

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



**THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3<sup>ème</sup> Cycle**

**En** : Electronique

**Spécialité** : Electronique : Matériaux et dispositifs

**Par** : *BENYETTOU Aicha*

**Sujet**

*Simulation et contribution à l'amélioration de photodétecteurs UV à base d'alliages  
innovants B(Ga,Al)N.*

Soutenue publiquement, le 12 / 02 / 2026 , devant le jury composé de :

M KERAI Salim	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M BENADDA Belkacem	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
M LACHACHI Djamel	MCA	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de thèse
M KHOUANI Mohammed	MCA	Univ. AinTémouchent	Examineur 1
...	...	...	...
M DJENNAT Abderrahmane Zakaria	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur n
M HAMDOUNE Abdelkader	Professeure	Univ. Tlemcen	Invité 1
...	...	...	...





## Remerciement

*Nous sommes reconnaissants envers ALLAH, l'Omnipotent et Tout-Puissant, pour le courage, la détermination et la persévérance qui nous ont permis d'accomplir mon travail. Je tiens avant tout à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, professeur BENADDA Belkacem, et à mon codirecteur de thèse monsieur LAOUACHA Djamel maitres de conférences classe A à l'université Abou-Bekr-Belkaid Tlemcen, pour leur accompagnement constant, leur patience, ses conseils avisés et la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long de ce travail. Ses remarques pertinentes et leur disponibilité ont grandement contribué à l'aboutissement de cette recherche. Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur KERAI Salim professeur à l'université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury. J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur KHOUANI Mohammed, maître de conférences classe A à Ain Temouchent, d'avoir accepté d'examiner mon travail. Mes respectueuses reconnaissances s'adressent également à Monsieur DJENATI Abderrahmane Zakaria, maitres de conférences classe A à l'université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner mon travail. Je souhaite exprimer toute ma gratitude à ma famille et à mes ami(e)s, pour leur soutien indéfectible, leur encouragement et leur compréhension durant les moments difficiles. Sans leur présence bienveillante, ce travail n'aurait pas été possible.*





*Dédicaces*

Je dédie ce travail à mes parents, dont la mémoire m'a donné le courage et la détermination nécessaires pour réussir ce projet. À mes chers frères Hicham, Oussama et Mohamed OUHIBI.

Mes chères sœurs Souad et Fatima et Salima, à mes nièces et mes neveux : Imane, Anfel, Bouchera, Remasse, Malak, Djihane, Amina Ouhibi, Inese, Nihal, Lili, Dania, Rehave Ahmmed, Achraf, Akram, Firasse, Nizar. À mes amies, pour leur présence et leurs encouragements, Fadia et Fadela et Malika. À ceux qui m'ont porté quand mes forces fléchissaient,

à ceux qui ont cru en mes possibles, Ahmed SLAMI, TABET HELAL Fadia et à ceux qui m'ont rappelé que la connaissance est un chemin qui se parcourt ensemble.

2025

## **Résumé :**

Nous avons pu obtenir des performances élevées pour le photodétecteur MSM AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub> avec une mobilité électronique élevée, grâce à DevEDIT et Atlas sous SILVCAO-TCAD, notre dispositif a démontré une sensibilité de 286 ( $I_{\text{illumination}}/I_{\text{dark}}$ ) à Vanode 20 V avec un courant d'illumination de 26 mA, un photocourant de  $1,56 \times 10^{-7}$  A à une onde de longueur de 0,350  $\mu\text{m}$  et une valeur d'efficacité appropriée de 87 % sans BGa<sub>N</sub>. Nous avons également étudié l'influence de la couche de barrière arrière au bore B<sub>0,03</sub>Ga<sub>0,97</sub>N. Nous avons ainsi obtenu une sensibilité de 293,4 à Vanode 20 V avec un courant d'éclairage de 27 mA, un photocourant de  $1,85 \times 10^{-7}$  A à une longueur d'onde de 0,350  $\mu\text{m}$  et une valeur d'efficacité appropriée de 90 %. L'optimisation des performances du photodétecteur MSM est réalisée en variant divers paramètres, montrant divers comportements novateurs de transport. Notamment, la variabilité des hauteurs de barrière des contacts métal-semiconducteur permet une large gamme d'injections de porteurs minoritaires, tandis que le dopage et l'épaisseur du semi-conducteur influent sur la tension critique d'augmentation de ces injections. Des matériaux tels que le nitrure de gallium, le nitrure d'aluminium et de gallium et le nitrure de bore et de gallium sont utilisés pour fabriquer des photodétecteurs MSM optimaux fonctionnant dans les régions ultraviolet, offrant des performances.

**Mots clés :** photodétecteur UV, nitrure de gallium (Ga<sub>N</sub>), nitrure d'aluminium et de gallium (AlGa<sub>N</sub>), nitrure de bore et de gallium (BGa<sub>N</sub>), photodétecteur MSM.

