

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen



Faculté des Sciences

Département de Physique



Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables»

Mémoire de Fin d'Etude

Pour l'obtention du Diplôme de Master

En Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

*Détermination de la résistivité en fonction de la température
du nitrure de gallium (GaN)*

Présenté par :

M^{elle}. Amirats Firdaws

Soutenu le 25 Juin 2018

Devant la commission d'examen

Président	M ^r . S. AMARA	MC "A "	Université de Tlemcen
Examineur	M ^r . Y. M. MAHDAD	MC "B "	Université de Tlemcen
Examineur	M ^r . A. BENYOUCEF	MC "B "	Université de Tlemcen
Encadreur	M ^r . T. BAGHDADLI	MC "A "	Université de Tlemcen

Année Universitaire 2017 – 2018

Remerciements

Je Remercie, En Premier Lieu, Mon Dieu Qui A Fait Que
Nous Soyons Des Musulmans Et Qui A Illuminé Notre
Chemin De La Lueur Du Savoir Et De La Science

*J'exprime toute ma reconnaissance et mes remerciements particuliers à mon encadreur Monsieur **BAGHDADLI TEWFIK**, qui m'a permis de réaliser ce travail, pour son suivi permanent, ses conseils, ses lectures attentives. Il m'a largement fait profiter de son expérience dans le domaine des matériaux. Les échanges que j'ai pu avoir avec lui ont été très enrichissants. Il a assuré l'encadrement au quotidien du mémoire.*

*Je remercie vivement Monsieur **AMARA SOFIANE** Maître de Conférences à l'université Abou Bekr **BELKAID** de Tlemcen pour avoir accepté de présider le jury.*

*Je remercie les membres du jury, Monsieur **YASSINE MOHAMMED MAHDAD** et Monsieur **ABDELLAH BENYOUCEF**, Maître de conférences à l'université Abou Bekr **BELKAID** de Tlemcen, pour le grand honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce projet.*

Enfin, je remercie tous mes collègues de physique énergétique et énergie renouvelable promotion 2017 et toute mes amies.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

 *Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

 *Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

 *Mon frère Slimane, Mon ange gardien et mon fidèle compagnon dans les moments les plus délicats de cette vie*

 *Mon cher petit frère Nawfel, présent dans tous mes moments d'étude par son soutien moral.*

 *Mon mari Amin, Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.*

A ma famille et tous ceux qui me connaissent.

Résumé :

Nous avons présenté dans ce travail les résultats de simulation de la résistivité et la mobilité du GaN en fonction de température.

Ces résultats confirment que la résistivité diminue d'une manière non monotone avec la température, ce qui nous a permis de voir l'évolution des différentes interactions en fonction de la température.

Les interactions dominantes à basse température sont les interactions avec les impuretés ionisées et les interactions prépondérantes à haute température sont les interactions avec les phonons optiques et on remarque que la température T_m pour laquelle la mobilité est maximale ou la résistivité est minimale augmente avec le dopage.

Le GaN est un matériau d'avenir pour la conception de composants de puissance haute tension et haute température.

Mots clé : La résistivité, mobilité, Van der Pauw, GaN

ملخص:

قدمنا نتائج المحاكاة من المقاومة والحركية لتبريد الغاليوم كدالة من درجات الحرارة. تؤكد هذه النتائج أن المقاومة تتخفض بطريقة غير رتيبة مع درجة الحرارة ، مما يسمح لنا برؤية تطور التفاعلات المختلفة كدالة للحرارة.

التفاعلات السائدة في درجات الحرارة المنخفضة هي التفاعلات مع الشوائب المتأينة والتفاعلات السائدة عند درجة الحرارة المرتفعة هي التفاعلات مع الفونونات الضوئية ويلاحظ أن درجة الحرارة T_m التي يكون فيها الحراك أعلى أو أن المقاومة هي الحد الأدنى للزيادات مع تناول المنشطات. تبريد الغاليوم عبارة عن مادة مستقبلية لتصميم مكونات طاقة عالية الجهد وعالية الحرارة. **الكلمات المفتاحية:** المقاومة ، الحركة ، فان در بو، نيتريد الغاليوم

Abstract:

We presented in this work the results of simulation for the GaN resistivity and mobility with the temperature dependence.

These results confirm that resistivity decreases in a non-monotonic with temperature, which allowed us to see the evolution of the different interactions with temperature dependence.

The dominant interactions at low temperature are the interactions with ionized impurities and the dominant interactions at high temperature are the interactions with the optical phonons and it is noted that the temperature T_m for which the mobility is maximal or the resistivity is minimal increases with the doping.

GaN is a future material for the design of high voltage and high temperature power components

Key words: Resistivity, mobility, Van der Pauw, GaN

SOMMAIRE

Liste des symboles	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Le nitrure de gallium, propriétés et croissance	
I.1. Introduction.....	6
I.2. Propriétés GaN	6
I.2.1. Propriétés structurales.....	6
I.2.1.1. Structure cristallographique.....	6
I.2.1.2. Zone de Brillouin.....	9
I.2.2. Propriétés électroniques	10
I.2.3.1. structure de bande.....	10
I.2.2.2. mobilité électronique et champ électrique critique.....	11
I.2.3. Propriétés optique.....	12
I.2.3. Propriétés thermique.....	13
I.2.3.1. Dilatation thermique.....	13
I.2.3.2. Chaleur spécifique.....	14
I.2.3.3. Température de Debye	15
I.2.3.4. Conductivité thermique	15
I.3. Les différentes techniques de croissance épitaxiale de GaN	16
I.3.1. L'épithaxie en phase vapeur ou VPE (Vapor Phase Epitaxy)	16
I.3.1.1. MOVPE	16
I.4. Dopage résiduel et intentionnel.....	19
I.4.1. Origine du dopage résiduel.....	19
I.4.1.1. Lacunes d'azote	19
I.4.1.2. Atome en site interstitiel	20
I.4.1.3. Atomes d'impuretés en site substitutionnel	20
I.4.2. Le dopage intentionnel	21
I.4.2.1. Dopage de type N.....	21

I.4.2.1. Dopage de type P.....	21
I.4. Les composés ternaires $Al_xGa_{(1-x)}N$ et $B_xGa_{(1-x)}N$	22
I.5. Conclusion	23
Bibliographie: Chapitre I.....	24
Chapitre II : Caractérisation électrique du nitrure du gallium	
II.1. Introduction.....	31
II.2. Mesure de la résistivité	31
II.2.1. Méthode des quatre pointes	31
II.2.2. Méthode de Van Der Pauw.....	33
II.3. Mesure Hall.....	37
II.3.1. Historique de Hall	38
II.3.2. Théorie de l'effet Hall.....	39
II.4. Protocole expérimental.....	41
II.5. Conclusion.....	44
Bibliographie: Chapitre II.....	45
Chapitre III : Simulation-Résultats et discussion	
III.1. Introduction	48
III.2. La mobilité et la concentration des porteurs.....	49
III.2. Présentation des échantillons.....	51
III.2.1. Mesures Van Der Pauw en fonction de température.....	53
III.3. Modèle de simulation	55
III.4. Logiciel de simulation Origin.....	57
III.5. Résultats et discussion	58
III.6. Conclusion.....	63
Bibliographie: Chapitre III.....	65
Conclusion Générale.....	66

Liste des symboles

a : Paramètre de maille

c : Paramètre de maille

l : Longueur de liaison Ga-N suivant c

E_{cr} : Champ critique

$P6_3mc$: Groupe d'espace de structure wurtzite

$F\bar{4}3m$: Groupe d'espace de la structure zinc blende

$Fm3m$: Groupe d'espace de Structure de rock salt

n : Indice de réfraction

E : Energie

E_0 : Constante énergétique

A : Constante énergétique

α : Coefficient d'absorption

E_g : Energie du gap

C : Capacité thermique

T : Température

R : Constante de Boltzman

Θ_D : Température de Debye

C_p : Capacité calorifique

d : Densité

s : Espace entre les point a,b,c,d

S : Surface

R : Résistance

ρ : Résistivité

t : Epaisseur de l'échantillon

V : Tension

I : Courant

f : Facteur de correction

n : Concentration d'électrons

p : Concentration de trous

μ_n : Mobilité d'électrons

μ_p : Mobilité de trous

q : Charge élémentaire

B : Champ magnétique

V_H : Tension Hall

N_S : Concentration des porteurs en surface

N_B : Concentration des porteurs en volume

μ : Mobilité des porteurs

τ : Temps de relaxation

m^* : Masse effective de la particule

N_i : Nombre total d'impuretés

μ_{min} : Mobilité maximal

μ_{max} : Mobilité minimal

μ_L : Composante de la mobilité du réseau

T_m : Température pour laquelle la mobilité est maximale

T_0 : Température ambiante

α, B, γ : Paramètres constantes

Liste des figures

Figure I-1 : Structure cristallographique de type wurtzite du nitru de gallium	7
Figure I-2 : Structure cristallographique de type zinc blende du nitru de gallium	8
Figure I-3 : Structure cristallographique de type rocksalt (NaCl) du nitru de gallium.	9
Figure I-4 : Les zones de Brillouin des deux structures de GaN : (a) zinc blende et (b) Wurtzite	10
Figure I-5 : La structure de bande pour le GaN : a) cubique, b) hexagonal	11
Figure I-6 : Evolution de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique, pour le GaN, la Structure Wurtzite est représentée par lacourbe 1 et la structure Zinc-Blende par la courbe 2.	12
Figure I-7 : Coupe de la chambre de croissance de type MOVPE	19
Figure I-8 : Diagramme du gap en fonction du paramètre de maille des ternaires nitrures III-N.	23
Figure II-1 : Principe de la détermination de la résistivité par la méthode des quatre pointes.	32
Figure II-2 : Les équipotentielles forment des cylindres dans le cas «A» d'une couche mince et des sphères dans le cas «B» d'un échantillon épais.	33
Figure II-3 : Caractéristique courant –tension entre deux contacts d'indium sur une couche de nitru de gallium dopé Si sur saphir avec et sans traitement de surface et recuit des contacts d'Indium.	34
Figure II-4 : Formes diverses d'échantillons pour la méthode Van der Pauw	35

Figure II-5 : La configuration du courant et la mesure de la tension avec la configuration Van der Pauw pour déterminer la résistivité	35
Figure II-6 : Représentation du facteur de correction de Van der Pauw	36
Figure II-7 : Keithley 236	37
Figure II-8 : Keithley 2602	37
Figure II-9 : Représentation schématique de l'effet Hall.	39
Figure II-10 : l'effet Hall « matériau de type N ».	40
Figure II-11 : l'effet Hall « matériau de type P ».	40
Figure II-12 : Le logiciel de mesure Van der Pauw / Effet Hall.	42
Figure II-13 : Banc Hall, (a) réservoir d'azote, (b) aimant.	43
Figure II-14 : Cryostat à l'azote pour les mesures en fonction de la température.	43
Figure III-1 : Le calcul de la mobilité 2D en fonction de la température pour le GaN sur AlGaN.	51
Figure III-2 : le substrat GaN sur saphir (Al_2O_3).	52
Figure III-3 : le substrat GaN sur AlN sur saphir (Al_2O_3).	52
Figure III-4 : Mesure expérimental de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir.	53
Figure III-5 : Mesure expérimental de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir	53
Figure III-6 : Mesure expérimental de la mobilité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir.	54

Figure III-7 : Mesure expérimental de la mobilité en fonction de la température 54
du matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir.

Figure III-8 : Vue de logiciel Origin 57

Figure III-9 : Mesure de la résistivité en fonction de la température du matériau 58
GaN dopé silicium sur saphir, les symboles c'est les mesures expérimentales et en
trait plein les résultats de la simulation.

Figure III-10 : Mesure de la résistivité en fonction de la température du 59
matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir, les symboles c'est les mesures
expérimentales et en trait plein les résultats de la simulation.

Figure III-11 : Mesure de la mobilité en fonction de la température du matériau 60
GaN dopé silicium sur saphir, les symboles c'est les mesures expérimentales et en
trait plein les résultats de la simulation.

Figure III-12 : Mesure de la résistivité en fonction de la température du 61
matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir, les symboles c'est les mesures
expérimentales et en trait plein les résultats de la simulation.

Figure III-13 : Résultats de la simulation, la résistivité en fonction de 62
la température pour différents dopage mentales et en trait plein les résultats de la
simulation

Figure III-14 : Résultats de la simulation, la température T_m 63
en fonction du dopage

Liste des tableaux

Tableau I-1 : paramètres cristallins de GaN type wurtzite	7
Tableau I-2 : paramètres cristallins de GaN type zinc de blende	8
Tableau I-3 : Les points critiques de la zone de Brillouin des mailles cubique à faces centrées et Hexagonal.	9
Tableau I-4 : Coefficients de dilatation thermique α de GaN et divers substrats	14
Tableau I-5 : Impact des propriétés du GaN sur les performances des composants	15
Tableau II-1 : Protocole expérimental de mesure Van der Pauw/ Hall	41
Tableau III-1 : Paramètres de transport du GaN à basse et à température ambiante, mesurés par la technique Van der Pauw / Effet Hall.	52
Tableau III-2 : Tableaux récapitulatifs des différents paramètres de simulation de la résistivité en fonction de température calculés	60
Tableau III -3 : Tableaux récapitulatifs des différents paramètres de simulation de la mobilité en fonction de température calculés.	61

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans les premières années du vingtième siècle les propriétés complexes des semi-conducteurs ont été essentiellement découvertes. Beaucoup de ces propriétés ont été exploitées dans d'ingénieux dispositifs en micro-électronique. Au fil des années, les dispositifs ont été rendus manufacturables par les ingénieurs et les techniciens. Les semi-conducteurs se trouvaient encore au cœur de cette révolution, parmi eux le silicium qui est resté le champion, pour parer à beaucoup de ces concurrents par son abondance, et par son aptitude à la fabrication, mais son gap indirect le rend non performant dans certains cas, notamment pour les applications optoélectroniques [1].

les années 90 ont vu l'émergence de la filière des semi-conducteurs à grande bande interdite avec comme principal objectif le développement des systèmes électroniques pour les applications de défense. Les Etats-Unis et le Japon, pionniers en matière de recherche sur le GaN, sont aujourd'hui encore en avance sur l'Europe dont les moyens investis dans le domaine sont bien supérieurs à ceux déployés dans ces deux pays [1].

La structure de bande interdite directe est mise à profit pour la réalisation de dispositifs optiques (GaN et alliages InP, Al, P), ce qui autorise un spectre d'applications du visible aux ultraviolets, en émission et en détection: le matériau GaN est le seul qui puisse prétendre à des applications opto-électroniques aux courtes longueurs d'onde (bleu, ultraviolet, blanc). De nombreux composants électro-optiques (Light Emitting Diodes LED, Laser Diodes LD) ou détecteurs en environnement hostile (Metal-Semiconductor-Metal MSM, ...) sont d'ores et déjà disponibles, et constituent encore un axe fort de recherche.

L'électronique de puissance est de plus en plus présente dans les systèmes embarqués :

- ✓ le secteur automobile prospecte également sur l'énergie électrique pour limiter ses émissions de CO₂: l'amélioration des véhicules hybrides et électriques est ainsi liée à l'utilisation de matériaux tels que le GaN qui peuvent drainer de forts courants (plusieurs ampères) à des températures élevées (plus de 300°C).
- ✓ L'aéronautique a également besoin de convertisseurs de puissance de grande compacité et de faible masse soumis à des cycles thermiques (faibles/fortes températures). Les dispositifs à grande bande interdite se positionnent très favorablement sur les aspects thermiques, de masse et de volume. De

Introduction Générale

plus, l'immunité aux agressions radiatives permet de réduire l'utilisation de boîtiers protections et ainsi de diminuer la masse du système [1].

L'électronique des hautes fréquences tire pour sa part un bénéfice des caractéristiques exceptionnelles de la grande bande interdite pour des applications de forte puissance. Des travaux sur matériau SiC ont déjà été publiés, mais le GaN reste largement majoritaire pour les applications de puissance à haute fréquence. Si la technologie autorise désormais la conception de dispositifs bipolaires, les transistors HEMT (et MESFET) sont les dispositifs les plus répandus pour les applications à haute fréquence telles que la conception de systèmes Radar (large bande jusqu'en bande X), les pylônes de relais de téléphonie mobile.

Là sont quelques avantages techniques de GaN mentionnés ci-dessous [4]:

- Réduction des besoins en dissipation de chaleur
- 80% de réduction du volume et du poids du système
- Chute de tension plus faible pour les appareils unipolaires
- Augmentation de la puissance de sortie
- Amélioration des caractéristiques transitoires et de la vitesse de commutation
- Réduction du bruit électrique provenant de petits systèmes
- Bruit électrique réduit dû à une charge de récupération pratiquement nulle.

Dans ce cadre, ce travail était consacré à la caractérisation électrique de nitrure de gallium. Les échantillons que nous avons étudiés, sont élaborés au Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes par l'Épitaxie en Phase Vapeur aux Organo-Métalliques(MOVPE), et la méthode Van der Pauw et l'effet Hall pour déterminer la résistivité, la concentration et la mobilité des porteurs libres dans le semi-conducteur.

Dans le premier chapitre, nous décrivons les propriétés physiques, optiques et électroniques fondamentales du nitrures de gallium, puis nous présenterons les méthodes permettant l'élaboration.

Le chapitre II est dédié aux techniques de caractérisation électrique utilisées pour la mesure de la résistivité, de la concentration des porteurs et de la mobilité.

Le chapitre III est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats de simulation de la résistivité, et de la mobilité pour deux échantillon l'un du GaN sur saphir avec un dopage de $(1,20 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ et le deuxième du GaN sur AlN sur saphir

Introduction Générale

avec un dopage de $(2,85 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3})$, en utilisant le logiciel origin pour le fit en tenant compte l'effet thermique la température, et des différentes interactions.

Bibliographie: Introduction générale

- [1] **Taleb Ihsen Yasser**, « Etude Des Propriétés De Quelques Nitrures : Application Aux Photodiodes », Thèse Doctorat Soutenu en Juin 2012, Université de Tlemcen.

- [2] **Aster Guilhem**, « Fiabilité des dispositifs HEMT en technologie GaN », Thèse Doctorat Soutenu en Janvier 2012, Université de Toulouse.

- [3] **Jean-Guy Tartarin**, « LA TECHNOLOGIE GAN ET SES APPLICATIONS POUR L'ELECTRONIQUE ROBUSTE, HAUTE FREQUENCE ET DE PUISSANCE », Rapport LAAS n° 08644. veille technologique sur la filière GaN. 2008.

- [4] **Christophe Ligeret**, « Réduction de la Consommation Electrique du Contrôle-Commande des Machines Automatisées. Automatique / Robotique ». Université Rennes 1, 2010. Français.

**Chapitre I : Le nitrure de gallium,
propriétés et croissance**

I.1. Introduction

Le nitru de gallium (GaN) est un composé binaire (groupe III/groupe V) présentant des propriétés remarquables dont la plus importante est sa largeur de la bande interdite directe de 3,4 eV, qui émet à des longueurs d'onde correspondant au bleu, à la limite de l'ultra-violet, et augmente la probabilité de transition optique.

Jusqu'en 1993, les seules diodes électroluminescentes (LED) émettant dans le bleu étaient à base de carbure de silicium, un matériau nécessitant d'être dopé pour avoir de bonnes propriétés semi-conductrices, mais ce dopage affaiblit le pouvoir d'émission et rend ces dispositifs commercialement inexploitable.

