 2.11 : Mise en évidence du phénomène de drain-lag, et des phases de capture et d'émission

b. Le mécanisme de gate-lag :

Il intervient lors d'une variation brusque de la tension appliquée sur l'accès de grille. Il est représentée sur la figure 2.12, le porteur de charge qui avait été capturé est lentement réémis.

Les pièges qui sont responsables du gate-lag sont généralement situés en dessous de la grille. L'interface entre le semi conducteur et le contact métallique doit être de très bonne qualité. Cette zone est très sensible aux effets de surface qui sont liés à la fois à la nature du cristal et à la technologie utilisée pour le dépôt métallique du contact Schottky, et les pièges qui sont localisés en surface du composant, en particulier entre la grille et le drain[25][26].

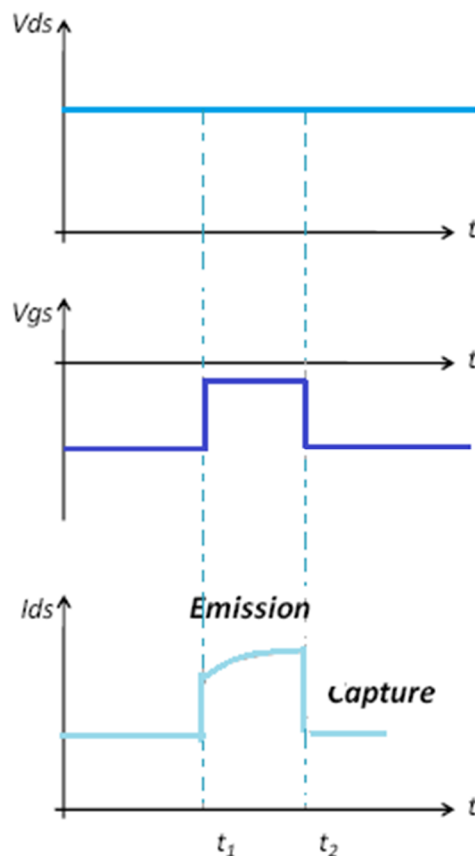


Figure 2.12: Mise en évidence du phénomène de gate-lag, et des phases de capture et d'émission

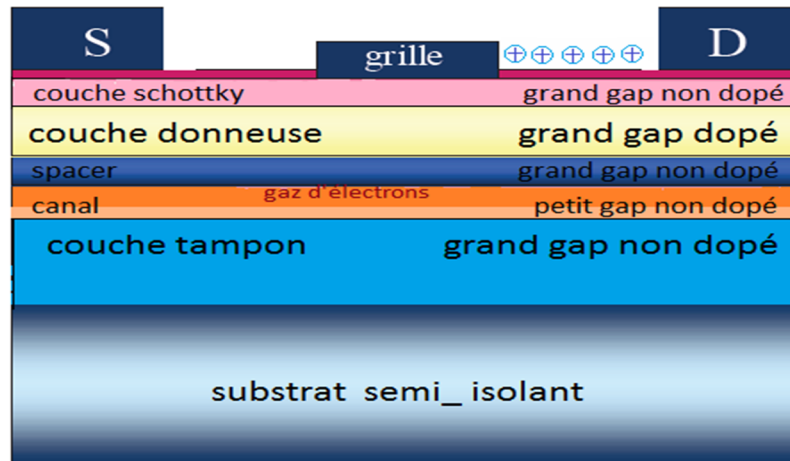


Figure2.13 : les pièges a la surface de grille drain

c. Comment minimiser les effets de piégeage :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les défauts présents dans la structure d'un HEMT sont une source majeure de l'effondrement du courant de sortie et de la limitation des performances en puissance et en fréquence de ces transistors. Ainsi, le contrôle de ces pièges, activés électriquement ou thermiquement, est important pour la fiabilité des composants surtout pour des applications qui nécessitent un fonctionnement à haute tension et à haute température[25].il ya deux solutions pour minimiser les pièges :

➤ La passivation

Pour réduire les effets de « gate lag »on dépose un film de diélectrique au dessus de la couche d'AlInN .les passivations les plus utilisées sont : SiN_4 , SiO_2 . Cette couche permet l'amélioration des performances du transistor, car elle contribue `à réduire certains effets de pièges. La figure 2.14 montre un exemple de passivation ajoutée a un transistor HEMT AlInN/GaN.

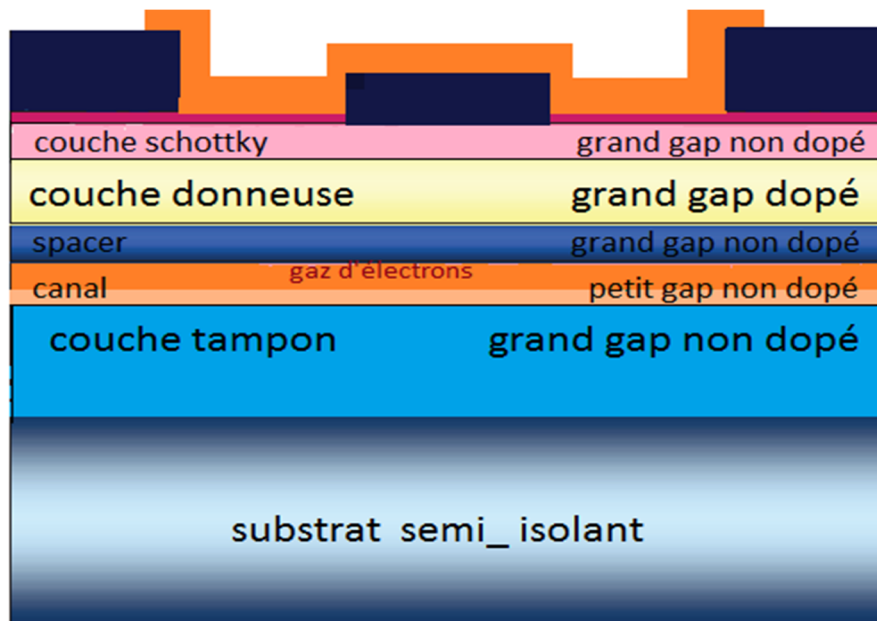


Figure 2.14 : HEMT AlInN/GaN avec couche de passivation

L'effet de la passivation sur le courant de sortie : augmentation de la concentration des porteurs dans le canal, et par conséquent elle élimine ou diminue la zone de déplétion créée à la surface, cette dernière est responsable de la diminution des fréquences de transition[27].

➤ Les plaques de champ (Field Plates) :

Une des améliorations certainement les plus remarquables a été l'ajout d'un "Field Plate" au-dessus de la structure de base déjà passivée précédemment décrite. On trouve sur la figure 2.15 le principe d'ajout d'une métallisation de grille s'étendant du côté du drain.

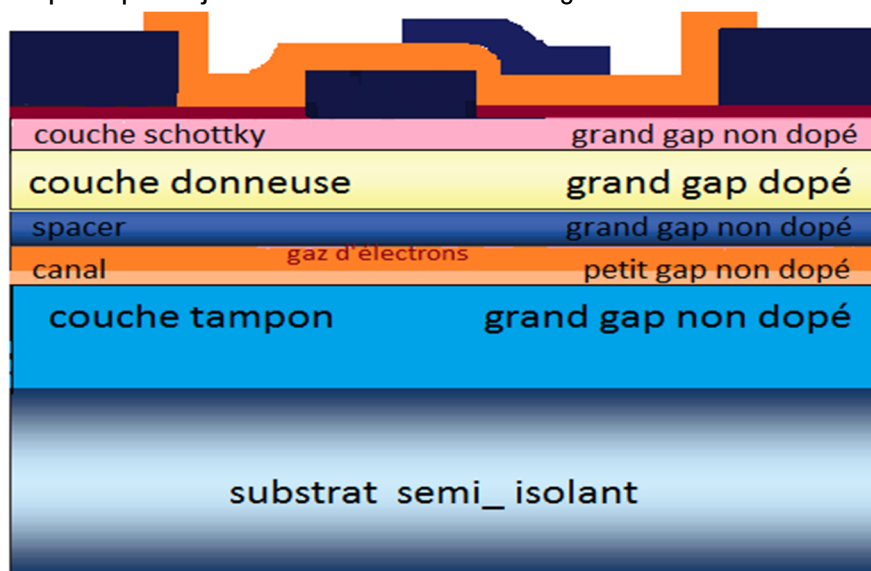


Figure 2.15: HEMT AlInN/GaN avec passivation et Field Plate

L'efficacité de ce nouveau type de structure a fait ses preuves en améliorant le champ de claquage et en limitant les effets de pièges. Elle a donc apporté une rupture en termes de puissance de sortie [28].

2.7.2 Les effets thermiques :

L'état thermique d'un composant résulte de la température ambiante et de l'auto-échauffement du transistor. Lorsque la puissance dissipée augmente, la température augmente, faisant chuter la mobilité ; en résulte une chute du courant de drain. En clair, une forte élévation de température altère de façon importante les performances des transistors. Elle est souvent liée à des fuites par le contact de grille et par le substrat. Les courants de fuites de contact de grille augmentent avec la température. L'augmentation de la conductivité du substrat avec la température est responsable de ces fuites. Ces courants de fuites de substrat sont liés à l'augmentation de la conductivité du substrat, ce phénomène est très marqué pour les substrats qui ne sont pas semi isolant à l'état naturel [27][28].