## **Abstract:**

We were able to get high performance for the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub> MSM photo-detector with a large electronic mobility thanks to DevEDIT and Atlas under SILVCAO-TCAD. Our device demonstrated a sensitivity of 286 ( $I_{\text{illumination}}/I_{\text{dark}}$ ) at Vanode 20 V with an illumination current of 26 mA, a photocurrent of  $1.56 \times 10^{-7}$  A at a wavelength of 0.350  $\mu\text{m}$  and a suitable 87%

efficiency value in the absence of B GaN. Additionally, we investigated the impact of the back barrier layer at boron B0.03Ga0.97N. With an illumination current of 27 mA, a photocurrent of  $1.85 \times 10^{-7}$  A at a wavelength of 0.350  $\mu\text{m}$ , and a suitable efficiency value of 90%, we were able to achieve a sensitivity of 293.4 at Vanode 20 V. The MSM photodetector's performance

is optimized by varying various parameters, demonstrating various innovative transport behaviors. In particular, a variety of minority carrier injections are possible due to the metal-semiconductor contacts' variable barrier heights. While the doping and thickness of the semiconductor influence the critical voltage for increasing these injections. Materials such as gallium nitride, aluminum gallium nitride, and boron gallium nitride are used to fabricate optimal MSM photodetectors operating in the ultraviolet regions, offering high performance.

**Key words:** UV photodetector , Gallium nitride (GaN), Aluminum gallium nitride (AlGaN) , Boron gallium nitride (B GaN), MSM photodetector.

## ملخص:

تمكنا من الحصول على أداء عالٍ لمستشعر الضوء MSM AlGaN/GaN/BGaN مع حركية إلكترونية عالية، بفضل Atlas و DevEDIT تحت SILVCAO-TCAD، أظهر جهازنا حساسية قدرها 286 ( $I_{\text{illumination}}/I_{\text{dark}}$ ) عند Vanode 20 V مع تيار إضاءة قدره 26 mA، وتيار ضوئي قدره  $1.56 \times 10^{-7}$  A عند طول موجة 0,350  $\mu\text{m}$  وقيمة كفاءة مناسبة قدرها 87 % بدون B GaN. كما درسنا تأثير طبقة الحاجز الخلفي للبورون B0,03Ga0,97N. وبذلك حصلنا على حساسية تبلغ 293,4 في فانود 20 فولت مع تيار إضاءة يبلغ 27 مللي أمبير، وتيار ضوئي يبلغ 1,85 إي-7 أمبير عند طول موجة يبلغ 0,350 ميكرومتر، وقيمة كفاءة مناسبة تبلغ 90%. يتم تحسين أداء كاشف الضوء MSM من خلال تغيير مختلف المعلمات، مما يظهر سلوكيات نقل مبتكرة متنوعة. على وجه الخصوص، تسمح تقلبات ارتفاعات الحاجز للاتصالات المعدنية-شبه الموصلية بنطاق واسع من حقن الحاملات الثانوية، في حين أن التلوث وسمك شبه الموصلية يؤثران على الجهد الحرج لزيادة هذه الحقن. تُستخدم مواد مثل نيتريد الغاليوم ونيتريد الألومنيوم والغاليوم ونيتريد البورون والغاليوم لتصنيع مستشعرات ضوئية MSM مثالية تعمل في المناطق فوق البنفسجية، وتوفر أداءً عاليًا.

**الكلمات المفتاحية:** كاشف الأشعة فوق البنفسجية، نتريد الغاليوم (GaN)، نتريد الغاليوم (AlGaN)، نتريد الغاليوم البورون (B GaN)، كاشف الضوء MSM.



# **Sommaire**

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Propriétés des matériaux nitrurés III	
I.1.Introduction.....	6
I.2. Caractéristiques des nitrures.....	6
I.2.1. Les étapes de la cristallisation .....	6
I.2.2. Polarité.....	8
I.2.3. Caractéristiques mécaniques .....	9
I.2.3. 1.Coefficients élastiques.....	10
I.2.4. Propriétés optiques.....	11
I.2.5. Bande interdite.....	12
I.2.6. Impact de la contrainte et de la température sur le gap.....	13
I.2.7. Déformations structurelles. ....	13
I.2.7.1. Présentation des imperfections structurales dans un cristal. ....	14
I.2.8. Alliages d'aluminium et nitrure de gallium (AlGaN) .....	14
I.2.9. Efficacité à grande échelle des transporteurs .....	15
I.2.10. Substrats.....	16
I.3. Photodétecteurs ultraviolets.....	17
I.3.1. Matériaux pour la détection des UV .....	17
I.3.1 .1. Photodétecteurs MSM fabriqués à partir de silicium. ....	18
I.3.1 .2. Photodétecteurs MSM fabriqués à partir de SiC. ....	18
I.3.1 .3. Photodétecteurs MSM à base des matériaux III-V.....	18
I.4.Conclusion.....	19
Chapitre II : Photo -détecteurs ultraviolets	

# **Sommaire**

II.1. Introduction.....	20
II.2. Systèmes de détection .....	20
II.2.1. Unités de mesure pour ces dispositifs. ....	21
II.3. Ultraviolets photodétecteurs .....	22
II.3.1. Photoconducteurs.....	24
II.3.2. Schottky photodiodes .....	25
II.3.3. Photodiodes de type métal-semiconducteur-métal (MSM).....	26
II.3.4. Diodes photop-i-n .....	28
II.4. Contacts en métal .....	28
II.4.1. Ohmiques contacts.....	28
II.4.2. Schottky contacts.....	29
II.5. Dopage.....	31
II.5.1. Problématique .....	31
II.5.2. Dopage de catégorie n .....	32
II.5.3. Dopage de catégorie type p.....	32
II.6. Transports de phénomènes dans les semi-conducteurs .....	34
II.6.1. Incorporation de charges .....	35
II.6.2. Niveaux quasi-Fermi Injection de charges.....	35
II.7. Recombinaison et production.....	36
II.7.1. Modèle SRH (Shockley-Read-Hall).....	36
II.8. Conclusion.....	38
Chapitre III : Méthodes de Croissance	
III.1. Introduction.....	39

