

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 d'une couche semi conductrice  
de GaN par la technique Van der Pauw*

---

*Présenté par :*

**M<sup>me</sup>. Djebbari née Benkhedda Sara**

**Soutenu publiquement le 24/06/2018**

**Devant la commission d'examen**

Présidente	M <sup>me</sup> . S.BENSMACHINE	MC "A "	Université de Tlemcen
Examineur	M <sup>r</sup> . L. MERAD	MC "A "	Université de Tlemcen
Examineur	M <sup>r</sup> . Y. M. MAHDAD	MC "B "	Université de Tlemcen
Encadreur	M <sup>r</sup> . T. BAGHDADLI	MC "A "	Université de Tlemcen

Année Universitaire 2017 – 2018

# *Remerciements*

*Au nom de DIEU le Clément et le Miséricordieux Louange à ALLAH le Tout-puissant*

*En tout premier lieu, je remercie le bon DIEU, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Au terme de ce travail, j'exprime mes sincères remerciements*

## ***A mon encadreur***

*Mr T. Baghdadli maître de conférence classe « A » à l'université de Tlemcen, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il m'a accordé ainsi que pour ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

## ***Au Présidente du Jury***

*M<sup>me</sup>. S. Bensmaine maître de conférences classe « A » à l'université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury. Hommage respectueux.*

## ***A Monsieur L. Merad***

*Maître de conférences classe « A » à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'être membre du jury de ce mémoire. Vifs remerciements.*

## ***A Monsieur Y. M. Mahdad***

*Maître de conférences à l'université classe « B » de Tlemcen, pour m'avoir fait l'honneur de siéger dans le jury. Sincères remerciements.*

## *Dédicaces*

### *Je dédie ce raisonnable travail*

#### *A mon très cher père*

*Parce que j'ai la chance d'avoir un papa exceptionnel. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consenti pour mon éducation et ma formation. Il a été là pour moi dans mes moments de moins, dans mes périodes de noirs, il a été mes jambes lorsque j'allais si mal.*

*Entre lui et moi, il y aura toujours plus que ce lien de sang, je lui dois tellement.*

*C'est une personne très belle de l'intérieur comme de l'extérieur. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour lui.*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.*

*Je ne peux pas expliquer tout ici, ce serait trop long, mais je voudrais juste vous faire savoir combien cet homme est "grand".*

#### *A ma chère Maman*

*Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

*Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.*

### *A Mon Mari*

Aucun mot ne saurait t'exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, la tendresse et la gentillesse dont tu m'as toujours entouré. Cher mari j'aimerais bien que tu trouves dans ce travail l'expression de mes sentiments de reconnaissance les plus sincères car grâce à ton aide et à ta patience avec moi que ce travail a pu voir le jour...

### *A Mes frères et ma sœur*

Mes grands frères Amine, Amel: merci pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils, qui m'ont guidé tout au long de ma vie.  
Merci mes petits frères Yasser, Anes, Ayoub.

### *A Mon très cher petites poussins : Alaa et Malak*

### *A Ma très cher Tante*

Puisse Dieu, le tout puissant, préserve et accorde à ma petite famille santé, longue vie et bonheur.

### *A mon encadreur Mr T. Baghdadli*

Pour les nombreux sacrifices qu'il a consenti à l'aboutissement du présent travail qu'il a suivi patiemment, avec doigté et surtout avec le professionnalisme et également pour tous les partages scientifiques ,je lui rends le témoignage de toute ma reconnaissance.

*A tous les membres de ma famille Benkhedda et Djebbari, petits et grands, A tous mes amis.*

# Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale .....1

## **Chapitre I** Propriétés du Nitrure de Gallium, structure et élaboration du matériau

I-1 Introduction .....5

I-2 Intérêt du nitrure de gallium .....5

I-3 Caractéristiques du Nitrure de gallium .....5

I-4 Structure cristalline .....5

I-5 Propriétés électroniques .....7

I-5.1 Structure de Bande .....7

I-6 Propriétés optiques .....10

I-7 Croissance Epitaxiale .....13

I-7.1 Epitaxie en phase vapeur aux organométalliques EPVOM .....13

I-8 Dopage .....15

I-8.1 Origine du dopage résiduel .....15

I-8.2 Dopage Intentionnel .....16

I-9 La Résistivité .....17

I-10 La mobilité .....17

I-11 Les composé ternaire  $Al_xGa_{(1-x)}N$  et  $B_xGa_{(1-x)}N$  .....19

I-11.1 Propriétés du ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ .....	19
I-11.2 Propriétés du ternaire $\text{B}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ .....	20
Conclusion .....	21
Bibliographie: Chapitre I.....	22

**Chapitre II** Caractérisation électrique des matériaux III-N

I- Introduction .....	25
II- Mesure de la Résistivité .....	25
II-1. Méthode des Quatre Pointes .....	25
II-2. Technique de Van Der Pauw .....	28
II-2-1. Théorème de Van Der Pauw .....	29
II-3 Mesures Hall .....	31
II-4 Contacts Ohmiques .....	34
• Traitement de surface .....	35
III- Conclusion .....	36
Bibliographie: Chapitre II .....	37

## **Chapitre III** Protocole De Mesure, Résultats et discussions

I. Introduction .....	40
II. Protocole de Mesure de la Résistivité, Mobilité et Concentration des Porteurs.....	40
II.1. Les Techniques de Mesure .....	40
II.1.1. La Technique de Van der Pauw .....	40
II.1.2. La Technique de Mesure de la Mobilité et Concentration des Porteurs Effet Hall .....	43
II.2 Instrumentation .....	45
III. Exemple de mesure .....	47
IV. Conclusion .....	55
Bibliographie : Chapitre III .....	56
Conclusion général .....	57
Résumé .....	58

# *Liste des Figures*

## *Chapitre I Propriétés du Nitrure de Gallium, structure et élaboration du matériau*

*Fig.I-1 Schéma de la structure cristalline wurtzite*

*Fig.I-2 Schéma de la structure cristalline Blende de Zinc*

*Fig.I-3 Première Zone de Brillouin des deux structures avec les points de haute symétrie*

*Fig.I-4 Diagrammes de bandes de GaN, (a) en phase hexagonale et (b) en phase cubique selon deux méthodes de calcul : calcul ab-initio (lignes en pointillés) et méthode semi-empirique des pseudos potentiels (lignes en trait plein)*

*Fig.I-5 le carrée du coefficient d'absorption en fonction de l'énergie de photon pour le GaN*

*Fig.I-6 Représentation schématique de la croissance par MOVPE*

*Fig.I-7 Diagramme du gap en fonction du paramètre de maille des ternaires nitrures III- N.*

## *Chapitre II Caractérisation électrique des matériaux III-N*

*Fig.II-1 expérience de mesure de la résistance carrée par la méthode des quatre pointes*

*Fig.II-2 Les équipotentiels forment des cylindres dans le cas (a) dans le cas d'un échantillon massif (b) d'une couche mince et des demi-sphères*

*Fig.II-3 Formes diverses d'échantillons pour la méthode Van der Pauw.*

*Fig.II-4 La configuration du courant et la mesure de la tension avec la configuration Van der Pauw de la résistivité.*

*Fig.II-5 Représentation du facteur de correction de Van der Pauw*



**Fig.II-6** Effet Hall.

**Fig.II-7** Configuration de la mesure Effet Hall

**Fig.II-8** 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.

### **Chapitre III** Protocole De Mesure, Résultats et discussions

**Fig.III-1** La configuration du courant et la mesure de la tension avec la configuration Van der Pauw de la résistivité.

**Fig.III-2** Protocole expérimental de mesure Van der Pauw.

**Fig.III-3** Protocole expérimental de mesure Hall.

**Fig.III-4** Keithley 236

**Fig.III-5** Keithley 2602.

**Fig.III-6** Banc Hall: (a) réservoir d’azote, (b) aimant.

**Fig.III-7** Le logiciel de mesure Van der Pauw / Effet Hall.

**Fig.III-8** support pour les mesures I(V).

**Fig.III-9** Logiciel de caractérisation électrique.

**Fig.III-10** Les caractéristiques Courant-Tension I(V) sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

**Fig.III-11** Les caractéristiques Tension –Courant V(I) sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

**Fig.III-12** Les caractéristiques Tension –Courant V(I) représentée sur la diagonale mesure Hall.

# *Liste des Tableaux*

## *Chapitre I Propriétés du Nitrure de Gallium, structure et élaboration du matériau*

*Tableau.I-1 Coefficients de Sellmeier pour l'indice de réfraction ordinaire, pour le h-GaN et h-AIN*

## *Chapitre III Protocole De Mesure, Résultats et discussions*

*Tab.III-1 Paramètres de transport de GaN dopé Si mesurés par la méthode Van der Pauw /Hall.*

# *Liste des Symboles*

## *Abréviations*

I-V : Courant-tension.

$E_g$  : Bande interdite

SC : Semi-conducteur

GaN : Nitrure de Gallium

Si : Silicium

N : Azote

Mg : Magnésium

NH<sub>3</sub> : L'ammoniac

SZB : Structure Zinc Blende

SW : Structure Wurtzite

MOVPE : L'épitaxie en Phase Vapeur Organométallique

HVPE : L'épitaxie en Phase Vapeur Hydrure

VDP : méthode de Van der Pauw

LMOPS : Laboratoire Matériaux Optique Photonique et Système

## *Symboles*

k : Milieu d'une arête joignant deux faces hexagonales ou rectangulaires.

F : centre de la première zone de Brillouin.

$\Gamma$  : centre de la zone de Brillouin.

$\Gamma_9$  : bande des trous lourds.

$\Gamma_7$  : bande des trous légers.

a : paramètre de maille.

b : paramètre de courbure.

$\lambda$ : Longueur d'onde.

$c$  : Coefficients de Sellmeier.

$\alpha$  : Coefficient d'absorption.

$A$  : La dérivée de l'absorbance.

$L$  : Chemin optique.

$t$  : l'épaisseur

$\rho$  : La résistivité

$V$  : Tension

$V_H$  : Tension Hall

$I$  : Courant

$R$  : Résistance

$N_S$  : Concentration des porteurs surfacique

$N_B$  : Concentration des porteurs volumique

$\mu$  : la mobilité

$\mathcal{F}$  : Facteur Correctif

$S$  : surface

$s$  : l'écartement

# *Introduction générale*

## Introduction générale

La plupart d'entre nous connaissent le silicium, matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, de son abondance naturelle et de son coût de mise en œuvre économique [1], mais comme l'électronique et la télécommunication, les systèmes deviennent de plus en plus exigeants. Le silicium est un peu à la fin de cette attache il y'a nécessité à trouver d'autres matériaux semi-conducteurs qui peuvent donner de meilleures performances, et permettre aux gens d'avoir des système de télécommunications qui offrent la capacité demandée, alors comment pouvons-nous surmonter ces difficultés, essayons de regarder d'autres matériaux et voir comment ils peuvent être utilisés et comment obtenir plus de fréquences et de performances supérieures avec ces nouveaux dispositifs, bien sûr il y a des bandes de fréquences qui sont déjà occupé et pour augmenter la capacité des données que vous voulez transmettre parfois, il vous suffit de déplacer jusqu'à une nouvelle fréquence plus élevée.

Les fréquences sont plus difficiles à gérer parce que les choses sont beaucoup plus rapides, nous devons donc essayer de trouver de nouveaux matériaux. Il y a en particulier un matériau qui est un composé binaire appelé nitrure de gallium, Il est peu sensible aux rayonnements ionisants.

Les nitrures d'éléments III sont des semi-conducteurs remarquables car ils couvrent l'ensemble du spectre visible ainsi que les ultraviolets [2]. L'intérêt des nitrures des semi-conducteurs III-V, comme le nitrure de gallium (GaN) et ses alliages, réside dans leurs nombreuses applications dans le domaine de l'électronique et l'optoélectronique [3]. Les composants à base de nitrure de gallium, en particulier ceux réalisés par la société Nichia (Japon), sont actuellement les plus performants dans le domaine des diodes émettrices de lumière [4].

La compréhension des phénomènes physiques et électrique est très importantes pour les composants dans ce contexte nous traiterons la caractéristique électrique du nitrure de gallium.

Dans le premier chapitre nous présenterons un bref historique du développement des nitrures. Nous y avons ensuite répertorié les principales propriétés connues du nitrure de gallium (Structure cristalline, propriétés électroniques et diélectriques), ainsi que les techniques et les difficultés rencontrées pour son élaboration.

Dans le second chapitre nous traiterons les techniques de caractérisation électrique utilisées pour la mesure de la résistivité, de la concentration des porteurs et de la mobilité.

Le troisième chapitre sera consacré aux mesures expérimentales notamment, la résistivité la mobilité et la concentration des porteur d'une couche semi-conductrice de nitrure de gallium dopé silicium sur substrat saphir à la température ambiante et à la température d'azote.

# ***CHAPITRE I***

***Propriétés du Nitrure de Gallium, structure et  
élaboration du matériau***



## **I-1 Introduction**

Le nitrure de gallium est un matériau encore récent, dont les propriétés et les paramètres physiques sont souvent absentes des bases de données disponibles sur les matériaux semi-conducteurs, c'est un semi-conducteur à large bande interdite (3,4 eV) utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de grande puissance ou de haute fréquence [4].

Le nitrure de gallium est un composé chimique de formule GaN qui se présente sous la forme d'une poudre cristalline jaune, et qui possède une semi-conductivité intrinsèque, la couche de ce matériau épitaxies sur différents substrats à forts désaccords paramétriques, est caractérisé dans ses deux phases cristallines: wurtzite et blende de zinc [5].

## **I-2 Intérêt du nitrure de gallium**

Le nitrure de gallium présente les avantages d'une bande interdite directe, d'une grande stabilité chimique, de très bonnes propriétés mécaniques, mais également de propriétés physiques intéressantes qui le rendent non seulement attractif pour les émetteurs bleus [6], mais également pour l'électronique haute température, haute puissance et haute fréquence. Sa large bande interdite permet également d'envisager son utilisation dans des photo-détecteurs UV insensibles au rayonnement visible du soleil.

## **I-3 Caractéristiques du Nitrure de gallium**

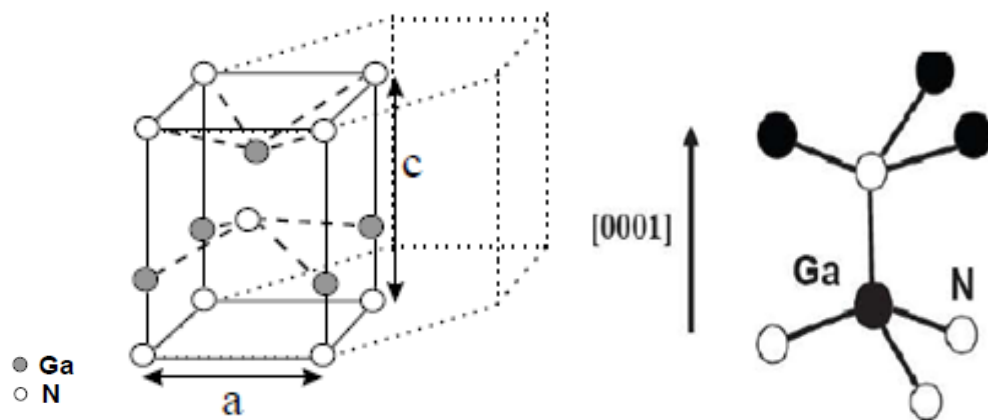
Les nitrures d'éléments III sont des semi-conducteurs remarquables car ils couvrent l'ensemble du spectre visible ainsi que les ultraviolets. Les dispositifs optoélectroniques à base de nitrures présentent aujourd'hui des performances exceptionnelles, malgré une densité de dislocations très élevée ( $>10^8 \text{cm}^{-2}$ ) et des champs électriques intrinsèques géants (plusieurs MV/cm). Les différents phénomènes physiques mis en jeu dans ces matériaux sont illustrés par les propriétés optiques de puits et de boîtes quantiques [2].

## **I-4 Structure cristalline**

Le nitrure de gallium cristallise sous deux formes différentes [7]:

- Le poly-type thermodynamiquement stable: est la phase hexagonale (**structure wurtzite**: h-GaN ou  $\alpha$ -GaN ) [8].