2.7.3 L'ionisation par impact :

En fonctionnement, lorsque la polarisation drain source augmente, le champ électrique devient intense dans le canal coté drain. Sous l'effet de ce fort champ, les électrons sont accélérés et entrent en collision avec les atomes du réseau. Ces atomes alors ionisés créant des paires électrons-trous. Les électrons s'ajoutent au courant de drain tandis que les trous sont collectés par la grille. À très fortes tensions de drain, ces électrons issus de l'ionisation sont accélérés à leur tour et ionisent d'autres atomes ce qui entraîne un phénomène d'avalanche [22].

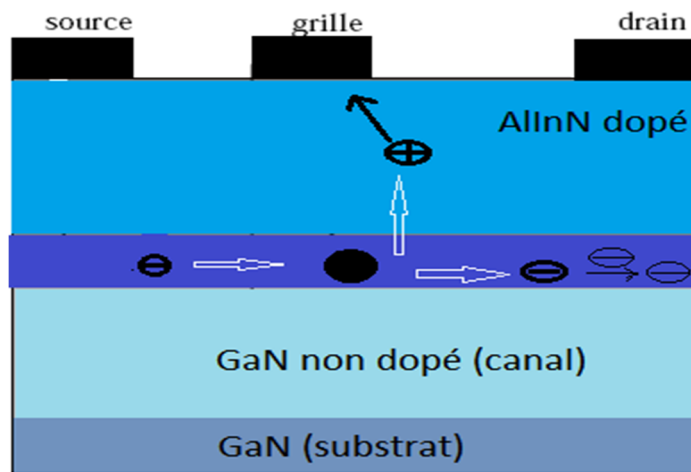


Figure 2.16 : création de paires électrons /trou par ionisation par impact dans le canal d'un transistor

2.7.4 L'effet kink :

L'effet kink(coude) correspond à une augmentation rapide du courant de drain au-delà d'une certaine tension de drain appelée tension de kink ou tension de coude, que l'on notera V_{kink} . Cependant l'origine de ce phénomène est encore aujourd'hui au centre des discussions.

L'effet de kink induit par le mécanisme d'ionisation par impact. Les électrons générés sont collectés par le drain, et les trous accumulés vers la grille, entraînant l'augmentation du courant de drain[14].

2.8 La technologie d'amplification:

Le transistor HEMT GaN fait l'objet depuis quelques années de très nombreux travaux de recherches. Des transistors de petits développements ($256\mu m$) ont permis de démontrer des densités de puissance records de $40W/mm$ à $4GHz$. De même, des amplificateurs de fortes puissances (supérieures à $100W$) ont pu être réalisés, leurs transistors constituant alors des densités de puissance de l'ordre de $10W/mm$. Le tableau 2.7 Recense l'état de l'art des amplificateurs HEMTs sur le nitrure de gallium [26].

type	Bande de fréquence(MHz)	Puissance de sortie (W)	Tension (V)	Gain en puissance (dB)	Rendement de drain (%)
EGN35A180IV	3400-3600	180	50	9	50
EGN35A090IV	3400-3600	100	50	9	50
EGN35A030MK	3400-3600	40	50	9	50
EGN26A180IV	2500-2700	180	50	11	55
EGN26A090IV	2500-2700	100	50	11	55
EGN26A030MK	2500-2700	40	50	11	55

Tableau2.3 :caractéristiques des transistors HEMT GaN

2.9 Conclusion :

Nous avons étudié le fonctionnement du transistor HEMT au travers du principe de l'hétérojonction AlInN/GaN qui donne de bonnes propriétés de transport (forte densité de porteurs, une bonne mobilité et une haute vitesse de saturation) .

On a aussi vu que la tension de seuil est plus dominée par la densité de charge induite par la polarisation. Nous avons étudié les caractéristiques $I(V)$ de la structure AlInN/GaN et montré des valeurs de courants en accord et en extension.

A partir de cette structure, nous avons vu que le courant de fuite des porteurs à l'hétéro interface dépend de la discontinuité de la bande de conduction (ΔE_c), donc pour diminuer le courant de fuite il faut augmenter ΔE_c .

Les facteurs limitatifs ont été identifiés qui sont l'ionisation par impact empêchant la montée en tension ,également l'effondrement des propriétés de transport liées a la montée en température pendant le fonctionnement en puissance, mais aussi les pièges en surface et en volume qui provoque un effondrement de la densité de puissance en fonctionnement hyperfréquence et la réduction des phénomènes de pièges en ajoutant une couche d'oxyde. Nous avons décrit la technologie pour l'amplification de puissance.

Chapitre 3 Résultats et interprétation

3.1 Introduction :

Ces dernières années, le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistors) à base d'hétéro structure AlInN/GaN et AlGaN fait l'objet d'intenses recherches et d'études. Celles-ci ont montré l'efficacité de ce composant pour des applications hyperfréquences nécessitant des tensions et des puissances élevées.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation du HEMT AlInN .nous étudions l'impact de la concentration d'aluminium sur le paramètre de maille, la contrainte et sur la structure de bande, la mobilité des électrons, et l'influence de la tension de drain et de la grille sur le courant de drain.

3.2 L'influence de la concentration d'aluminium (Al) sur le paramètre de maille :

Pour déterminer l'effet de l'aluminium (Al) sur le paramètre de maille de la structure AlInN nous avons varié x dans l'intervalle $[0 \ 1]$. Sur la figure 3.1 est représenté le paramètre de maille de la structure AlInN en fonction de la concentration de Al.

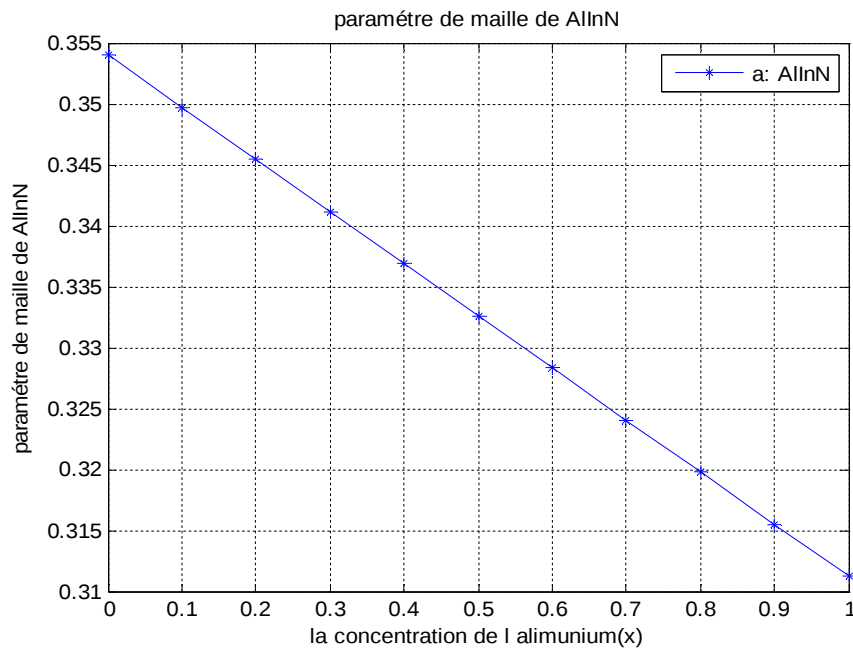


Figure 3.1 : le paramètre de maille de AlInN en fonction de la concentration d'Al

On constate que la diminution du paramètre de maille de la structure AlInN est due à la force de la torsion appliquée sur le paramètre de maille du InN, comme on peut le constater, pour $x = 0$ le paramètre de maille de la structure est égal à celui du InN.

L'augmentation de la concentration d'aluminium induit une diminution de paramètre de maille de l'alliage.

3.3 L'influence de la concentration de l'aluminium sur la contrainte :

En adaptation de maille les constantes du réseau de la couche déposée et du substrat étant égales ou peu différentes, les défauts à l'interface et les dislocations résultantes ne sont pas importantes. Dans le cas des alliages, cet accord de maille obtenu seulement pour des compositions bien précises, limite la gamme de compositions possibles et le type de matériaux à hétéro épitaxie. Les hétéro structures contraintes permettent un choix plus varié de matériaux. À partir de l'équation 1.9, on a calculé le désaccord de maille de notre structure $Al_x In_{(1-x)}N/GaN$ par rapport à la variation de la concentration d'aluminium dans l'alliage $Al_x In_{(1-x)}N$.