# Sommaire

III.2. Croissance épitaxiale : concepts et méthodes.....	39
III.2.1. Expansion sur du saphir.....	40
III.2.2. Expansion sur AlN.....	40
III.2.3. Expansion sur Si.....	41
III.2.4. Expansion sur SiC.....	41
III.2.5 Expansion sur ZnO.....	43
III.2.6. Expansion sur verre.....	44
III.3. Méthodes d'expansion.....	45
III.3.1. Oxygénation en phase vapeur organique (EPVOM).....	45
III.3.2. Synthèse par jets de molécules (EJM).....	47
III.4.Nitride d'aluminium de gallium AlGaN.....	48
III.4.1. Introduction.....	48
III.4.2. Caractéristiques du ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	49
III.4.3. Changement du gap d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la proportion de mole x (Al).....	49
III.4.4. Paramètre de courbure.....	50
III.4.5.Dopage.....	50
III.4.5.1. Dopage de catégorie n.....	50
III.4.5.2.Dopage de catégorie p.....	51
III.4.6. Vitesse de saturation dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ selon la valeur de x.....	52
III.4.7.Mobilité des électrons dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de .....	52
III.4.8.Elaboration du ternaire AlGaN.....	53
III.4.9.Principe d'élaboration.....	53
III.4.10. Incorporation d'Al dans GaN.....	54

## Sommaire

III.4.11. Intégration du Ga dans l'AlN.....	56
III.5. Méthodes de caractérisation.....	58
III.5.1. Photoluminescence.....	58
III.5.2. Capacité à réfléchir la lumière ou une autre forme d'énergie.....	59
III.5.3. Réfraction photonique (PR).....	60
III.6. Nitrure de gallium-bore $B_xGa_{1-x}N$ .....	60
III.6.1. Introduction.....	60
III.6.2. Propriétés du BGN.....	61
III.6.2.1. Changement de l'écart du $B_xGa_{1-x}N$ en fonction du rapport molaire $x$ .....	61
III.6.2.2. Propriétés électriques.....	62
III.6.2.3. Propriétés optiques.....	64
III.7. Conclusion.....	64
VI.1.	
Introduction.....	65
IV.2. Présentation du logiciel de simulation "SILVACO" .....	65
IV.2.1. Équations fondamentales des semi-conducteurs.....	66
IV.2.1.1.Équation de Poisson.....	66
IV.2.1. 2. Équation de protection des porteurs.....	67
IV.2.1.3.Équation de transport.....	67
IV.3. Présentation à l'instrument ATLAS.....	68
IV.3.1.Ordre des commandes ATLAS.....	69
IV.4. Les modèles physiques.....	71
IV.4.1. Définition des Modèles .....	71

# **Sommaire**

IV.4.1.1. Modèle de mobilité.....	72
IV.4.1.2. Modèle de fusion-recombinaison des porteurs.....	73
IV.4.1.3. Modèles analytiques des porteurs.....	73
IV.4.1.4. Modèle d'ionisation par pression.....	73
IV.4.1.5. Modèles de passage et modèles d'incorporation de porteurs.....	74
IV.5. Méthodes numériques.....	74
IV.6. Résultats de la simulation.....	75
IV.6.1. Introduction.....	75
IV.6.2. Structures examinées ainsi que leurs paramètres physiques et géométriques.....	75
IV.6.2.1. Maillage et structure simulée.....	77
IV.6.2.2. Diagramme de bandes d'énergie.....	78
IV.7. Champ électrique.....	81
IV.8. Simulation des performances et discussion des résultats.....	82
IV.8.1. Introduction.....	82
IV.8.2. Caractéristique courant-tension sous lumière et en obscurité.....	82
IV.8.3. photocourant disponible (available photocurrent).....	84
IV.8.4. Responsivité de photodétecteur UV MSM.....	85
IV.8.5. Rendement quantique du photodétecteur UV MSM.....	86
IV.8.6. Absorption et diffusion en rapport avec la lumière.....	87
IV.8.7. Capacité en rapport avec la tension de l'anode.....	88
IV.8.8 . Temps de réponse.....	89
IV.9. Conclusion.....	90
Conclusion Générale et Perspectives.....	91

# **Sommaire**

Références.