La structure cristalline wurtzite (figure I-1), nommée d'après le minéral wurtzite, est la structure cristalline de nombreux composés binaires. Elle fait partie du système cristallin hexagonal. La phase wurtzite est la plus stable dans les conditions normales de croissance (sur substrat saphir, SiC,...) formée de deux réseaux hexagonaux compacts, l'un occupé par les atomes III et l'autre occupé par les atomes d'azote (V), décalés suivant l'axe c d'une valeur de  $3c/8$  interpénétrés et décalés de  $5/8$ ème de la maille élémentaire [9].



**Fig.I-1** Schéma de la structure cristalline wurtzite [4].

- Le poly-type cubique (**structure blende de zinc**: c-GaN ou  $\beta$ -GaN), thermodynamiquement métastable, peut être également obtenu en choisissant des conditions de croissance adaptées [8].

Cette structure Blende de Zinc (figure I-2), qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc...), qui se compose de deux réseaux cubiques à faces centrées (cubique a face centré) un occupé par les éléments III et l'autre occupé par les atomes d'azote, décalé d'un quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de  $\frac{3}{4} a$  [111], où  $a$ , représente le paramètre de maille du matériau [10].

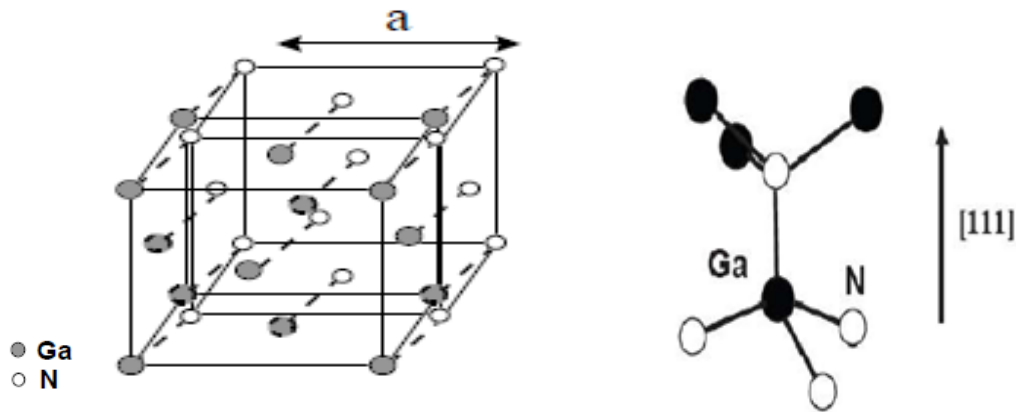


Fig.I-2 Schéma de la structure cristalline Blende de Zinc [4].

## I-5 Propriétés électroniques

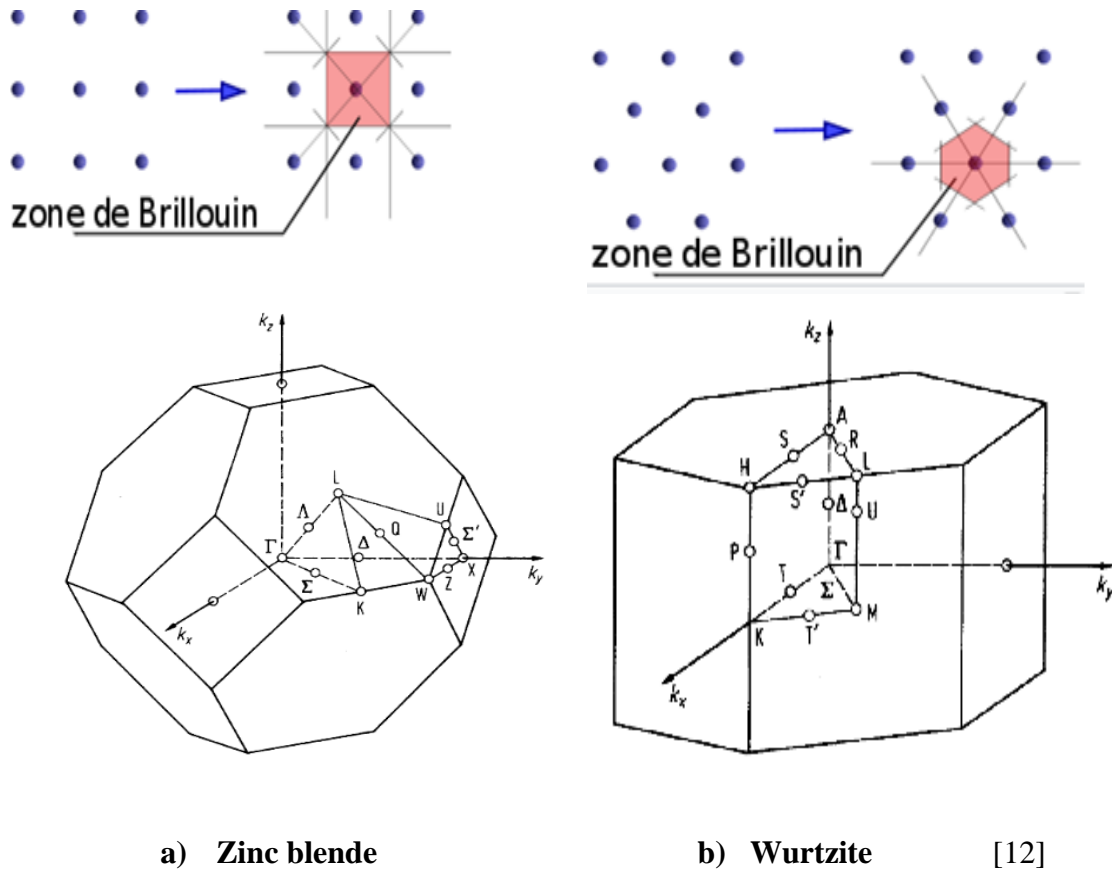
### I-5.1 Structure de Bande

Les propriétés électriques des nitrures III-N sont directement reliées à la concentration des porteurs libres (électrons et trous) dans le semi-conducteur. Les binaires (GaN, AlN, etc...) possèdent en général un gap direct (minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence se trouve aligné dans l'espace des  $k$  (milieu d'une arête joignant deux faces hexagonales ou rectangulaires) au centre de la zone de Brillouin). Les deux poly-types de GaN présentent, comme la plupart des matériaux III-V, une bande interdite directe au point F, centre de la première zone de Brillouin ( $k=0$ ) [11].

- **Zone de Brillouin**

Le cristal étant périodique, les paramètres internes (comme la densité d'électrons) ont la périodicité du réseau. Le réseau direct est défini par la première zone de Brillouin. Les grandeurs physiques sont périodiques dans l'espace direct, il suffit de les connaître dans la maille élémentaire du réseau pour les reconnaître dans tout le cristal. Il est de même pour l'espace réciproque, il suffit de les avoir dans la première zone de Brillouin comme le montre la (figure I-3).

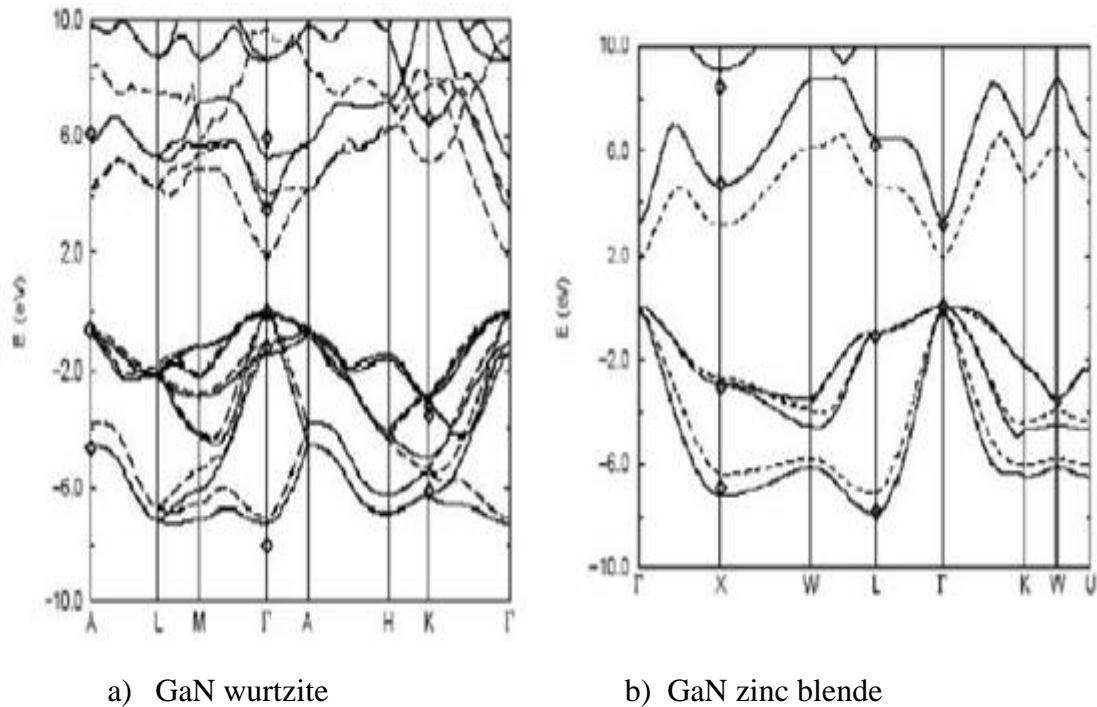
La première zone de Brillouin d'un atome est définie comme le volume délimité par des surfaces issues de l'ensemble des points équidistants de l'atome et de ses plus proches voisins [12].



**Fig.I-3** Première Zone de Brillouin des deux structures avec les points de haute symétrie

Dans la (figure I-4) au voisinage de point  $\Gamma$ , la bande de conduction (de symétrie  $\Gamma_7$ ) est unique alors que la bande de valence se subdivise en trois bandes nommées HH, LH et CH (de symétries respectives  $\Gamma_9$ ,  $\Gamma_7$  et  $\Gamma_7$ ). Cette séparation est due à deux facteurs: le champ cristallin (bande CH) et l'interaction spin-orbite (bande des trous lourds HH et bande des trous légers LH) [12].

Les mesures de photoluminescence, d'absorption ou de réflectivité sur nitrure de gallium permettent de déterminer les énergies de ces trois excitons A, B, C formés à partir des trous HH, LH, CH [4].



**Fig.I-4** Diagrammes de bandes de GaN, (a) en phase hexagonale et (b) en phase cubique selon deux méthodes de calcul : calcul ab-initio (lignes en pointillés) et méthode semi-empirique des pseudos potentiels (lignes en trait plein) [12].

Dans la structure cubique, au point  $\Gamma$  (siège des transitions radiatives) le couplage spin orbite divise le haut de la bande de valence en deux niveaux. L'un correspond aux bandes de trous lourds et de trous légers, dégénérées en  $\Gamma$ .

Dans le cas du nitrure de gallium hexagonal, la non cubicité de la maille donne lieu, de plus, à un champ électrique appelé champ cristallin qui induit une levée de dégénérescence au point  $\Gamma$  des trous lourds et trous légers.

La maîtrise du niveau de dopage résiduel et intentionnel dans les nitrures III-N est un point clé pour la réalisation de dispositifs [12].

## I-6 Propriétés optiques

Il est important de définir d'abord la notion d'exciton, Un exciton est une paire électron-trou en interaction coulombienne qui correspond au premier état d'excitation du cristal. Le mécanisme de création est le suivant: lorsqu'on excite un matériau semi-conducteur avec une énergie supérieure à son gap, des électrons quittent la bande de valence pour peupler la bande de conduction laissant des trous dans la bande de valence. Après thermalisation au bas des bandes, un électron et un trou en interaction coulombienne forment un complexe appelé "exciton" plus ou moins libre de se propager dans le matériau avant de se recombiner. La spectroscopie optique de semi-conducteurs permet d'étudier les excitons et conduit à la détermination de certains paramètres intrinsèques du matériau [9].

- **Indice de réfraction**

La connaissance de l'indice de réfraction est utile lorsque l'on étudie des structures laser car le confinement optique, et donc la propagation des photons dans le guide d'onde, en dépendent. Les propriétés optiques des nitrures en phase hexagonale sont anisotropes, ce qui se traduit par une biréfringence uni-axiale. Il y a donc deux indices de réfraction: un indice ordinaire correspondant à une polarisation parallèle à l'axe [0001] et un indice dit "extraordinaire" correspondant à une polarisation dans le plan (0001). Toutefois; on pourrait, en première approximation, négliger l'anisotropie et ne considérer que l'indice ordinaire, La variation de l'indice de réfraction ordinaire  $n$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , dans la gamme de transparence, est décrite par une loi de type Sellmeier [12]:

$$n(\lambda) = [a + b.\lambda^2 / (\lambda^2 - c^2)]^{1/2} \quad (1)$$

Avec:

a : paramètre de maille

b : paramètre de courbure

$\lambda$  : Longueur d'onde

c : coefficients de Sellmeier

Le tableau I-1 regroupe les coefficients de Sellmeier pour l'indice de réfraction ordinaire, pour le h-GaN et h-AIN.

	GaN	AlN
Domaine de longueurs d'onde	364-600nm	300-600nm
a	5.15	1.00
b	0.35	3.12
c (nm)	339.8	138.0

**Tableau.I-1** Coefficients de Sellmeier pour l'indice de réfraction ordinaire, pour le *h-GaN* et *h-AlN* [12].

L'indice de réfraction a été mesuré par ellipsométrie spectroscopique, ainsi que la réflectivité, la transmission ou encore la luminescence dans le visible et l'infrarouge [12].

- **coefficient d'absorption**

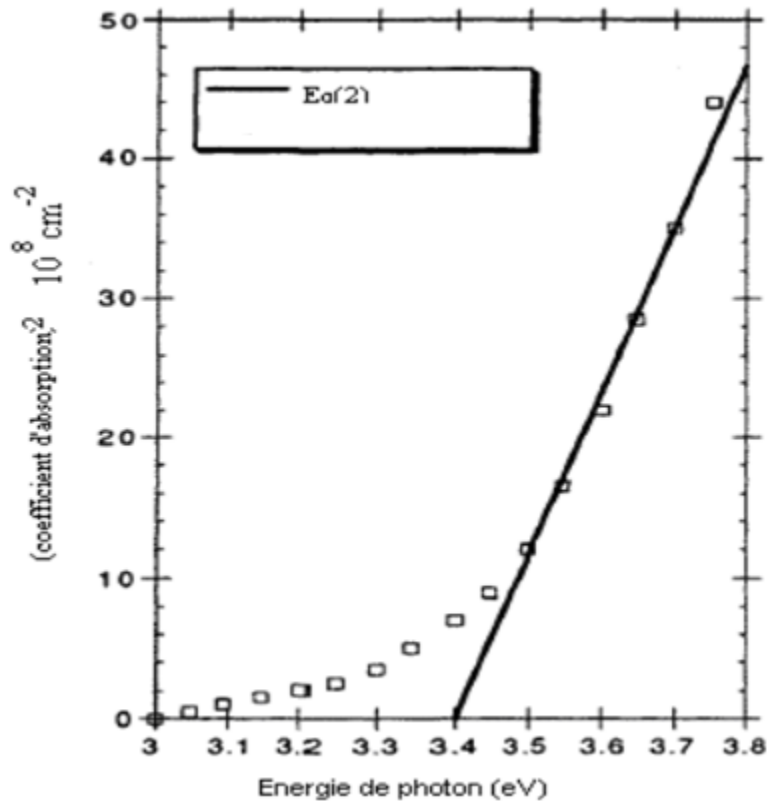
En optique, le coefficient d'absorption ou absorptivité est une quantité locale définie à partir de la dérivée de l'absorbance  $A$  par rapport au chemin optique  $L$  parcouru par un rayonnement électromagnétique dans un milieu donné (exprimé en  $m^{-1}$  ou en  $cm^{-1}$ )

$$\alpha = - \left. \frac{dA}{dL} \right|_L = 0 \quad (2)$$

Un certain nombre d'études ont été menées concernant l'absorption visible et ultraviolette dans les deux structures wurtzite et zinc blende de GaN en films minces.

Le carré du coefficient d'absorption pour les structures wurtzite et zinc blende est une fonction linéaire de l'énergie des photons pour des énergies au-dessus de  $E_g(E=E_g+0,5\text{eV})$ , qui confirme la transition d'énergie de gap directe dans le GaN [12].