Avec le remplacement par du nitru de gallium plus efficace, l'équipe du japonais **Shuji Nakamura** employée par la **Nichia company** a complété la palette de couleurs à la disposition des producteurs pour couvrir tout le spectre visible, en jouant sur différents alliages à base de GaN, ce qui a rendu possible des applications comme les écrans LED, les diodes blanches ou encore les lasers bleus. Les diodes laser bleues sont utilisées dans la technologie des disques Blu-ray remplaçant les DVD qui augmente la capacité de stockage [1].

Le GaN est un matériau d'avenir pour la conception de composants de puissance haute tension et haute température.

I.2. Propriétés GaN

I.2.1. Propriétés structurales

I.2.1.1. Structure cristallographique

Le nitru de gallium se présente sous trois structures cristallines: les structures de type wurtzite (appelé également hexagonale), structures zinc blende et structures rocksalt (appelé aussi NaCl). La structure thermodynamiquement stable est de type wurtzite.

- *Structure de type wurtzite :*

La structure wurtzite est constituée des atomes d'azote forment un empilement hexagonal compact et des atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques comme le montre **Figure I-1**. Le groupe d'espace de structure wurtzite est $P6_3mc$ [2].

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

Cette structure est caractérisée par les paramètres de maille a et c , mais aussi par le paramètre $u = l/c$, où l est la longueur de liaison Ga-N suivant c . Ces paramètres sont regroupés dans le **Tableau I-1**.

GaN	
Structure cristalline	Hexagonal (wurtzite)
paramètre de maille	$a = 3,189 \text{ \AA}$ $c = 5,185 \text{ \AA}$
groupe d'espace	P63mc
Coefficient de dilatation thermique	$\Delta a/a = 5,59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $\Delta c/c = 3,17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tableau I-1 : *paramètres cristallins de GaN type wurtzite* [3].

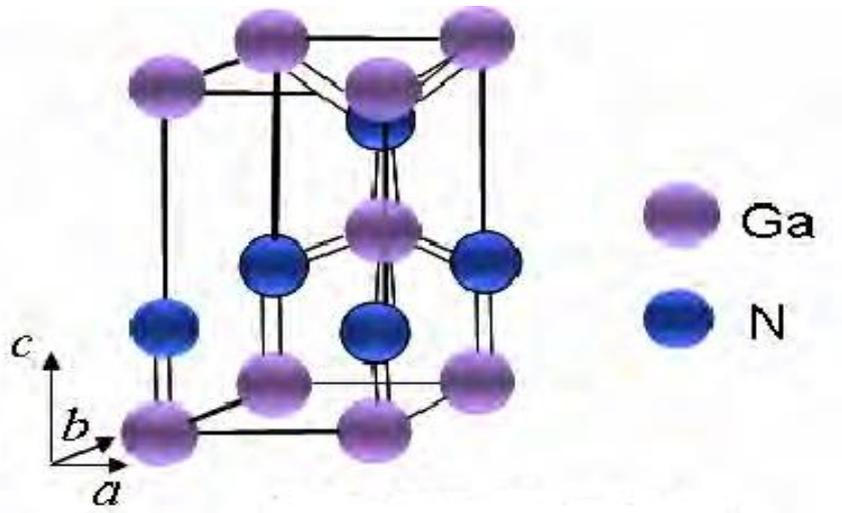


Figure I-1 : *Structure cristallographique de type wurtzite du nitru de gallium*.

La structure cristallographique recherchée lors de l'épitaxie de couches présentes dans un transistor à haute mobilité d'électrons (HEMT) à base de GaN est une structure wurtzite. Elle est la phase la plus stable thermodynamiquement et la plus facile à obtenir.

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

- *Structure de type zinc blende :*

Dans la structure de type blende (**Figure I-2**), les atomes d'azote forment un empilement cubique faces centrées dans lequel les atomes de gallium occupent la moitié des sites tétraédriques. Le groupe d'espace de la structure zinc blende est $F\bar{4}3m$. Cette structure est caractérisée par le paramètre de maille **a** donné dans le **Tableau I-2** [3].

GaN	
Structure cristalline	Cubique (zinc de blende)
paramètre de maille	$a = 4,511\text{\AA}$
groupe d'espace	$F\bar{4}3m$

Tableau I-2 : paramètres cristallins de GaN type zinc de blende [3].

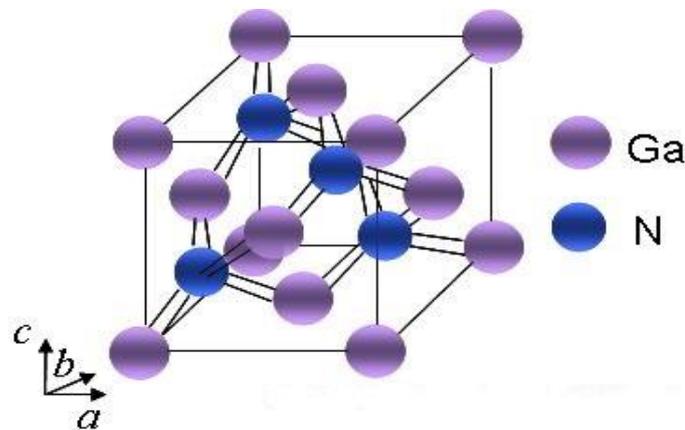


Figure I-2 : Structure cristallographique de type zinc blende du nitru de gallium.

- *Structure de type rock salt (NaCl):*

La structure rock salt ne s'obtient pas par croissance, mais en appliquant une forte pression. Des effets des hautes pressions est de favoriser les coordinences élevées au sein du réseau des matériaux, ce qui permet de stabiliser la phase de type NaCl. En effet, pour cette structure, la coordinence des atomes de gallium et d'azote est de 6 contre 4 dans le cas de celles de type wurtzite et blende. La structure de type NaCl est composée de deux sous réseaux cubiques faces centrées d'atomes d'azote et de gallium, décalés de $a/2$ (**Figure I-3**). Le groupe d'espace de Structure de rock salt est $Fm\bar{3}m$ [4].

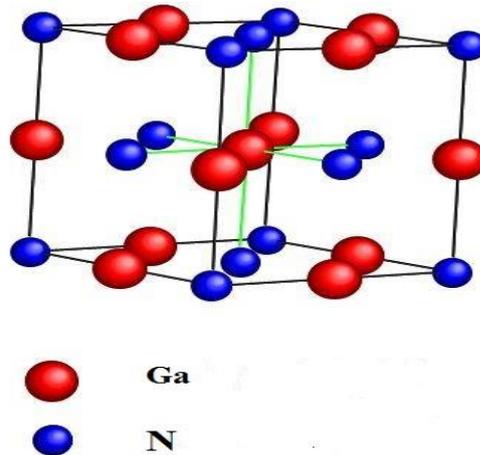


Figure I-3 : *Structure cristallographique de type rock salt (NaCl) du nitru de gallium.*

I.2.1.2. Zone de Brillouin

Pour un cristal périodique, les paramètres internes (par exemple la densité d'électrons) ont la périodicité du réseau. Le réseau direct est défini par la première zone de Brillouin qui joue un rôle essentiel dans la théorie des bandes. La **Figure I-4** représente les zones de Brillouin des deux structures de GaN zinc blende et Wurtzite.

Le **Tableau I-3** représente les points critiques de la zone de Brillouin des mailles cubique à faces centrées et Hexagonal.

Symbole	Description
<u>Cubique à faces centrées</u>	
K	Milieu d'une arête joignant deux faces hexagonales
L	Centre d'une face hexagonale
U	Milieu d'une arête joignant une face hexagonale et une face carrée
W	Sommet
X	Centre d'une face carrée
<u>Hexagonal</u>	
A	Centre d'une face hexagonale
H	Sommet
K	Milieu d'une arête joignant deux faces rectangulaires
L	Milieu d'une arête joignant une face hexagonale et une face rectangulaire
M	Centre d'une face rectangulaire

Tableau I-3 : *Les points critiques de la zone de Brillouin des mailles cubique à faces centrées et Hexagonal [5].*

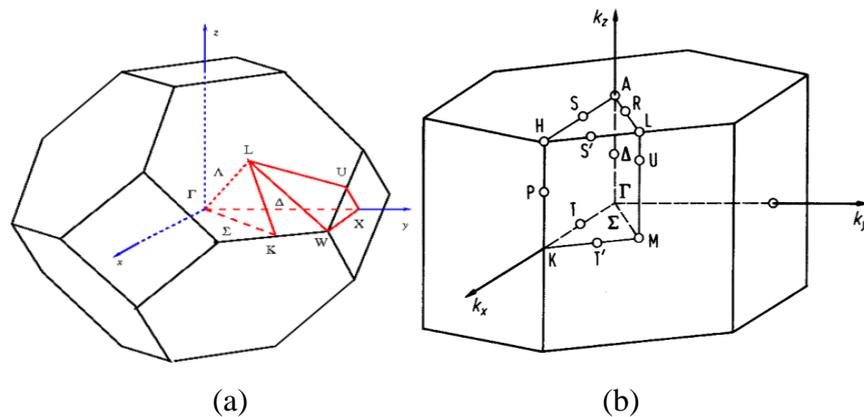


Figure I-4 : Les zones de Brillouin des deux structures de GaN : (a) zinc blende et (b) Wurtzite

1.2.2. Propriétés électroniques

1.2.3.1. structure de bande

La connaissance de la structure de bande d'un semi-conducteur est essentielle pour la réalisation des dispositifs. Les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons en fonction de leur vecteur d'onde k . Un des points importants de la structure de bande est la valeur de l'énergie séparant le maximum de la bande de valence du minimum de la bande de conduction ("gap" du matériau). De nombreux calculs basés sur diverses méthodes ont été réalisés pour déterminer la structure de bande du binaire GaN, la méthode empirique des pseudo-potentiels fournissant les meilleurs résultats en termes de comparaison avec les mesures expérimentales du gap. La **Figure I.5** représente les structures de bandes obtenues pour le GaN, a) cubique, b) hexagonal.

Le GaN possède un gap direct c'est à dire le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence se trouve alignés dans "l'espace des k " au centre de la zone de Brillouin.

Les valeurs des largeurs de la bande interdite pour le GaN wurtzite à 300K est de 3,4 eV. Cette valeur de gap direct correspondent à une longueur d'onde de 364nm permettant de concevoir des composants optoélectroniques de nouvelles générations dans la gamme spectrale de l'ultraviolet (LEDs, Lasers, Photodétecteurs) [6].

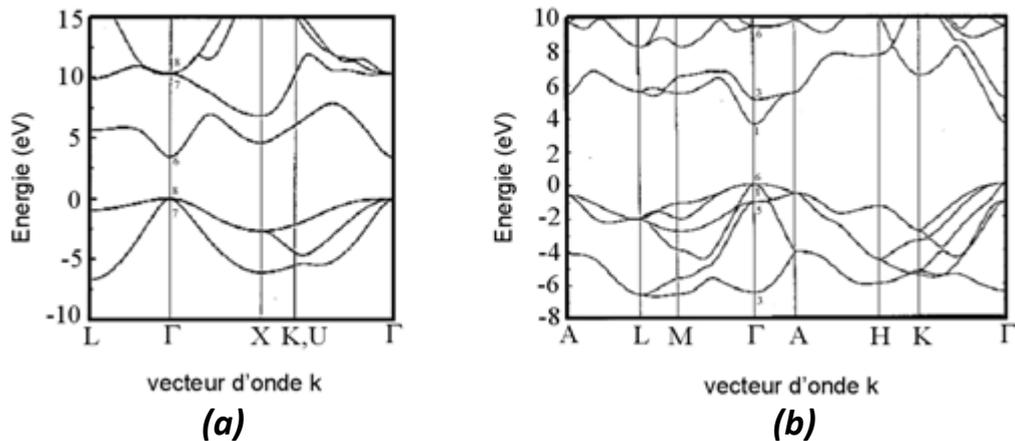


Figure I-5 : La structure de bande pour le GaN : a) cubique, b) hexagonal [2].

I.2.2.2. mobilité électronique et champ électrique critique

Une propriété électrique importante dans les semi-conducteurs est la capacité de déplacement des électrons sous l'effet d'un champ électrique, appelée mobilité électronique. La mobilité électronique dépend fortement de la qualité cristallographique du matériau. La concentration des électrons et leur mobilité sont directement liées à la résistivité de la couche, mesurée par la technique Van der Pauw. Un régime de survitesse apparaît lorsque les électrons de la vallée principale acquièrent suffisamment d'énergie pour passer dans la vallée secondaire M-L. Dans les vallées secondaires la masse effective des électrons augmente ce qui entraîne une diminution de la vitesse des porteurs. Ce phénomène est représenté dans la **Figure I-6** où la vitesse des électrons est représentée en fonction du champ électrique. Le champ critique E_{cr} représente le champ électrique auquel correspond une vitesse de dérive des électrons maximale. Pour le GaN, ce champ E_{cr} est de l'ordre de 150 kV/cm [7].

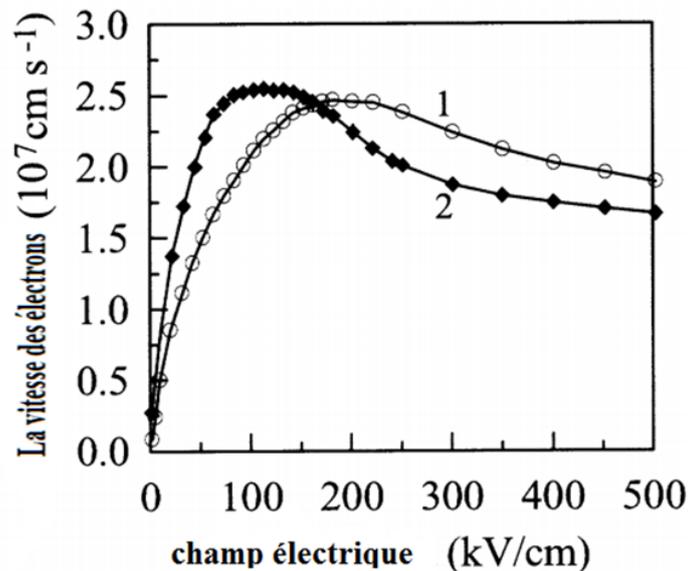


Figure I-6 : Evolution de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique, pour le GaN, la structure Wurtzite est représentée par la courbe 1 et la structure Zinc-Blende par la courbe 2 [7].

1.2.3. Propriétés optique

Dans les semi-conducteurs, les propriétés optiques résultent des transitions électroniques entre les niveaux de la bande de valence et de la bande de conduction. Les transitions peuvent être directes ou indirectes, peuvent impliquer des interactions entre les paires électron-trou et les niveaux énergétiques dus à des impuretés ou des défauts. Les propriétés optiques dépendent beaucoup de l'échantillon lui-même. Les mesures optiques donnent des informations sur la structure et la composition.

Le nitride de gallium est biréfringent. La connaissance de son indice de réfraction est importante pour l'élaboration des structures des dispositifs d'optoélectronique. Il est mesuré par ellipsométrie spectroscopique, réflectivité, transmission ou encore luminescence dans le visible et l'infrarouge. Dans cette région, la partie imaginaire de l'indice de réfraction est négligeable.

La valeur de sa partie réelle s'exprime de la manière suivante, en fonction de l'énergie E de la source lumineuse:

$$n = \left[1 + \frac{A}{E_0^2 - E^2} \right] \quad (\text{I-1})$$

Où A et E_0 sont des constantes énergétiques

Avec $A = 385 \text{ eV}$ et $E_0 = 9 \text{ eV}$. [8]

Entre 900 et 2000nm, la dispersion est faible. En dessous de 800nm, elle augmente car l'énergie des phonons approche celle du gap. Il apparaît aussi que la

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

dispersion est très sensible à la teneur en oxygène, elle diminue quand la concentration en oxygène augmente.

De manière générale, la valeur de l'indice de réfraction varie entre 2,1 et 2,5 à 1900nm et 480 nm respectivement pour un film cristallin de GaN de bonne qualité[9].

Le coefficient d'absorption a aussi fait l'objet de nombreuses études. La valeur du carré est linéaire avec l'énergie des photons au-dessous de l'énergie du gap :

$$\alpha^2 = (\alpha_0)^2 \cdot (E - E_g) \quad (\text{I-2})$$

Avec $\alpha_0 = 1,08 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$.

E_g : Energie du gap

Ceci confirme le fait que le gap du GaN est direct [10]. Les mesures du coefficient d'absorption de GaN de type wurtzite au gap excitonique donnent des valeurs de 3×10^4 à $1,5 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$. En outre, il faut signaler que les mesures de réflectance en UV/visible sont sensibles aux transitions excitoniques et inter bandes [9].

1.2.3. Propriétés thermique

La dilatation thermique, la chaleur spécifique, la température de Debye et la conductivité thermique permettent de définir les propriétés thermiques du nitru de gallium.

1.2.3.1. Dilatation thermique

La dilatation thermique est liée à la variation de la densité d'un solide avec la température, les distances interatomiques se modifiant sous l'effet des vibrations. La dilatation thermique d'un semi-conducteur dépend de sa microstructure; c'est à dire de sa stœchiométrie, de la présence de défauts étendus, de la concentration en porteurs libres, pour obtenir des résultats cohérents, les mesures doivent être réalisées sur des monocristaux [11].

La dilatation thermique est mesurée en fonction de la température sur des monocristaux. Selon le paramètre **a**, le coefficient de dilatation thermique est constant sur toute la gamme de température. Selon le paramètre **c**, la composante principale parallèle à l'axe **c** dépend de la température, la dilatation thermique connaissant une rupture de pente à 700K .

La valeur du coefficient de dilatation thermique est importante à connaître pour l'élaboration de dispositifs électroniques. En effet, dans le cas de couches hétéroépitaxiées, si la dilatation thermique du substrat est différente de celle de la

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

couche, il peut se créer des contraintes résiduelles induisant des fissures du substrat et de la couche épitaxiée . Ceci intervient alors fortement sur l'efficacité du dispositif considéré.

Le **Tableau I-4** représente des valeurs de coefficients de dilatation thermique, comparés aux substrats les plus souvent utilisés lors de l'hétéroépitaxie de GaN. Bien que le carbure de silicium 6H-SiC soit le plus adapté en terme de compatibilité de la dilatation thermique aux températures (autour de 300K), c'est le saphir qui est le plus souvent utilisé en raison de son coût bien moins élevé [12].

Matériaux	GaN		Saphir	6H-SiC	3C-SiC	ZnO	GaAs
	300-700k	700-900k	300K	300K	300K	300K	300K
$\alpha_a (10^{-6}k^{-1})$	5,59		7,5	4,2	2,7	2,9	6
$\alpha_c (10^{-6}k^{-1})$	3,17	7,75	8,5	4,7	2,7	4,75	6

Tableau I-4 : Coefficients de dilatation thermique α de GaN et divers substrats [12].

1.2.3.2. Chaleur spécifique

Le coefficient de chaleur spécifique permet de calculer la variation de température d'un système auquel on apporte une quantité connue de chaleur. Dans les semi-conducteurs, l'énergie apportée a pour effet une augmentation du nombre de phonons présents, les électrons des bandes de conduction et les trous des bandes de valence étant en général en nombre insuffisant pour jouer un rôle important par rapport aux phonons. La concentration en porteurs libres et la présence de défauts ponctuels ou étendus affectent la chaleur spécifique. La chaleur spécifique (à pression constante) est mesurée en fonction de la température. La capacité calorifique suit la loi suivante [12] :

$$C_p = \left(\frac{12\pi^4 R}{5} \right) \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 C \quad (\text{I-3})$$

Où C : Capacité thermique, T : Température, R : la constante de Boltzman,

Avec $R = 8,3144 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et θ_D la température de Debye.