## Liste des figures

Figure I.1 : Schémas de la structure (a) wurtzite et de la structure (b) zinc-blende .....	7
Figure I.2: Structure Wurtzite du nitrure de gallium (GaN) où $a_0$ et $c_0$ sont les paramètres de réseau.....	8
Figure I.3 : Orientations cristallographiques [0001] et [0001] en fonction des polarités gallium et azote du GaN wurtzite.....	9
Figure I.4 : Structures de bandes GaN et AlN calculées par Christensen et al.....	11
Figure I.5 : Structure de bandes du GaN en phase wurtzite au voisinage de $k = 0$ .....	12
Figure I.6 : Représentation schématique de la structure de bande pour le GaN hexagonal dans le plan $k_x$ - $k_y$ autour du sommet de la bande de valence (1) : (a) sans contrainte, (b) avec une contrainte biaxiale, et (c) avec une contrainte uniaxiale dans le plan $c$ . (d) Indiquez la direction de chaque contrainte. (2) : pour le GaN cubique avec (b) : compression biaxiale et (c) : tension biaxiale.....	13
Figure I.7 : Densité d'états et masse effective dans une bande de conduction,(a) Masse effective élevée faible courbure densité d'états élevée et (b) Masse effective faible courbure élevée densité d'états faible.....	15
Figure II.1 : Les spectre électromagnétique.....	22
Figure II.2 : Conversion de flux lumineux pW en photon par seconde.....	22
La figure II.3 montre la réponse spectrale normalisée d'un photoconducteur GaN mesurée pour une gamme de valeurs de fréquence de modulation du signal optique incident. Les données expérimentales sont comparées à la réponse spectrale d'une photodiode GaN à Schottky arrière-empilé qui a été fabriquée en utilisant le même échantillon de GaN(Si).....	25
Figure II.4 : Réponse spectrale normalisée de la photodiode à la barrière de Schottky dans $Al_xGa_{1-x}N$ pour différentes valeurs de fraction molaire d'aluminium. Encart : Effet de la puissance de la lumière incidente sur la variation du photocourant à $\lambda = 325$ nm.....	26
Figure II.5 : Structure (a) photodiode MSM ; (b) photodiode réceptivité normalisée de $Al_xGa_{1-x}N$ MSM en fonction de la longueur d'onde.....	27

## Liste des figures

Figure II.6 : Structure (a) photodiode p-i-n ; (b) photodiode réceptivité p-i-nAl <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N/GaN en fonction de la longueur d'onde, à x=0.28 selon E. Munoz.....	28
Figure II.7 les phénomènes de capture et d'émission d'électrons et de trous de la bande de valence a la bande de conduction.....	36
Figure III-1 : Croissance épitaxiale.....	39
Figure III-2 : La disposition élémentaire de la maille du saphir est (a) rhomboédrique et (b) hexagonale.....	40
Figure III-3 : Diagramme de la maille élémentaire du silicium selon les directions (a) [001], (b) [011], et (c) [111].....	41
Figure III-4 : Maille élémentaire de SiC avec 4 atomes de silicium et un atome de carbone en son centre.....	42
Figure III-5 : Position des bandes et du niveau de stabilisation du niveau de Fermi dans les composés II-VI.....	43
Figure III-6 : Un verre silicaté avec une structure cristalline qui contient des cations (Na, K ou Ca).....	44
Figure III-7 :Modèle conceptuel de la croissance par épitaxie à jets moléculaires.....	47
Figure III-8:Changement du bandgap dans Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N, selon la proportion d'Al.....	50
Figure III.9 : Mobilité des électrons en fonction de la fraction molaire Al[22].....	53
Figure III-10 : Principe d'élaboration des alliages ternaires.....	54
Figure III-11:Variation des oscillations de RHEED en lien avec la température de la cellule d'Al, lorsque celle-ci est en présence de Ga sur GaN. Pour le réglage des conditions riches en N du GaN, la température de la cellule de Ga est établie à 980°C et le débit de N <sub>2</sub> s'établit à 0.5ccm. Le substrat est à une température de 700°C.....	55
Figure III-12 : Évolution du transitoire en fonction du flux d'Al lorsque la surface de GaN est exposée (a) uniquement à Al, (b) à la fois à Al et Ga sur la surface de GaN. Dans ce dernier scénario, la température de la cellule de Ga est établie à 1030°C.....	56

## Liste des figures

Figure III-13 :(a) Changement des oscillations de RHEED en fonction de la température de la cellule de Ga en présence d'Al. Le substrat est à une température de 700°C et le débit de N2 est de 0,5. (b) Taux d'expansion de l'alliage AlGa <sub>N</sub> en relation avec la température du Ga en présence d'Al, aux températures de 1020°C (carrés pleins), 1060°C (cercles pleins), 1100°C (losanges pleins) et fluctuant autour de 1100°C (losanges vides).....	57
Figure III-14 : Modèle de système de photoluminescence.....	59
Figure III-15 Mise en place expérimentale des mesures de réflectivité.....	60
Figure III-16 : Energie de gap en fonction des paramètres de maille avec représentation de composés nitrurés usuels (lignes droites) et des matériaux à base de nitrure de bore (lignes pointillées).....	62
Figure III-17 : La résistivité électrique en fonction de la concentration en bore dans l'alliage B <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N à température ambiante. Le tableau en incrustation montre la densité de porteurs et la dépendance de la mobilité avec la teneur en bore.....	63
Figure III-18: Indice de réfraction en fonction de la concentration en bore dans les alliages B <sub>Ga</sub> N et BAlN.....	64
Figure IV-1: Fichiers d'entrée et de sortie d'ATLAS.....	68
Figure IV-2 : Séquence des groupes de commandes d'ATLAS suivie de leurs instructions.....	70
Figure IV-3 : Structure schématique du photodétecteur MSM (a) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et du photodétecteur MSM (b) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /B <sub>Ga</sub> N.....	76
Figure IV-4 : Structure schématique 3d de (a) photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et (b) photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /B <sub>Ga</sub> N.....	77
Figure IV-5 : section transversale 2D de (a) photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et (b) photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /B <sub>Ga</sub> N.....	78
Figure IV-6 : Structure schématique et maillage du (a) photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et (b) photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /B <sub>Ga</sub> N.....	79
Figure IV-7 : Diagramme de bande du photodétecteur MSM (c) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et (d) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /B <sub>Ga</sub> N/MSM.....	80