La figure I-5 suivante montre la dépendance du carré du coefficient d'absorption en fonction de l'énergie des photons [12].



**Fig.I-5** le carré du coefficient d'absorption en fonction de l'énergie de photon pour le GaN [12].

Le gap du nitrure de gallium est direct, les mesures du coefficient d'absorption de nitrure de gallium de type wurtzite, au gap excitonique, donnent des valeurs variant de  $3 \cdot 10^{-4}$  à  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$  [12].



## I-7 Croissance Epitaxiale

Contrairement au cas des semi-conducteurs tels que le silicium ou le GaAs, il n'existe pas encore de substrat de nitrure de gallium monocristallin massif disponible industriellement. La difficulté à obtenir ce type de cristaux vient de son point de fusion très élevé et des fortes pressions de vapeur saturante des composés. Des monocristaux massifs ont été élaborés avec succès à haute pression, mais la surface disponible est de 100 mm<sup>2</sup> pour 200 heures de croissance [9].

### I-7.1 Epitaxie en phase vapeur aux organométalliques EPVOM

La technique de l'épitaxie en phase vapeur à partir de composés organométalliques a été introduite à la fin des années 60 par *H Manasevit et al* [13]. La MOVPE se distingue de l'EPV aux hydrures par la nature des précurseurs d'éléments III utilisés, qui sont des composés organométalliques contenant l'atome à épitaxier, mais également par le fait que la croissance se déroule dans un réacteur à parois froides, hors équilibre thermodynamique [13].

La MOVPE (Metal Organic Vapour Phase Epitaxy), consiste à élaborer le nitrure de gallium (GaN), à réaliser une pyrolyse de l'ammoniac et d'un composé organométallique (tri-méthyl-gallium (TMGa) ou triéthyl-gallium (TEGa)) à la surface du substrat chauffé. L'utilisation du TEGa lors de la croissance du GaN comme précurseur limitait la contamination des couches par le carbone, du fait que le carbone proviendrait en grande partie des radicaux méthyles très réactifs [9].

La chambre de croissance est la pièce maîtresse de l'équipement de la MOVPE. Il existe différentes géométries, verticales ou horizontales. La MOVPE qui présente l'intérêt d'une mise en œuvre très souple à coût raisonnable, est très majoritairement utilisée aujourd'hui dans l'industrie des semi-conducteurs, pour la fabrication de composants [4].

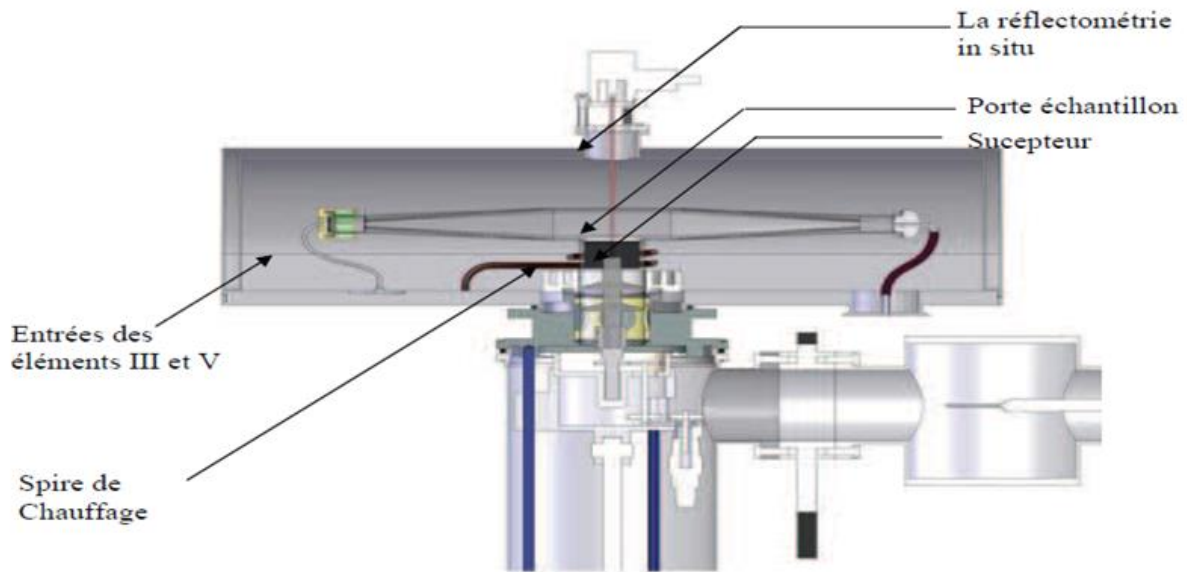
Les parois de la chambre où se déroule la croissance (réacteur) sont froides, seul le substrat est porté à haute température (1000 °C), la pression dans le réacteur est comprise entre 50 torr et la pression atmosphérique. La haute température de la surface confère une

grande mobilité aux atomes qui peuvent se ranger parfaitement en un cristal. C'est la croissance cristalline, ou l'épitaxie.

Plusieurs géométries de réacteurs MOVPE existent, qui dépendent de la qualité, de la régularité et de la stabilité du flux de gaz [9].

La croissance par MOVPE peut se décomposer en plusieurs étapes élémentaires schématisées sur la (figure I-6), parmi elles: transport des précurseurs en phase gazeuse vers la surface du substrat, pyrolyse des molécules organométalliques, diffusion et insertion des radicaux métalliques au sein du cristal et enfin, désorption des produits carbonés résiduels [14].

Le réacteur dans lequel la croissance du GaN est réalisé au niveau du Laboratoire Matériaux Optiques, Photoniques et Systèmes (LMOPS) de l'Université Paul Verlaine-Metz est en forme de T (*T-shaped reactor* (figure I-6)).



**Fig.I-6** Représentation schématique de la croissance par MOVPE [15].

## I-8 Dopage

### I-8.1 Origine du dopage résiduel

Des mesures SIMS ont montré que le carbone (C), l'oxygène (O) et le silicium (Si) sont parmi les impuretés non intentionnellement incorporées dans les films  $\beta$ -GaN [16].

Il existe dans la littérature plusieurs théories qui s'opposent pour expliquer ce dopage résiduel, Les couches de GaN non intentionnellement dopées présentent un fort résiduel de type N (de l'ordre de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  dans les meilleur cas).

Nous reportons ici les principaux défauts ponctuels susceptibles d'être à l'origine du dopage résiduel dans les nitrures III-N [16].

- **Lacunes d'Azote**

Cette attribution a cependant été remise en question par les travaux théorique de *Neugebauer et al* [17], et *Van de Walle et al* [17], qui aboutissent à une faible probabilité de formation de lacunes d'azote dans un matériau de type N.

Ils ont suggéré que les impuretés silicium en site Gallium ( $\text{Si}_{\text{Ga}}$ ) et oxygène en site azote ( $\text{O}_{\text{N}}$ ) était en revanche de bons candidats pour le dopage résiduel car toutes les couches de nitrure de gallium hexagonal sont élaborées sous conditions de croissance riches en Ga où la formation de ces défauts est favorisée. 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 [17].

Cependant, ces calculs aboutissent également à une faible énergie de formation des lacunes de gallium (accepteur profond) dans une 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 nitrure de gallium [9].

- **Atomes en site interstitiel**

Dans un cristal, des motifs (atomes, ions ou molécules) sont situés aux nœuds d'un réseau. L'espace entre ces motifs est appelé sites interstitiels. Les atomes interstitiels

d'azote ou de gallium ont des énergies de formation très élevées, leur formation est peu probable [14].

- **Atomes d'impuretés en site substitutionnel**

Le silicium, l'oxygène et le carbone sont souvent présents dans la couche épitaxiale. Le silicium, donneur dans les nitrures, se place préférentiellement en site gallium.

L'oxygène se place en site azote et agit comme donneur simple, favorisé sous conditions de croissance riche en gallium.

Le carbone se place préférentiellement en site d'azote et se comporte comme un accepteur [16].

### **I-8.2 Dopage Intentionnel**

Le dopage s'effectue habituellement par trois techniques: l'incorporation lors de la croissance, la diffusion à l'état solide et l'implantation ionique.

#### Dopage de Type N :

Divers éléments peuvent être utilisés pour le dopage de type N, mais le plus courant est le silicium. Dans le nitrure de gallium, 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 (Épitaxie en phase vapeur aux organométalliques) et une source solide en MBE (Épitaxie par jet moléculaire). L'énergie d'activation du silicium n'est pas déterminée précisément, elle est généralement donnée entre 12 et 17 meV [9].

#### Dopage de Type P :

Le dopage de type P s'est avéré beaucoup plus difficile que le N-type. La difficulté était due à la forte concentration des porteurs dans le nitrure de gallium présents au début de

la croissance, conjuguée à la haute énergie d'activation pour les dopants accepteurs ( $E \sim 250 \text{ meV}$  pour Mg).

Les études sur le dopage de type P ont été effectuées par *Peter Kozodoy et al* [17], ils ont été menés sur les conditions de croissance, l'activation, et le traitement des contacts ohmiques P, la résistivité typique à température ambiante pour le nitrure de gallium dopé en magnésium est d'environ  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ . La majorité des atomes Magnésium dans le film restent électriquement inactifs, mais la mobilité reste faible [17].

## **I-9 La Résistivité**

Les paramètres du nitrure de gallium varient en fonction de l'épaisseur de la couche, des propriétés structurales et morphologiques, des défauts étendus et ponctuels, du type de substrat.

La concentration des électrons et leur mobilité sont directement liées à la résistivité de la couche, mesurée par la technique Van der Pauw qu'on détaillera dans le chapitre suivant [9].

## **I-10 La mobilité**

La mobilité des porteurs de charge est une notion utilisée en physique pour caractériser les milieux conducteurs du courant électrique. Elle est notée  $\mu$ , et relie la vitesse moyenne d'un porteur de charge électrique du milieu (électron, trou, ion, etc.) au champ électrique qu'il subit via la relation suivante:

$$\mathbf{V}_d = \mu \mathbf{E} \quad (3)$$

La mobilité est une caractéristique très importante du matériau, car elle traduit la capacité qu'ont les porteurs à se déplacer dans le matériau. C'est donc un facteur déterminant pour les dispositifs. Ceci est très important pour des domaines comme l'optoélectronique, ou les télécommunications.

D'après la définition de la mobilité, le transport électronique dépend essentiellement de deux paramètres :

- La masse effective des électrons.
- La fréquence des interactions avec le réseau cristallin.

Les atomes vibrent autour de leur position d'équilibre (phonon), d'autre part, il existe des perturbations locales du potentiel cristallin (dopant, alliages, ...), qui sont aussi sources d'autres types d'interactions des porteurs avec le réseau.

Les différentes interactions qui limitent la mobilité sont principalement [9]:

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

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 [9]. 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) [18].

- **L'interaction avec les phonons**

- **phonons optiques** : pour lesquels les atomes vibrent en opposition de phase.

- 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.

- **les phonons acoustiques** : où les atomes vibrent en phase.

- Ce type d'interaction est présent dans toute la gamme de températures mais rarement prépondérante.

- 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 [9].

Ces interactions phonon-électron se font par absorption ou émission de phonons, en respectant la conservation de l'énergie et du vecteur d'onde.

- **Diffusion d'alliage**

A cause du désordre d'un alliage, le potentiel cristallin n'est pas périodique du fait des fluctuations locales de composition.

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

Cette interaction est présente dans toute la gamme de température, et n'est pas prépondérante dans une gamme de températures en particulier. 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 [9].

## **I-11 Les composé ternaire $Al_xGa_{(1-x)}N$ et $B_xGa_{(1-x)}N$**

### **I-11.1 Propriétés du ternaire $Al_xGa_{1-x}N$**

L'AlGaN a reçu le plus d'attention des alliages de la famille des nitrures III-V, en raison de son potentiel d'applications en hétéro-structure AlGaN / GaN.

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 donc des objectifs impératifs pour développer de nouveaux composants, en particulier dans le domaine de l'UV lointain [18].

L'étude la plus complète à ce jour sur les propriétés d'AlGaN a été réalisée par Yoshida et al [14], il a signalé la variation de la concentration des électrons, la mobilité, la résistivité, la constante du réseau et le gap, en fonction de x sur toute la gamme d'alliage [14].

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 1 eV pour l'AlGaN.

$$E_{g \text{ Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}} = xE_{g\text{AlN}} + (1-x)E_{g\text{GaN}} - x(1-x)b \quad (4)$$

- **Bowing**

Le bowing est généralement positif pour les alliages III-V, c'est-à-dire que le gap de l'alliage est plus petit que le résultat de l'interpolation linéaire, et peut en principe être fonction de la température. L'origine physique du bowing peut être attribuée à des troubles effets créés par la présence de différents cations-anions. Le bowing a été généralisé pour les termes quadratiques dans la composition de l'alliage. Il exprime les extensions de plusieurs paramètres de bande, ainsi, dans certains cas, il peut être attribué à des mécanismes physiques spécifiques. Mais parfois, il peut simplement correspondre aux paramètres empiriques ou données expérimentales [21].

### **I-11.2 Propriétés du ternaire $B_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$**

Pour le  $B_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ , les études faites par l'équipe du LMOPS (laboratoire matériaux optique photonique et système), pour déterminer les propriétés, structurales et électroniques en fonction de la composition, montre qu'un bowing existe aussi pour ce nouveau ternaire [9].

Les énergies de la bande interdite des binaires GaN, AlN et BN et leur paramètre de maille sont représenté sur la (figure I-7), montrant que les alliages AlGaN et B GaN (et le quaternaire BAlGaN) permettent de concevoir des composants optoélectronique fonctionnant dans la gamme spectrale de 200nm à 364nm. L'alliage B GaN (et le BAlGaN) peut être en accord de maille sur AlN pour une composition de bore de l'ordre de 10%.



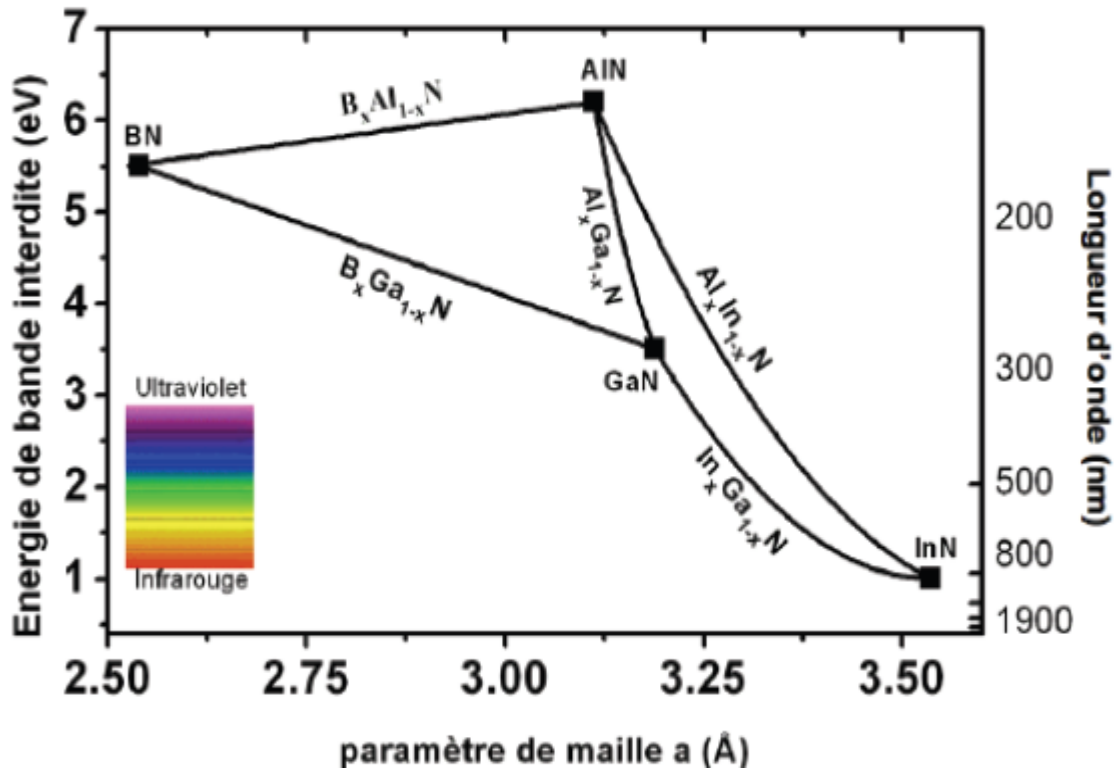


Fig.I-7 Diagramme du gap en fonction du paramètre de maille des ternaires nitrures III- N.