Chapitre I Le nitrure de gallium, propriétés et croissance

1.2.3.3. Température de Debye

La température de Debye θ_D caractérise la valeur maximale des énergies des vibrations. Elle a été calculée par Polian et al. [13] à partir de la chaleur spécifique ou encore par Demidienko et al. [14] à partir des propriétés élastiques. Les valeurs calculées par Demidienko et al. [14] de θ_D sont respectivement de 700K et 650K qui sont cohérentes avec les calculs de Kim et al. [15] Christensen et al. [16] et Azuhaka et al. [17] qui prédisent θ_D entre 620 et 690K.

1.2.3.4. Conductivité thermique

La conductivité thermique κ est la propriété cinétique qui est déterminée par les contributions des degrés de liberté électronique, rotationnel et vibrationnel. Dans les semi-conducteurs, à cause des faibles densités d'électrons de conduction et de trous, la contribution principale au transport de chaleur vient des phonons. Dans un cristal pur, la diffusion des phonons est le processus limitant. Dans un cristal réel, la conductivité thermique est déterminée par les défauts ponctuels ainsi que les joints de grain dans les céramiques. De toutes les propriétés thermiques, la conductivité est la plus affectée par les défauts de structure [18].

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

Le **Tableau I-5** représente l'impact des propriétés du GaN sur les performances des composants [19].

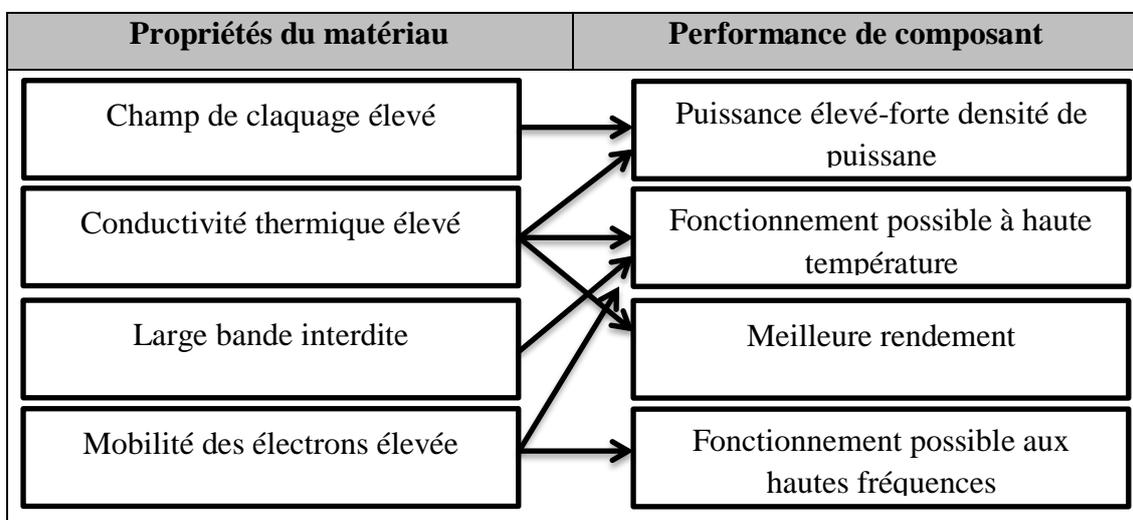


Tableau I-5 : Impact des propriétés du GaN sur les performances des composants [19].

I.3. Les différentes techniques de croissance épitaxiale de GaN

Actuellement, le terme d'épitaxie est utilisé pour tout dépôt monocristallin dont l'orientation est fixée par un substrat. Si ce substrat est de même nature que le dépôt, on parle d'homoépitaxie, s'il est de nature différente, le terme d'hétéroépitaxie est employé. Les progrès dans l'utilisation des matériaux à base de nitrures d'éléments III (GaN, AlN et InN) ont été freinés par des difficultés intrinsèques liées au matériau, et surtout à l'absence de monocristaux ou de substrats adaptés. L'enjeu est donc d'améliorer la qualité du matériau et de réduire la densité de dislocations.

Deux grandes voies se distinguent :

La croissance du GaN sur des substrats pleines plaques à basse pression ou la croissance par ELO (Epitaxial Lateral Overgrowth). La croissance ELO est basée sur la croissance sélective (SAG : Selective Area Growth) à partir de substrats masqués où la surcroissance latérale, à travers les ouvertures, s'étend au-dessus du masque diélectrique jusqu'à la coalescence. Les dislocations sous le masque ne peuvent ainsi pas se propager du substrat vers la couche épitaxiée latéralement. Cette croissance ELO est surtout mise en oeuvre pour des dispositifs en phase vapeur.

1.3.1. L'épitaxie en phase vapeur ou VPE (Vapor Phase Epitaxy)

A partir d'une phase mère gazeuse et par une réaction de condensation à l'équilibre ou hors équilibre, un cristal est formé. La réaction se produit dans un réacteur équipé d'un système d'arrivée et de recyclage des gaz. Pour les semi-conducteurs III-V, cette technique se décompose en trois grandes catégories se distinguant par la nature des sources gazeuses utilisées. La technique HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) utilise des molécules de type hydrures, la CIVPE (Chlorure Vapor Phase Epitaxy), des chlorures et la MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy), des organométalliques. Chaque technique possède une géométrie particulière de réacteurs VPE impliquant différentes températures de croissance et différentes vitesses de dépôt [20].

1.3.1.1. MOVPE

La croissance de GaN par MOVPE provient de la réaction d'un gaz organométallique (par exemple le TriMéthyl Gallium TMGa), précurseur de l'élément III, gallium, avec de l'ammoniac NH₃, pour des températures avoisinantes les 1000°C.

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance



Où **g** : état gazeux

s : état solide

La configuration du réacteur est dite à « murs froids », c'est à dire que seul le suscepteur est chauffé. En raison de son coût élevé et de la limitation de la vitesse de croissance (**3 - 4 $\mu\text{m/h}$**), cette technique n'est généralement pas adaptée à la croissance de couches épaisses de GaN. C'est une méthode utilisée pour la réalisation de couches tampons à basse température et la production de couches minces destinées à des applications de dispositifs électroniques. Principalement, la croissance de GaN par MOVPE est réalisée à basse pression pour créer un flux laminaire qui fournit un bon contrôle de l'épaisseur et de l'interface substrat paroi [21].

Dans ce processus MOVPE à pression atmosphérique, une couche tampon de quelques centaines de nanomètres (< 400 nm) est d'abord déposée sur un substrat saphir (0001), à basse température (525°C). Cette couche tampon est soit du GaN[22], soit de l'AlN. Une couche de GaN de quelques microns est ensuite épitaxiée.

Diverses techniques ont été développées pour améliorer la qualité des couches minces telles que :

– L'ELO two step. Elle offre une meilleure morphologie de surface et une diminution de la densité de dislocations par rapport à l'ELO one-step classique. Elle se décompose en deux étapes: dans une première étape, l'extension verticale est favorisée alors que dans la seconde étape c'est l'extension latérale qui est privilégiée. Ce processus présente l'avantage de courber les dislocations qui permettent de réduire significativement la densité de dislocations sur la surface du substrat jusqu'à $5 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ [23].

– La croissance à trois dimensions (3D) proposée par Frayssinet et al. [24] diminue la densité de dislocations des couches minces. Une nucléation 2D - 3D composée d'îlots de GaN (à basse température) est créée après le traitement du substrat saphir par SiN, un mélange de silane (SiH_4) et d'ammoniac. Ensuite la croissance de GaN se développe à partir des îlots par une croissance latérale et verticale jusqu'à la coalescence. La densité **d** dislocations est réduite à $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$.

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

– Sur le même principe d'une croissance sans masque, une étude est réalisée sur une plaquette de saphir attaquée par H_3PO_4 pour créer des creux pyramidaux triangulaires inversés distribués uniformément sur la surface (0001). La croissance sélective de GaN est initiée dans ces creux, suivie par une croissance type ELO pour réaliser des couches de GaN ($8,4 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$) [25].

Le dépôt de couches sur des grandes surfaces nécessite par conséquent l'utilisation de substrats différents du GaN, et il n'existe pas actuellement de substrat en accord de maille, et ayant le coefficient thermique proche de celui du GaN.

Le substrat utilisé pour notre étude est le saphir (Al_2O_3) pour le premier échantillon, le saphir offre l'avantage d'être disponible en quantité, à coût relativement raisonnable, d'être très stable à haute température (autour de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), et d'être transparent dans toute la gamme spectrale utile du GaN.

Le deuxième échantillon la couche de GaN élaborée sur un substrat d'AlN sur saphir. L'AlN utilisé présente un très grand contraste électrique, ils permettent d'étudier les propriétés électriques épitaxiées sur AlN [6].

Plusieurs géométries de réacteurs MOVPE existent, qui dépendent de la qualité, de la régularité et de la stabilité du flux de gaz.

Le réacteur dans lequel la croissance du GaN est réalisée au niveau du Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz est en forme de T (T-shaped reactor **Figure I-7**). Le Centre National d'étude des Télécommunications (CNET) a développé cette géométrie originale dans les années 90. Elle combine les avantages du réacteur horizontal pour l'uniformité du flux et du réacteur vertical, pour la facilité de chargement de l'échantillon. Il a été utilisé pour les matériaux III-V (InP et GaAs)[26]. Puis, il a été reconfiguré par l'équipe nitru de GaN du Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz pour étendre le champ de ses possibilités à la croissance des nitru de GaN à haute température (jusqu'à $1000 \text{ }^\circ\text{C}$)[27].

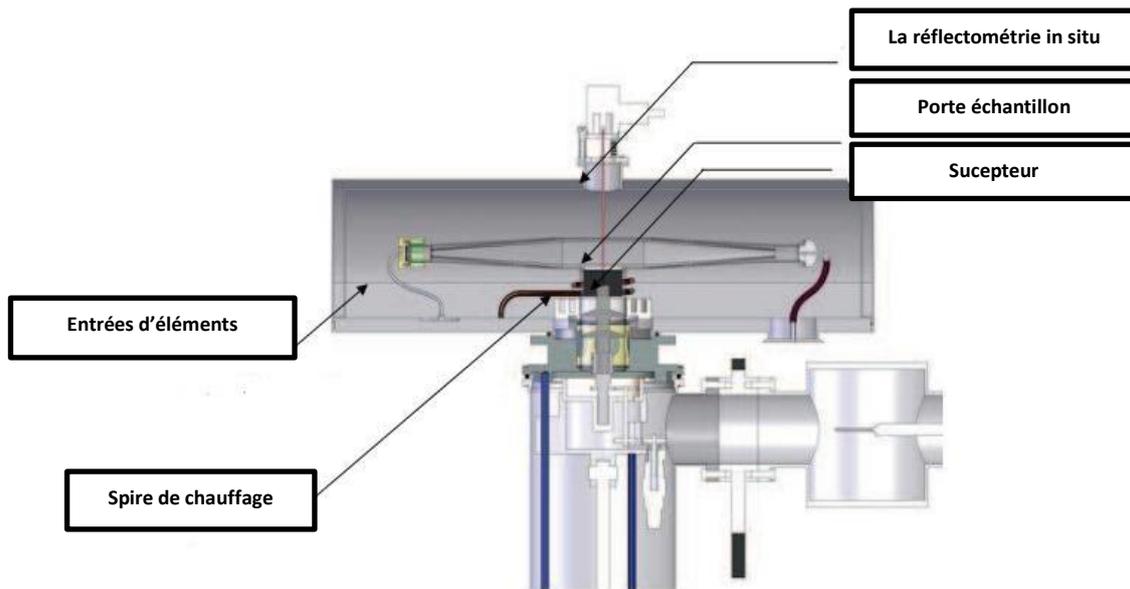


Figure I-7 Coupe de la chambre de croissance de type MOVPE.

I.4. Dopage résiduel et intentionnel

1.4.1. Origine du dopage résiduel

Même les meilleurs échantillons de GaN, contiennent une densité de défauts très élevée, ce dont témoignent leurs forts dopages résiduels de type N (de l'ordre de 10^{17}cm^{-3}) [28]. L'étude d'un défaut isolé est difficile et nécessite la corrélation d'études théoriques et expérimentales. Il en résulte que la nature de la plupart des défauts électriquement actifs dans le GaN n'est pas déterminée avec certitude. Il existe dans la littérature plusieurs théories qui s'opposent pour expliquer ce dopage résiduel. Ces théories font intervenir les défauts structuraux, nombreux dans les nitrures. Nous reportons ici les principaux défauts ponctuels susceptibles d'être à l'origine du dopage résiduel dans le nitru de gallium:

1.4.1.1. Lacunes d'azote

Ces lacunes se forment plus facilement avec des conditions de croissance riche en gallium et vice versa pour les lacunes de gallium[9]. Des calculs ont montré que l'énergie de formation de lacunes d'azote est de 4eV, impliquant qu'elles ne devraient pas être assez nombreuses à température ambiante pour expliquer une telle concentration de porteurs [29]. Cependant, ces calculs aboutissent également à une faible énergie de formation des lacunes de gallium (accepteur profond) dans une

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

couche de type N et à une faible énergie de formation des lacunes d'azote dans une couche de type P. Les lacunes semblent être les meilleurs candidats pour expliquer le phénomène de compensation observé dans le GaN.

I.4.1.2. Atome en site interstitiel

Une impureté en site interstitiel est supposée donner un niveau peu profond dans un cas et un niveau profond dans l'autre. Les atomes interstitiels d'azote ou de gallium ont des énergies de formation très élevées. Leur formation est peu probable.

I.4.1.3. Atomes d'impuretés en site substitutionnel

Le silicium, l'oxygène et le carbone sont souvent présents dans la couche épitaxiée. Les éléments en silice présents dans le bâti peuvent être l'origine du silicium et probablement de l'oxygène qui peut aussi provenir directement ou indirectement des gaz vecteurs ou du NH_3 quand il est utilisé comme précurseur. Le silicium, donneur dans les nitrures, se place préférentiellement en site Ga. L'oxygène se place en site azote et agit comme donneur simple, favorisé sous conditions de croissance riche en gallium. Son énergie d'activation, d'après Meyer et al [30], est de 80 MeV. Chung et al [31] ont montré que l'incorporation de l'oxygène diminue en augmentant la température de croissance. Comme la différence des rayons des atomes de carbone et de l'azote est faible, le carbone se place préférentiellement en site d'azote et se comporte comme un accepteur. Pour expliquer l'origine du dopage résiduel, plusieurs méthodes expérimentales ont été utilisées. Par des mesures SIMS, Popovici et son équipe [32] ont montré que la concentration en impuretés dans les couches déposées par MBE (Epitaxie par Jet Moléculaires) n'était pas corrélée avec la concentration en dopants résiduels mesurée par effet Hall. Ils ont aussi montré une diminution de la concentration des porteurs lorsque la concentration en azote dans la couche augmente. Ce qui confirme que les lacunes d'azote sont source du dopage résiduel. Cependant des résultats contradictoires ont été rapportés par Abernathy et al [33], qui ont observé une grande concentration d'électrons pour des conditions riches en azote. Une contribution des deux phénomènes pourrait être à l'origine du dopage résiduel comme le suggère Xu et al [34]. L'origine du dopage résiduel n'est donc pas nettement établie, même si la plupart des auteurs l'attribue aux lacunes d'azote.

Le dopage résiduel est néfaste pour les applications en micro- et optoélectronique (HEMT, Photodétecteurs...), tout d'abord parce que ces dispositifs nécessitent des couches semi- isolantes et ensuite parce que le dopage résiduel rend le dopage

Chapitre I Le nitru de gallium, propriétés et croissance

intentionnel (N ou P) particulièrement délicat. Il y'a deux possibilités, très difficiles à mettre en œuvre en pratique, pour éliminer ce dopage résiduel :

- (i) élimination des défauts intrinsèques qui en sont à l'origine mais la méconnaissance de ces défauts rend leur élimination difficile.
- (ii) la compensation par des impuretés extrinsèques de type P. C'est cette dernière méthode qui est utilisée, notamment en dopant avec le fer [6].

1.4.2. Le dopage intentionnel

La fabrication des dispositifs micro- et optoélectroniques à base de nitrures III-N nécessite le contrôle de la concentration d'impuretés résiduelles dans le matériau, ainsi que la maîtrise de l'incorporation d'impuretés spécifiques pour le dopage N et P. Le dopage s'effectue habituellement par trois techniques: l'incorporation lors de la croissance, la diffusion à l'état solide et l'implantation ionique. Toutefois, des problèmes spécifiques dans le cas des nitrures font encore l'objet d'une intense recherche. En effet, la grande complexité du dopage de type P constitue un obstacle au développement de diodes et détecteurs dans l'ultraviolet lointain.

1.4.2.1. Dopage de type N

Divers éléments peuvent être utilisés pour le dopage de type N, mais le plus courant est le silicium. Dans le GaN, les atomes de silicium se logent principalement sur les sites du gallium, car le silicium a un rayon de covalence plus proche de celui du gallium que de celui de l'azote. Les précurseurs utilisés sont le silane en MOVPE et une source solide en MBE. L'énergie d'activation du silicium n'est pas déterminée précisément, elle est généralement donnée entre 12 et 17 MeV[35].

1.4.2.1. Dopage de type P

Le dopage de type P des nitrures est particulièrement complexe. Divers accepteurs ont été étudiés (notamment Li, Na, K, Be, Zn et Ca) mais le seul efficace semble être le magnésium du fait de sa plus grande solubilité dans les nitrures III-N [36]. Le problème majeur du magnésium est que son énergie d'activation est élevée et augmente avec la concentration en aluminium dans l'AlGaN. Ainsi à température ambiante, seulement quelques pourcents des atomes de Mg sont ionisés. Par ailleurs, les atomes de magnésium ont tendance à s'accumuler au centre des dislocations ce qui laisse autour de celles-ci des régions appauvries en magnésium, dont les propriétés électriques sont altérées.

I.4. Les composés ternaires $Al_xGa_{(1-x)}N$ et $B_xGa_{(1-x)}N$

L'alliage $Al_xGa_{(1-x)}N$ sert souvent de barrière de confinement dans les structures optoélectroniques à base de nitrures. La connaissance de ses propriétés et la maîtrise de sa croissance sont des objectifs impératifs, pour développer de nouveaux composants en particulier dans le domaine de l'UV lointain.

Dans les alliages $Al_xGa_{(1-x)}N$ non dopés, l'effet de localisation des porteurs augmente avec la concentration en aluminium et au-delà d'une concentration de 50%, l'alliage n'est plus semi-conducteur mais semi-isolant (s'il n'est pas intentionnellement dopé). Lorsqu'on dope avec du silicium ces alliages à forte teneur en aluminium, on a une forte augmentation de la conductivité à partir de $10^{18}cm^{-3}$ [37]. Il est toutefois important de noter qu'il existe une limite supérieure dans le dopage de type N de l'AlN par le silicium. Si la concentration atomique de ce dernier dépasse $3 \times 10^{19}cm^{-3}$, un phénomène d'auto-compensation se produit et l'AlN devient à nouveau résistif.