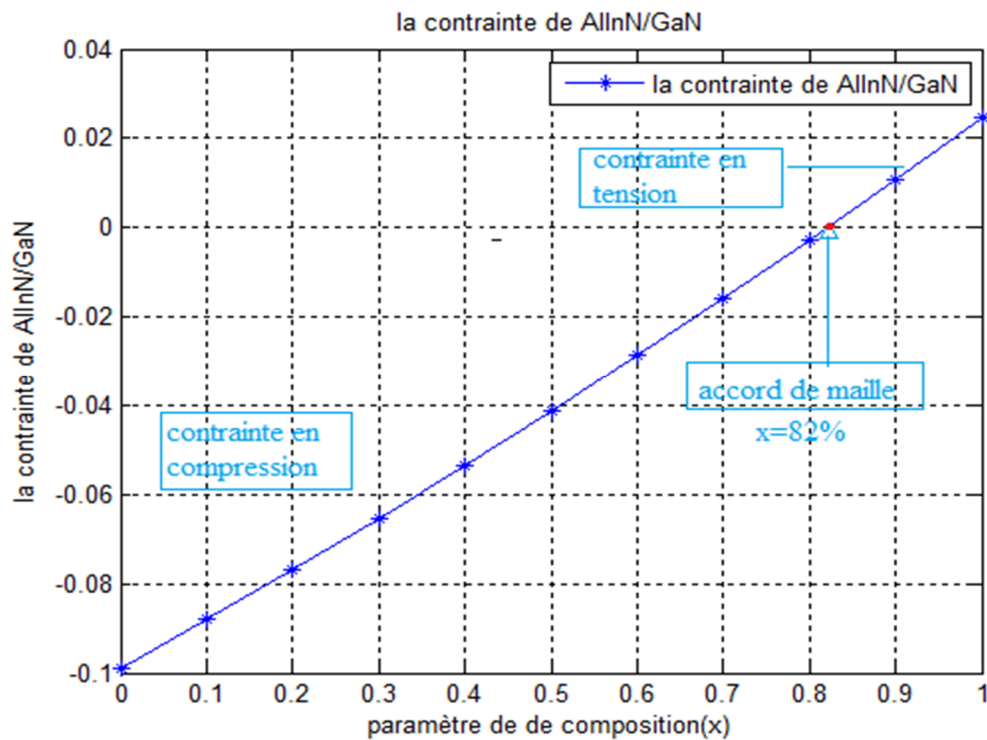


Figure 3.2 : variation de la contrainte en fonction de la concentration de l'aluminium

L'ajout de la concentration d'aluminium augmentera le désaccord de la structure telle que pour une concentration d'aluminium inférieure à 82% le paramètre de maille du substrat est supérieur au paramètre de maille de l'alliage, la contrainte de la structure est en compression, et pour $x=82\%$ le paramètre de maille de la structure est égale au paramètre de substrat donc l'alliage est en accord de maille avec le substrat, et pour $x>82\%$ le désaccord est positif c'est-à-dire la structure est contrainte en tension (le paramètre de maille du substrat est supérieure au paramètre de AlInN).

3.4 L'influence de la concentration de l'aluminium sur l'énergie de gap :

La structure de bandes des semi conducteurs IIIIV est directe C'est-à-dire que le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde k dans la structure de bandes.

Pour déterminer l'effet de l'aluminium sur l'energie de gap de la structure $Al_xIn_{(1-x)}N$, nous avons fait varier la concentration de l'aluminium dans l'intervalle $[0\ 1]$.

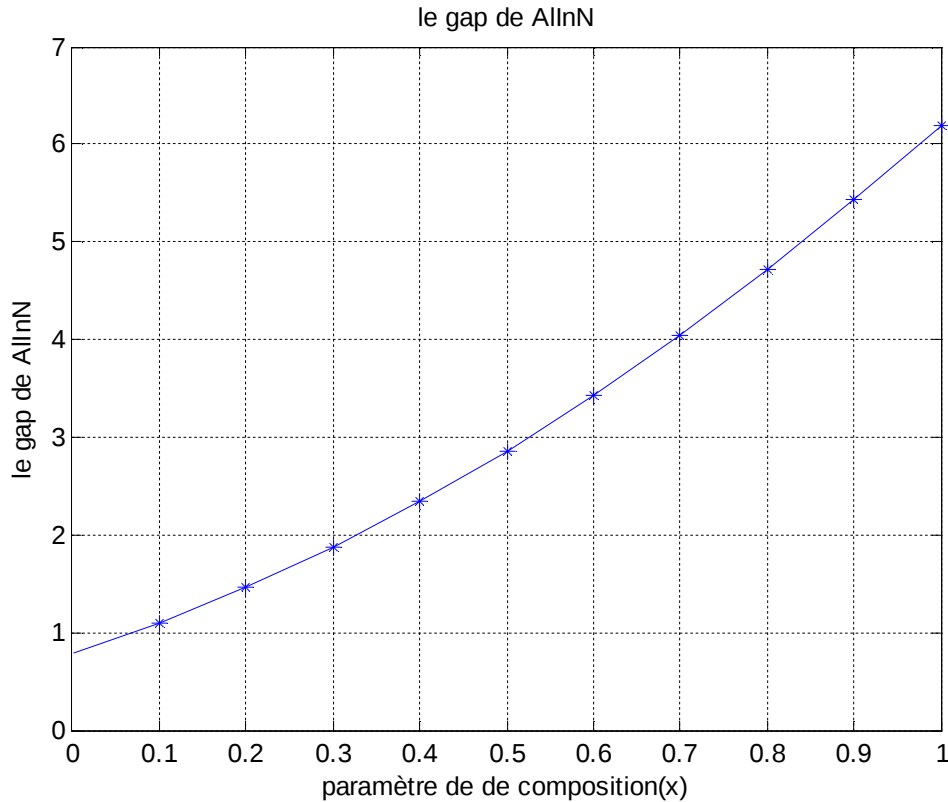


Figure 3.3 :L'énergie de la bande interdite E_g de la structure $AlInN$ en fonction du paramètre de composition

On peut voir que plus le pourcentage d'aluminium augmente l'énergie de la bande interdite augmente. Pour $x=82\%$ l'énergie de la bande interdite égale a 4.77ev.

3.5 L'influence de la contrainte sur l'énergie de gap :

Pour le système $Al_{(1-x)}In_xN/GaN$, la figure (3.4) donne la variation de l'énergie du gap dans les trois cas possibles (soumise à une contrainte en compression si la concentration de l'aluminium $x < 0.82$, à une contrainte en tension si la concentration de l'aluminium $x > 0.82$, et sans contrainte (accord de maille) pour une concentration de l'aluminium égale à 0.82).

On peut dire que la contrainte a un effet remarquable sur l'énergie du gap ; La contrainte compressive (pour $x \in [0, 0.82[$), l'énergie de la bande interdite contrainte plus grande que celle non contrainte, alors que pour la contrainte extensive (pour $x \in]0.82, 1]$), l'énergie de la bande interdite contrainte plus petite que non contrainte, comme il est illustré par la simulation représentée sur la figure 3.5.

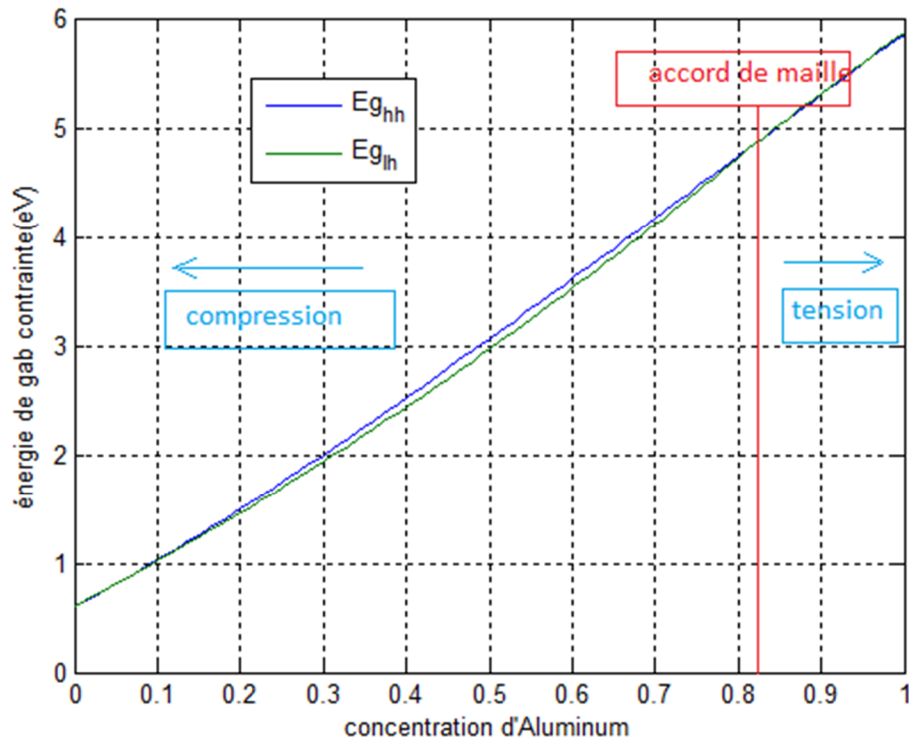


Figure 3.4 : Variation de l'énergie de la bande interdite de la structure contrainte sur

$Al_{(1-x)}In_xN / GaN$ en fonction de la concentration de l'aluminium.