## **Liste des figures**

Figure IV-8 : Champ électrique du photodétecteur MSM (e) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et (f) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /BGa <sub>N</sub> .....	81
Figure IV-9 : Caractéristiques I-V des photodétecteurs (g) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> MSM et (h) AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /BGa <sub>N</sub> /MSM dans l'obscurité.....	83
Figure IV-10 : Courants d'illumination dans le photodétecteur MSM UV avec et sans BGa <sub>N</sub> .....	83
Figure IV-11 : Réponse spectrale de photodétecteur UV MSM.....	85
Figure IV-12 : Responsivité de photodétecteur UV MSM.....	86
Figure (IV-13) : Rendement quantique du photodétecteur UV MSM.....	87
Figure IV-14 : Absorption et Transmission d'un Photodétecteur UV MSM.....	88
Figure IV-15 : Les capacités du photo détecteur (i) MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et (j) du photodétecteur MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /BGa <sub>N</sub> .....	89
Figure IV-16 : Réponse transitoire du photodétecteur (k) MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> et du photodétecteur (l)MSM AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> /BGa <sub>N</sub> .....	90

## **Liste des tableaux**

Tableau I.1 : Coefficients élastiques des III-nitrides en phase hexagonale.....	10
Tableau I.2 : Coefficients élastiques nitride de bore en phase hexagonale.....	10
Tableau I.3 : Bandes interdites des nitrides d'éléments III cristallisés dans la phase wurtzite.....	12
Tableau I.4: Quelques propriétés des substrats les plus souvent utilisés pour l'épitaxie de matériaux III-N.....	17
Tableau II.1 : Liste des métaux utilisés comme contacts ohmiques sur GaN.....	29
Tableau II.2 : métaux utilisés sur le GaN comme contact redresseur.....	31
Tableau III-1 :Vitesse de saturation en fonction de la fraction molaire d'aluminium.....	52
Tableau III-2 : Mobilitédes électrons dans Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N en fonction de la fraction molaire Al.....	52
Tableau IV-1. Les paramètres du modèle physique supposés à T = 300 K.....	77
Tableau IV-2 : Comparaison de courant dans l'obscurité et sous 'illumination des dispositif.	84

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Des recherches récentes sur des dispositifs de haute qualité utilisant des matériaux nitrures III-V ont conduit à l'élaboration de photodétecteurs haute performance dans la gamme spectrale UV. Ils ont été reconnus comme une technologie cruciale pour la production de dispositifs optiques à haute densité et à faible coût [1], et leurs utilisations importantes dans les domaines militaires et civils ont suscité un intérêt croissant. Les nitrures présentent l'avantage d'avoir une bande interdite large et directe, une stabilité chimique remarquable et de bonnes propriétés mécaniques, ce qui les rend intéressants pour l'émission de lumière bleue et UV, ainsi que pour les applications électroniques à haute température, haute puissance et haute fréquence [2]. Parmi ces nitrures, le nitrure de bore (BN) est un composé multiphase qui fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années et qui est utilisé dans un large éventail d'applications industrielles en raison de ses caractéristiques électriques et structurales remarquables. Il a également suscité un intérêt croissant pour ses applications importantes dans les domaines militaires et civils. Il est utilisé dans les systèmes d'alerte de défense, les communications UV, les sciences spatiales, la surveillance environnementale, la production industrielle, la médecine et les soins de santé [3]-[7]. Cela permet de construire des capteurs aveugles visibles et des capteurs solaires [8]. Ils ont de nombreuses applications telles que la détection chimique, la détection de flammes, la détection de trous dans la couche d'ozone, la communication à courte portée, la détection et le guidage de missiles, la surveillance de la croissance de la végétation, l'astronomie UV et la détection de gaz [9]-[11]. Les photodiodes MSM ont gagné en popularité dans la communauté scientifique ces dernières années en raison de leurs avantages fondamentaux [12]-[13] :

- Faciles à fabriquer et à intégrer ;
- Construction simple.
- Capacité minimale par rapport à la surface.

Les photodiodes métal-semi-conducteur-métal (MSM) sont composées de deux diodes Schottky disposées dos à dos au-dessus d'une zone active de collecte de lumière utilisant une conception d'électrodes interdigitées. Ce photodétecteur ne peut pas fonctionner en l'absence de polarisation. En raison de leur faible capacité par unité de surface, les photodiodes MSM sont intrinsèquement rapides et sont généralement limitées par le temps de transit plutôt que par le temps constant.

La taille et l'espacement des électrodes peuvent être obtenus avec une dimension inférieure au micron grâce à la lithographie par faisceau d'électrons, ce qui améliore considérablement la vitesse. Le principal inconvénient des photodétecteurs MSM est leur faible réactivité intrinsèque.

## *Introduction générale*

La sensibilité photographique des détecteurs métal-semi-conducteur-métal est faible, car l'oxydation des électrodes projette une ombre sur la zone active de collecte de la lumière. L'utilisation de matériaux de haute qualité tels que l'AlN, le GaN, le BN et leurs alliages AlGaN et B GaN est essentielle dans les nouvelles technologies.

La recherche fondamentale est essentielle pour comprendre les mécanismes de croissance et, par conséquent, améliorer la qualité des matériaux en contrôlant les conditions de croissance et en explorant de nouvelles voies pour mettre en pratique les capacités de croissance actuelles [14].

La structure basée sur les matériaux AlGaN/GaN présente un certain nombre de propriétés intéressantes liées aux champs électriques internes causés par les polarisations spontanées et piézoélectriques [15]. Le champ peut être utilisé pour attirer les électrons, ce qui entraîne le développement d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2D) dans la couche canal [16].