Les paramètres de maille des alliages ternaires sont très bien décrits par une interpolation linéaire des coefficients de GaN et AlN pour $Al_xGa_{(1-x)}N$. Cette interpolation (Loi de Vegard) [38] est généralement étendue aux propriétés structurales, thermiques et mécaniques, etc.

$$c_{Al_xGa_{(1-x)}N} = Xc_{AlN} + (1-X)c_{GaN} \quad (I-5)$$

$$a_{Al_xGa_{(1-x)}N} = Xa_{AlN} + (1-X)a_{GaN} \quad (I-6)$$

Pour les ternaires $Al_xGa_{(1-x)}N$, l'énergie de la bande interdite ne suit pas cette interpolation, puisqu'elle est généralement non linéaire en fonction de la composition. Un facteur de non linéarité est introduit: c'est le coefficient b (bowing), qui vaut 1eV pour l'AlGaIn [39].

$$E_{g Al_xGa_{(1-x)}N} = XE_{g AlN} + (1-X)E_{g GaN} - X(1-X)b \quad (I-7)$$

Pour le $B_xGa_{(1-x)}N$, les mesures faites au niveau de Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz, pour déterminer les propriétés, structurales et électroniques en fonction de la composition, montre qu'un bowing existe aussi pour ce nouveau ternaire [40].

Les énergies de la bande interdite des binaires GaN, AlN et BN et leur paramètre de maille sont représenté sur la **Figure I-8**, montrant que les alliages AlGaN et BGaN (et le quaternaire BAlGaN) permettent de concevoir des composants optoélectronique fonctionnant dans la gamme spectrale de 200nm à 364nm. L'alliage BGaN(et le BAlGaN) peut être en accord de maille sur AlN pour une composition de bore de l'ordre de 10% [6].

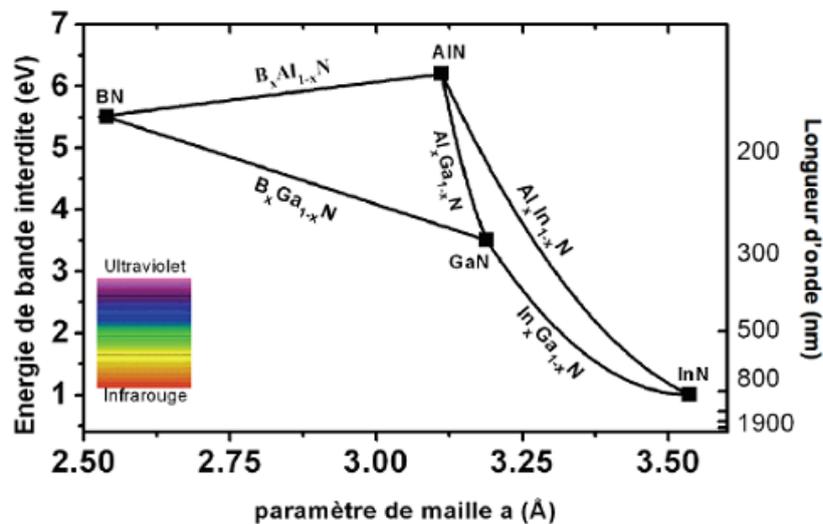


Figure I-8 Diagramme du gap en fonction du paramètre de maille des ternaires nitrures III-N [6].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les propriétés du nitru de gallium structurales, thermiques, électronique et optiques.

Le GaN possède de très bonnes propriétés physico-chimiques pouvant être utilisé en électronique et en optoélectronique, c'est un semi-conducteur à large gap direct (3.4eV); il émet dans les courtes longueurs d'onde: le bleu, le violet et l'ultraviolet.

Il peut exister sous deux formes cristallines: la phase wurtzite (hexagonale) qui est stable, et la phase blende de zinc (cubique) qui est métastable, Il est non intentionnellement dopé N, avec une concentration allant de 10^{16} à 10^{19}cm^{-3} .

Chapitre I Le nitruire de gallium, propriétés et croissance

Puis nous avons présenté les méthodes permettant l'élaboration, spécifiquement la technique de croissance MOVPE.

Enfin nous avons donné les paramètres des alliages ternaires, et leur variation avec la composition.

Bibliographie: Chapitre I

- [1] **Shuji Nakamura, Gerhard Fasol** , «The Blue Laser Diode GaN Based Light Emitters and Lasers»,Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997.

- [2] **Hamroun Amin**, «Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT) AlGaN/GaN : Modélisation et simulation des performances»,
Mémoire de magistère soutenue 2011, Université Tlemcen.

- [3] **Lény Baczkowski**, « Modélisation et Caractérisation Thermique de Transistors de Puissance Hyperfréquence GaN et Conséquences Sur La Fiabilité de Modules Radars d'émission/Réception En Bande X»,
Thèse de doctorat soutenue le 03 Décembre 2015, Université de Lille.

- [4] **Annaïg DENIS**, «Elaboration; cristallogénèse et caractérisations physico-chimique des nitrures des éléments de la colonne III_A et en particulier et particulier de GaN », Thèse de doctorat soutenue 9 Octobre 2003, Université Bordeaux I

- [5] **Philippe Agnès**, «Caractérisation électrique et optique du nitru de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus »,
Thèse Doctorat, Soutenue le 6 Décembre 1999, l'institut national des sciences appliquées de Lyon

- [6] **Baghdadli Tewfik**, «Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique »,
Thèse de doctorat soutenue le 10 Juillet 2009, Université de Tlemcen.

- [7] **Ludovic Lacheze**, «Etude et simulation des effets parasites dans les HEMT_s ALGaN/GaN», Thèse de doctorat soutenue le 14 Décembre 2009, Université de Bordeaux.

Chapitre I Le nitride de gallium, propriétés et croissance

- [8] **Ananta R, Acharya** ,«Group III – Nitride Semiconductors: Preeminent Materials for Modern Electronic and Optoelectronic Applications»,The Himalayan Physics ,Year 5, Vol. 5, Kartik 2071 Nov 2014.
- [9] **B. Gil**, «Group III nitride semiconductor compounds: physics and applications», Oxford England, Clarendon Press, 1998.
- [10]**Shuji Nakamura, Shigefusa F. Chichibu**, «Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes», by CRC Press, 9 March 2000.
- [11] **I. Akasaki, H. Amano** ,«Crystal structure, mechanical properties and thermal properties of GaN», publication INSPEC, Datareview 1994,
- [12]**S. Krukowski, M. Leszczynski, S. Porowski** «Thermal properties of the group III nitrides», publication INSPEC, Datareview 1998.
- [13]**P.Polian, M.Grinsditch and I.Grzegory** , «Elastic constants of gallium nitride»,J. Appl. Phys., 79(1996).
- [14]**A. F. Demidenko, V. I. Koshcheko, L. D. Sabanova and Y. M. Gran**, «Low-temperature heat capacity, entropy, and enthalpy of aluminum and gallium nitrides», Russ. J. Phys. Chem., 49(1975).
- [15]**K. Kim, R. L. Lambrecht and B. Segall** ,«Elastic constants and related properties of tetrahedrally bonded BN, AlN, GaN and InN»,Phys. Rev. B, 53(1996).
- [16]**N. E. Christensen and I. Gorczyca**, «Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure», Phys. Rev. B, 50(1994).

- [17] **T. Azuhata, T. Sota and K. Suzuki**, «Elastic constants of III - V compound semiconductors: modification of Keyes' relation», *J. Phys. Condens. Matter*, 8(1996).
- [18] **Hamdoune Abdelkader**, «Elaboration du nitrure de gallium; Etude de ses propriétés et applications», Thèse de doctorat soutenue le 21 Juin 2006, Université de Tlemcen.
- [19] **Elias Al Alam, Alain Cazarré, Frédéric Morancho, Karine Isoird, Yvon Cordier**, «Le Nitrure de Gallium : un Matériau d'Avenir pour la Conception de Composants de Puissance Haute Tension et Haute Température», MGE 2008 4ème Colloque Matériaux du Génie Electrique, May 2008, TOULOUSE, France. 4 p., 2008.
- [20] **Julie Turret**, «Etude de l'épitaxie sélective de GaN/saphir et GaN/GaN-MOVPE par HVPE. Application à la croissance de structure périodiques de faible dimensionnalité», Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2008.
- [21] **Tadao Hashimoto, Masaaki Yuri, Masahiro Ishida, Yoshitami Terakoshi, Osamu Imafuji, Takashi Sugino, Kunio Itoh**, «Reduction of Threading Dislocations in GaN on Sapphire by Buffer Layer Annealing in Low-Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition», *The Japan Society of Applied Physics* 1999.
- [22] **X. H. Wu, P. Fini, S. Keller, E. J. Tarsa, B. Heying, U. K. Mishra, S. P. DenBaars, J. S. Speck**, «Morphological and Structural Transitions in GaN Films Grown on Sapphire by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition» *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996.
- [23] **Pierre Ruterana, Martin Albrecht, Jörg Neugebauer**, «Nitride Semiconductors: Handbook on Materials and Devices», WILEY-VCH, 2003.
- [24] **Eric Frayssinet, Bernard Beaumont, Jean-Pierre Faurie, Pierre Gibart, Zsolt Makkai Bela Pécz Pierre, Lefebvre Pierre Valvin**, «Micro Epitaxial lateral overgrowth of GaN/sapphire by Metal Organic Vapour Phase Epitaxy», *MRS Internet Journal Nitride Semiconductor Research* 7,8 (2002) 1.

- [25] **Wei Zhang, Qiuyan Hao, Caichi Liu ,Yuchun Feng**, «No mask epitaxial lateral overgrowth of gallium nitride on sapphire»,*Journal of Alloys and Compounds* 456 (2008) 368.
- [26] **Mircea, A. Ougazzaden, and R. Mellet** ,« Very uniform epitaxy», *Prog. Cryst. Growth Charact*, 1989.
- [27] **S. Gautier, C. Sartel, S. Ould-Saad, J. Martin, A. Sirenko, and A. Ougazzaden** , «GaN materials growth by movpe in a new-design reactor using DMHY and NH₃»,*Journal of Crystal Growth*, 2006.
- [28] **Klaus H. Ploog and Oliver Brandt**, «Doping of group III nitrides», *Journal of Vacuum Science & Technology* 1998.
- [29] **Jörg Neugebauer, Chris G. Van de Walle**, «Gallium vacancies and the yellow luminescence in GaN», *Applied Physics Letters: Vol 69*, May 1996.
- [30] **B.K. Meyer, A. Hoffmann, P. Thurian**,«Defect spectroscopy in the nitrides In Group III nitride semiconductors compound: physics and application»,*Oxford: Clarendon press*, 1998.
- [31] **B. Chung, M. Gershenson** «The influence of oxygen on the electrical and optical properties of GaN crystals grow by metalorganic vapour phase epitaxy» *J. Appl. Phys*, vol 72, n° 2, 1992.
- [32] **G. Popovici, H. Morkoç, S. Noor Mohammad**, «Deposition and properties of group III nitrides by molecular beam epitaxy in group III nitride semiconductors compounds», *Oxford : Carendon press*, 1998.

- [33] **C.R. Abernaty** «Growth of group II nitrides from molecular beam in GaN and related materials», New York, 1997.
- [34] **X.XU, H. Liu and C. Shi** , «Residual donors and compensation i metalorganic chemical vapor deposition as-grown nGaN», J. Appl. Phys., vol. 90, n° 12, 2001.
- [35] **J K Sheu, G C Chi**, «The doping process and dopant characteristics of GaN», Journal of Physics: Condensed Matter, Published 23 May 2002.
- [36] **C. Stampfl , J. Neugebauer , Chris G. Van de Walle** , «Doping of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys», Materials Science and Engineering B59 (1999) 253–257.
- [37] **H.X. JIANG, J.Y. LIN**, «ALGaN and InAlGaN alloys-epitaxial growth, optical and electrical properties, and applications», OPTO-ELECTRONICS REVIEW 10(4), 271–286 (2002).
- [38] **K. T. Jacob, Shubhra Raj, L. Rannesh**, «Vegard’s law: a fundamental relation or an approximation?», Indian Institute of Science, Bangalore.
- [39] **S. R. Lee, A. F. Wright, M. H. Crawford, G. A. Petersen, J. Han, R. M. Biefeld**, «The band-gap bowing of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloys», Applied Physics Letters: Vol 74, April 1999.
- [40] **A. Ougazzaden, S. Gautier, T. Moudakir, Z. Djebbour, Z. Lochner, S. Choi, H. J. Kim, J.-H. Ryou, R. D. Dupuis, and A. A. Sirenko**, «Bandgap bowing in B GaN thin films», Applied Physics Letters: Vol.93 0833118 (2008).

Chapitre II : Caractérisation électrique du nitruire du gallium

II.1. Introduction

Le développement des matériaux III-N, et plus particulièrement le **GaN**, a permis de réaliser des dispositifs optoélectroniques performants dans le domaine du visible (bleu), et ultraviolet. Les procédés d'élaboration ont été optimisés sur des substrats tels que le **SiC**, et surtout le saphir. Cela a permis l'industrialisation de diodes laser et de diodes électroluminescentes bleues, utilisées dans le stockage optique à haute densité et l'affichage notamment.

Les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont directement reliées à la quantité de porteurs libres, électrons et trous présents dans la couche. Ce chapitre est dédié aux techniques de caractérisation électrique utilisées pour la mesure de la résistivité, de la concentration des porteurs et de la mobilité notamment la technique Van der Pauw / Effet Hall.

II.2. Mesure de la résistivité

La résistivité électrique est un paramètre très important pour la conception des dispositifs semi-conducteur. La résistivité d'un matériau dépend de la densité de porteurs libres, de leur mobilité et par conséquent des paramètres structuraux de la couche, et des défauts ponctuels et étendus. La résistivité est mesurée par deux méthodes, La méthode des quatre pointes alignées (de Wenner) ou La méthode des quatre pointes carrées (de Van der Pauw).

II.2.1. Méthode des quatre pointes

La méthode classique des deux pointes permet de mesurer la résistivité d'un matériau, mais à condition que la résistance à mesurer soit très grande devant celle des contacts. Or pour les semi-conducteurs, cette condition n'est pas satisfaite dans la plupart des cas. Pour s'affranchir de cette contrainte, on utilise la méthode des quatre pointes qui permet de mesurer la résistivité des semi-conducteurs épais ou en couche déposée sur un isolant dans la majorité des cas. Mais, elle peut aussi être sollicitée pour mesurer l'épaisseur de couches minces métalliques là où la résistivité ne varie pas beaucoup [1]. En effet, on doit injecter le courant en deux points (a et d sur la **Figure II-1**) et mesurer la tension entre deux autres points distincts (b et c). Les pointes sont placées au centre de l'échantillon et écartées les unes des autres d'une distance s . Etant donné que la mesure de la tension est ainsi découplée de l'injection

Chapitre II Caractérisation électrique du nitrure de gallium

du courant, l'effet de la résistance du contact est éliminé (l'appareil de mesure de tension ayant une impédance d'entrée très grande).

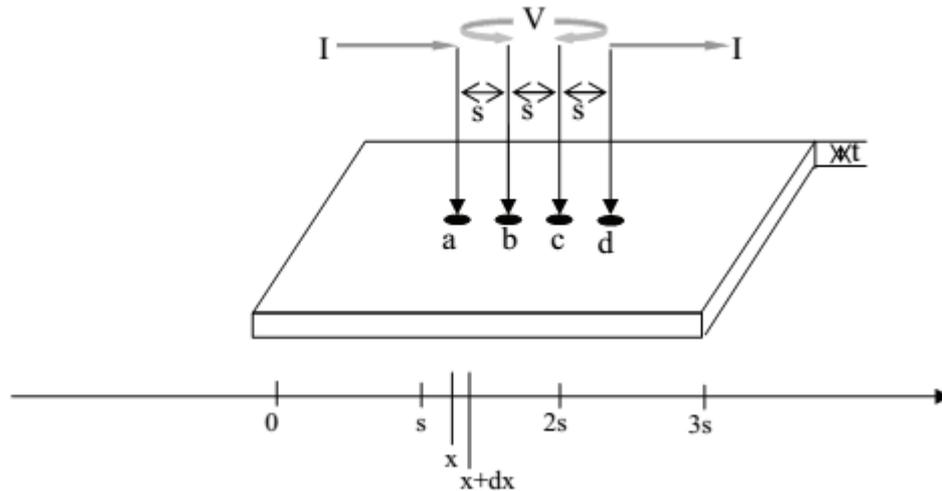


Figure II-1 : Principe de la détermination de la résistivité par la méthode des quatre pointes [2].

Considérons les quatre points alignés et espacés de s . Entre un point d'abscisse x et un point d'abscisse $(x + dx)$ **Figure II-1**, l'élément de résistance dR est donné par :

$$dR = \rho \frac{dx}{S} \quad (\text{II-1})$$

$$R = \int_s^{2s} dR = \rho \int_s^{2s} \frac{dx}{S}$$

Où S est la surface, et s est l'espace entre les point a,b,c,d

Selon la géométrie de l'échantillon on distingue deux cas (**Figure II-2**) :

- **Le cas d'un échantillon « mince »**, **Figure II-2 (A)** c'est-à-dire avec une épaisseur t plus petite que l'écartement entre les pointes, les équipotentielles sont cylindriques et la résistance totale entre les deux pointes internes est donnée par [3]:

$$R = \rho \int_s^{2s} \frac{dx}{\pi \cdot x \cdot t} = \frac{\rho}{\pi \cdot t} \ln 2 \quad (\text{II-2})$$

D'où la résistivité :

$$\rho = 4,53 \cdot t \cdot R = 4,53 \cdot t \cdot \frac{V}{I} \quad (\text{II-3})$$

- Le cas d'un échantillon « épais », **Figure II-2 (B)** c'est-à-dire avec une épaisseur t plus grande que l'écartement s entre les points, les équipotentielles sont des sphères et la résistance totale entre les deux points internes est donnée par [4]:

$$R = \rho \int_S^{2S} \frac{dx}{\pi \cdot x^2} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot s} \quad (\text{II-4})$$

Ainsi la résistivité est donnée par :

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot \frac{V}{I} \quad (\text{II-5})$$

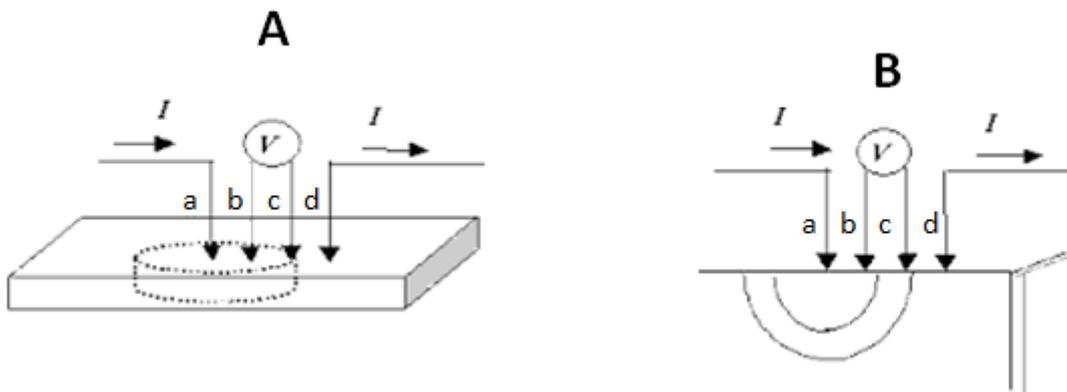


Figure II-2 : Les équipotentielles forment des cylindres dans le cas «A» d'une couche mince et des sphères dans le cas «B» d'un échantillon épais.