## Conclusion

La recherche sur les nitrures est encore en pleine évolution, si bien qu'il existe encore peu de paramètres fondamentaux du matériau communément admis. Dans ce chapitre nous avons présenté les propriétés structurales et électroniques et optiques des nitrures III-N. Nous avons passé en revue les propriétés de transport et particulièrement, la problématique du dopage résiduel et son origine. Les semi-conducteurs III-V possèdent des mobilités de porteurs de charge supérieures au silicium et permettent donc la réalisation de transistors fonctionnant à plus basse tension d'alimentation. Enfin le paramètre des alliages ternaires, et leur variation avec la composition.

## **Bibliographie: Chapitre I**

[1] : Feddaoui Omar mémoire de magister: Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables.

[2] : Les nitrures d'éléments III : des semi-conducteurs III-V singuliers, Article proposé par Nicolas Grandjean et Jean Massies, (université de Montpellier II).

[3] : Mostefaoui Mohammed, titre modélisation d'une cellule solaire à base de composés III-V nitrurés, Université El Djillali liabès de Sidi Bel Abbès.

[4] : Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus.pdf. par Agnès PHILIPPE. Ingénieur INSA de Lyon  
Soutenue le 6 Décembre 1999.

[5] : Nitrure de gallium .Wikipédia.

[6] : Benzeghadi Halima, Pour l'obtention du Diplôme de Master 2, thème Analyse des spectres Raman sur des échantillons de GaN dopé et non dopé, Soutenue publiquement le 25 Juin 2012.

[7] : Lacheze\_ludovic\_2009.pdf . etude et simulation physique des effets parasites dans les hems AlGaIn/GaN. Soutenue le 14 décembre 2009.

[8] : Etude des composés ternaires à base de nitrures en utilisant la méthode de simulation de Monte Carlo.pdf.par : Mme BACHIR - DAHMANI Nadia.

[9] : Baghdadli.Tewfik.SMZ0919.pdf .Thèse Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique  
Soutenue publiquement le 10 juillet 2009.

[10] : DJI4307.pdf . Etude par simulation des phénomènes de polarisations et les contacts

Ohmiques dans les transistors HEMTS base de GAN . Présenté Par: djimli chahrazad.

[11] : CHAPITRE1-HAMROUN-Amine.pdf, Les nitrures (Al, Ga, In)-N.

[12] : Etude Des Propriétés De Quelques Nitrures : Application Aux Photodiodes, Présenté par : Mr Taleb Ihsen Yasser Soutenu en Juin 2012.

[13] : H. Manasevit. Applied Physics Letters, 12, 156, 1968.

[14] : S. Nakamura GaN growth using GaN buffer layer Jpn. J. Appl. Phys., vol. 30, n° 10A, pp. L1705-L1707, 1991.

[15] : S. Yoshida, S. Misawa, S. Gonda Improvements on the electrical and luminescent properties of reactive molecular beam epitaxially grown GaN films by using AlN-coated sapphire substrates Appl. phys. Lett., vol. 42, n°. pp. 427, 1983.

[16] : these en 2002, martinez guerrero, chapitre5.pdf dopage des films GaN.

[17] : O. Briot, MOVPE growth of nitrides. In group III nitride semiconductors compounds, edited by B.Gil. Oxford: Clarendon press, P.70-122, 1998.

[18] : H. Brooks Physics Review, vol 23, P 879, 1951.

[19] : H.X. Jiang, J.Y. Lin AlGa<sub>N</sub> and InAlGa<sub>N</sub> alloys – Epitaxial growth, optical and electrical properties, and applications, Opto-electron. Rev. 10, 271, 2002.

[20] : Y. Taniyasu, M. Kasu, N. Kobayashi Intentional control of n-type conduction for Si doped AlN and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0.42<x<1) Appl. Phys. Lett. 81, 1255, 2002.

[21] : 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<sub>G</sub>GaN thin films», Applied Physics Letters: Vol.93 0833118 (2008).

# ***CHAPITRE II***

***Caractérisation électrique des matériaux III-N***

## I- Introduction

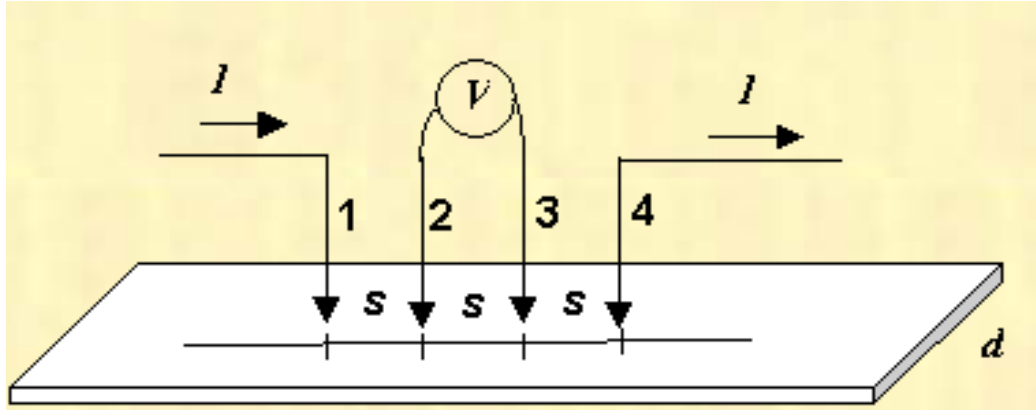
Les nitrures d'éléments III sont des semi-conducteurs remarquables, et plus particulièrement le nitrure de gallium (GaN) qui est le matériau le plus prometteur pour la réalisation d'émetteurs de lumière bleue à l'état solide et il couvre l'ensemble du spectre visible ainsi que les ultraviolets. Ce travail porte sur l'étude des techniques de caractérisation électrique utilisées pour la mesure de la résistivité la mobilité, et la concentration des porteurs, notamment la technique Van der Pauw / Effet Hall.

## II- Mesure de la Résistivité

### II-1. Méthode des Quatre Pointes

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 [1].

La méthode des quatre pointes est une méthode expérimentale utilisée couramment pour mesurer la résistance carrée et/ou la résistivité d'un semi-conducteur massif. Elle consiste en quatre pointes alignées, équidistantes d'une distance  $s$  petite par rapport aux dimensions de l'échantillon. On envoie un courant  $I$  entre la pointe 1 et la pointe 4 (figure II-1) et on mesure la différence de potentiel  $V$  entre les pointes 2 et 3, le rapport tension courant  $\frac{V}{I}$  est lié à la résistivité en fonction des dimensions de l'échantillon [2].



**Fig.II-1** expérience de mesure de la résistance carrée par la méthode des quatre pointes [2].

Dans le cas d'un échantillon massif, les équipotentielles sont des demi-sphères et la résistance mesurée entre la pointe 2 et la pointe 3 est calculée en intégrant des résistances infinitésimales comprise dans le quart de la couronne de sphère comprise entre les pointes en question et centrées à la pointe 1 (figure II-2-a), les parties de l'échantillon à l'extérieur de cette portion ne peuvent intéresser la chute de potentiel entre 2 et 3. L'aire de cette couronne en partant de la pointe 1 et pour un rayon  $r$  est  $\pi r^2$ , ce qui donne [2]:

$$dR = \rho \frac{dr}{\pi r^2} \quad (5)$$

et

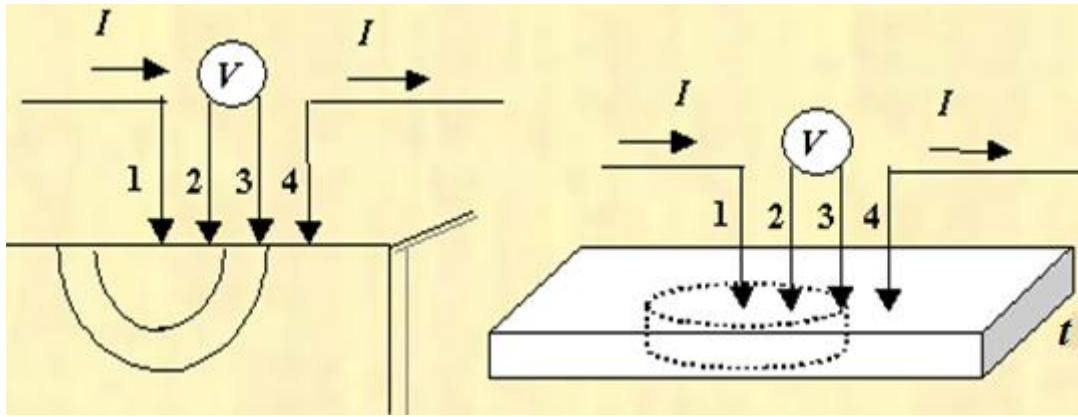
$$R = \frac{\rho}{\pi} \int_s^{2s} \frac{dr}{r^2} = -\frac{\rho}{\pi} \left[ \frac{1}{r} \right] = \frac{\rho}{\pi} \frac{1}{2s} \quad (6)$$

Or

$$R = \frac{V}{I} \quad (7)$$

Et donc :

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (8)$$



(a)

(b)

**Fig.II-2** Les équipotielles forment des cylindres dans le cas (a) dans le cas d'un échantillon massif (b) d'une couche mince et des demi-sphères [3].

Dans le cas d'une couche mince d'épaisseur ( $t$ ), les équipotielles sont de forme cylindrique, (figure II-2-b). On calcule la résistance entre la pointe 2 et la pointe 3 en ne considérant que la moitié de la couronne cylindrique située dans le sens du passage du courant, on a [1]:

$$dR = \rho \frac{dr}{\pi r t} \quad (9)$$

et 
$$R = \frac{\rho}{\pi t} \int_s^{2s} \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{\pi t} [\ln(r)] = \frac{\rho}{\pi t} \ln(2) \quad (10)$$

Or 
$$R = \frac{V}{I} \quad R_0 = \frac{\rho}{t} \quad (11)$$

Et donc :

$$\rho = \frac{\pi t V}{\ln 2 I} = 4,53. t. \frac{V}{I} \quad (12)$$

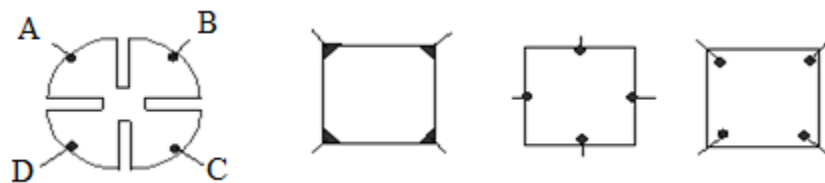
Le coefficient 4,53 est un coefficient correcteur qui n'est valable que si la distance entre les pointes est très petite par rapport à la longueur et largeur de la couche semi-conductrice. Lorsque ces dimensions deviennent plus proches de  $s$ , le coefficient correcteur diminue [2].

### Méthode Pratique pour la mesure 4 pointes :

- Effectuer une mesure tension sur courant ( $V/I$ ) pas trop près des bords de l'échantillon.
- Exprimer la mesure en Ohms
- Multiplier par 4,53 pour obtenir  $R_0$ , noter ce résultat (toujours en Ohms), la correction d'épaisseur n'est pas nécessaire).
- Exprimer l'épaisseur  $t$  de la couche en cm
- Multiplier  $R_0$  par  $t$  pour obtenir la résistivité  $\rho$ , noter ce résultat (en Ohm.cm) [3].

## II-2. Technique de Van Der Pauw

Dans le cas des couches minces il est difficile d'effectuer des mesures d'effet Hall tel qu'on vient de le voir sur les échantillons massifs. Van der Pauw a trouvé une méthode astucieuse qui va être présentée ci-dessous. Les mesures de cette méthode sont valables pour une lamelle mince de semi-conducteur de forme quelconque [4], D'ailleurs le NIST d'échantillon (National Institute of Standards and Technology) conseille d'utiliser certaines formes plutôt que d'autres (figure II-3) [5].



Forme conseillée

forme acceptée

connexions à éviter

**Fig.II-3** Formes diverses d'échantillons pour la méthode Van der Pauw.

C'est la deuxième forme que nous adapter pour nos mesures.

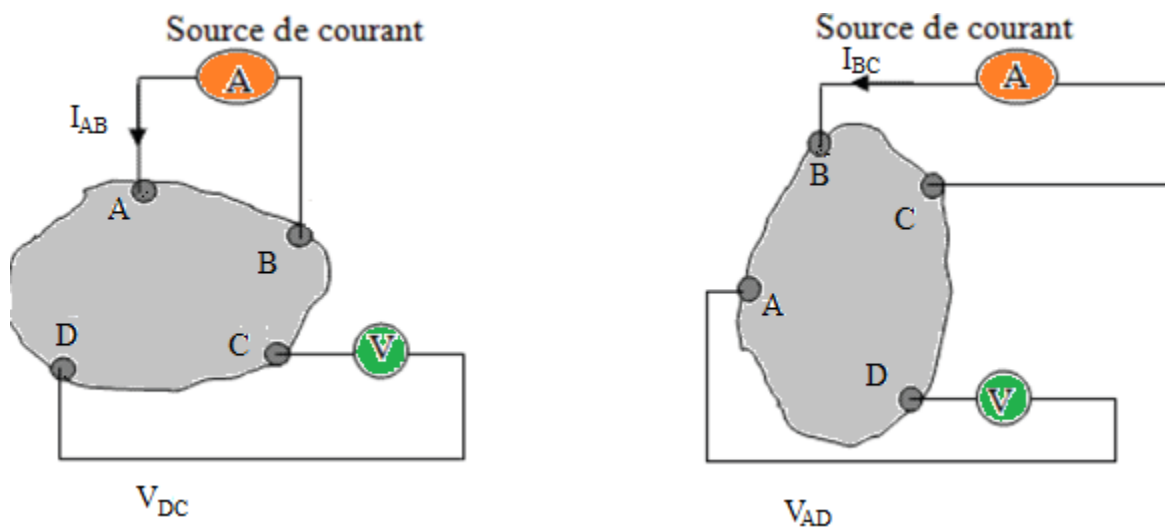


Trois conditions sont cependant nécessaires pour pouvoir appliquer cette méthode:

- 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 [1]

### II-2-1. Théorème de Van Der Pauw

On dispose d'un échantillon de forme quelconque, possédant quatre contacts A, B, C, D, de sorte que l'on soit proche des trois conditions de Van der Pauw. On injecte un courant  $I$  entre les contacts A et B et on mesure la tension entre D et C (côté opposé). Ensuite on injecte le courant  $I$  entre B et C et la tension  $V$  est mesurée entre A et D, comme illustré sur la (figure II-4). Le rapport entre la tension mesurée et le courant injecté, nous donne les résistances  $R_A$  et  $R_B$



**Fig.II-4** La configuration du courant et la mesure de la tension avec la configuration Van der Pauw de la résistivité.

Van der Pauw a montré que la résistivité  $\rho$  de l'échantillon obéit à la relation (14) suivante (Théorème de Van der Pauw):

$$\exp\left[-\frac{\pi R_A}{\rho} t\right] + \exp\left[-\frac{\pi R_B}{\rho} t\right] = 1 \quad (13)$$

Avec:

$$R_A = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \quad R_B = \frac{V_{AD}}{I_{BC}} \quad (14)$$

Où  $t$  est l'épaisseur de l'échantillon et  $\rho$  la résistivité du matériau.

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

$$\rho = \frac{\pi}{\text{Ln}2} \frac{R_A + R_B}{2} \cdot t \approx 4,53 \frac{R_A + R_B}{2} \cdot t \quad (15)$$

Et si  $R_A \neq R_B$  l'échantillon est de forme quelconque alors :

$$\rho = \frac{\pi}{\text{Ln}2} \frac{R_A + R_B}{2} \cdot t \cdot f(R_A / R_B) \quad (16)$$

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-5), Si on applique la formule (13) (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.

Si  $1 < R_A/R_B < 2$  alors :

$$R_s = \frac{\pi}{\text{Ln}2} \frac{R_A + R_B}{2}$$

Avec une précision de 5% au pire.