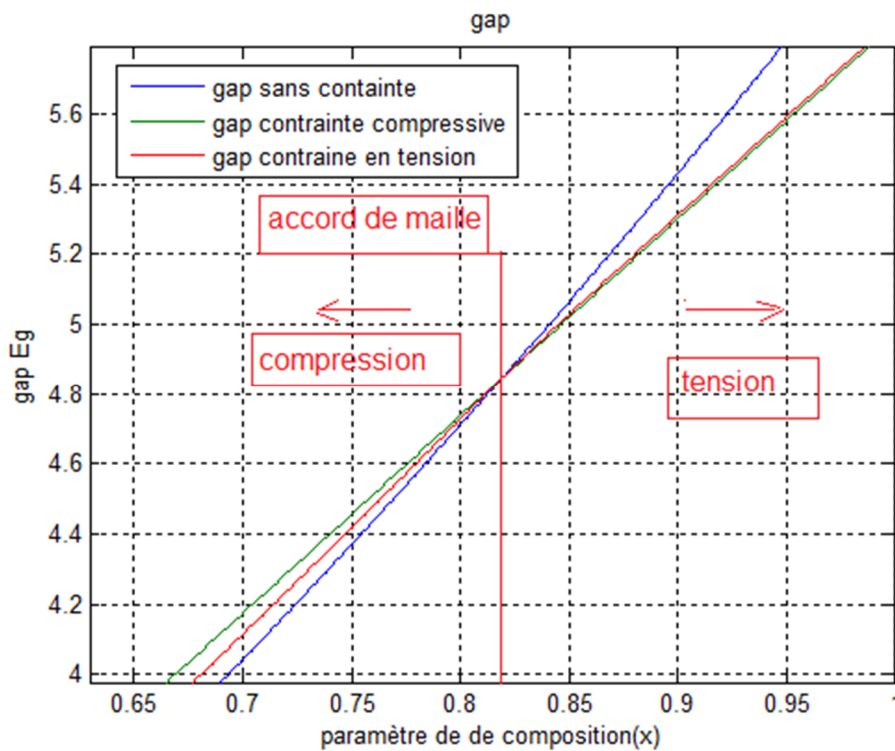


Figure 3.5 : Variation de l'énergie de la bande interdite de la structure contrainte et non contrainte sur $Al_{(1-x)}In_xN / GaN$ en fonction de la concentration de l'aluminium.

3.6 L'influence de la concentration de l'aluminium sur Epaisseur critique :

Pour calculer l'épaisseur critique de notre système $Al_{(1-x)}In_xN / GaN$, on définit l'épaisseur critique comme l'épaisseur à partir de laquelle une dislocation initialement présente à l'interface de contact, se propage latéralement sous l'effet du champ de contrainte. On remarque qu'il y a une faible épaisseur critique ($h_c < 100 \text{ \AA}$) pour une concentration d'aluminium entre $[0, 0.6[$, et une grande épaisseur critique ($h_c > 100 \text{ \AA}$) pour une concentration d'aluminium entre $]0.6, 1]$, comme il est représenté sur la figure 3.6.

en pratique il est difficile de réaliser une couche de l'épaisseur critique ($h_c < 100 \text{ \AA}$), pour notre projet on peut choisir une concentration d'aluminium supérieure à 0.6.

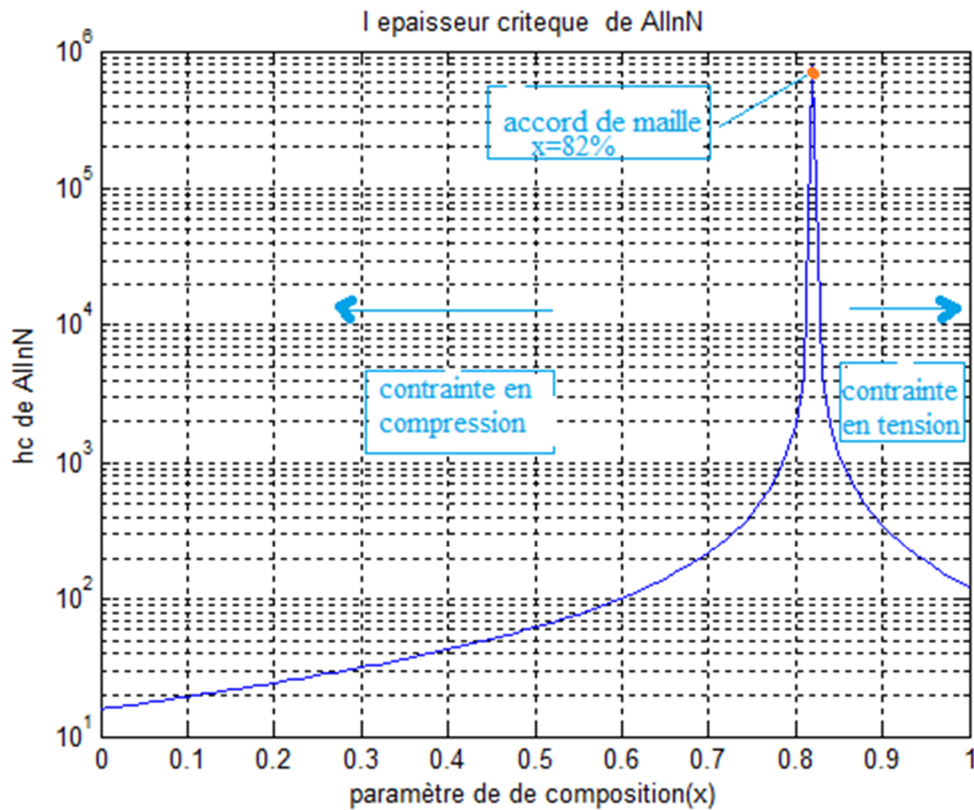


Figure 3.6 : Variation de l'épaisseur critique de la structure contrainte sur $Al_{(1-x)}In_xN / GaN$ En fonction de la concentration de l'aluminium.

3.7 L'influence de la concentration de l'aluminium sur la densité de l'interface :

La valeur de la polarisation piézoélectrique est négative pour les couches sous une contrainte extensive ($a > a_0$) et les deux polarisations P_{PZ} , P_{SP} , sont parallèles. Si la contrainte induite est compressive ($a < a_0$) la polarisation Piézoélectrique est positive et elle est antiparallèle avec la polarisation spontanée.

Pour une couche d' $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$, une composition en Al proche de 83% donne un accord de maille avec le GaN et par conséquent une polarisation piézoélectrique nulle. Lorsque le pourcentage est inférieur à cette valeur, la couche va se trouver en compression et la polarisation piézoélectrique positive va s'opposer à la polarisation spontanée de la couche, comme il est représenté sur la figure 3.7.

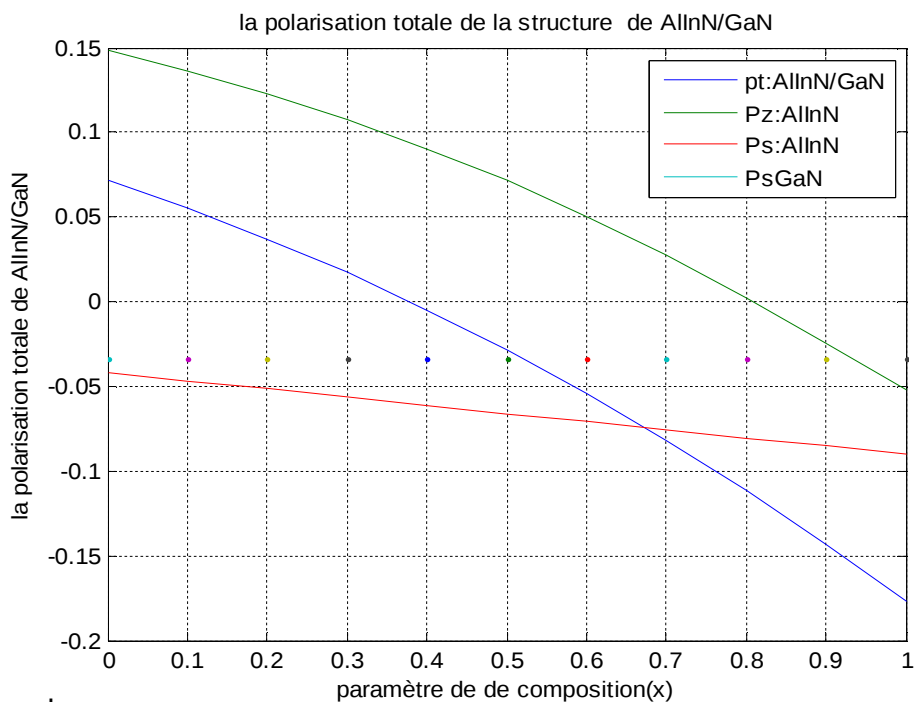


Figure 3.7: Variation de la polarisation en fonction de la concentration d'aluminium.