II.2.2. Méthode de Van Der Pauw

La méthode des quatre points est très sensible à la géométrie de l'échantillon, à l'espacement entre les points de mesure. Dans certains cas (notamment est utiliser pour des géométries arbitraires), l'utilisation de la technique Van der Pauw permet de mesurer la résistivité d'un échantillon plat, de forme quelconque. Trois conditions sont cependant nécessaires pour pouvoir appliquer cette méthode [5]:

- Echantillon plat et uniforme.
- Contacts ponctuels, ohmiques et situés à la périphérie de l'échantillon, avec un espacement très grand par rapport à la dimension de ces contacts.
- Echantillon connexe, c'est-à-dire sans trous isolés.

Les semi-conducteurs ont une surface chimiquement très active permettant facilement l'absorption d'oxygène et la formation d'oxyde et aussi de dépôt de

poussière qui peuvent former une barrière aux passages des porteurs. Afin d'optimiser la qualité des contacts entre le semi-conducteur et les métaux, il faut traiter la surface semi-conductrice.

Les échantillons de forme carré utilisé dans notre travail sont traités avec de l'acétone puis de l'éthanol dans un bain à ultrasons et recuit des contacts d'Indium après l'évaporation au niveau de Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz, La **Figure II-3** montre que sans traitement de surface et sans recuit des contacts la caractéristique courant-tension n'est pas linéaire par contre avec le traitement de surface et recuit des contacts d'Indium la caractéristique est bien linéaire (ohmique) et symétrique, pour le substrat GaN dopé silicium sur saphir [6].

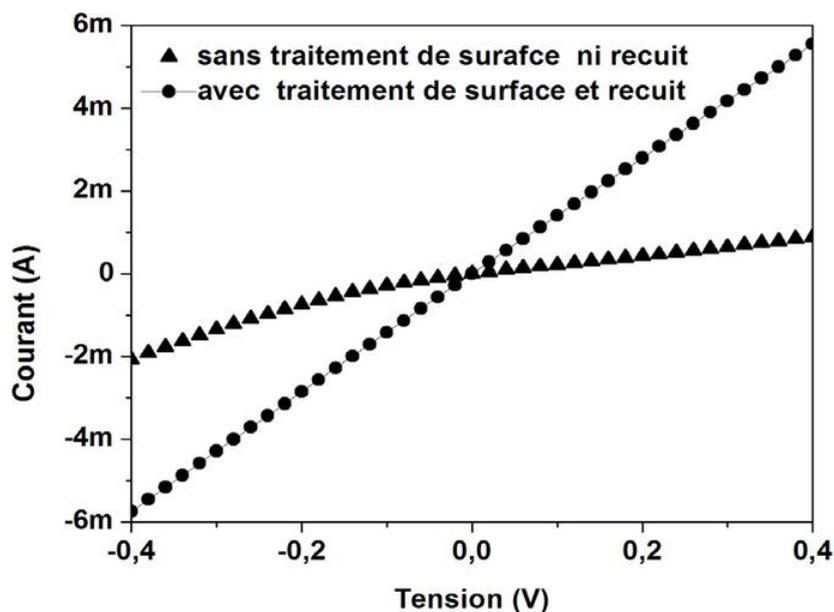


Figure II-3 : *Caractéristique courant –tension entre deux contacts d’indium sur une couche de nitrure de gallium dopé Si sur saphir avec et sans traitement de surface et recuit des contacts d’Indium [6].*

D'ailleurs le NIST (National Institute of Standards and Technology) conseille d'utiliser certaines formes plutôt que d'autres pour les mesures Van Der Pauw (**Figure II-4**) [7].

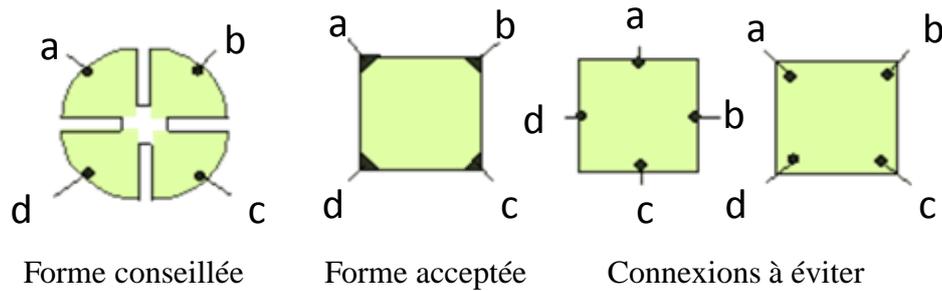


Figure II-4 : Formes diverses d'échantillons pour la méthode Van der Pauw

On doit disposer d'un échantillon de forme quelconque, possédant quatre contacts **a**, **b**, **c**, **d**, de sorte qu'il faut satisfaire les trois conditions de Van der Pauw.

On doit injecter le courant entre les contacts **a** et **b** et mesurer la tension entre **c** et **d** (côté opposé). Ensuite il faut injecter le courant entre **b** et **c** et mesurer la tension entre **a** et **d**, comme illustré sur (**Figure II-5**). Le rapport entre la tension mesurée et le courant injecté, donne les résistances **R_A** et **R_B**.

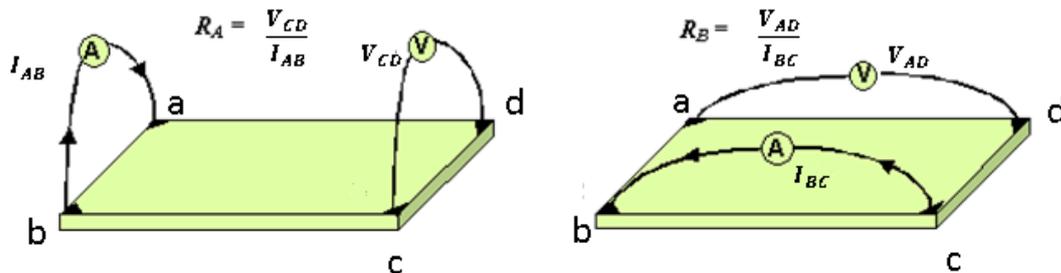


Figure II-5 : La configuration du courant et la mesure de la tension avec la configuration Van der Pauw pour déterminer la résistivité [7].

Van der Pauw a montré en 1958 que la résistivité ρ d'un l'échantillon obéit à la relation suivante (théorème de Van der Pauw) :

$$\exp\left(-\pi \frac{R_A}{\rho} \cdot t\right) + \exp\left(-\pi \frac{R_B}{\rho} \cdot t\right) = 1 \tag{II-6}$$

Avec :

$$R_A = \frac{V_{CD}}{I_{AB}} \tag{II-7}$$

$$R_B = \frac{V_{AD}}{I_{BC}} \quad (\text{II-8})$$

Où t est l'épaisseur de l'échantillon et ρ la résistivité du matériau.

Si $R_A \approx R_B$ (pour un échantillon de forme carré par exemple), alors :

$$\rho \approx \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_A + R_B}{2} t \approx 4,53 \frac{R_A + R_B}{2} t \quad (\text{II-9})$$

Et si l'échantillon est de forme quelconque alors :

$$\rho \approx \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_A + R_B}{2} \cdot t \cdot f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \quad (\text{II-10})$$

Où f est un facteur de correction obtenu en résolvant l'équation de Van der Pauw.

Ce facteur varie peu avec la géométrie, comme le montre la **Figure II-6**. Si on applique la formule (II-6) (valable dans le cas symétrique (un carré par exemple)) à une géométrie non symétrique (un rectangle par exemple), l'erreur commise est le plus souvent négligeable [8].

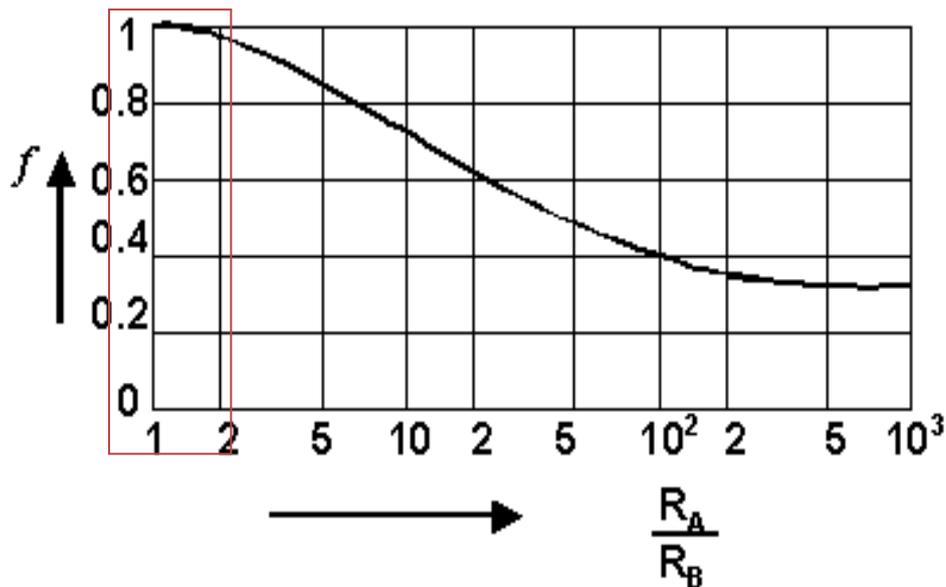


Figure II-6 : Représentation du facteur de correction de Van der Pauw[8].

Si $1 < \frac{R_A}{R_B} < 2$ alors $R_S \approx \frac{\pi}{\ln 2} \frac{R_A + R_B}{2}$ Avec une précision de 5% au pire.

Chapitre II Caractérisation électrique du nitrure de gallium

Pour effectuer ces mesures des quatre pointes alignées (ou de Wenner) et des quatre pointes carrées (ou de Van der Pauw), on doit utiliser un ensemble d'équipements scientifiques performants permettant ainsi de faire des mesures fiables et précises, avec en outre des outils de traitement informatique.

- Une SMU Keithley 236 :

Particulièrement bien adaptée à la régulation ou à la mesure de très faibles courants (de $10\mu\text{A}$ à 100mA), **Figure II-7.**



Figure II-7 : Keithley 236

- Une double SMU Keithley 2602:

Permettant de couvrir la gamme de courant 10nA - 100mA (en source et en mesure de courant), la gamme de tension $10\mu\text{V}$ - 40V (en source et en mesure de tension), avec deux unités indépendantes. **Figure II-8**



Figure II-8 : Keithley 2602

II.3. Mesure Hall

La résistivité, mesurée par la méthode des quatre pointes ou par Van der Pauw, dépend de la concentration d'électrons et de trous n et p et de leur mobilité μ_n , μ_p respectivement, selon la relation suivante :

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (\text{II-11})$$

Où

q : la charge élémentaire, $q=1,6 \times 10^{-19}$ C

II.3.1. Historique de Hall

A l'automne 1879 à l'université Johns Hopkins de Baltimore, Edwin Herbert Hall (1855-1938) réalise sa thèse de doctorat sous la direction du professeur Henry Augustus Rowland (1848-1901). Il porte attention à une question que se posait le célèbre James Clerk Maxwell (1831-1879) dans son ouvrage « A Treatise on Electricity and Magnetism » (Clarendon Press, Oxford. 1873), à savoir si la force générée par un champ magnétique sur un conducteur traversé par un courant agit sur le conducteur même ou sur le courant électrique qui le traverse. Aussi s'intéresse-t-il à une expérience réalisée par le professeur Rowland qui essaya sans succès de détecter l'influence d'un champ magnétique sur un courant électrique. Il part d'une hypothèse faite par le professeur Edlund dans un de ces articles (« Unipolar induction » Phil. Mag, Oct 1878) selon laquelle si le courant électrique dans un conducteur fixe est lui-même attiré par un aimant, alors il doit être dévié vers un côté du matériau et la résistance de ce dernier devrait augmenter. Dans ses premières expériences, il mesure les variations de résistance d'un fil d'argent disposé en spirale traversé par un courant et soumis à un champ magnétique, mais cela ne s'avère pas concluant. Finalement, toujours sous les conseils du professeur Rowland et après plusieurs essais sur différents matériaux, il s'intéresse alors à l'observation de la différence de potentiel entre les côtés opposés d'une feuille d'or. Cette expérience est un succès, il met alors en évidence la présence d'une différence de potentiel entre les côtés opposés de la feuille d'or lorsque celle-ci est traversée par un courant électrique et soumise à un champ magnétique perpendiculaire. L'effet d'un champ magnétique sur un matériau conducteur traversé par un courant électrique portera son nom: **l'effet Hall [9]**.

II.3.2. Théorie de l'effet Hall

Pour effectuer la mesure Hall, il doit utiliser la même configuration Van der Pauw avec les quatre connections, en satisfaisant les trois conditions de Van der Pauw. Il faut appliquer un champ magnétique dans la direction perpendiculaire au plan de l'échantillon, et imposer un courant puis mesurer la tension Hall, comme illustré dans la **Figure II-9**.

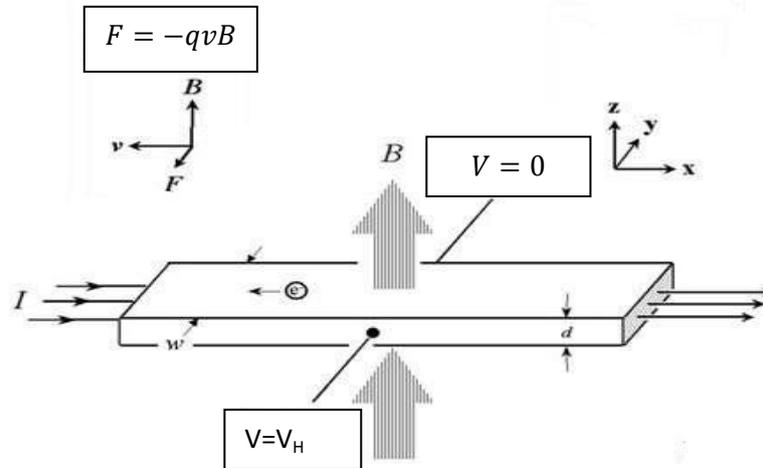


Figure II-9: Représentation schématique de l'effet Hall [10].

La tension Hall nous renseigne sur le type et la concentration des porteurs. Si le matériau est de type **N** (électrons majoritaires), comme illustré dans la **Figure II-10**, la tension Hall est donnée par:

$$V_H = -\frac{1}{nq} \frac{IB}{t} < 0 \quad (\text{II-12})$$

Où q : la charge élémentaire, $q=1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

B : le champ magnétique,

n : la concentration d'électron.

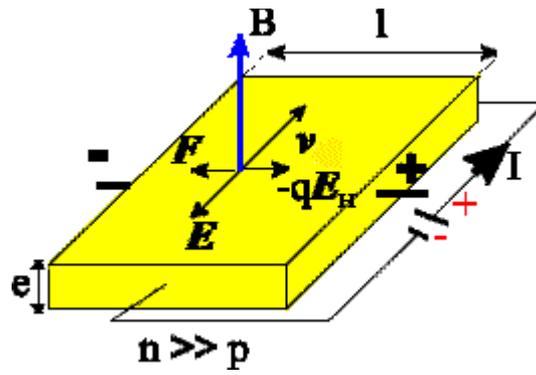


Figure II-10 : l'effet Hall « matériau de type N » [11].

Et si le matériau est de type P (trous majoritaires), comme illustré dans la **Figure II-11**, la tension Hall est donnée par:

$$V_H = + \frac{1}{pq} \frac{IB}{t} > 0 \quad (\text{II-13})$$

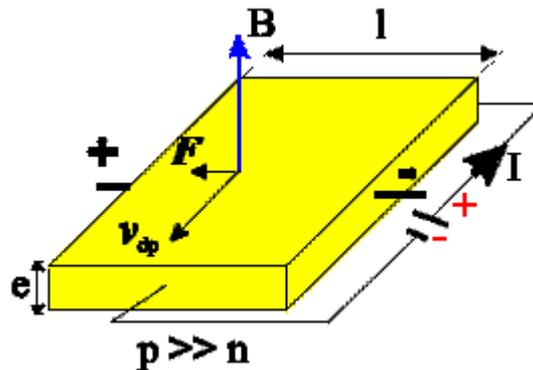


Figure II-11 : l'effet Hall « matériau de type P » [11].

Le signe de V_H nous renseigne donc sur le type de porteurs libres.

La concentration en surface N_S est calculée par l'équation suivante :

$$N_S = \frac{IB}{q|V_H|} \quad (\text{II-14})$$

La concentration des porteurs en volume N_B est :

$$N_B = \frac{N_S}{t} \quad (\text{II-15})$$

Et la mobilité est donnée par la formule suivante :

$$\mu = \frac{t}{qN_S\rho} \tag{II-16}$$

$$\mu = \frac{1}{qN_B\rho} \tag{II-17}$$

II.4. Protocole expérimental

Pour effectuer les mesures Van der Pauw / Hall. Le protocole est résumé dans le **Tableau II-1**, il est suivi selon le NIST.

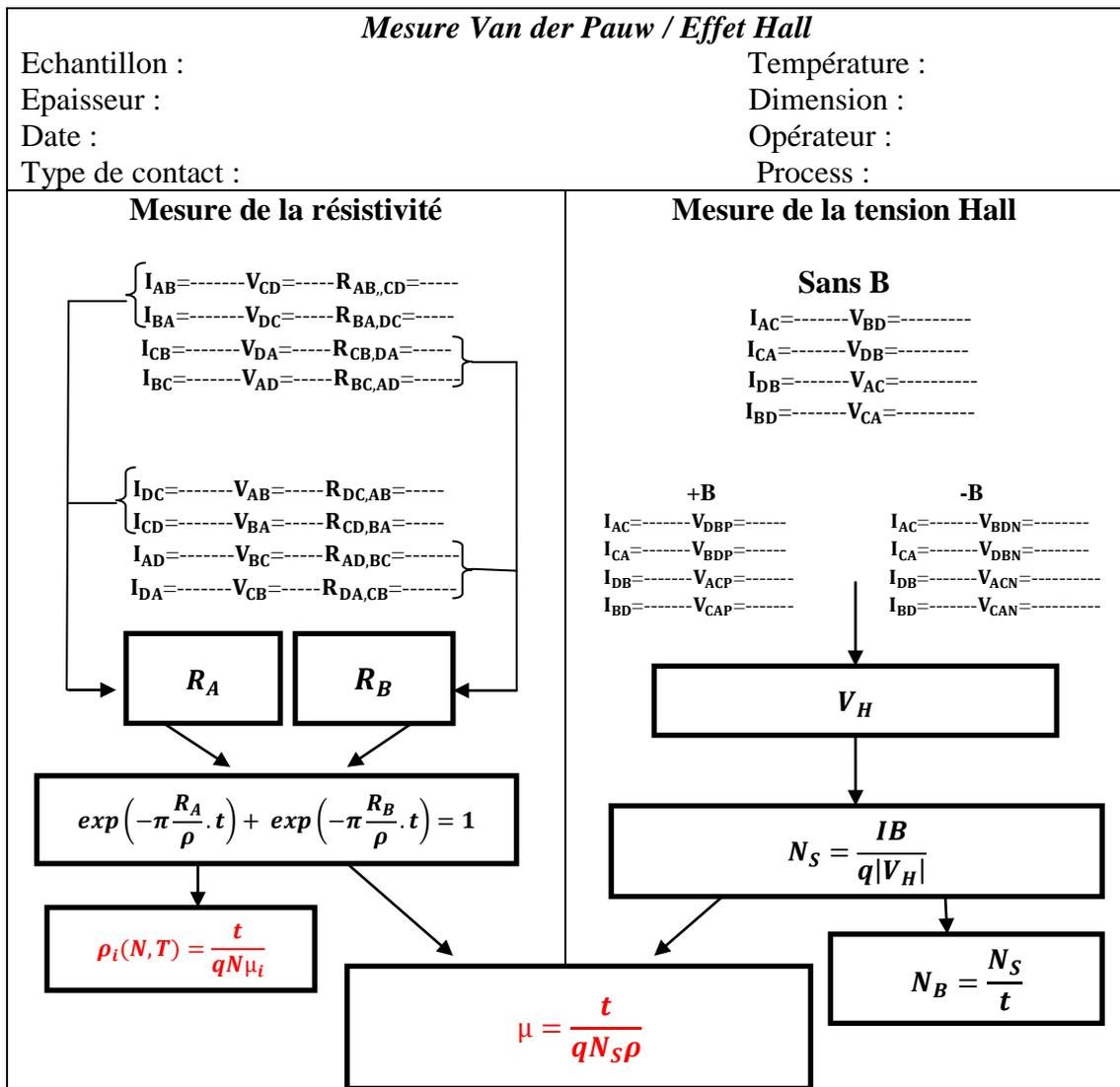


Tableau II-1 : Protocole expérimental de mesure Van der Pauw/ Hall [12].