Les photodétecteurs à base d'Al<sub>x</sub>Ga(1-x)N ont le potentiel de devenir une technologie de détection importante en termes de coût, de robustesse, de stabilité, de consommation d'énergie et de bande passante [17]. Grâce à leur faible capacité et à leur résistance de shunt élevée, les photodétecteurs MSM en SiC, GaN ou saphir offrent un faible bruit, une vitesse élevée, une sensibilité élevée et une faible polarisation inverse. Ils peuvent fonctionner de manière invisible sur des surfaces visibles ou infrarouges sans interférer avec d'autres appareils.

Au début des années 2000, des chercheurs ont travaillé à l'amélioration des performances des photodétecteurs (PD) UV AlGaN en étudiant de nouvelles topologies de dispositifs et de nouvelles méthodologies de développement de matériaux [18]-[20]. L'objectif était d'atteindre un équilibre entre haute sensibilité, faible bruit, temps de réaction rapide et excellente efficacité quantique dans le domaine UV.

Pour surmonter ces problèmes, de nombreux groupes de recherche ont créé de nouvelles architectures de dispositifs, notamment des photodiodes Schottky, des photodiodes à avalanche et des photodiodes p-i-n. Ces structures ont surpassé la structure MSM en termes de sensibilité, de vitesse, de réduction du bruit et d'efficacité quantique [21].

Les avancées réalisées dans les années 2000 ont jeté les bases du développement de photodiodes UV AlGaN encore plus performantes dans les années suivantes.

Les photodétecteurs métal-semiconducteur-métal (MSM) utilisant des alliages AlGaN/GaN/BGaN ont fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années, en raison de leurs performances exceptionnelles dans la détection des ultraviolets (UV).

## **Introduction générale**

Une étude notable est celle de Pandit et al. (2023), qui ont mis au point un photodétecteur UV hautement sensible basé sur une structure HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> avec des électrodes en graphène sur une structure mesa p-Ga<sub>N</sub>. Cette conception a considérablement réduit le courant d'obscurité et amélioré la sensibilité et la détectivité du dispositif [22].

De plus, une étude de simulation menée par Kilin et al. (2025) a permis d'optimiser la conception des photodétecteurs MSM à base de Ga<sub>N</sub> et d'In<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub> pour la détection des UV. Les résultats ont montré une amélioration significative du photocourant et de la sensibilité spectrale dans la région UV, ce qui suggère que ces structures peuvent offrir des performances améliorées pour les applications de détection des UV [23].

De plus, Allam et al. (2024) ont étudié l'effet de l'ajout d'une couche de BGa<sub>N</sub> à la structure du photodétecteur. Leurs simulations ont démontré que l'augmentation de la concentration en bore dans l'alliage BGa<sub>N</sub> améliore l'absorption optique et génère un photocourant plus élevé dans la gamme UV, ce qui en fait un candidat prometteur pour les dispositifs optoélectroniques [24].

Cette recherche illustre les progrès significatifs réalisés dans le développement de photodétecteurs UV à base d'alliages AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub>, soulignant leur potentiel pour des applications nécessitant une détection UV efficace. Notre recherche présente une exploration complète des structures de photodétecteurs UV MSM AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> à grande surface sur des plaquettes de saphir, dans le but d'étudier l'élimination des défauts cristallins et la réduction de la densité de dislocations dans la structure épitaxiale du photodétecteur UV MSM.

Les principaux objectifs de ce travail sont de fabriquer des photodiodes UV MSM à l'aide de la structure sélectionnée et de caractériser leurs courants d'obscurité et photodétectables, leur réactivité, leur détectivité spécifique, et de réaliser des simulations optiques sur des hétérostructures AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> avec et sans nitrure de bore et de gallium BGa<sub>N</sub>.

Le bore possède des propriétés chimiques essentielles. Cet élément a fait l'objet de nombreuses recherches, tant sur le plan théorique [25]-[26] que pratique [27], sous diverses formes. Sa stabilité et ses caractéristiques électriques ont également été étudiées [28]. Grâce à leurs nombreuses caractéristiques intrigantes, ces nouvelles nanostructures ont un large éventail d'applications potentielles dans les domaines de l'énergie solaire, de la photoconversion, des batteries, des capteurs, de la nanoélectronique et de la profondeur afin d'identifier la forme idéale pour améliorer les performances des dispositifs. et de comparer les performances des photodiodes UV MSM AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> à motifs simulées à celles des dispositifs sans motifs.