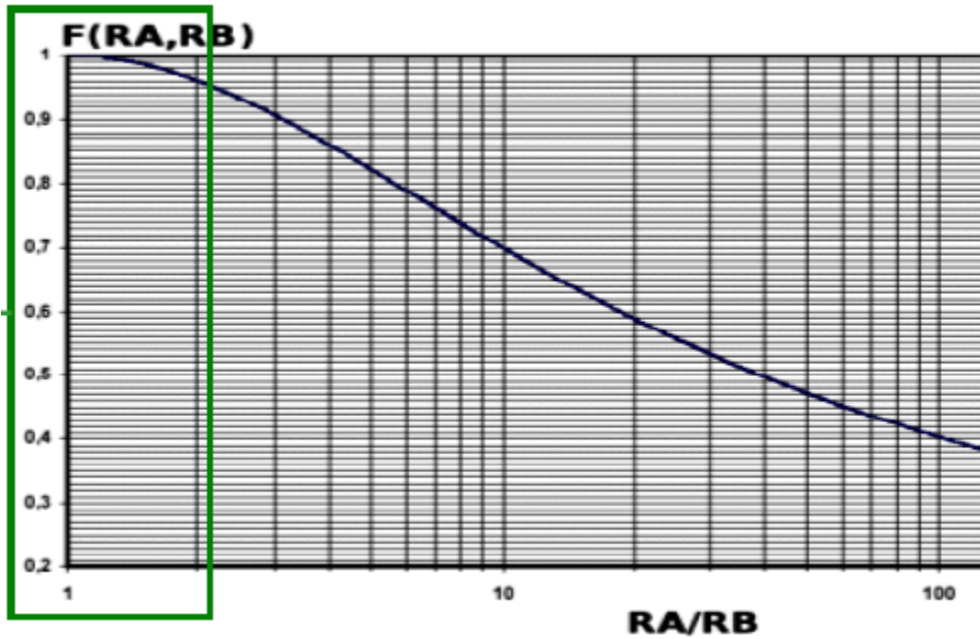


Fig.II-5 Représentation du facteur de correction de Van der Pauw [1].

### II-3 Mesures 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  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  et la charge électrique  $q$  respectivement, selon la relation suivante:

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (17)$$

Un courant électrique traversant un matériau soumis à un champ magnétique engendre une tension perpendiculaire à ce champ et aux lignes de courant (figure II-6). Dans certaines conditions, cette tension croît par paliers, effet caractéristique de la physique quantique [1].

Notons que le Prix Nobel de physique a été attribué en 1985 pour l'effet Hall quantique entier et en 1998 pour l'effet Hall quantique fractionnaire. Pour effectuer la mesure Hall, on utilise la même configuration Van der Pauw avec les quatre connections, en satisfaisant les trois conditions de Van der Pauw. On applique un champ magnétique dans la direction perpendiculaire au plan de l'échantillon, on impose un courant et on mesure la tension Hall, comme illustré dans la (figure II-6) [5].

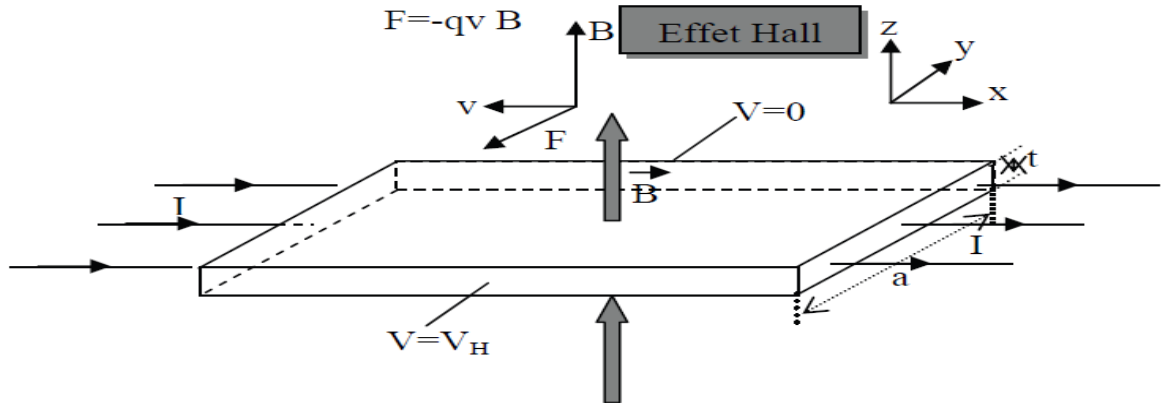


Fig.II-6 Effet Hall.

En pratique on injecte un courant I entre 2 contact de la diagonale et on mesure la tension V l'autre diagonale en appliquant un champ magnétique B comme présenté sur la (figure II-7).

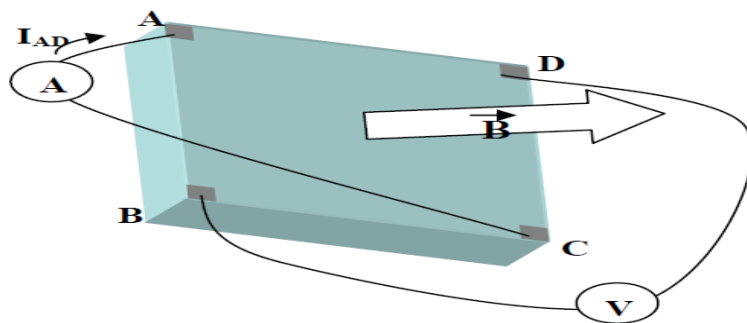


Fig.II-7 Configuration de la mesure Effet Hall [1]

La tension Hall nous renseigne sur le type et la concentration des porteurs:

Si le matériau est de type N (électrons majoritaires), la tension Hall est donnée par :

$$V_H = -\frac{1}{nq} \frac{IB}{t} < 0 \quad (18)$$

Et si le matériau est de type P (trous majoritaires), la tension Hall est donnée par :

$$V_H = +\frac{1}{pq} \frac{IB}{t} > 0 \quad (19)$$

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

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

$$N_S = \frac{IB}{q|V_H|} \quad (20)$$

La concentration des porteurs en volume  $N_B$  est :

$$N_B = N_S/t \quad (21)$$

Et la mobilité est donnée par la formule suivante :

$$\mu = \frac{t}{qN_S\rho} \quad (22)$$

On vient de voir qu'en théorie c'est une seule mesure à effectuer ( $V_H$ ), c'est-à-dire appliquer un courant entre deux contacts opposés sur la diagonale et mesurer la tension sur l'autre diagonale avec l'application d'un champ magnétique (figure II-7), mais en pratique on effectue douze mesures, en modifiant la configuration et en inversant le sens du champ magnétique et le courant injecté, ceci afin de s'affranchir des tensions parasites et de minimiser les erreurs expérimentales. Ceci est d'autant plus indispensable que la tension Hall est souvent relativement faible. [2].

## II-4 Contacts Ohmiques

Pour réaliser une bonne caractérisation électrique, les contacts doivent être ohmique condition nécessaire.

Historiquement l'or et l'aluminium ont été les premiers métaux étudiés dans la réalisation de contacts sur du nitrure de gallium dopé de type N [6]. Plus tard, des contacts en multiples couches ont été réalisés dans le but d'arrêter la diffusion, et le recuit qui augmentait la résistance du contact. La réalisation des contacts ohmiques est reliée principalement au faible travail de sortie du métal. Les études ont été entreprises pour la réalisation de contact sur du GaN. Un contact l'aluminium [7] dont le travail de sortie mesuré est de ( $\phi_m=4.28\text{eV}$ ) [8], le titane ( $\phi_m=4.28\text{eV}$ ) [9] et la multicouche Ti/Al a été étudiée par *Lin et al* [10], Mais l'inconvénient de ces contacts c'est l'oxydation rapide donc dans plusieurs travaux, en général l'or est ajouté pour protéger l'aluminium de l'oxydation, mais l'or pénètre dans la couche d'aluminium après le recuit.

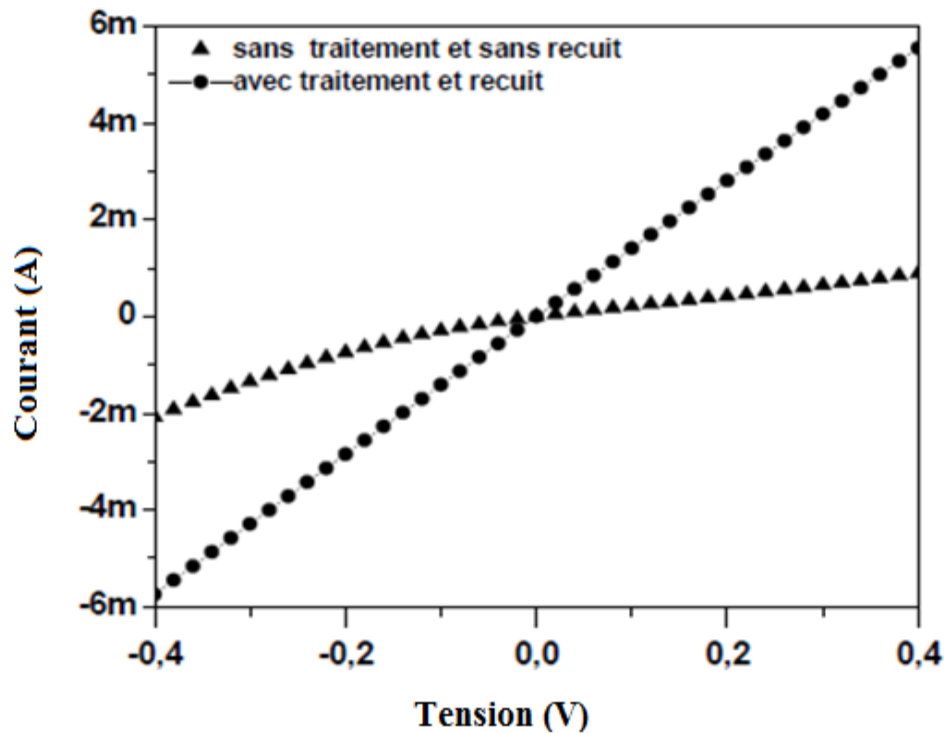
Actuellement du fait de la relation chimique complexe entre l'aluminium et le nitrure de gallium, les propriétés des contacts d'aluminium sur nitrure de gallium (dopé N) ne sont pas complètement comprises et maîtrisées. Même si certains résultats montrent que la diffusion, après recuit, de l'aluminium à travers le titane, peut être responsable de la bonne ohmicité des contacts il est généralement admis que le titane réagit avec le GaN pour former après le recuit une couche de TiN (métal plus conducteur que le titane), qui permet la diminution de la résistance du contact. Cette réaction créerait une fine région riche en sites vacants d'azote (donneurs) formant une région superficielle dopé N. De plus le titane en piégeant l'oxyde surfacique favoriserait l'adhérence du contact métallique [1].

Plusieurs facteurs interviennent pour l'obtention d'une bonne qualité de contact bien sur la qualité de la couche épitaxie (désaccord de maille), ainsi que la préparation de surface avant l'évaporation. Une large bibliographie révèle l'étude du traitement de surface avant le dépôt des contacts et du recuit des contacts, une étude très large sur l'épaisseur et le recuit a été traitée par *Wang et al* [7], ainsi que plusieurs études ont été entreprises pour la réalisation des contacts ohmiques en utilisant l'aluminium sur du nitrure de gallium. *Wang et al* [7] n'ont pas utilisé de recuit pour le contact ohmique d'aluminium et ils ont utilisé des contacts ohmiques d'Indium.

- **Traitement de surface**

Le protocole généralement utilisé est un traitement chimique de HCl:H<sub>2</sub>O (1:1) pendant 3 min [12]. Ensuite, rinçage à l'eau désionisée puis séchage à l'azote. *Wang et al* [13], ont utilisé un traitement chimique BOE:H<sub>2</sub>O (1:10) pendant 30 sec, *Hake et al.* ont fait un traitement chimique à l'eau régale pendant 10 minutes, suivi d'un traitement aux solvants dans un bain à ultrason [14], *Rajagopal Reddy et al.* utilisent du trichloréthylène suivi de l'acétone et du méthanol pendant 5 minutes dans un bain à ultrasons, ensuite un traitement chimique à l'eau régale pendant 10 minutes [15].

La figure II-8 montre que sans traitement de surface d'un échantillon de nitrure de gallium dopé silicium sur saphir avant d'évaporer les contacts d'Indium à travers un masque et sans recuit des contacts, la caractéristique courant-tension n'est pas linéaire par contre pour le même échantillon traité avec de l'acétone puis de l'éthanol dans un bain à ultrasons et recuit des contacts d'indium après l'évaporation, la caractéristique est bien linéaire (ohmique) et symétrique [1].



*Fig.II-8* 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 [1]

### III- Conclusion

Ce chapitre concernant les techniques de caractérisation électrique notamment la technique des quatre pointes, la technique Van der Pauw pour la détermination de la résistivité la mobilité et la concentration des porteur d’une couche semi-conductrice de nitrure de gallium dopé silicium sur substrat saphir. Aussi la réalisation de contacts ohmiques sur ces couches qui une étape cruciale pour cette caractérisation.



## Bibliographie: Chapitre II

[1] : Baghdadli.Tewfik.SMZ0919.pdf .Thèse Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique Soutenue publiquement le 10 juillet 2009.

[2] : Ahmed Bouazzi, caractérisation des semi-conducteurs chapitre 9: Méthode des quatre pointes.

[3] : Mesure 4 pointes, aime-toulouse DOCPDF.

[4] : L.J. Van der Pauw A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape *Phil. Res. Rep.* 13, 1–9, Feb. 1958

[5] : [ahmedbouazzi.org/chapitre\\_9/texte9\\_5.htm](http://ahmedbouazzi.org/chapitre_9/texte9_5.htm) ; caractérisation des semi-conducteurs . La méthode de Van Der Pauw.

[6] : Matthieu Schaller et Xavier Buffat, Effet Hall, 7 décembre 2007.

[7] : S.Nakamura and G. Fasol The blue Laser diodes, Springer Berlin, 1997.

[8] : L.L. Smith, M.D. Bremser, E.P. Carlson, et al. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 395, 861, 1996.

[9] : D.R. Lide *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 77th Edition, CRC Press, Boca Raton, New York, pp. 12–122, 1996.

[10] : Y.F. Wu, W.N. Jiang, B.P. Keller, et al. *Solid-State Electron* 41, 165, 1997

[11] : M.E. Lin, Z. Ma, F.Y. Huang, Z.F. Fan, L.H. Allen, H. Morkoc Low resistance ohmic contacts on wide band-gap GaN. *Appl. Phys. Lett.* 64, 1003, 1994.

[12] : C.K. Tan , A. Abdul Aziz, F.K. Yam *Applied Surface Science* 252, 5930–5935, 2006.

[13] : L.Wang, M. I. Nathan, T-H. Lim, M. A. Khan and Q. Chen High barrier height GaN Schottky diodes: Pt/GaN and Pd/GaN *Appl. Phys. Lett.* 68 (9), 26 February 1996.

[14] : P. Hacke, T. Detchprohm, K. Hiramatsu, and N. Sawaki Schottky barrier on n-type GaN grown by hydride vapor hase epitaxy.

[15] : V. Rajagopal Reddy, P. Koteswara Rao, C.K. Ramesh Annealing effects on structural and electrical properties of Ru/Au on n-GaN Schottky contacts Materials Science and Engineering B 137, 2007.

# ***CHAPITRE III***

***Protocole De Mesure, Résultats et  
discussions***

## **I. Introduction**

La conductivité et la résistivité des plaques sont les principaux paramètres électriques de divers matériaux utilisés dans l'industrie électronique. Parmi les matériaux électroniques, les semi-conducteurs occupent une place prépondérante en raison de leur importance dans la fabrication de systèmes électroniques intégrés [1], la résistivité est généralement utilisée pour caractériser les propriétés électriques des couches minces.

Nous présentons dans ce chapitre les techniques de caractérisation pour étudier ces matériaux, notamment les mesures courant-tension et la technique Van der Pauw/ Effet Hall (que nous avons détaillée dans le chapitre II).