Chapitre II Caractérisation électrique du nitrure de gallium

Ce protocole expérimental a été implémenté grâce aux logiciels d'acquisition et de traitement développés au Laboratoire (LMOPS) par S. Ould Saad Hamady [6]. Les mesures effectuées sont réalisées à l'aide d'un Keithley 2602 (**Figure II-8**), qui présente l'avantage d'avoir deux unités électriques indépendantes.

Le logiciel de commande et d'acquisition est très pratique à utiliser, il faut préciser l'épaisseur de la couche, la valeur du champ magnétique, les valeurs initiales et finales du courant, ainsi que le pas. L'utilisateur est directement guidé au cours des mesures, toutes les configurations utilisées s'affichent et le moment de mettre l'aimant dans le sens positif et négatif. Les valeurs des paramètres de transports s'affichent directement après la mesure (**Figure II-12**), ainsi que les courbes de leur variation avec le courant injecté.

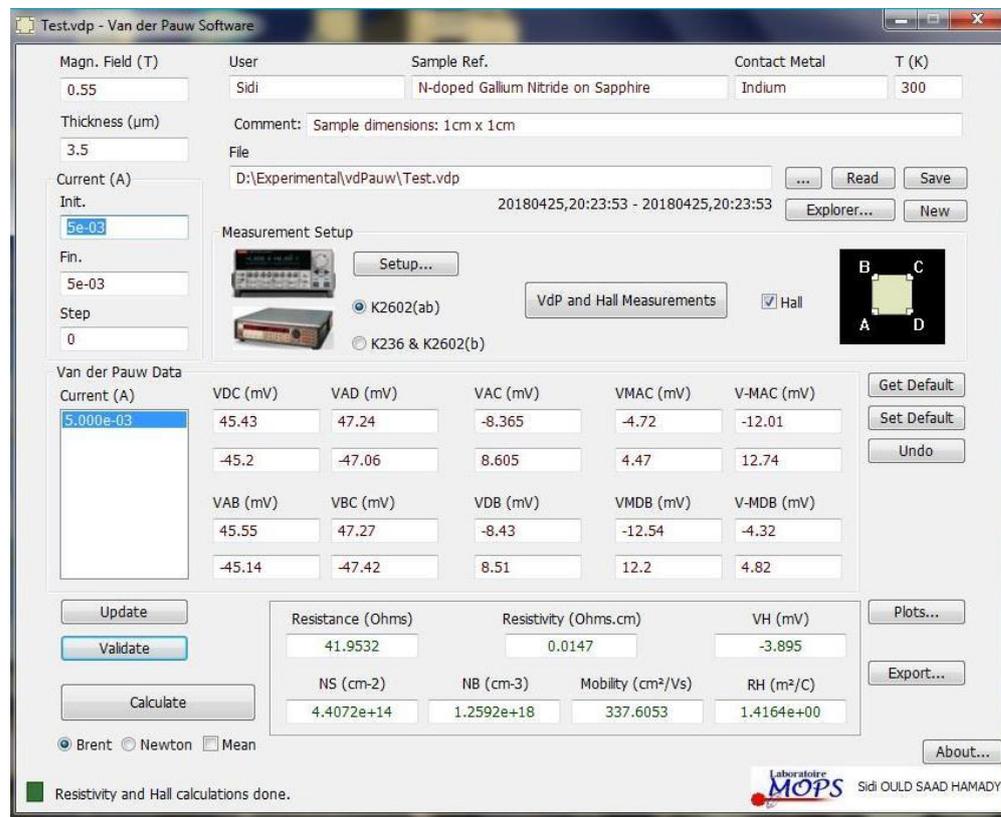


Figure II-12 : Le logiciel de mesure Van der Pauw / Effet Hall.

Le succès des mesures de Hall dépend en grande partie de l'instrumentation utilisée.

- Un banc à effet Hall :

Un aimant permanent de 0,55 Tesla **Figure II-13 (b)**, un support pour l'aimant et l'échantillon, et un petit réservoir pour l'azote permettant de faire les mesures à

77K **Figure II-13** (a). Ce banc est relié à une double SMU Keithley 2602 ; permettant de réguler le courant et de faire les mesures de tension.

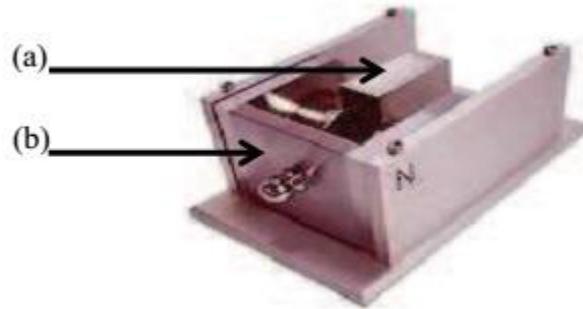


Figure II-13: Banc Hall, (a) réservoir d'azote, (b) aimant.

- Un système de cryogénie :

Avec un cryostat (**Figure II-14**), un système de pompage primaire-secondaire et une régulation de température de type PID. Ce cryostat, alimenté en azote, permet de couvrir la gamme de température 77K-500K avec une précision d'environ 0.1K.

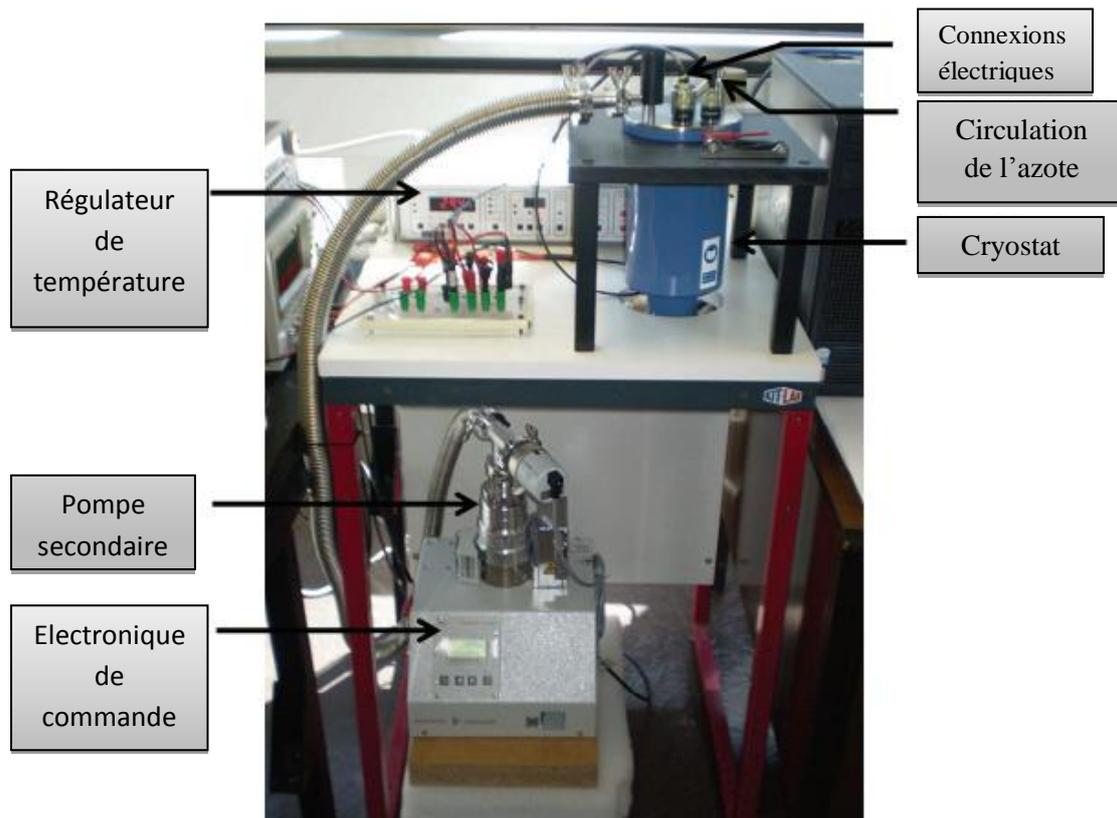


Figure II-14 : Cryostat à l'azote pour les mesures en fonction de la température

[12].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les paramètres physiques essentiels de ces travaux de mémoire. Tout d'abord, nous avons défini l'instrumentation de la caractérisation électrique et nous avons détaillé les différentes techniques de mesure de la résistivité, à savoir la méthode des quatre pointes, la technique Van der Pauw. Ensuite, nous avons abordé la théorie de l'effet Hall, effet qui bien que découvert il y a plus d'un siècle, nous avons défini aussi l'expression de la mobilité des porteurs de GaN.

Bibliographie: Chapitre II

- [1] **Bendimred Mansour**, «Réalisation d'un capteur de gaz MOX», Mémoire de magister 2009, Université Science et de la Technologie Oran.
- [2] **Amélie Dussaigne**, «Etude des couches minces», Section de physique travaux pratiques avancées, 26 septembre 2011.
- [3] **Beadle, W.E., J.C.C. Tsai, R.D. Plummer**, «Quick Reference Manual for Silicon Integrated Circuit Technology», New York: John Wiley & Sons 1985.
- [4] **Clarysse, T**, « Impact of probe penetration on the electrical characterization of sub-50 nm profiles» J. Vac. Sci. Technol. B, 2001.
- [5] **VanDerPauw, L.J.**, «A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shapes» Philips Res Repts, 1958.
- [6] **T. Baghdadli, S. Ould Saad Hamady, S. Gautier, J. Martin, M. Bouchaour, N. Maloufi, P. Miska B. Benyoucef, A. Ougazzaden**, «Optimisation des contacts Métal/Semi-conducteur et caractérisation électrique de matériaux grand gap à base de nitrure de gallium », Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007
- [7] **David, J.M.**, «A numerical analysis of various cross sheet test structures. Solid-State Electronics», 1976.
- [8] **VanDerPauw, L.J.**, « A Method of Measuring the Resistivity and Hall Coefficient on Lamellae of Arbitrary Shape». Philips Tech. Rev., 1958.
- [9] **Fabrice Severac** , «Jonctions ultra-minces p+/n pour MOS “ultimes”: étude de l'impact des défauts cristallins sur la mobilité et l'activation du bore», Université Toulouse, Soutenu Le 24 Avril 2009.

[10] Blood Peter, «The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron». 1992: Academic, London.

[11] S.M. Sze Kwok K. Ng, «Physics of Semiconductor Devices», John Wiley & Sons, Inc ,First published:10 April 2006.

[12] Baghdadli Tewfik, «Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique »,
Thèse de doctorat soutenue le 10 Juillet 2009, Université de Tlemcen.

Chapitre III : Simulation-Résultats et discussion

III.1. Introduction

La simulation des différents paramètres des composants est une étape indispensable pour la compréhension des phénomènes physiques et électriques.

Dans le premier chapitre nous avons présenté les propriétés structurales, électroniques et thermiques de nitrure de gallium. Puis nous avons détaillé dans la deuxième chapitre les techniques de caractérisation électrique utilisées pour la mesure de la résistivité (la technique Van der Pauw / Effet Hall).

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats de simulation de la résistivité, et de la mobilité du nitrure de gallium en utilisant le logiciel Origin, en tenant compte l'effet thermique "la température".

- Dans une première étape, nous présenterons les échantillons étudiés, fournis par le Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz, et leurs résultats de la caractérisation électrique.
- Dans une deuxième étape, nous présenterons des résultats expérimentaux de la résistivité et la mobilité des échantillons en fonction de température réalisée au (LMOPS).
- Dans une troisième étape nous détaillerons le model de simulation, puis nous présenterons les résultats de simulation de la résistivité et la mobilité en fonction de la température pour deux dopages différents.
- Finalement, nous interpréterons ces résultats de simulation en les comparants avec les résultats expérimentaux.

III.2.La mobilité et la concentration des porteurs

Dans le domaine des faibles champs électriques, les porteurs libres sont en équilibre thermodynamique avec le réseau et leur vitesse moyenne est proportionnelle au champ électrique. En d'autres termes, la mobilité des porteurs est indépendante du champ électrique et la vitesse de dérive s'écrit simplement :

$$\vec{v} = \pm \mu \vec{E} \quad \text{(III -1)}$$

Avec : $\mu = \frac{q\tau}{m^*}$

τ : le temps de relaxation.

q : la charge élémentaire.

m^* : la masse effective de la particule.

Lorsque le champ devient important, les interactions des porteurs avec les vibrations du réseau entraînent une diminution de la mobilité des porteurs. Cette diminution de la mobilité se traduit par une variation non linéaire de la vitesse de dérive des porteurs. La loi de variation de la mobilité avec le champ électrique varie d'un matériau à l'autre, en fonction de la nature de la structure de bandes du semi-conducteur.

La mobilité μ et le temps de relaxation τ sont des paramètres phénoménologiques qui recouvrent des mécanismes de diffusion dont le traitement quantitatif fait appel à des formalismes relativement lourds et qui nécessitent des hypothèses simplificatrices. Conformément à la définition, ces effets sont discutés en termes de mobilité et de relaxation. Les paramètres qui influent le plus sur la mobilité des porteurs de charge sont la température et le nombre volumique d'impuretés. On distingue quatre types d'interaction entre les porteurs libres et le réseau [1] :

- **L'interaction avec les impuretés ionisées**

L'ionisation des impuretés contenues dans le cristal conduit à l'apparition d'un potentiel coulombien qui perturbe la distribution périodique du potentiel cristallin. Ainsi, les électrons qui passent au voisinage d'une impureté ionisée trouvent leur trajectoire modifiée, ce qui réduit leur efficacité dans le transport du courant, mais ils conservent leur énergie cinétique (interaction élastique). Cette interaction a fait l'objet de plusieurs études, H. Brooks et al. [2] donnent l'expression de la mobilité limitée par les impuretés ionisées, elle varie en $N_i^{-1}T^{3/2}$, avec N_i le nombre total d'impuretés et T la température. Ce type d'interaction c'est la plus pénalisante pour la mobilité aux très basses températures, et elle est d'autant plus pénalisante que le nombre d'impuretés est élevé.

- **L'interaction avec les impuretés neutres**

Aux basses températures, quand le niveau de Fermi du semi-conducteur est au-dessus du niveau énergétique correspondant à une impureté, celle-ci ne sera pas ionisée. Si des distorsions dans le réseau cristallin sont introduites, il y'a une rupture de la périodicité du réseau. Le couplage entre les porteurs et cette impureté n'est pas coulombien. Cette interaction est présente dans toute la gamme de température, et n'est pas prépondérante dans une gamme de températures en particulier.

- **La diffusion d'alliage**

Les phonons se distinguent en deux catégories, selon les vibrations des atomes: les phonons optiques, pour lesquels les atomes vibrent en opposition de phase, et les phonons acoustiques, où les atomes vibrent en phase. Ces interactions phonon-électron se font par absorption ou émission de phonons, en respectant la conservation de l'énergie et du vecteur d'onde. On distingue :

- **L'interaction avec les phonons acoustiques**

Avec les deux types de mécanismes qui font intervenir ces collisions: interaction acoustique (couplage par déformation de potentiel cristallin) et interaction piézoélectrique (couplage coulombien). Les collisions acoustiques sont des chocs élastiques dont l'effet principal est de rendre aléatoire la direction du vecteur de vitesse des électrons. Ces deux mécanismes sont pénalisants pour le transport de charges avec l'application d'un champ électrique. Ce type d'interaction est présent dans toute la gamme de températures mais rarement prépondérante.

- **L'interaction avec les phonons optiques**

A basse température, le nombre de phonons est faible, l'interaction électron-phonon est peu probable. Lorsque la température augmente, les vibrations du réseau augmentent. Ainsi l'interaction avec les phonons optiques devient prépondérante aux hautes températures. Cependant ce phénomène cesse d'être pénalisant, dès que l'énergie cinétique dépasse le seuil d'émission du phonon polaire.

Ces effets sont en quelque sorte des perturbations de la périodicité parfaite d'un réseau cristallin qui détermine la structure de bandes. Parmi toutes les origines de perturbation, ce sont les interactions avec les phonons (ou vibrations du réseau) et avec les impuretés qui jouent le rôle le plus important dans les semi-conducteurs. En particulier, ces mécanismes permettent d'expliquer la variation de la mobilité en fonction de la température $\mu(T)$. La mobilité des électrons (μ_n) et des trous (μ_p) sont des paramètres physiques prépondérants pour les dispositifs micro-ondes [3].

Dans le **GaN** la mobilité des électrons est conditionnée par deux mécanismes principaux, la diffusion par les phonons optiques et la diffusion par les impuretés ionisées. En fait, en raison de la masse effective des électrons, la diffusion par les impuretés ionisées joue un rôle relativement faible, par rapport au **GaAs**. En outre, à

haute température la diffusion par les phonons optiques joue un rôle majeur. En conséquence, la différence de mobilité des électrons du gaz bidimensionnel. Entre le dopage dans le canal et le dopage dans la barrière, est relativement faible, surtout à haute température. On peut donc sans inconvénient doper le canal pour obtenir des valeurs élevées de concentration des électrons n_s , sans pour autant affecter beaucoup la mobilité [4].