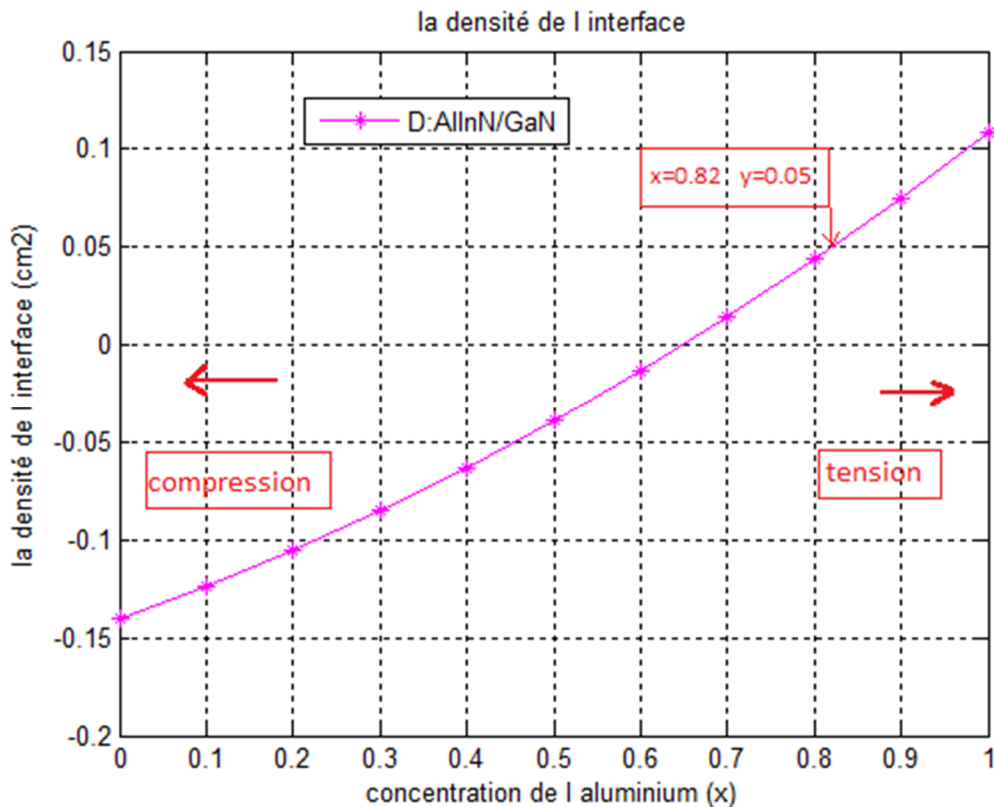


Figure 3.8: Variation de la densité de l'interface en fonction de la concentration l'aluminium face Ga.

On peut voir que plus le pourcentage de l'aluminium augmente plus la densité de l'interface (face Ga) augmente. Si le pourcentage de l'aluminium est inférieur à 82% la densité de l'interface est négative, le gaz bidimensionnel est le gaz des électrons ;si le pourcentage de l'aluminium est supérieur à 82% la densité de l'interface est Positive et le gaz bidimensionnelle c'est gaz des trous.

3.8 L'influence de la concentration de l'aluminium sur la discontinuité de bande de conduction:

La discontinuité de bande de conduction est présente par la différence entre l'affinité électronique de couche barrière et le Canal.

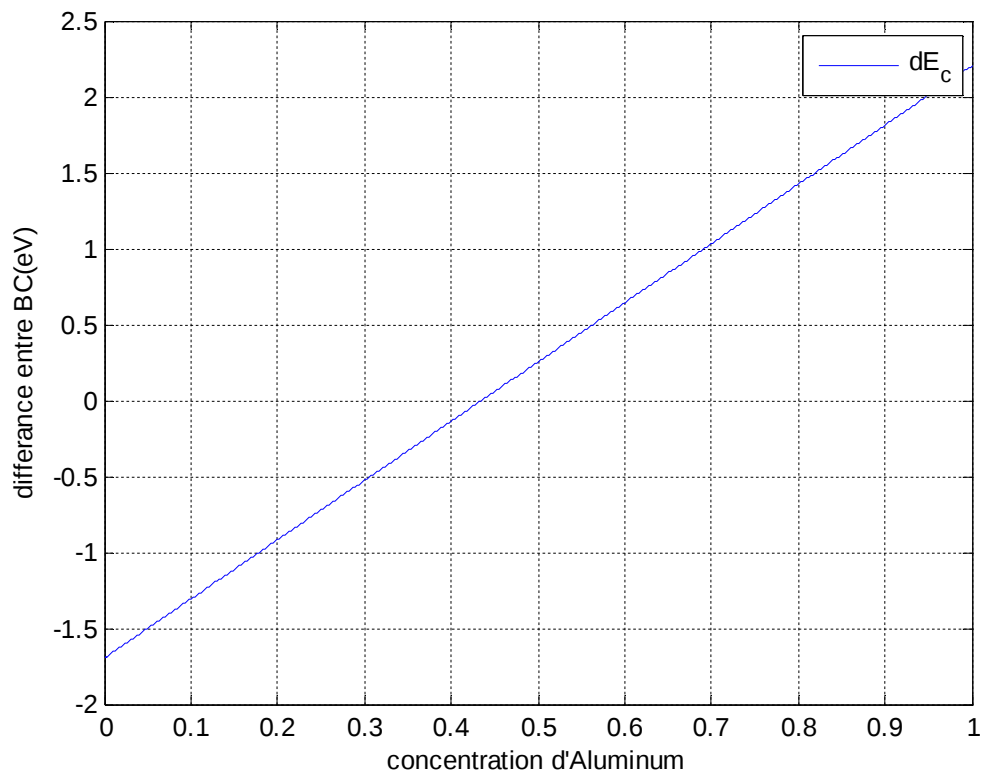


Figure 3.9 : Variation de la discontinuité de bande de conduction en fonction de la concentration de l'aluminium.

Nous remarquons d'après la figure (3.9) que si la concentration de l'aluminium est entre ($x = [0, 0.4[$), la discontinuité de bande de conduction est négative, puisque l'affinité électronique de couche barrière est supérieure que le Canal. Si ($x =]0.4, 1]$) la discontinuité de bande de conduction est positive puisque l'affinité électronique de la couche barrière est inférieure que le Canal.

On peut avoir que plus la concentration de l'aluminium augmente, Plus la discontinuité de bande de conduction ΔE_c augmente, ce qui autorise la diminution le courant de fuite dans le puits quantique.

3.9 L'influence de la variation de tension V_{gs} sur le courant de sortie $I_{ds}(V_{ds})$:

Les caractéristiques courant-tension d'un transistor HEMT à base d'hétéro structure AlInN/GaN sont présentées sur les figures 3.10 et 3.11.

Ces résultats sont obtenus en variant la tension de drain pour plusieurs valeurs de la tension appliquée à la grille V_G et pour deux valeurs de l'aluminium ($x=0.82$ accord de maille et $x=0.9$).

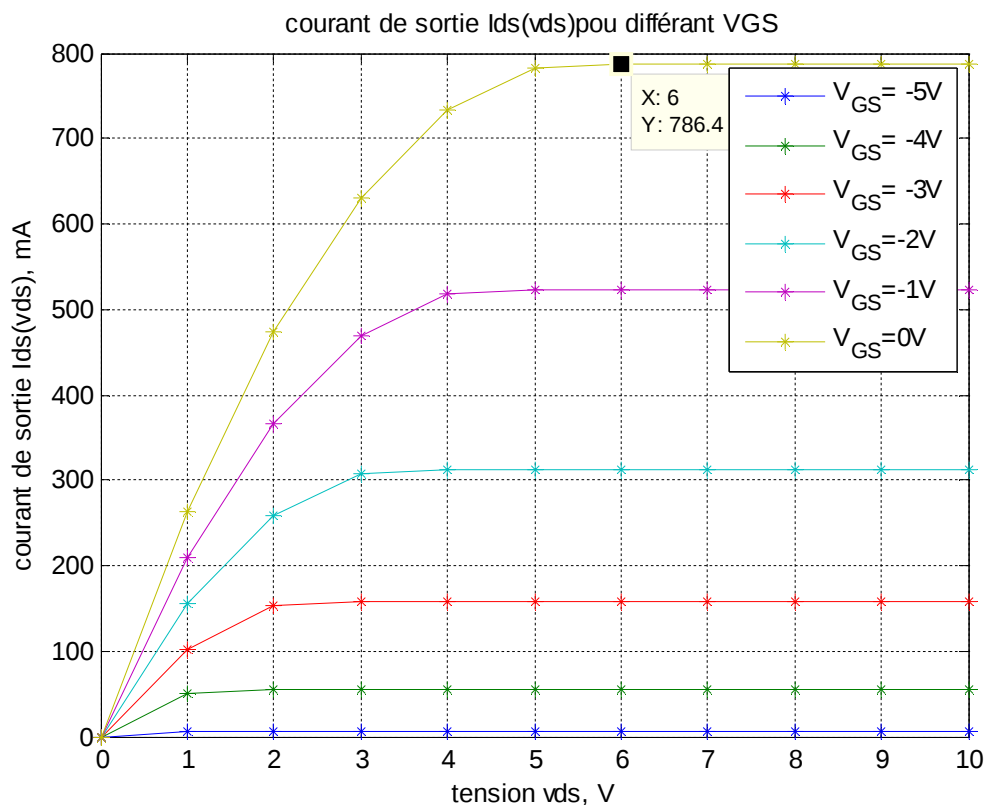


Figure 3.10: courant de sortie drain-source en fonction de la tension V_{ds} pour différentes valeurs de V_{gs} pour $x=0.82$, $w=55\mu m$, $L=1\mu m$, $d_i=1nm$, $d=11nm$