## **Introduction générale**

Cette recherche rend compte du développement réussi d'un UV grand format avec un photodétecteur MSM AlGa<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub> grâce à la simulation SILVACO-TCAD ; nous obtenons les principales caractéristiques. Dans ce manuscrit, nous avons simulé une structure de photodétecteur métal-semiconducteur-métal (MSM) AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> sans et avec une couche mince de 3 μm de nitrure de bore et de gallium (BGa<sub>N</sub>) comme couche barrière arrière pour une concentration en bore de 3 %. Cependant, la croissance de B<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N reste un défi en raison de la grande différence de rayon atomique entre le bore et le gallium [29]. De plus, il a été démontré que dans des conditions de croissance normales, la solubilité du bore dans le Ga<sub>N</sub> est limitée [30]. L'objectif de cette étude est d'améliorer les performances de notre dispositif et d'obtenir un dispositif hautement performant sans dislocation intercouche et avec des performances encore meilleures grâce à l'introduction de la couche barrière arrière en BGa<sub>N</sub>. De plus, ce type de photodétecteur a été développé avec succès pour détecter les rayonnements UV dans la gamme de 100 nm à 450 nm et peut être utilisé dans des applications militaires et médicales. Diagnostic médical, détection environnementale, télédétection, détection de signaux optiques, imagerie thermique, caméras de vision nocturne, astronomie, suivi de missiles, suivi de cibles, etc. La structure proposée pourrait donc offrir des perspectives intéressantes pour le développement de photodétecteurs UV métal-semiconducteur-métal hautement sensibles, malgré ces avantages. De plus, la structure du nitrure de bore et de gallium (BGa<sub>N</sub>) peut être moins stable que celle du Ga<sub>N</sub> ou de l'AlGa<sub>N</sub>, en particulier à des concentrations élevées de bore. Enfin, bien que les études montrent des améliorations significatives en termes de performances, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la stabilité et la fiabilité à long terme des dispositifs utilisant le BGa<sub>N</sub> comme couche de barrière arrière.

Notre thèse comprend quatre chapitres :

- Les structures cristallines sont étudiées dans le premier chapitre, ainsi que les diverses propriétés des composés binaires et ternaires. notamment le nitrure de gallium (Ga<sub>N</sub>), le nitrure d'aluminium (AlN), le nitrure d'indium (InN), le nitrure de bore (BN), le nitrure de gallium-aluminium (AlGa<sub>N</sub>) et le nitrure de gallium-bore (BGa<sub>N</sub>).
- Le chapitre deux traite des notions générales concernant les divers types de photodétecteurs ultraviolets, les différents contacts métalliques ainsi que la problématique du dopage.

## **Introduction générale**

- Le chapitre trois met en évidence diverses méthodes de croissance, notamment les deux plus couramment utilisées actuellement : l'EPVOM (Epitaxie en Phase Vapeur aux Organo-Métalliques) et l'EJM (Epitaxie par Jets Moléculaires).
- Le chapitre quatre consiste à présenter le logiciel utilisé ainsi que sur les résultats issus de la simulation, accompagnée de leur interprétation et discussion.

Nous concluons notre thèse par une conclusion générale et perspective.

*Chapitre I: Propriétés  
des matériaux III Nitrures*

# **Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.**

## **I.1.Introduction.**

Les semi-conducteurs à gap direct se définissent comme ceux élaborés à partir de matériaux III-N, tels que GaN, AlN, InN, BN et leurs composés dérivés. Ces matériaux semblent très intéressants pour des applications électroniques et optoélectroniques. En électronique, ces matériaux permettent la création de dispositifs à haute fréquence, puissance et température, tels que les transistors bipolaires, les transistors à effet de champ et les transistors à haute mobilité électronique [31]. Ils sont utilisés en optoélectronique pour créer des diodes laser visibles très efficaces [32,33], des diodes électroluminescentes [34-36] et des cellules photovoltaïques [37,38]. Ils ont fait l'objet de recherches approfondies en vue d'une utilisation dans les photodétecteurs ultraviolets (UV), car ils permettent une détection dans le spectre visible-ultraviolet, ce qui éliminerait le besoin de filtres optiques coûteux [39].

## **I.2. Caractéristiques des nitrures.**

La phase hexagonale connue sous le nom de wurtzite et la phase cubique (blende de zinc) sont les deux principales formes cristallines (polytypes) dans lesquelles on trouve principalement les éléments III. La phase hexagonale a fait l'objet de la plupart des recherches sur cette famille de semi-conducteurs. Les propriétés générales des nitrures, y compris leurs différentes formes cristallines et leurs propriétés électroniques et optiques, sont présentées dans ce chapitre.

### **I.2.1. Les étapes de la cristallisation.**

Connus sous le nom de matériaux III-N, ceux contenant du nitrure sont des substances semi-conductrices composées d'éléments de la colonne III liés à l'azote (N) de la colonne V du tableau périodique des éléments. La plupart de ces composés cristallisent sous l'une des deux formes suivantes : hexagonale ( $\alpha$ -III-N) ou cubique ( $\beta$ -III-N). La phase la plus stable obtenue dans des conditions de croissance typiques est la phase hexagonale ou wurtzite. Le mélange de zinc (ZnS) est la structure cristalline dans laquelle la plupart des matériaux III-V se cristallisent. Il est composé de deux cubes à faces centrées, l'un composé des atomes d'azote de la colonne V et l'autre des éléments de la colonne III. La figure I.1(a) montre que la taille de ces deux sous-réseaux est égale à un quart de la diagonale principale.

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

Deux réseaux hexagonaux serrés, l'un composé des atomes d'azote de la colonne V et l'autre des atomes des éléments de la colonne III, constituent la structure hexagonale. La figure I.1 (b) montre que les deux sous-réseaux sont mis à l'échelle conformément à l'axe  $c$  de  $3c/8$ . Les figures I.1(a) et (b) montrent les deux structures cristallines des semi-conducteurs III-V.