La **Figure III-1** représente l'effet de chaque interaction sur la mobilité d'une couche de GaN déposé sur AlGaIn en fonction de la température [5]

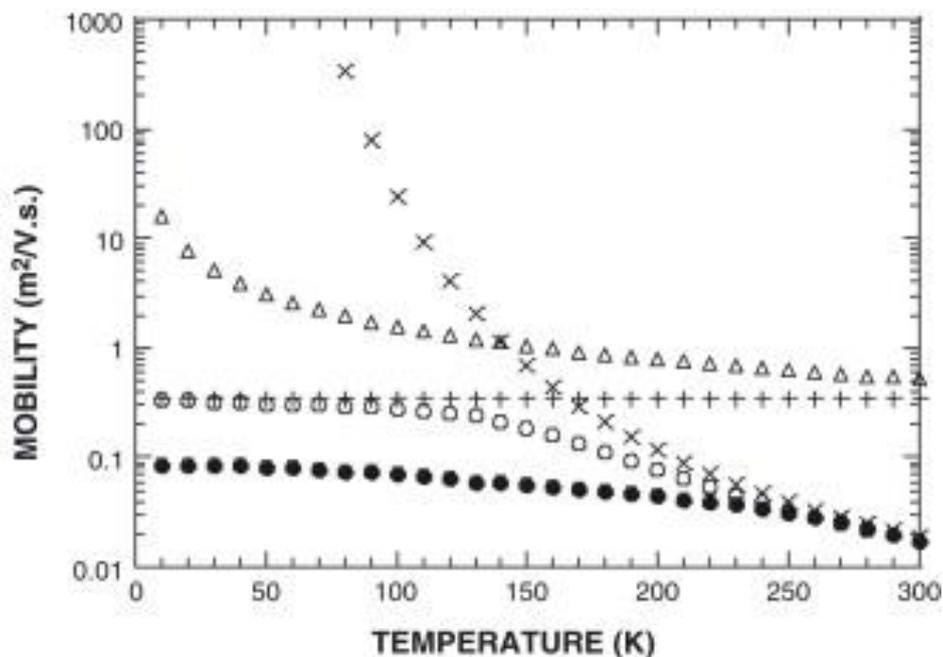


Figure III-1 : Le calcul de la mobilité 2D en fonction de la température pour le GaN sur AlGaIn.

x : Phonons optiques ; Δ : Phonons acoustiques ; + : impuretés ionisées ; \circ : Total ;
 ● : Expérimental [5]

III.2. Présentation des échantillons

Les échantillons étudiés sont élaborés par épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE) fournis par l'équipe nitrure de laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz :

- *Echantillon A* : GaN (template) épitaxié directement sur substrat saphir (Al_2O_3), avec une épaisseur de 3500 nm ($3,5\mu m$) comme le montre la **Figure III-2**.

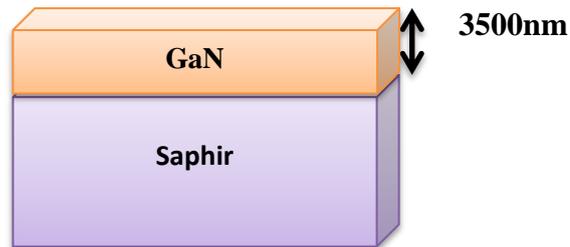


Figure III-2 : le substrat GaN sur saphir (Al_2O_3).

- *Echantillon B* : GaN sur sur AlN sur saphir avec une épaisseur de 650 nm comme le montre la **Figure III-3**.

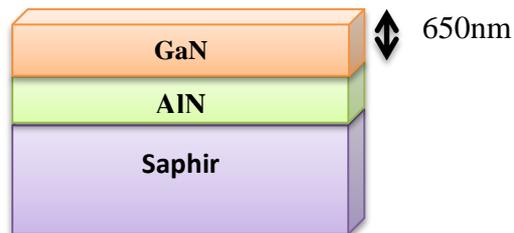


Figure III-3: le substrat GaN sur AlN sur saphir (Al_2O_3).

Pour faire les mesures de paramètres de transport du GaN en fonction de la température, le banc expérimental Van der Pauw/Effet Hall décrit en détail dans le chapitre II est utilisé du (LMOPS). Le **Tableau III -1** montre les valeurs mesurées pour deux échantillons à basse et à température ambiante.

Les mesures sont réalisées en utilisant des contacts d'indium déposé sur la périphérie des échantillons avec recuit et après un traitement de surface avec l'acétone puis de l'éthanol dans un bain à ultrasons.

	Température (K)	Résistivité ($\Omega.cm$)	Mobilité (cm^2/Vs)	Concentration des porteurs (cm^{-3})
GaN/Saphir	80	$3,2 \times 10^{-2}$	162	$1,19 \times 10^{18}$
	300	$1,5 \times 10^{-2}$	336	$1,20 \times 10^{18}$
GaN/AlN/Saphir	80	$3,6 \times 10^{-3}$	55	$3,05 \times 10^{19}$
	300	$3,3 \times 10^{-3}$	66	$2,85 \times 10^{19}$

Tableau III -1 : Paramètres de transport du GaN à basse et à température ambiante, mesurés par la technique Van der Pauw / Effet Hall [1].

III.2.1. Mesures Van Der Pauw en fonction de température

Les **Figure III-4**, **Figure III-5** représentent respectivement les mesures expérimentales de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir, du GaN sur pseudo-substrat d'AlN sur saphir

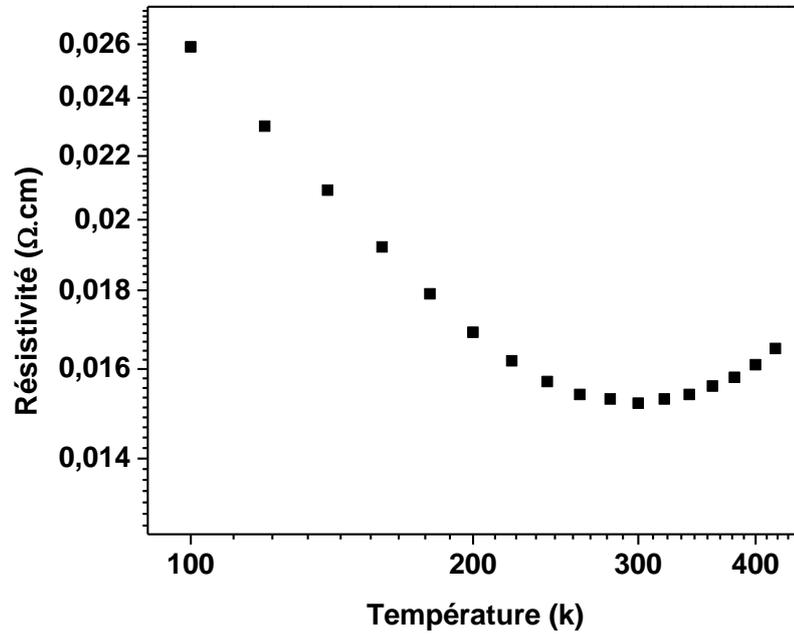


Figure III-4 : *Mesure expérimental de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir [1].*

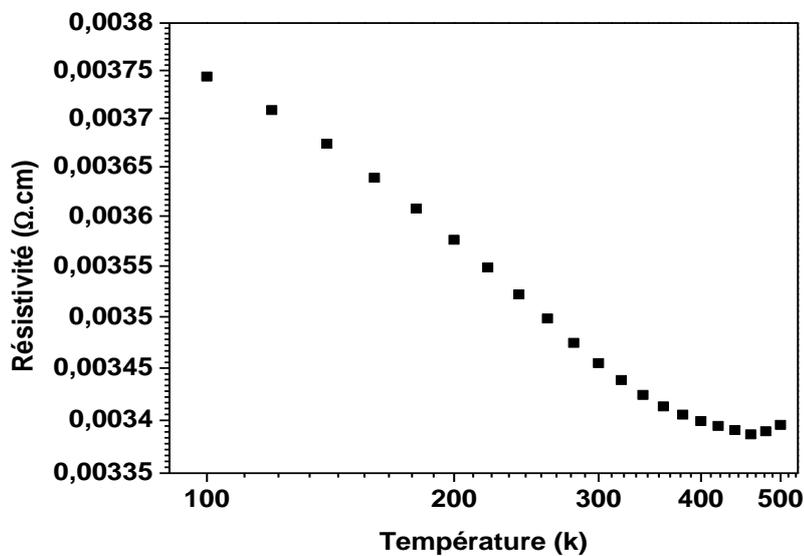


Figure III-5 : *Mesure expérimental de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir [1].*

Nous présentons indifféremment de la résistivité et la mobilité liée par le dopage en le considérant constante et en utilisant la relation (II-17). Les courbes des **Figure III-6** et **Figure III-7** représentent respectivement la variation de la mobilité en fonction de température du matériau GaN dopé silicium sur saphir et du GaN sur pseudo-substrat d'AlN sur saphir.

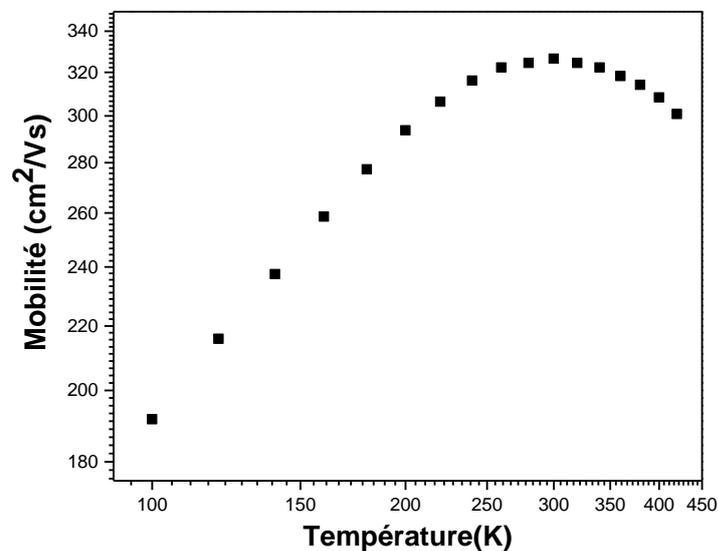


Figure III-6 : *Mesure de la mobilité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir.*

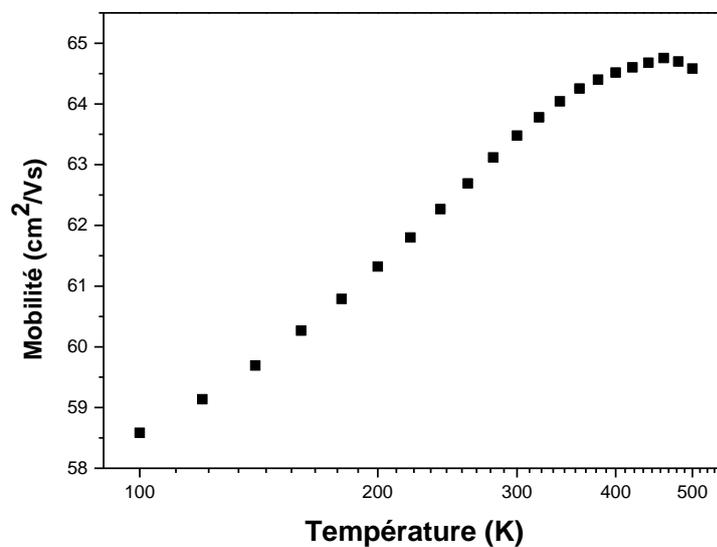


Figure III-7 : *Mesure de la mobilité en fonction de la température du matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir.*

Un modèle de simulation déjà utilisé sur le carbure de silicium [6] en fonction de différents paramètres traduisant les différentes interactions sera utilisé pour les mesures expérimentales réalisées sur le GaN pour différent dopage.

III.3. Modèle de simulation

La première étape consiste en l'approximation de la dépendance de la concentration du dopage en fonction de la mobilité à température ambiante, l'approximation bien connue de Caughey-Thomas [6].

L'approximation du Gaughey-Thomas s'écrit sous la forme:

$$\mu_i(N) = \mu_{min, i} + \frac{\mu_{max, i} - \mu_{min, i}}{1 + \left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i}} \quad (\text{III -2})$$

Où $i = n, p$ pour les électrons et les trous respectivement pour le GaN.

A de faibles dopages et à température ambiante, la diffusion des phonons est le mécanisme dominant.

$$\mu_{max,i} = \mu_{L,i} \quad (\text{III -3})$$

Où $\mu_{L,i}$ est la composante de la mobilité du réseau (phonon).

La mobilité des phonons dépend de température et s'écrit sous la forme

$$\mu_L = \mu_L(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\alpha} \quad \text{Où } T_0 = 300k \text{ et } \alpha \text{ une constant.}$$

A partir de l'Equation (III -3) :

$$\mu_{max,i} = \mu_{max,i}(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\alpha} \quad (\text{III -4})$$

La contribution de l'interaction des impuretés peut être obtenue en soustrayant la contribution de phonon de la mobilité totale décrite par la relation (II-2).

$$\mu_{I,i} = \mu_{max,i} \left[\frac{\mu_{max,i}}{\mu_{max,i} - \mu_{min,i}} \frac{1 + \left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i}}{\left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i}} - 1 \right] \quad (\text{III -5})$$

En combinant les deux équations (III -3) et (III -5) on obtient :

$$\frac{\mu_{max,i} - \mu_{min,i}}{1 + \left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i}} \left(\frac{N}{N_{g,i}}\right)^{\gamma_i} = \frac{\mu_{L,i}}{1 + \frac{\mu_{I,i}}{\mu_{L,i}}} \quad (\text{III -6})$$

Substituant (III -6) et (III -2) et tenant en compte de :

$$\mu_L = \mu_L(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\alpha} \quad \text{et} \quad \mu_I = \mu_I(T_0) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta}$$

La relation (III -2) peut écrire sous la forme suivante [8]:

$$\mu_i(N, T) = \mu_{max,i}(T_0) \frac{B_i(N) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_i}}{1 + B_i(N) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_i + \alpha_i}} \quad (\text{III -7})$$

Où

$$B_i(N) = \left[\frac{\mu_{min,i} + \mu_{max,i} \left(\frac{N_{g,i}}{N}\right)^{\gamma_i}}{\mu_{max,i} - \mu_{min,i}} \right]_{T=T_0} \quad (\text{III -8})$$

Il est remarquable que les expressions (III -7) et (III -8) décrivent la dépendance de la mobilité en fonction de la température dans les limites de faibles et forts dopages.

Alors la résistivité en fonction de la température donné par la formule suivante :

$$\rho_i(N, T) = \frac{t}{qN\mu_i} \quad (\text{III -9})$$

La dépendance de température T_m pour laquelle la mobilité est maximale ou la résistivité est minimale est donnée par la Formule suivante :

$$T_{i,m} = T_o \left[\frac{\beta_i}{\alpha_i} \frac{1}{B(N)} \right]^{\frac{1}{(\alpha_i + \beta_i)}} \quad (\text{III -10})$$

Nous avons utilisé le logiciel origin pour simuler la mobilité en fonction de température.

III.4. Logiciel de simulation Origin

Le logiciel Origin est un outil complet d'analyse de données et de mise en forme graphique fournissant tout un éventail de fonctionnalités (analyse de pics, ajustement de courbes, statistiques...). Il existe plusieurs raisons pour utiliser ce logiciel :

- Effectuez toutes vos analyses, calculs et statistiques.
- Fiter, simuler les fonctions et effectué des script.
- Large choix de graphiques de qualité publication.
- Connectivité avec Excel, Matlab, LabVIEW, Python....
- Import de données au rapport final.

Tout ça par simples « pointer-cliquer », sans aucune programmation nécessaire, et de manière intuitive comme le montre la **Figure III-8**.

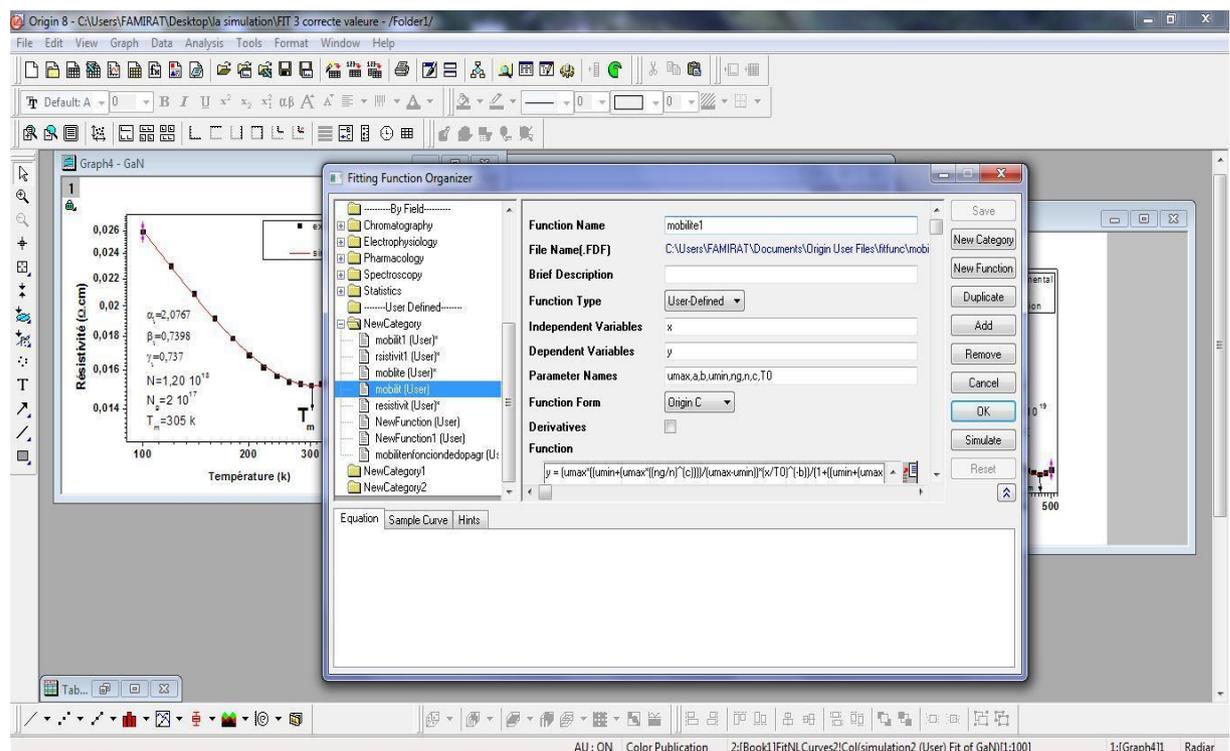


Figure III-8 : Vue de logiciel Origin

On utilise ce logiciel pour simuler le modèle mathématique de la mobilité « résistivité », des résultats expérimentaux en fonction de la température et voir la dépendance de la mobilité ou la résistivité en fonction de dopage.

III.5. Résultats et discussion

En appliquant ce modèle de simulation aux nitrures de gallium, nous avons obtenu une très bonne concordance entre la théorie et l'expérience pour les différentes couches de nitrures de gallium. Ce qui est représenté sur la **Figure III-9** et la **Figure III-10** pour le GaN sur saphir et le GaN sur AlN sur saphir respectivement en trait rouge.

Les valeurs du dopage sont de $1,20 \times 10^{18}$ pour une couche de GaN dopé silicium sur saphir et $2,85 \times 10^{19}$ pour une couche GaN sur pseudo substrat d'AlN sur elles correspondent à ceux mesurées par la méthode Van der Pauw / effet Hall, ce qui valide l'application du modèle de aux nitrures puisqu'il nous permet de déterminer d'une manière précise le dopage des couches.