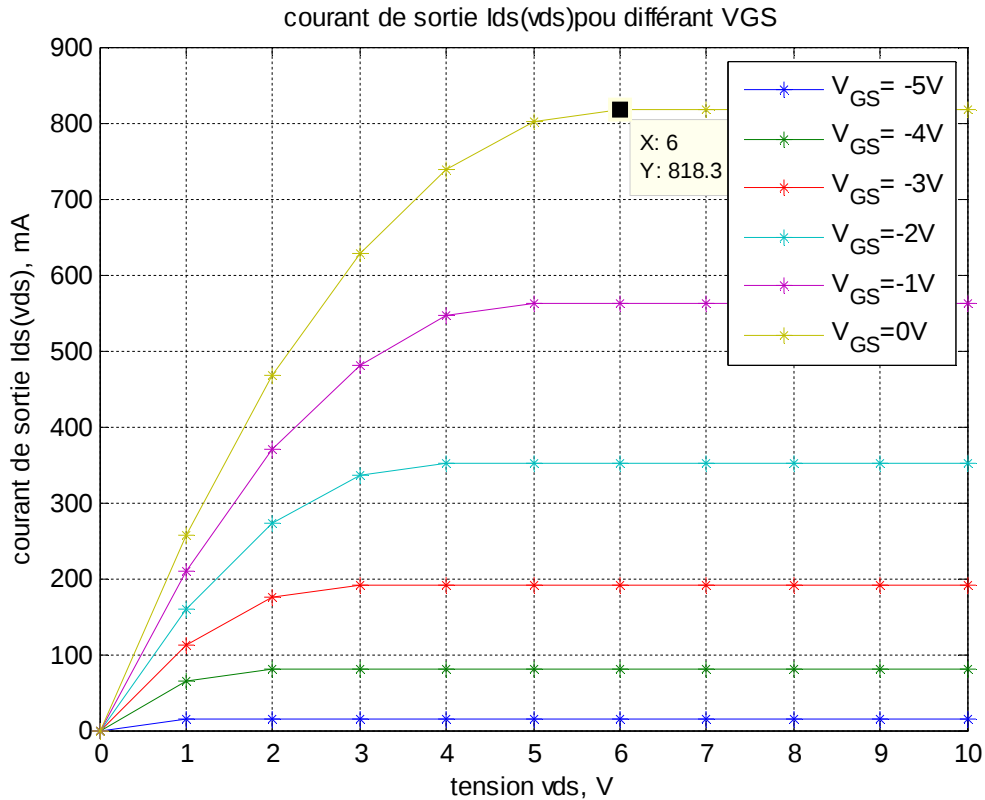


Figure 3.11: courant de sortie drain _source en fonction de la tension V_{ds} pour différents valeurs de V_{gs} pour $x=9$, $Z=55\mu m$, $L=1\mu m$, $d_i=1nm$, $d=11nm$

Une autre remarque peut être donnée, c'est la dépendance du courant I_{ds} de la concentration d'aluminium. On constate que pour $x = 0.82$, les valeurs du courant sont faibles si on les compare à celles obtenues pour $x = 0.9$. Ceci est due à l'augmentation de la discontinuité entre les bandes de conduction et les effets des polarisations spontanée et piézoélectrique à l'interface de l'hétérojonction AlInN/GaN.

A partir de la figure 3.10 on obtient le courant de drain _source en fonction de la tension de grille pour différents tensions de drain, le résultat de la simulation est illustré dans la figure 3.12.

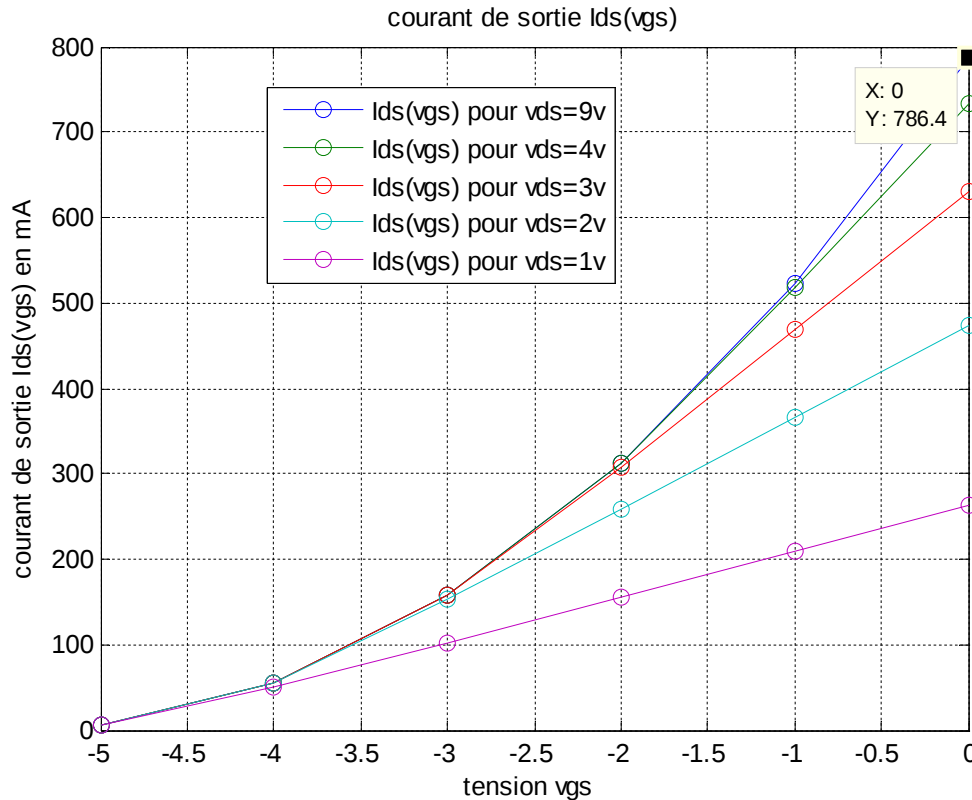


Figure 3.12: courant de sortie drain _source en fonction de la tension de grille pour différent tension de drain pour $x=82$, $Z=55\mu m$, $L=1\mu m$, $d_i=1nm$, $d=11nm$

On peut voir d'après la figure 3.10 que les tensions de grille et de drain augmentent le courant de sortie I_{ds} , le courant de sortie drain _source est maximum ($I_{ds}=0.7864 A$) si la tension de grille ($V_{gs}=0 V$) et la tension de drain ($V_{ds}=9 V$) (figure 3.12).

3.10 L'effet kink sur le courant de sortie $I_{ds}(V_{ds})$:

Comme le montrent la figure 3.13, en particulier, l'effet kink se manifeste comme une augmentation brusque du courant de drain pour une tension déterminée. Ceci cause une augmentation de la conductivité de sortie g_{ds} et une diminution du courant I_g de la grille.

D'autre part on observe que l'effet de kink est plus visible dans la figure 3.13. Comme il a été dit, l'effet kink est mis en rapport avec le phénomène d'ionisation par impact, une augmentation de la température peut offrir une énergie suffisante aux électrons recueillies dans les niveaux intermédiaires entre la bande de Valence et la bande de conduction pour

passer à la bande de conduction et, par conséquent, prennent part à la conduction en augmentant, de cette manière, la valeur du courant I_{ds} .

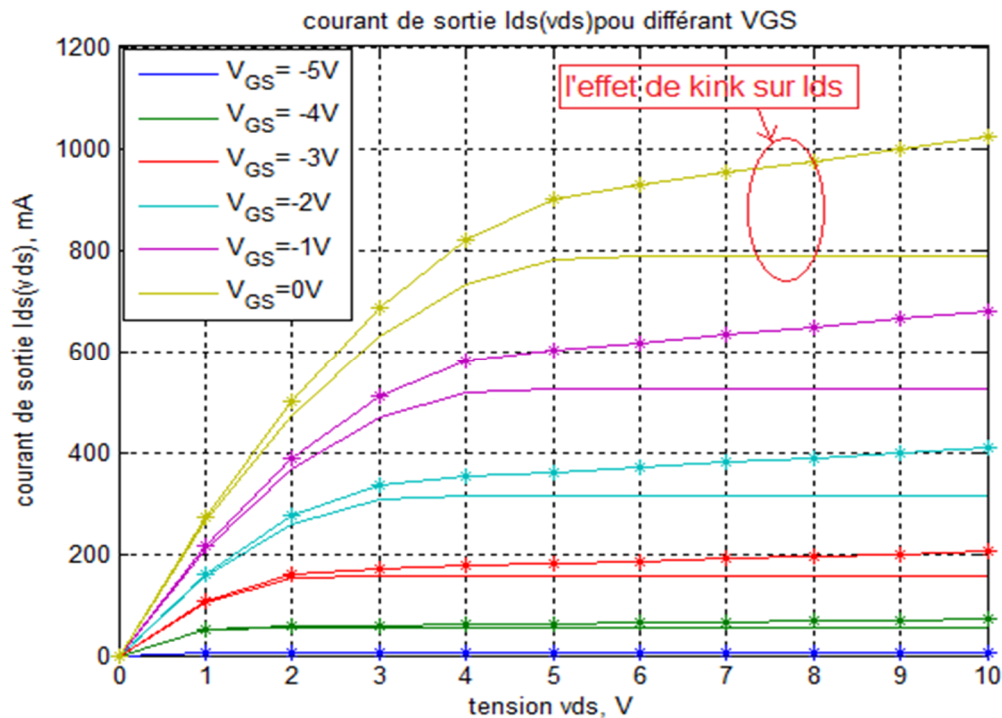


Figure 3.13: l'effet de kink sur le courant de sortie drain _source en fonction de la tension de grille pour différents tensions de drain pour $x=82$, $Z=55\mu m$, $L=1\mu m$, $d_i=1nm$, $d=11nm$

3.11 La mobilité des électrons dans le gaz bidimensionnel :

La mobilité des porteurs dans le canal dépend avant tout de la qualité cristallographique l'hétéro-structure, notamment au niveau de l'interface où se forme le puits de potentiel.