## **II. Protocole de Mesure de la Résistivité, Mobilité et Concentration des Porteurs**

La concentration des électrons et leur mobilité sont directement liées à la résistivité de la couche, mesurée par le technique van der Pauw, dans le nitrure de gallium, ces paramètres ont été étudiés par plusieurs équipes [2] et [3], Il ressort que ces paramètres varient en fonction de l'épaisseur de la couche, l'échantillon étudiée est une couche de GaN dopée silicium sur substrat saphir (Template) fournis par l'équipe nitrure du LMOPS (laboratoire matériaux optique photonique et système).

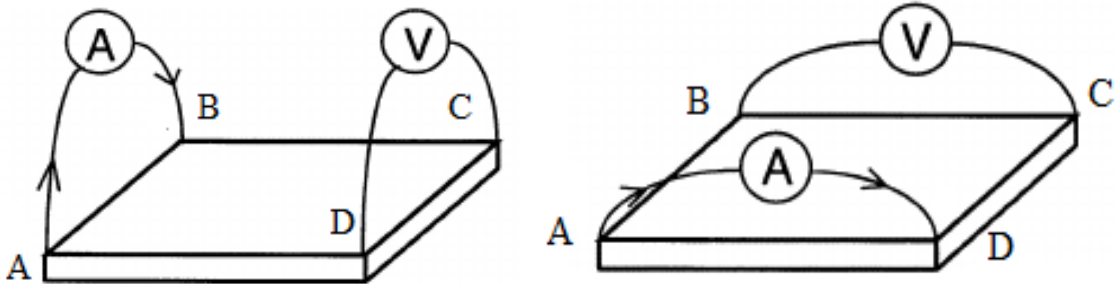
### **II.1. Les Techniques de Mesure**

#### **II.1.1. La Technique de Van der Pauw**

La méthode des quatre pointes est très sensible à la géométrie de l'échantillon, à l'espacement entre les points de mesure. Dans certains cas (notamment pour des géométries arbitraires), nous utilisons la technique Van der Pauw [4], qui permet de mesurer la résistivité  $\rho$  d'un échantillon plat, de forme quelconque.

On dispose d'un échantillon de forme quelconque, possédant quatre contacts A, B, C, D, de sorte que l'on soit proche des trois conditions de Van der Pauw. On injecte le courant

entre les contacts A et B et on mesure la tension entre D et C (côté opposé), Ensuite on injecte le courant entre B et C et la tension est mesurée entre A et D, comme illustré sur la (figure III-1). Le rapport entre la tension mesurée et le courant injecté, nous donne les résistances  $R_A$  et  $R_B$  [1].



**Fig.III-1** La configuration du courant et la mesure de la tension avec la configuration Van der Pauw de la résistivité.

En théorie on peut mesurer juste une seul fois la résistance mais pour minimiser les erreurs le fait que l'échantillon ne peut pas être carrée parfaitement, on fait huit mesures:

Les huit mesures à effectuer sont les suivantes

$$R_{BA,CD} = V_{CD} / I_{BA}$$

$$R_{AB,DC} = V_{DC} / I_{AB}$$

$$R_{CB,DA} = V_{DA} / I_{CB}$$

$$R_{BC,AD} = V_{AD} / I_{BC}$$

$$R_{DC,AB} = V_{AB} / I_{DC}$$

$$R_{CD,BA} = V_{BA} / I_{CD}$$

$$R_{AD,BC} = V_{BC} / I_{AD}$$

$$R_{DA,CB} = V_{CB} / I_{DA}$$

Pour le calcul

$$R_A = (R_{BA,CD} + R_{AB,DC} + R_{DC,AB} + R_{CD,BA}) / 4 \quad (23)$$

$$R_B = (R_{CB,DA} + R_{BC,AD} + R_{AD,BC} + R_{DA,CB}) / 4 \quad (24)$$

Pour effectuer les mesures Van der Pauw, le protocole expérimental, qui a été détaillé précédemment et qui est conforme au standard du NIST (National Institute of Standards and Technology), est résumé dans la (figure III-2) ci-dessous:

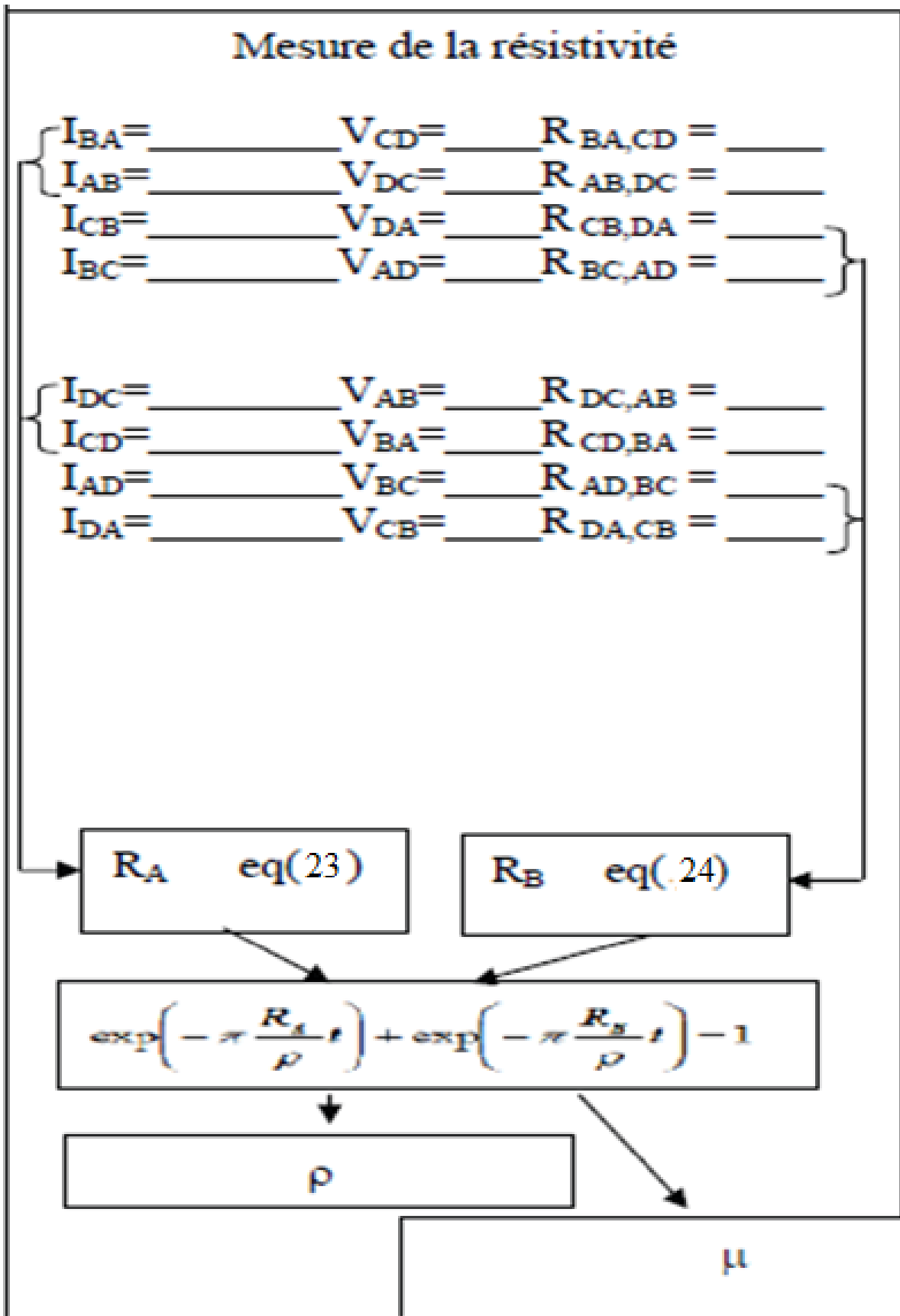


Fig.III-2 Protocole expérimental de mesure Van der Pauw.

### II.1.2. La Technique de Mesure de la Mobilité et Concentration des Porteurs Effet Hall

On vient de voir dans le chapitre précédent qu'en théorie c'est une seule mesure à effectuer pour déterminer la tension Hall ( $V_H$ ), c'est-à-dire appliquer un courant entre deux contacts opposés sur la diagonale et mesurer la tension sur l'autre diagonale avec l'application d'un champ magnétique, mais en pratique on effectue huit mesures, en modifiant la configuration et en inversant le sens du champ magnétique et le courant injecté, ceci afin de s'affranchir des tensions parasites et de minimiser les erreurs expérimentales. Ceci est d'autant plus indispensable que la tension Hall est souvent relativement faible [1].

- **Les Mesures Hall**

Les mesures en pratique sont:

- ✓ Avec champ magnétique +B

$$\begin{array}{ll} V_{BDP} \text{ avec } I_{AC} & V_{DBP} \text{ avec } I_{CA} \\ V_{ACP} \text{ avec } I_{DB} & V_{CAP} \text{ avec } I_{BD} \end{array}$$

Ou P pour dire que le champ est positive.

- ✓ Avec champ magnétique -B

$$\begin{array}{ll} V_{BDN} \text{ avec } I_{AC} & V_{DBN} \text{ avec } I_{CA} \\ V_{ACN} \text{ avec } I_{DB} & V_{CAN} \text{ avec } I_{BD} \end{array}$$

Ou N pour dire que le champ est négative.

$$V_H = (V_{BDP} - V_{BDN} + V_{DBP} - V_{DBN} + V_{ACP} - V_{ACN} + V_{CAP} - V_{CAN}) / 8. \quad (3)$$

Avec la concentration en surface  $N_S$  est calculée par l'équation (20 du chapitre II).

Et la concentration des porteurs en volume  $N_B$  est donnée par l'équation (21 du chapitre II).

Et la mobilité est donnée par la formule (22 du chapitre II).

Pour effectuer les mesures Hall, le protocole expérimental, est résumé dans la (figure III-3) ci-dessous:

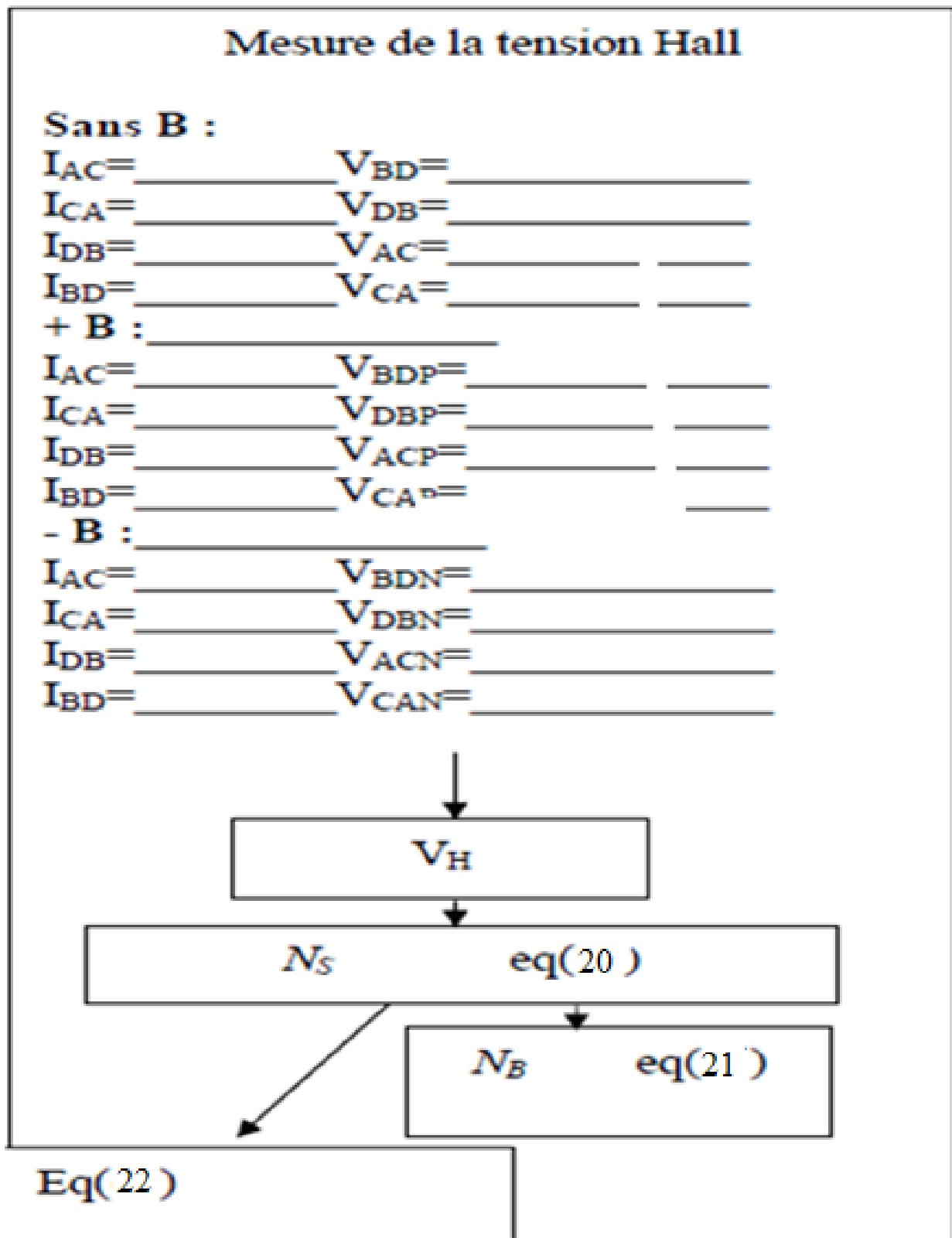


Fig.III-3 Protocole expérimental de mesure Hall.



## II.2 Instrumentation

- L'unité de mesure de la source (SMU pour Source Measure Unit) Keithley modèle 236 (figure III-4), est un instrument entièrement programmable capable de fournir et de mesurer simultanément la tension ou le courant. Sa sensibilité et sa large gamme dynamique permet une caractérisation précise des propriétés telles que la résistance d'isolement, le courant de fuite et les facteurs de dissipation dans des applications allant de l'essai général aux semi-conducteurs aux tests de matériaux. L'intégration sélectionnable et le filtrage de plusieurs mesures et une sensibilité de courant de (10fA à 100mA) fournissent des performances égales à celles d'un électromètre pour des applications exigeantes [5].



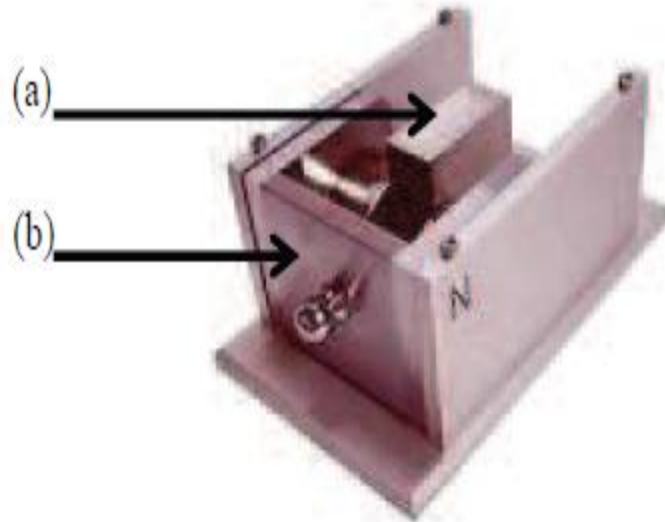
Fig.III-4 Keithley 236

- Un double SMU Keithley 2602 (figure III-5) permettant de couvrir la gamme de courant 10nA-100mA (en source et en mesure de courant), la gamme de tension 10PV-40V (en source et en mesure de tension), avec deux unités indépendantes [1].



Fig.III-5 Keithley 2602.

- Un banc à effet Hall avec un aimant permanent de 0.55T (figure III-6-(a)), un support pour l'aimant et l'échantillon, et un petit réservoir pour l'azote permettant de faire les mesures à 77K (figure III-6-(b)). Ce banc est relié à une double SMU permettant de réguler le courant et de faire les mesures de tension [1].



**Fig.III-6** Banc Hall: (a) réservoir d'azote, (b) aimant.

La détermination de la résistivité, mobilité et la concentration des porteurs ont été réalisées au LMOPS (laboratoire matériaux optique photonique et système) avec le keithley 2602.

Ce protocole expérimental a été implémenté grâce aux logiciels d'acquisition et de traitement développé par S. Ould Saad Hamady (figure III-7) [1]. Les mesures effectuées sont réalisées à l'aide d'un Keithley 2602 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 III-7), ainsi que les courbes de leur variation avec le courant injecté.