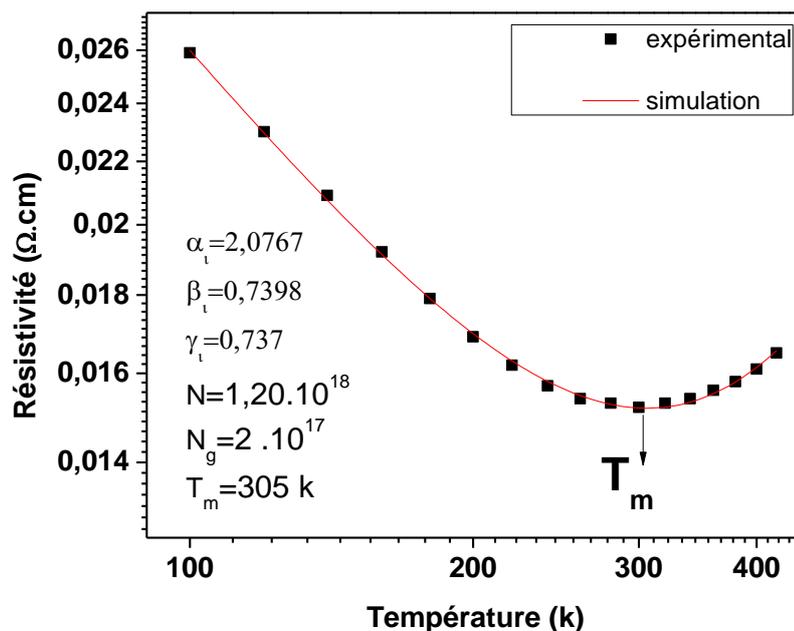


Figure III-9 : *Mesure de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir, les symboles c'est les mesures expérimentales et en trait plein les résultats de la simulation.*

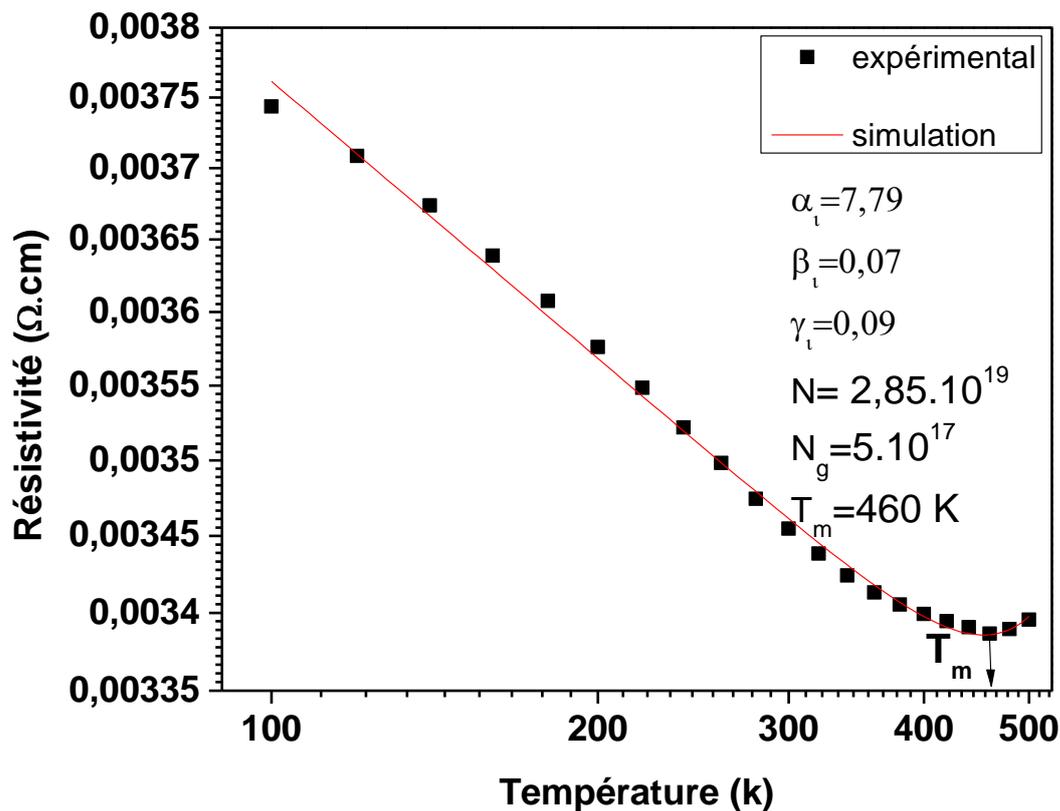


Figure III-10 : Mesure de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir, les symboles c'est les mesures expérimentales et en trait plein les résultats de la simulation.

La résistivité est plus élevée pour le GaN sur saphir, elle est de $0,026 (\Omega \cdot \text{cm})$ à $116 (\text{k})$ puis la résistivité diminue avec la température, la diminution n'est pas la même pour les deux échantillons.

La résistivité diminue d'une manière non monotone à cause des différentes interactions étant donné que le dopage résiduel est très important les interactions avec les impuretés ionisées sont prépondérants jusqu'à des températures élevées à $T_m = 305 (\text{k})$ et $T_m = 460 (\text{k})$ (déterminer par la simulation), pour le GaN dopé silicium sur saphir et le GaN sur AlN respectivement et au-delà c'est les interactions avec les phonons qui deviennent importants sachant que la concentration des porteurs reste quasiment constante avec la température .

Chapitre III Simulation-Résultats et discussion

Les paramètres de simulation de la résistivité sont reportés dans le tableau ci-dessous :

	$N_g(\text{cm}^{-3})$	α_i	B_i	γ_i	T_m (K)
GaN/Saphir	2×10^{17}	2,076	0,7398	0,73	305
GaN/AlN/Saphir	5×10^{17}	7,79	0,07	0,09	460

Tableau III -2 : Tableaux récapitulatifs des différents paramètres de simulation de la résistivité en fonction de température calculés.

Les **Figure III-11** et **Figure III-12** représente l'évolution de la mobilité en fonction de température des matériaux GaN dopé silicium sur saphir et du GaN pseudo-substrat d'AlN sur saphir respectivement.

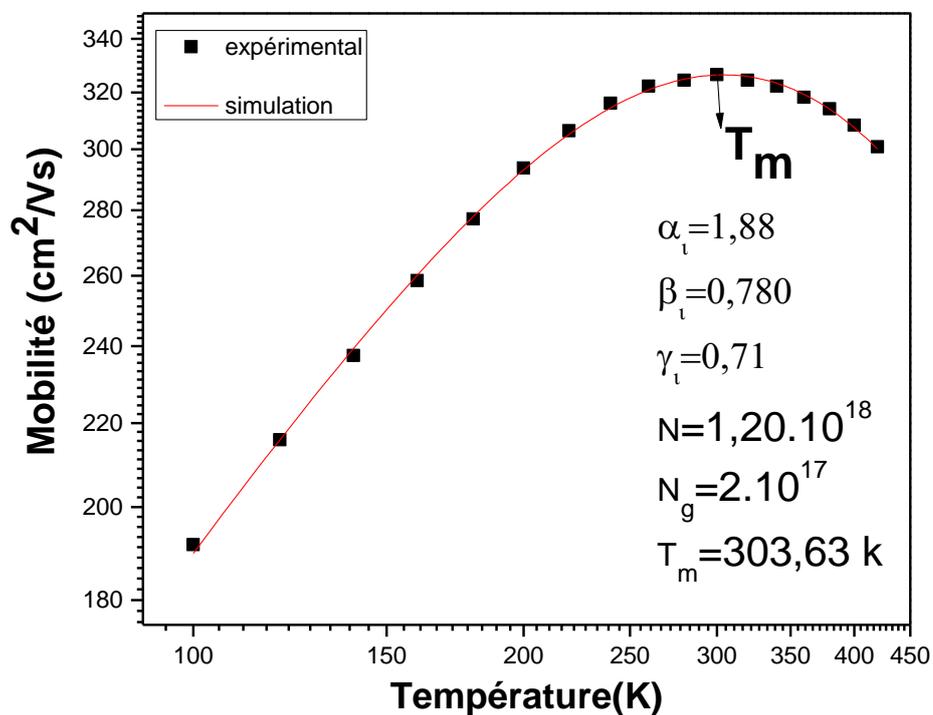


Figure III-11 : Mesure de la mobilité en fonction de la température du matériau GaN dopé silicium sur saphir, les symboles c'est les mesures expérimentales et en trait plein les résultats de la simulation.

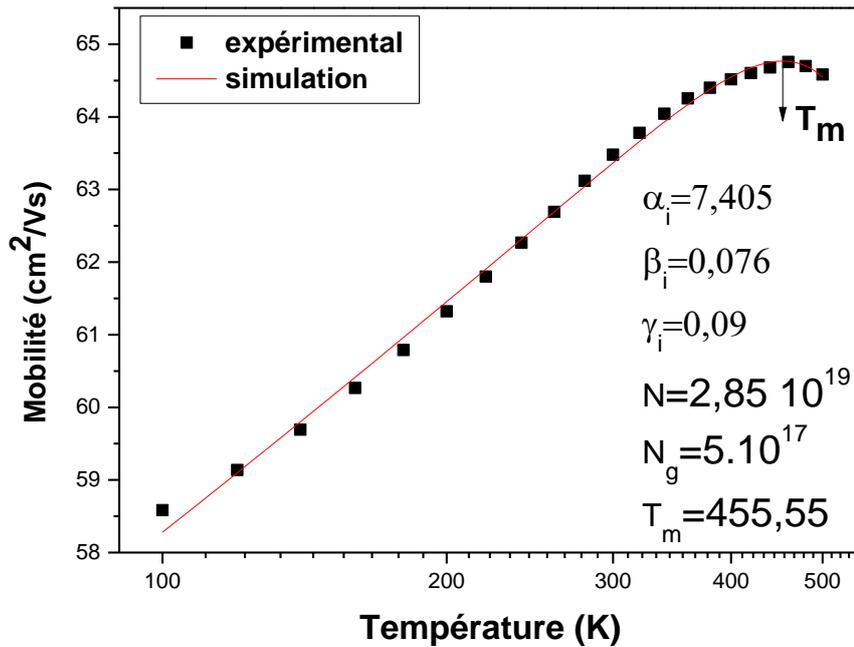


Figure III-12 : Mesure de la résistivité en fonction de la température du matériau GaN sur pseudo substrat d'AlN sur saphir, les symboles c'est les mesures expérimentales et en trait plein les résultats de la simulation.

La mobilité dans les nitrures est liée à différentes interactions. Les plus importantes interactions, c'est avec les impuretés ionisées et les interactions avec les phonons optiques et acoustiques ; par exemple sur les deux figures qui représentent l'évolution de la mobilité en fonction de la température à basse température c'est les interactions avec les impuretés ionisés qui sont prépondérantes et à haute température c'est les interactions avec les phonons qui limitent la mobilité.

Les paramètres de simulation de la mobilité sont reportés dans le tableau ci-dessous :

	$N_g(\text{cm}^{-3})$	α_i	B_i	γ_i	T_m (K)
GaN/Saphir	2×10^{17}	1,88	0,78012	0,71	303,63
GaN/AlN/Saphir	5×10^{17}	7,405	0,076	0,09	455,5

Tableau III -3 : Tableaux récapitulatifs des différents paramètres de simulation de la mobilité en fonction de température calculés.

On remarque qu'on retrouve les mêmes valeurs des paramètres que pour la résistivité.

On a utilisé ce modèle en fixant les paramètres et en faisant varier juste le dopage pour illustrer la variation de la résistivité avec le dopage, et comment elle se traduit cette variation sur la température ou la résistivité est minimale (T_m).

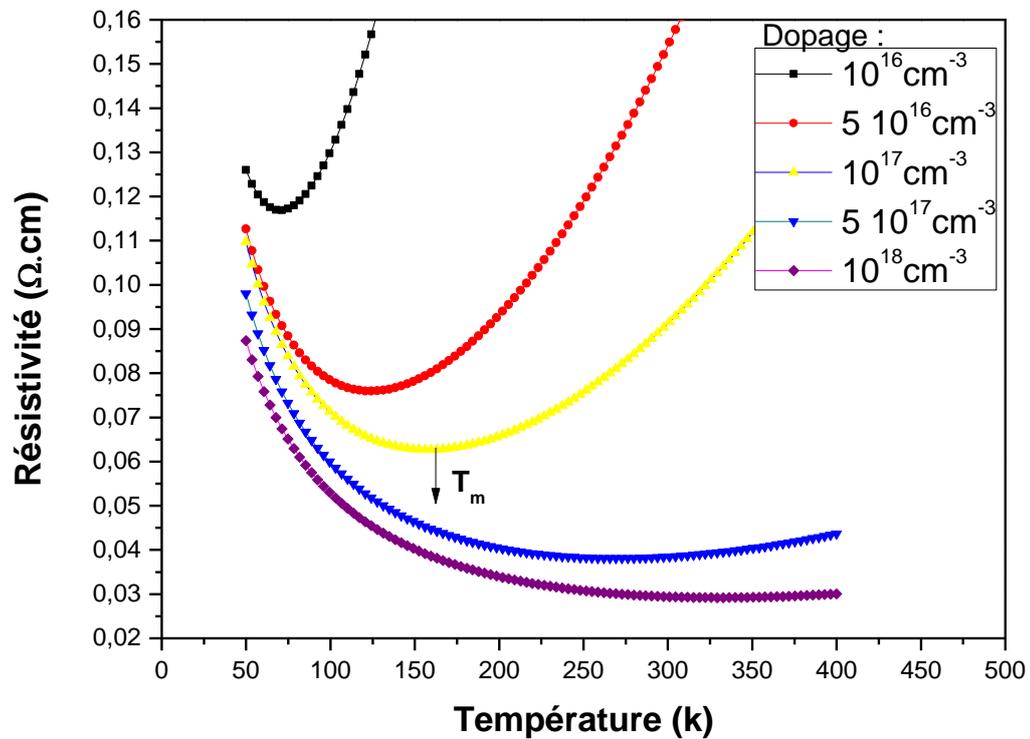


Figure III-13 : Résultats de la simulation, la résistivité en fonction de la température pour différents dopage.

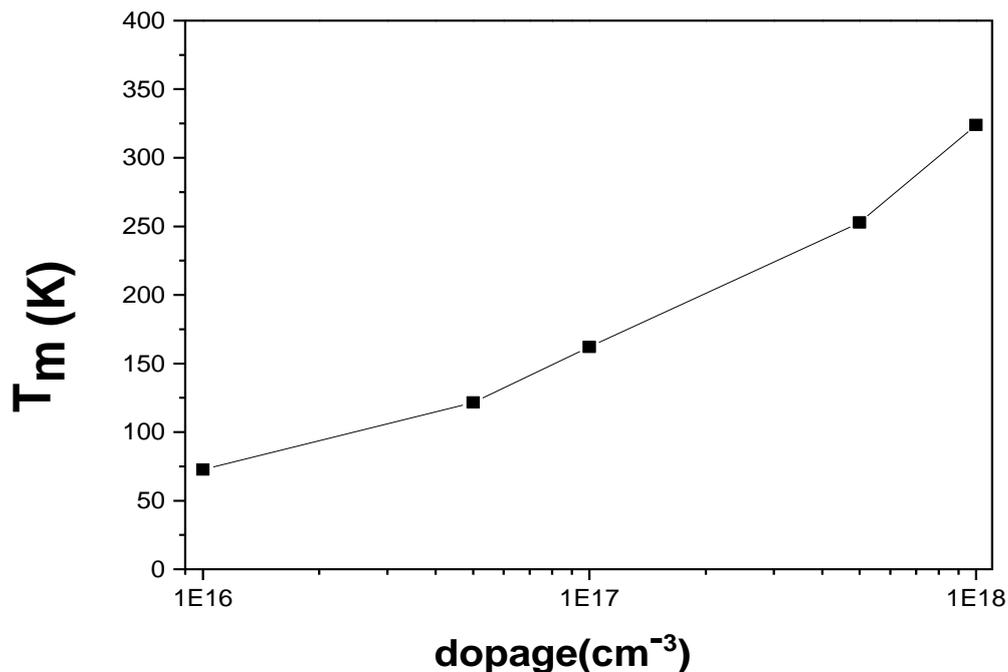


Figure III-14 : Résultats de la simulation, la température T_m en fonction du dopage.

La **Figure III-13** montre cette variation de la résistivité calculée par ce modèle en fonction de la température pour différents taux de dopage, et on a une température caractéristique qui varie avec le dopage; à cette température les interactions avec les phonons deviennent prépondérantes. Sur la **Figure III-14** on constate l'évolution de cette température T_m qui augmente avec le dopage.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans la première partie des résultats expérimentaux de la résistivité et la mobilité des deux échantillons de GaN sur saphir et le GaN sur AlN sur saphir en fonction de la température réalisée au (LMOPS) par la méthode Van der Pauw / effet Hall.

Dans la deuxième partie nous avons appliqué un modèle de simulation aux nitrures de gallium et nous avons obtenu une très bonne concordance entre la théorie et l'expérience, La résistivité diminue d'une manière non monotone à cause des différentes interactions et quand la température T augmente, la mobilité des

Chapitre III Simulation-Résultats et discussion

électrons diminue cela est dû au transport des électrons qui est dominé par la diffusion avec les phonons.

Et finalement, nous avons présenté les résultats de simulation de l'influence de la température et du dopage sur la résistivité, et comment elle se traduit avec cette variation sur la température ou la résistivité est minimale (T_m), à cette température les interactions avec les phonons deviennent prépondérantes.

Bibliographie: Chapitre III

- [1] **Baghdadli Tewfik**, «Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique », Thèse de doctorat soutenue le 10 Juillet 2009, Université de Tlemcen.
- [2] **H. Brooks**, «Physics Review», vol 23, P 879, 1951.
- [3] **Raymond Quere**, «Modélisation non linéaire des MESFETs sur carbure de silicium pour l'amplification de puissance en microondes », Thèse de doctorat Université de Linoges, Soutenue Le 28 Janvier 2000
- [4] **Henrey Malthieu**, «Physique des semi-conducteurs et des composants électronique», 2-10-048633-0 (2004).
- [5] **S. Gökdena, A. Ilgaza, N. Balkanb, S. Mazzucato**, «The effect of scattering mechanisms on the low field mobility in GaN/AlGaN heterostructures», Physica 2004.
- [6] **T.T.Manatasakanov, M.E.Levinshtein, L.I.Pomortseva, S.N.Yurkova** , «Carrier mobility model for simulation of SiC- bases electronic device», Proceedings of the IEEE(Volume: 55, Issue: 12, Dec. 1967).
- [7] **V.I Bonch Bruevich. S.G Kalashnikov**, «Semiconductor Physics», Nauka, Moscow, -Scientific Research Publishing 1977.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le présent travail a été consacré à la simulation de la résistivité et la mobilité des porteurs dans le nitrure de gallium en fonction de la température et du dopage.

Nous avons passé en revue les principales propriétés structurales, thermiques, électroniques et optiques. Puis nous avons présenté les méthodes permettant l'élaboration du GaN spécifiquement la technique de croissance MOVPE.

Dans la deuxième partie, nous avons défini les paramètres physiques essentiels de ces travaux de mémoire. Tout d'abord, nous avons défini l'instrumentation de la caractérisation électrique et nous avons détaillé les différentes techniques de mesure de la résistivité et abordé la théorie de l'effet Hall.

Dans la dernière partie des résultats expérimentaux de la résistivité et la mobilité des deux échantillons, le GaN sur saphir et le GaN sur AlN sur saphir en fonction de la température réalisée au (LMOPS) par la méthode Van der Pauw / effet Hall sont présentés.

Un modèle de la mobilité des électrons dans le GaN en fonction de la température et du dopage a été appliqué et nous avons obtenu une très bonne concordance entre la théorie et l'expérience, La résistivité diminue d'une manière non monotone à cause des différentes interactions et quand la température T augmentent la mobilité des électrons diminue cela est dû au transport des électrons qui est dominé par la diffusion avec les phonons optiques.

Les résultats de simulations obtenus de la résistivité en fonction de température et du dopage ont été présentés. Nous avons remarqué dans la première partie, que l'augmentation de la température conduit à une dégradation des propriétés de transport qui est dominés par la diffusion avec les phonons. Ensuite on constate l'évolution de la température (T_m) où la résistivité est minimale qui augmente avec le dopage.