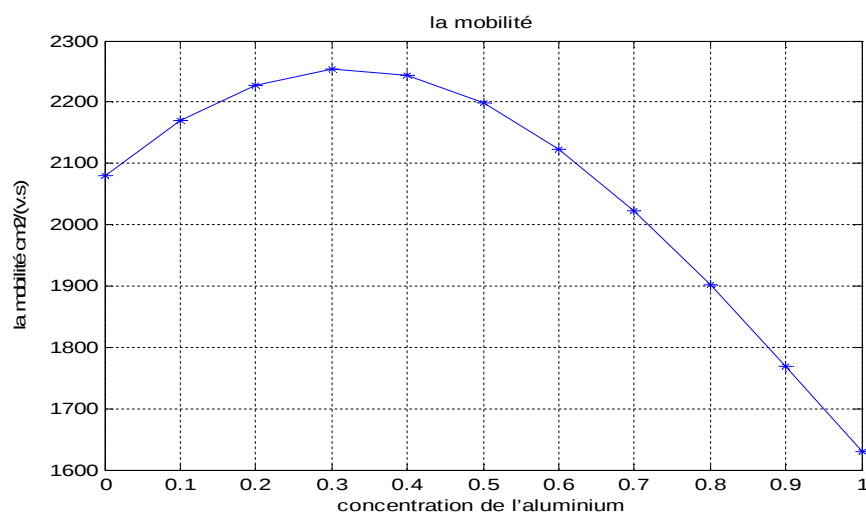


Figure 3.14: la mobilité des porteurs dans le gaz bidimensionnel en fonction de la concentration d'aluminium

On remarque que la mobilité des porteurs diminue avec l'augmentation de la concentration d'aluminium parce que la densité des porteurs dans le gaz augmente avec la concentration d'Aluminium c'est-à-dire les collisions entre les porteurs augmentent c'est implique la diminution de la mobilité dans le gaz.

3.12 La puissance de sortie en fonction courant de drain :

la puissance s'est un produit de la tension et le courant de drain qui donne le figure suivant :

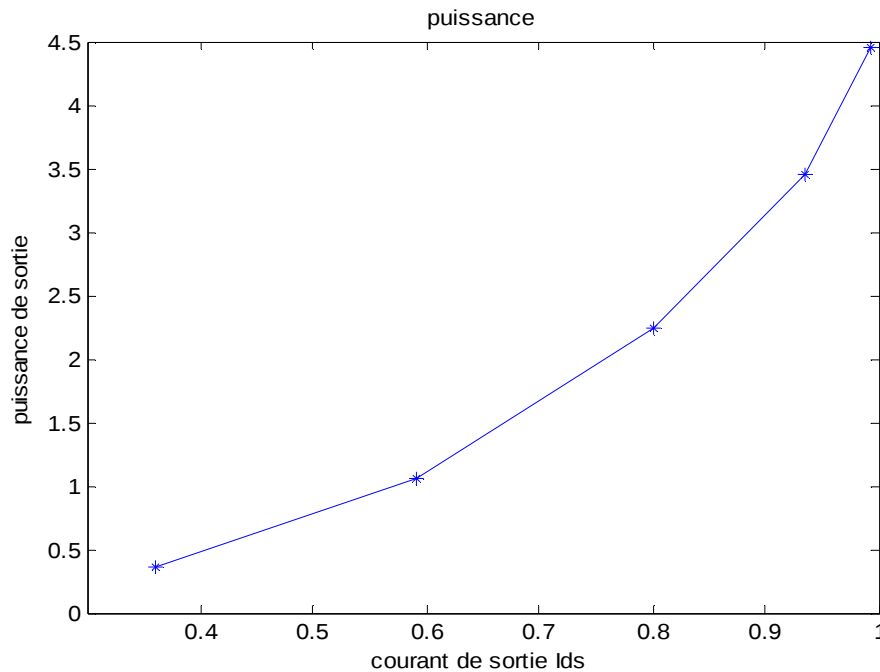


Figure 3.15: la puissance de sortie en fonction de courant

L'augmentation de la puissance est lié a la augmentation du courant de drain .

➤ Comparaison avec AlInN de substrat saphir :

La structure AlInN/AlN/GaN possède un grand désaccord de maille avec substrat saphir par exemple si $x=20\%$ la contrainte est égal a 38%. les résultats obtenues pour $x=82\%$ et $L=1\mu m$, $Z=100\mu m$ [21]. le courant de drain max $I_{dss}=0.56A$ pour $V_{ds}=6V$ et la puissance de sortie égal a 1.33W. On conclut que la structure AlInN/AlN/GaN sur substrat GaN donne des meilleurs resultats et bonne qualité ($I_{dss}=0.786, P_s=2.4W$) par rapport au substrat saphir .

3.13 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans la première partie, les résultats obtenus en étudiant l'influence de la concentration de l'aluminium sur les propriétés de transistor. nous avons présenté la caractérisation de l'augmentation du courant de drain dans les transistors HEMT d'AlInN/GaN. on remarque que la puissance du transistor est liée à la tension et courant de drain. Donc si le courant et la tension de drain sont élevés la puissance est élevée. la valeur de courant de saturation pour $x=0.90$ est égal à $0.818A$ et pour $x=0.82$ I_{Dssat} est égal à $0.786A$. Donc on conclut que le meilleur composant est pour $x=0.90$. La présence de l'effet kink dans le HEMT donne une augmentation brusque du courant de drain pour des tensions drain élevées, ce qui cause une augmentation de la conductivité de sortie pour une tension de drain déterminée.

Conclusion générale

Ce travail de thèse a porté sur l'étude du fonctionnement de composants HEMT à base d'hétéro structure AlInN/GaN.

La démarche adoptée pour cette étude s'est principalement divisée en trois chapitre .

Le premier concerne les propriétés de GaN et leur impact sur les hétéro structures. En effet, les dispositifs à base de nitrure de gallium présentent de bonnes performances dans les applications de haute puissance et haute température. Ceci est principalement dû au large gap direct du GaN qui est de 3.4 eV, sa grande conductivité thermique (1.7 W/cmK) et son champ de claquage élevé (3.5×10^5 V/cm). Nous avons vu que le GaN se cristallise sous deux formes, hexagonale et Zinc blende. La première est plus exploitée, en raison de sa stabilité thermique et de sa polarisation spontanée. Pour éviter les dislocations entre la couche tampon et le substrat nous avons le substrat GaN qui donne très bonne qualité du matériau avec peu de défauts. Cependant, cette technique est la plus chère.

le deuxième se base sur l'étude de l'effet de la polarisation spontanée et piézoélectrique sur la formation du gaz d'électrons bidimensionnel 2-DEG dans le canal d'un transistor à haute mobilité HEMT, à base d'hétérojonction AlInN/GaN avec dopage égal a 10^{18} .Nous avons présenté les contacts ohmiques et Schottky et les caractéristiques électriques des HEMTs AlInN/GaN en régime linéaire et en régime de saturation. Cette structure possède un courant de drain maximal égal a 0.786A. Pour favoriser la montée en fréquence de transistor, il est nécessaire d'utiliser des structures qui favorisent la mobilité des porteurs qui est élevée. Dans les HEMTs il ya des phénomènes qui limitent les performances de puissance ; l'intérêt de la passivation est pour minimiser les effets de pièges, et la plaque

de champ améliore le champ de claquage , limitant les effets de pièges. Les transistors à haute mobilité électronique, HEMT, en nitrure de gallium (GaN) répondent actuellement aux applications d'amplification et application radar et médicale.

Dans Le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation en MATLAB pour les différent caractéristique du transistor.

Tableaux des paramètres physiques

	GaN	InN	GaAs
l'énergie spin orbit: Δ(eV)	0,017	0,005	0,34
Potentiel hydrostatique de déformation a_c(eV)	-6,17	2,65	-5,08
Potentiel hydrostatique de déformation a_v(eV)	0,69	0,7	1,16
Potentiel de déformation de cisaillement : b (eV)	-2	1,2	-2
Masse effective des électrons : m_e (m_0)	0,13	0,14	0,0632
Masse effective des trous lourds : m_{hh} (m_0)	0,806	0,8	0,5
Masse effective des trous légers : m_{lh} (m_0)	0,205	0,19	0,088
Bande interdite à 300°K : E_g (eV)	3,47	1,994	1,519
Constante : α	$6,14 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{-4}$
Constante : β	870	700	360

Paramètres de Bowing

matériau	InGaN	AlInN	AlGaN	InGaAs
C(eV)	1,4	2,53	1	0,51

Expression des paramètres

Pour les alliages ternaires, les paramètres Δ_0 , m_e , m_{lh} , m_{hh} , a , C_{11} , C_{12} , a_v , b_v et E_g sont déterminés à partir de relations type loi de Végard, on a

$$A_x B_{(1-x)} C = x \cdot P_{Ac} + P_{BC} \cdot (1-x)$$

Avec

P : un des paramètres ci-dessus

État de l'art des transistors HEMTs en technologie GaN :

La technologie sur nitrure de gallium est en constant développement. Beaucoup de résultats sont publiés chaque année avec des réalisations de transistors de plus en plus performants. Le Tableau recense l'état de l'art des transistors (et amplificateurs) HEMTs sur nitrure de gallium portés à ce jour à notre connaissance.