On peut même choisir la méthode de la résolution de l'équation non linéaire de Van der Pauw (Brent, Newton, ...).

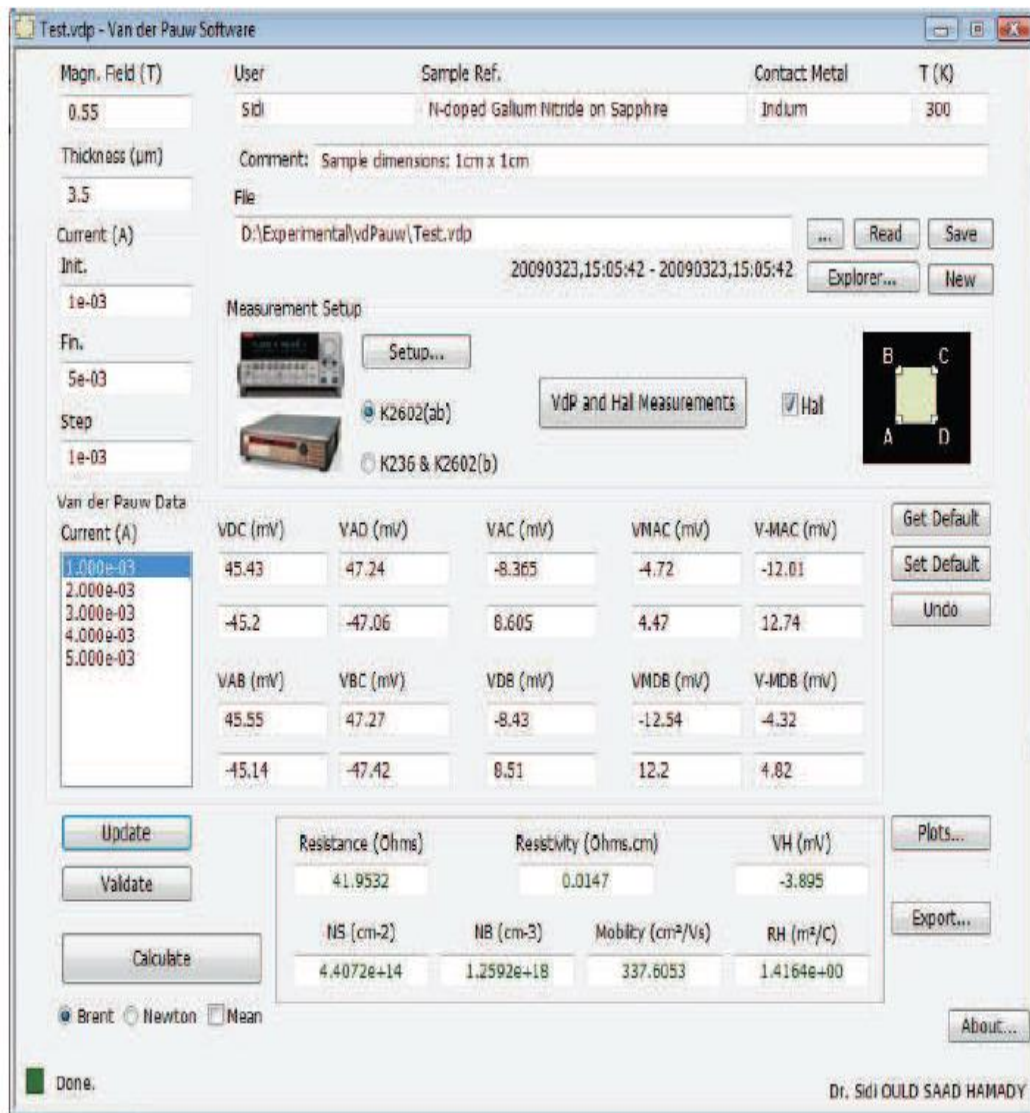
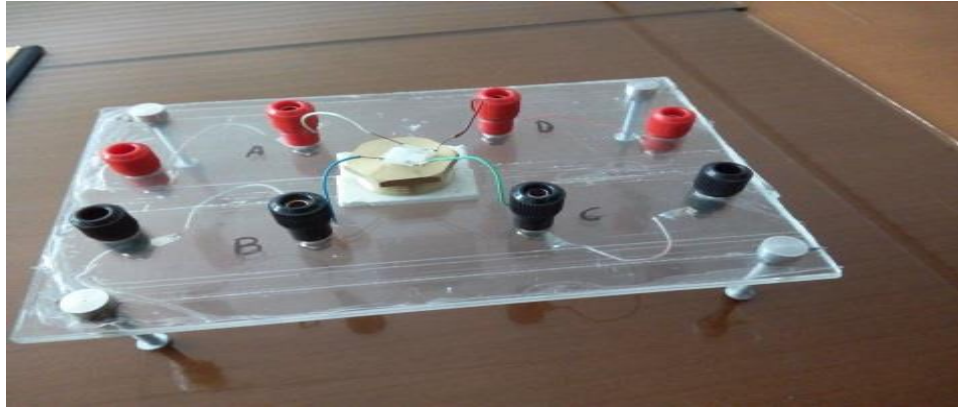


Fig.III-7 Le logiciel de mesure Van der Pauw / Effet Hall.

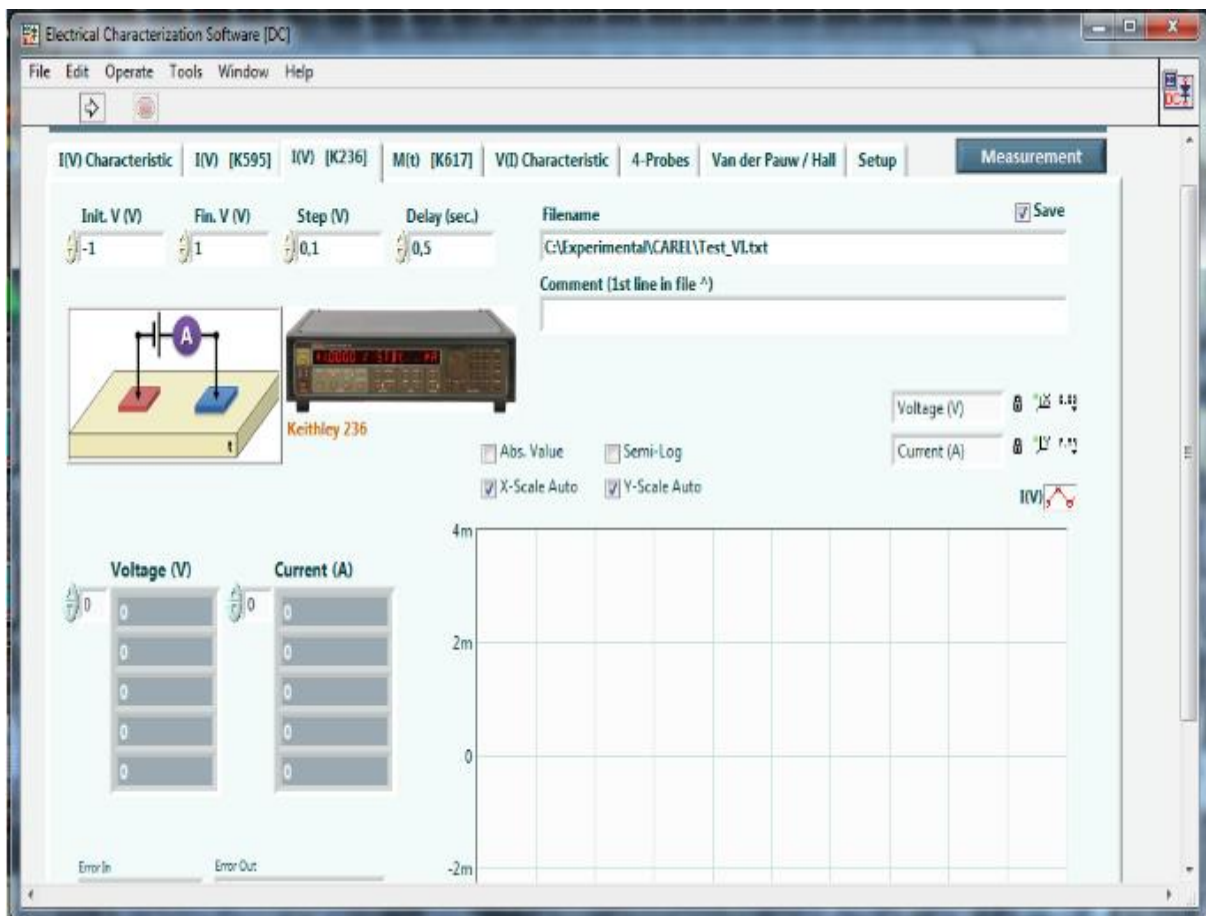
### III. Exemple de mesure

On a eu recours à faire des mesure, manuellement sur la caractéristique I(V) (courant tension), on a fait les mesure I(V) sur des contacts d'Indium réalisés sur un échantillon de (nitrure de gallium dopé Silicium) fournit par le laboratoire (LMOPS) après un traitement de surface à l'acétone et éthanol dans un bain à ultrasons (détaillé dans le chapitre II) et on a confectionné un support (figure III-8) pour les mesures I(V).



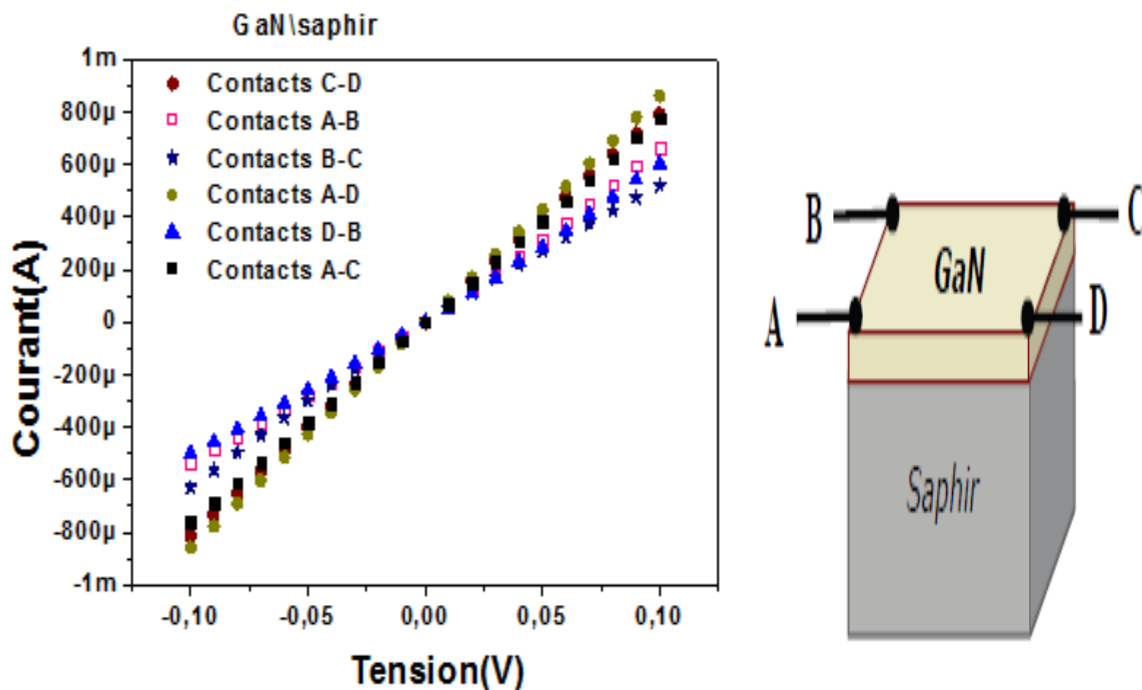
**Fig.III-8** support pour les mesures I(V).

Nous avons essayé d'automatiser le keithley 236 au sein de l'URMER en utilisant le logiciel présenté dans la figure III-9 mais malheureusement on a eu un problème de configuration avec la carte PCI 488 (reliée avec un câble IEEE avec le keithley 236), puisque elle est ancienne, une commande sera lancée au sein de laboratoire pour acquérir une nouvelle carte.



**Fig.III-9** Logiciel de caractérisation électrique.

Pour illustrer cette technique de caractérisation, nous présentons les mesures réalisées sur une couche de nitrure de gallium dopée silicium épitaxiée sur un substrat de saphir. Dans un premier temps, nous avons réalisé des contacts ohmiques sur l'échantillon de forme carrée, après un traitement chimique de la surface du nitrure de gallium. Cette étape est cruciale puisque la technique Van der Pauw ne peut s'appliquer que si l'ohmicité des contacts est excellente. Pour vérifier cette ohmicité, les quatre caractéristiques tension-courant entre les contacts sont relevées dans la configuration Van der Pauw. Les mesures courant en fonction de la tension  $I(V)$  réalisés à l'URMER manuellement avec le keithley 236 (figure III-10), ces six relevés mettant en évidence l'excellente ohmicité des contacts. On constate que les contacts sont bien ohmiques et la caractéristique est droite en considérant tous les contacts.



**Fig.III-10** Les caractéristiques Courant-Tension  $I(V)$  sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

Concernant les mesures Van der Pauw/Hall, elles ont été faites par le keithley 2602 du Banc à effet Hall au sein de laboratoire (LMOPS).

La figure III-11 représente la caractéristique tension en fonction du courant pour les mesures Van der Pauw réalisées avec le keithley 2602 au sein de LMOPS et on remarque aussi bonne ohmicité des contacts.

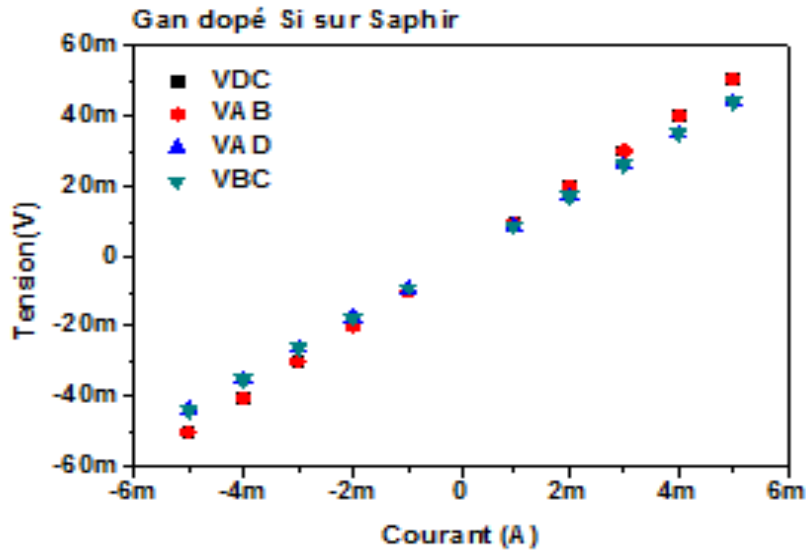


Fig.III-11 Les caractéristiques Tension –Courant  $V(I)$  sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

La figure III-12 montre une mesure Hall avec champ magnétique positif et négatif. Pour un courant positif, les tensions mesurées sont positives quel que soit le signe du champ magnétique [1].

On constate que les contacts sont bien ohmiques selon la diagonale et on voit l'influence du champ magnétique par rapport à la caractéristique de base.

Il y a une déviation par rapport à la caractéristique de base par fois dans le sens positive et par fois dans le sens négative.