Laboratoire	Substrat	Fréquence	Densité de puissance/ Puissance de sortie	PAE	tension de drain	Commentaire	Date de publication
CREE	SiC	4GHz 8GHz	32,2W/mm 30,6W/mm	54,8% 49,6%	120V 120V	Passivation + Field Plate	mars-2004
BAE systems/CREE	GaN	10GHz	9,4W/mm	40%	50V	Passivation + Field Plate	sept-2004
National Central University Taiwan	Saphir	2,4GHz	4W/mm	38%	30V	-	janv-2005
UCSB	Si	4GHz	3,3W/mm	54%	25V	Passivation	mai-2005
HRL Lab Malibu/BSS/USD	SiC	30GHz	5,7W/mm	45%	20V	-	juin-2005
Nitronex corporation	Si	2,14GHz	2,1W/mm	65%	28V	-	juin-2005
RF Micro Devices	SiC	2,14GHz	22,7W/mm	54%	80V	Passivation + Field Plate	juin-2005
Mitsubishi Electric Corporation	SiC	bande C	2,79W/mm	25%	40V	Passivation	juin-2005
UCSB	-	40GHz	10,5W/mm	34%	30V	Passivation	nov-2005
Hong Kong University	Saphir	4GHz	3,26W/mm	55,60%	8V	-	dec 2005
Tiger/Picogiga	Si	18GHz	5,1W/mm	20%	35V	Passivation	janv-2006
University of Illinois Emcore Corporation	SiC	18GHz	9,1W/mm	23,70%	55V	Passivation + Field Plate	juin-2006
Freescale SC	SiC	2,14GHz	5,9W/mm	55%	48V	Passivation	juin-2006
RF Micro Devices	SiC	2,14GHz	4,1W/mm 7W/mm	44,7% 47,9%	28V 48V	Passivation	juin-2006
CREE	SiC	4GHz	41,4W/mm	60%	135V	Double Field Plate	juin-2006
UCSB	SiC	4GHz	6,4W/mm 8,8W/mm	-	35V 55V	Passivation + Field Plate	sept-2006
NEC	SiC	2,14GHz	750W	-	50V	Pulsé + Field Plate	nov-2006
CREE	SiC	3,45GHz	41,4W/mm	66%	55V	Double Field Plate	déc-2006
Eudyna	SiC	2,9GHz	800W 912W	57% 56,4%	65V 70V	Pulsé	mai-2007
TriQuint SC	SiC	10GHz 35GHz	5,6W/mm 4,5W/mm	67% 51%	30V 20V	-	juin-2007
Mitsubishi Electric Corporation	-	bande C	220W	38%	60V	-	juin-2007
Toshiba	-	bande X (8,5-9,6)GHz	50W	-	24V	Applications radar et médicales	Annonce commerciale juin-2007

Cette prolifération de publications traduit un début de maturité de fabrication de ces semi-conducteurs GaN et l'engouement des différents laboratoires internationaux pour cette technologie. Les principaux transistors HEMTs commercialisés sont produits par Eudyna,

Nitronex, CREE et RFMD. Mais des HEMTs sont en développement au sein de NEC, Toshiba, Mitsubishi, Matsushita, Oki, Freescale, TriQuint.

Bibliographie

- [01] Walf Chikhaoui : "Etude des mécanismes physiques responsables des dysfonctionnements des transistors HEMTs à base d'hétérostructures AlGaIn/GaN et AlInN/GaN " , L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon ;2011.
- [02] Damien BORDEL : «développement de nouveaux substrats complants pour l'heteroeptaxie » , école centrale de lyon, 2007.
- [03] djimli CHAHRAZAD : " Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts ohmiques dans les transistors HEMTS base de GAN ", Université de Constantine ,2005.
- [04] LANCERY Ophélie : " étude par micro spectrométrie Raman de matériaux et de composants microélectroniques a base de semi conducteur III V grand " , Université des sciences et technologies de Lille ,décembre 2009.
- [05] Olivier MENARD : " développement de briques technologiques pour la technologique pour la réalisations de diodes Schottky sur nitrure de gallium " , université François de – Rabelais de tours,2010.
- [06] Mohammed LAREDJ : " modélisation électrothermique de transistors en technologie GaN " ; Université des sciences et technologies de Lille ;2011.
- [07] A. benzayed & S.keddar : "étude et simulation d'une structure d'un photo détecteur a base de InGaAs", université Saad Dahleb, Blida ,2010.

[08] Towfik BAGHDADLI ; “étude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux a base d’alliages III V pour l’optoélectronique “ , université de tlemcen ;2009.

[09] KADDECHE Mourad : “ étude des effets du field plate sur les caractéristiques électriques des transistors HEMTs a base de GaN “ , Université de Constantine ;2008.

[10] Stéphane FANGET : “matériaux et hétérostructures a base de nitrure d’éléments III en phase cubique et hexagonale pour l’optoélectronique “ , l’institut national des sciences appliquées de Lyon ,2002.

[11] Jean-Marc BETHOUX : “ Relaxation des contraintes dans les hétérostructures épaisses (Al,Ga)N : une piste originale pour la réalisation de diodes électroluminescentes à cavité résonante “ , Université de Nice Sophia-Antipolis ,2004.

[12] Arnaud CURUTCHET : “ Etude du bruit aux basses fréquences dans les Transistors à Haute Mobilité Electronique à base de Nitrure de Gallium “ ; L’UNIVERSITE BORDEAUX 1 ;2005.

[13] ABDELAZIZ FARES Zakia : “ caractérisation électrique des HEMTs a base de nitrure de gallium AlGa_N/Ga_N “ , université de mentouri de Constantine;2005.

[14] olivier PAJONA : “ Transistors HEMT Métamorphique sur substrat GaAs pour applications de télécommunication a très haut débit : mesures statiques et dynamique pour intégration des effets parasites dans des modèles “ ,Universite de limoges ,2006.

[15] Chalotte sury : “Localisation et évolution des sources de bruit en basses fréquences de HEMTs GaN sous contraintes électriques “ , Université de bordeaux1 ,2011.

[16] Sandra DE MEYER : “ Etude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium, Conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur, distribué de puissance à très large bande “ , UNIVERSITE DE LIMOGES ,2005.

- [17] Ludovic LACHEZE : “ Étude et simulation physique des effets parasites dans les HEMTs AlGa_N/Ga_N “ , Université de bodeaux ,2009.
- [18] Christopher Sanabria : “ Généralites et étude des défauts dans les HEMT AlGa_N/Ga_N “ ; Université de bordeaux , 2008.
- [19] Audrey PHILIPPON – MARTIN : ‘étude d’une nouvelle filière de composants sur technologie nitrure de gallium. Conception et réalisation d’amplificateurs distribués de puissance large bande a cellules cascades en montage flip-chip et technologie MMiC’, université de limoges,2007.
- [20] Geoffroy SOUBERCAZE-PUN :“ De l’étude en bruit basse fréquence à la conception d’un Oscillateur en Bande–X à partir de transistors AlGa_N/Ga_N HEMT“, Université Paul Sabatier de Toulouse,2007.
- [21] NICOLAS sarazin :”HEMT a base de gallium: évolution vers un nouveau système de matériaux , une nouvelle génération de composants”,université des sciences et technologies de Lille,2007.
- [22] Ikram ELMAOUDI :”étude et fabrication de transistors a enrichissement de la filière InAnAs/InGaAs pour applica on millimétriques faible bruit ”,université de Lille 1,2010.
- [23] Olivier Jardel :”contribution a la modélisation des transistors pour l’amplification de puissance aux fréquences microondes. développement d’un nouveau modèle électrothermique de HEMT AlGa_N/Ga_N incluant les effets de pièges, université de limoges,2008.
- [24] AISSAT Abdelkader :” modélisation et simulation du gain optique et du courant de seuil d’un laser à puits quantique contraint à base de Ga_x In_{1-x} N_y As_{1-y} /GaAs”, Ecole Nationale Polytechnique,2007.

[25] Guillaume CALLET :'' caractérisation et modélisation de transistors HEMT AlGa_N/Ga_N et InAlN/Ga_N pour l'amplification de puissance en Radiofréquences'', université de limoges,2011.

[26] Gwenael le COUSTRE :''Contribution au développement d'une filière de transistor de forte puissance a base de technologie HEMT Ga_N pour application télécoms et radar'', université des sciences et technologies de Lille, 2009.

[27] Salim TOUATI :''Conception, réalisation et caractérisation de composants de puissance hyperfréquence de la filière nitrure de gallium'', université des sciences et technologies de Lille, 2007.

[28] Fabien DE GROOTE :'' Mesures de formes d'ondes temporelles en impulsions : application `a la caractérisation de transistors micro-ondes de forte puissance'', université de limoges ,2007.