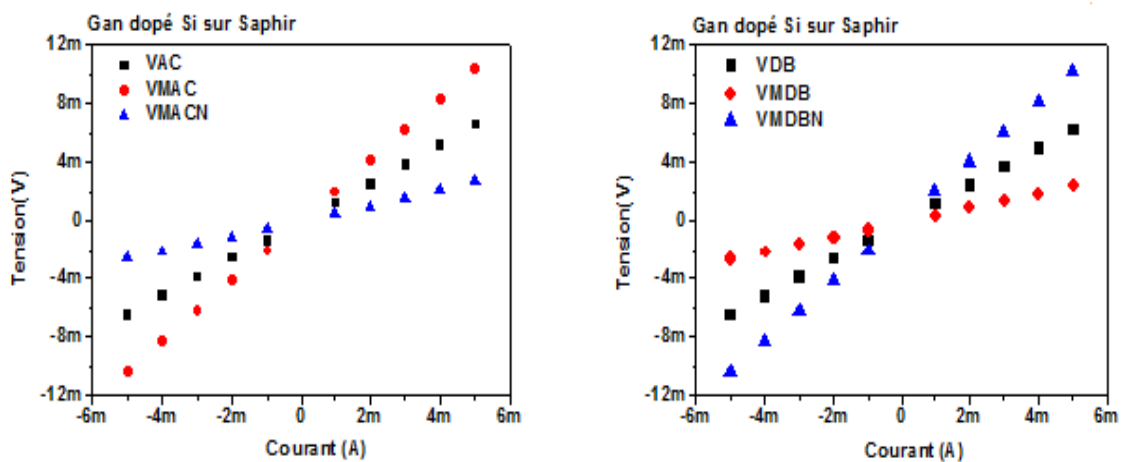
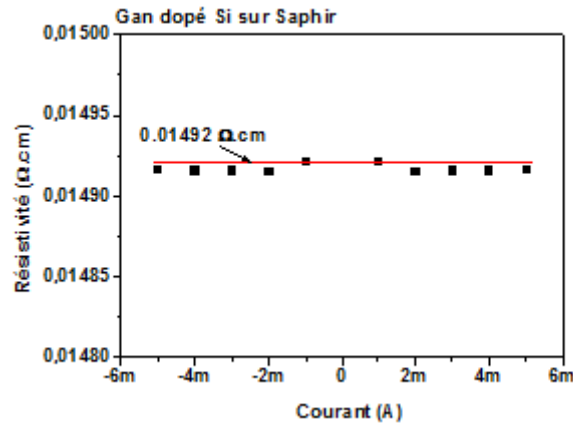


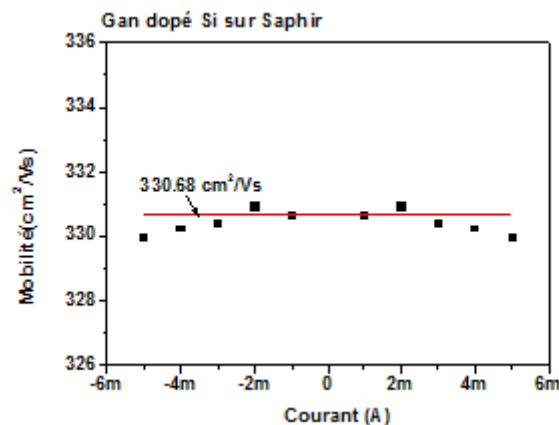
Fig.III-12 Les caractéristiques Tension –Courant  $V(I)$  représente sur la diagonale mesure Hall.

La figure III-13 représente la résistivité en fonction du courant injecté pour une couche de nitrure de gallium dopée silicium sur saphir. La mesure de la résistivité fournie par le logiciel, la résolution de l'équation de Van der Pauw permet ensuite d'avoir la valeur précise de la résistivité en fonction du courant injecté (figure III-11). Cette résistivité est constante avec le courant, comme attendu pour une couche semi conductrice homogène [1].

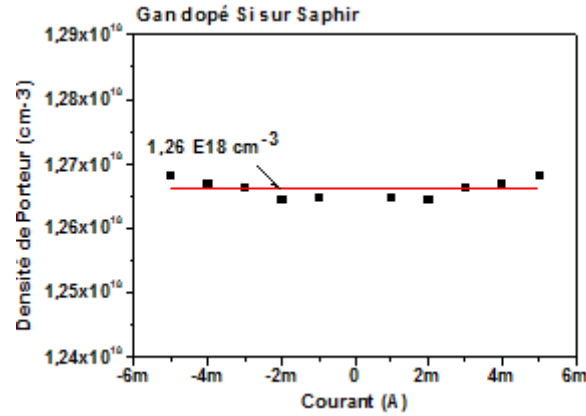


**Fig.III-13** La résistivité en fonction du courant injecté pour une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

La figure III-14 représente la mobilité en fonction du courant injecté, qui reste pratiquement constante avec le courant, comme prévue pour une couche homogène.



**Fig.III-14** La mobilité en fonction du courant injecté sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

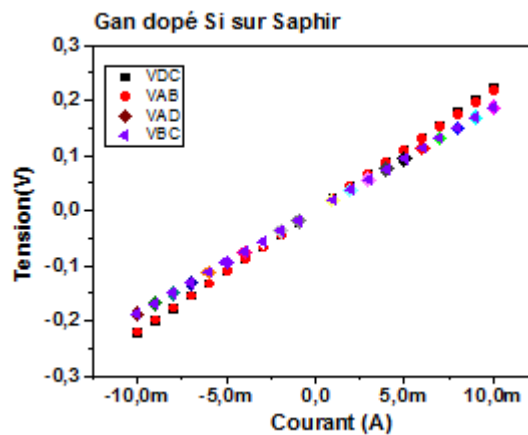


**Fig.III-15** La densité de porteur en fonction du courant injecté sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir.

Ces résultats obtenus sur un échantillon de référence GaN dopé silicium sur substrat saphir, donnent une valeur de la résistivité de 1,01492  $\Omega$ .cm, une concentration de porteurs libres (électrons) de  $1,26 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , et une mobilité de  $330,68 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Ces valeurs sont en très bon accord avec celles habituellement rapportées dans la littérature (Chen 2004 par exemple) [1], c'est-à-dire pour une couche de nitrure de gallium dopée silicium sur substrat saphir, une résistivité comprise entre  $10^{-3}$  et  $1 \Omega$ .cm, une concentration des porteurs entre  $10^{16}$  et  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  ainsi qu'une mobilité entre 100 et  $500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

Des mesures à la température d'azote ont été aussi réalisées au LMOPS.

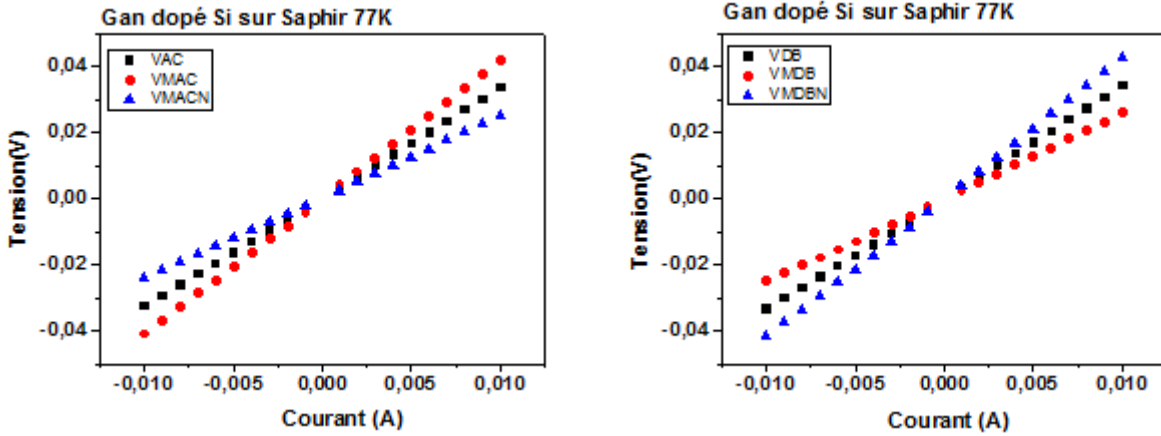
La figure III-16 représente des mesures tension en fonction du courant à la température d'azote ont été réalisé à 77 K, en remarque une bonne ohmicité des contacts dans toutes les configurations.



**Fig.III-17** Les caractéristiques Tension-Courant  $V(I)$  sur une couche de GaN dopée Si sur saphir.

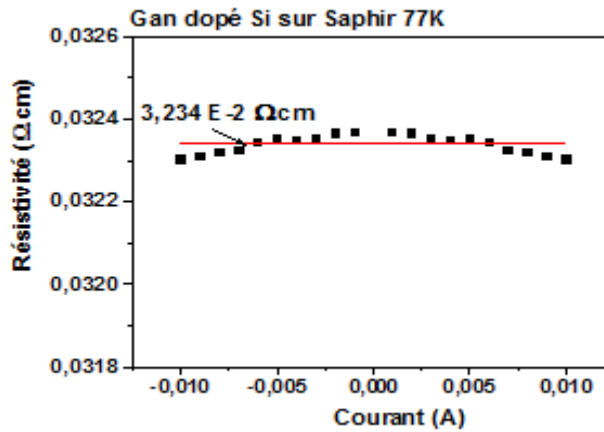


La figure III-18 montre des mesures Hall avec le champ magnétique positif et négatif, il y a une déviation par rapport à la caractéristique de base. On remarque la bonne ohmicité des contacts.



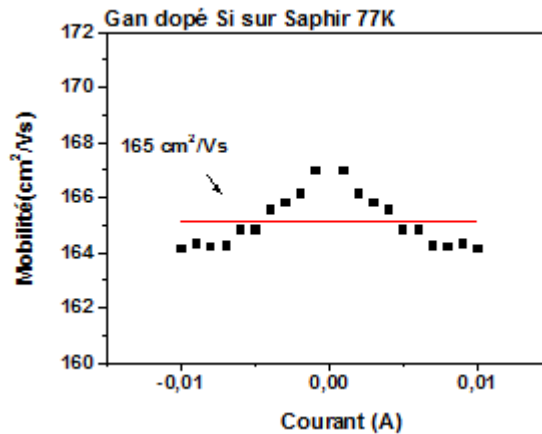
**Fig.III-18** Les caractéristique Tension-courant  $V(I)$  mesure Hall à la température d'azote.

La figure III-19 représente la résistivité en fonction du courant injecté.



**Fig.III-19** La résistivité en fonction du courant injecté pour une couche de GaN dopée silicium sur saphir à la température d'azote.

La figure III-20 représente la mobilité en fonction du courant injecté.



**Fig.III-20** La mobilité en fonction du courant injecté sur une couche de GaN dopée silicium sur saphir à la température d'azote.

On remarque que la résistivité et la mobilité restent pratiquement constantes avec le courant, comme prévue pour une couche homogène.

Notons que les valeurs de la résistivité mesurée par la méthode des quatre pointes sont quasiment les mêmes que celles mesurées par la méthode de Van der Pauw.

Le tableau III-1 résume les paramètres de transport pour ces couches de GaN de référence :

Température (K)	Résistivité ( $\Omega\text{cm}$ )	Mobilité ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	Concentration des porteurs ( $\text{cm}^{-3}$ )
77	$3,234 \cdot 10^{-2}$	165	$1,19 \cdot 10^{18}$
300	$1,492 \cdot 10^{-2}$	330,68	$1,26 \cdot 10^{18}$

**Tab.III-1** Paramètres de transport de GaN dopé Si mesurés par la méthode Van der Pauw /Hall.

On note que, la concentration des porteurs libres dans ces couches de nitrure de gallium est pratiquement constante avec la température dans la gamme de températures considérée. Ceci est principalement dû au fait que le silicium est un dopant très peu profond dans le nitrure de gallium, et quasiment tous les dopants sont ionisés dans cette gamme de températures. La variation de la résistivité est par conséquent uniquement liée à celle de la mobilité.

#### **IV. Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les mesures expérimentale notamment, la résistivité la mobilité et la concentration de porteur d'une couche semi conductrice de GaN dopé Si sur substrat saphir, par la technique Van der Pauw / Hall, la caractéristique courant tension.

On a confectionné un support pour l'échantillon on voulait automatiser la machine mais malheureusement on a un problème de la carte PCI, ce travail va être validé par la commande d'une carte PCI et d'un keithley 2602 pour sein de laboratoire.

## Bibliographie : Chapitre III

[1]: Baghdadli.Tewfik.SMZ0919.pdf .Thèse Etude des propriétés structurales et électroniques de nouveaux matériaux à base d'alliages III-N pour l'optoélectronique Soutenue publiquement le 10 juillet 2009.

[2] : D.C. Look and R.J. Molnar

Degenerate layer at GaN/sapphire interface : influence on Hall effect measurements  
Appl.Phys. Lett. Vol 70, n° 25 p. 3377-3379, 1997.

[3] : W. Götz,L.T. Romano, J. Wilker, N.M. Johnson and R.J. Molnar

Hall- effect analysis of GaN films growth by hybride vapor phase epitaxy Appl. Phy.Lett.,  
Vol.72, n° 10, p. 1214 1216, 1998.

[4] : L.J. Van der Pauw

A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape*Phil. Res. Rep.* 13, 1–9, Feb. 1958.

[5] : Keithley 236 Precision Source-Measure Unit, Low-Level-Sources.

## Conclusion général

Afin de répondre à des besoins de plus en plus restrictifs pour les futures applications, il est nécessaire d'avoir des bandes de fréquences de plus en plus importantes associées à des niveaux de puissance, rendement et linéarité conséquents.

La caractérisation et l'étude électrique et optique des semi-conducteurs nitrures à large bande interdite en couches minces ont été effectuées. Les mesures électriques ont été réalisées par les techniques suivantes: la technique de Van der Pauw et effet Hall et par la sonde des 4 pointes. La résistivité et les procédés de réalisation des contacts sont des facteurs très importants à la fois pour la caractérisation électrique. Dans ce but, des contacts ohmiques sur les matériaux nitrures ont été réalisés en utilisant de l'Indium.

Notre travail consistait à la détermination de la résistivité d'une couche semi conductrice de nitrure de gallium par la technique Van der Pauw. Il s'agit d'un thème de recherche amont qui permet la convergence de différents thèmes très attirants actuellement dans le milieu des semi-conducteurs à large bande. En fait, le matériau GaN possède de grande mobilité électronique, ce qui permet de faire diminuer les temps de transit dans le composant et donc augmenter sa fréquence qui est le principal intérêt de leur utilisation.

Pour mener à bien notre mémoire, nous avons d'abord présenté les matériaux nitrure de gallium, Dans une première étape nous avons présenté un bref historique du développement des nitrures III, Nous y avons ensuite répertorié les principales propriétés connues du nitrure de gallium (Structure cristalline, propriétés électroniques et diélectriques)

Dans une seconde partie on a traité les techniques de caractérisation électrique (Van der Pauw, la méthode des Quatre pointes).

Enfin, nous avons présenté les mesures expérimentales de la résistivité la mobilité et la concentration des porteur d'une couche semi-conductrice de nitrure de gallium dopé silicium sur substrat saphir à la température ambiante et à la température d'azote. La caractérisation électrique montre la bonne ohmicité des contacts.

Ce travail va être validé par la commande d'une carte PCI et d'un Keithley 2602 pour sein de laboratoire.

## ***Résumé***

Notre travail portait sur la réalisation de contacts ohmiques à base d'Indium sur du nitrure de gallium dopé au silicium sur saphir, le Keithley 236 a été utilisé pour les mesures du courant en fonction de la tension. Une étude sur la détermination des paramètres de transport d'une couche semi-conductrice de nitrure de gallium dopé au silicium sur saphir a été réalisée. Nous avons traité les techniques de caractérisation électrique (Van der Pauw, la méthode des Quatre pointes) par les mesures expérimentales de la résistivité, la mobilité et la concentration des porteurs de cette couche semi-conductrice.

**Mots Clés :** Résistivité, GaN , Van der Pauw.

## ***Abstract***

Our work focused on the realization of ohmic contacts based on Indium on silicon-doped gallium nitride on sapphire, the Keithley 236 was used for current measurements as a function of voltage. A study on the determination of the transport parameters of a semiconductor layer of silicon-doped gallium nitride on sapphire was realized. The techniques of electrical characterization (Van der Pauw, the Four-point method) by experimental measurements of the resistivity, the mobility and the concentration of the carriers of this semiconductor layer have been achieved.

**Key words:** Resistivity, GaN, Van der Pauw.

## ***ملخص***

ركز عملنا على تحقيق الاتصالات الأومية القائمة على الإنديوم على نيتريد الغاليوم المشبع بالسيليكون على الياقوت ، وقد استخدم كيثلي 236 للقياسات الحالية كدالة للجهد. أجريت دراسة حول تحديد معالم النقل لطبقة أشباه الموصلات من نيتريد الغاليوم المشبع بالسيليكون على الياقوت. لقد تعاملنا مع تقنيات التوصيف الكهربائي (فان دير باو ، طريقة الأربع نقاط) من خلال القياسات التجريبية للمقاومة ، والحركة وتركيز الحاملات لهذه الطبقة شبه الموصلة.

**الكلمات المفتاحية:** المقاومة ، نيتريد الغاليوم ، فان دير باو