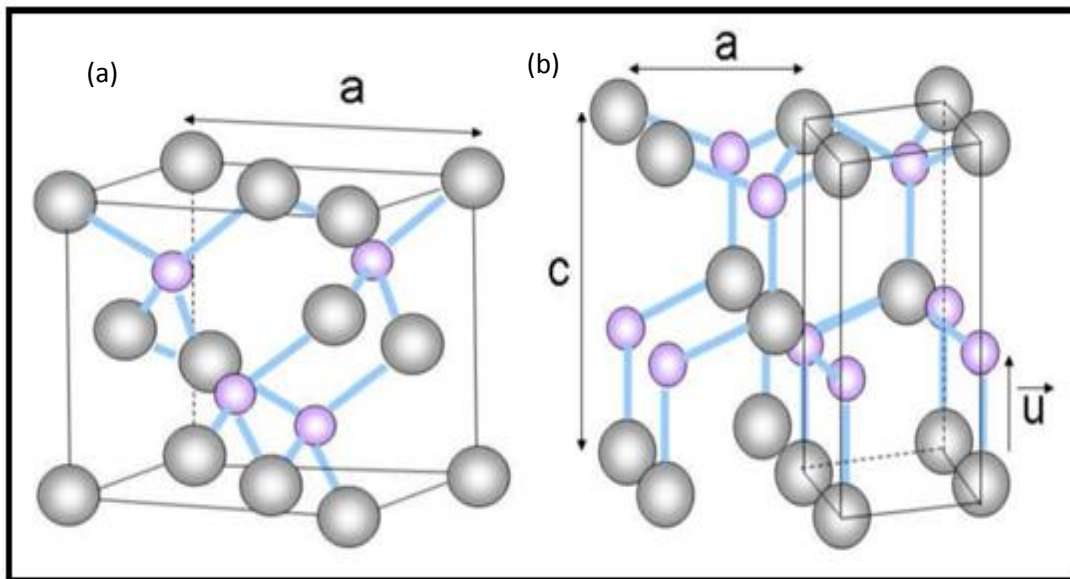


Figure I.1 : Schémas de la structure (a) wurtzite et (b) zinc-blende .

Avec une composition de quatre atomes, soit deux atomes d'azote et deux atomes de gallium, la structure wurtzite adopte un agencement hexagonal (voir, figure 1.2). Il est constitué de six atomes et se caractérise par deux constantes de réseau,  $a_0$  (3,18 Å) et  $c_0$  (5,18 Å) [40]. La croissance de ces structures s'effectue généralement le long de l'axe  $c$ . Les trois paramètres qui définissent le réseau wurtzite sont également représentés dans la figure I.2. Il s'agit de la hauteur de l'hexagone ( $c_0$ ), de sa longueur ( $a_0$ ) et de la longueur de liaison anion-cation ( $u_0$ ) en unités de  $c_0$  qui suivent la direction [0001]. L'indice « 0 » indique que ces valeurs correspondent à l'équilibre du réseau.

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

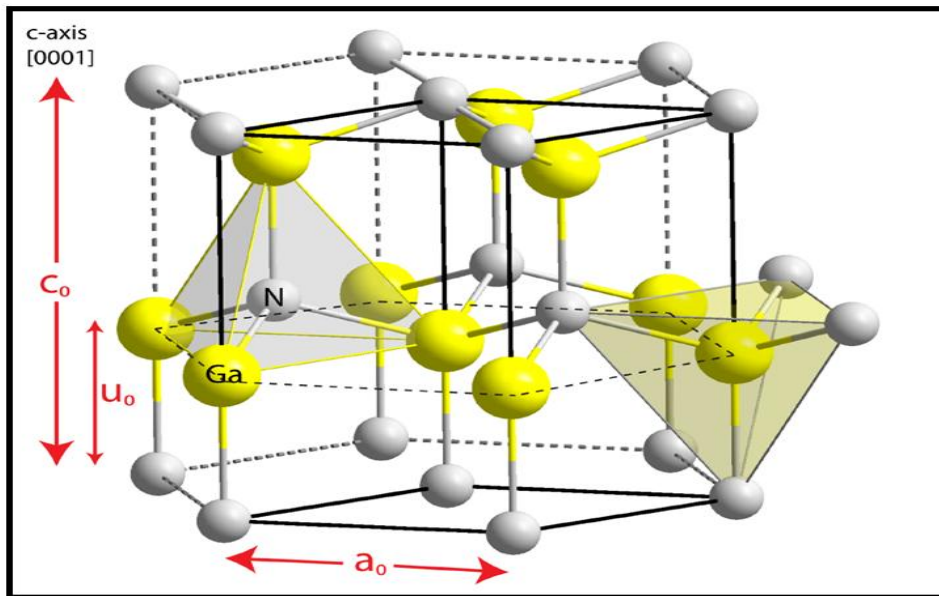


Figure I.2: La structure Wurtzite du nitrure de gallium (GaN) est caractérisée par les paramètres de réseau  $a_0$  et  $c_0$  [40].

### **I.2.2. Polarité.**

Étant donné que les directions  $[0001]$  et  $[\bar{0}001]$  ne sont pas équivalentes dans la structure wurtzite, une polarité métallique et une polarité azotée sont définies pour distinguer les deux orientations. Conventionnellement, l'axe  $[0001]$  est orienté du métal vers l'azote. Nous avons représenté les deux scénarios dans la figure I.3 : les structures réalisées selon l'orientation  $[\bar{0}001]$  sont appelées métal (Ga, Al, etc.), tandis que celles réalisées selon  $[0001]$  sont appelées azote. La nature des atomes à la surface n'est pas révélée par la polarité d'un canapé ; ce paramètre est plutôt contrôlé par la minimisation de l'énergie de surface (qui dépend des reconstructions de surface).

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

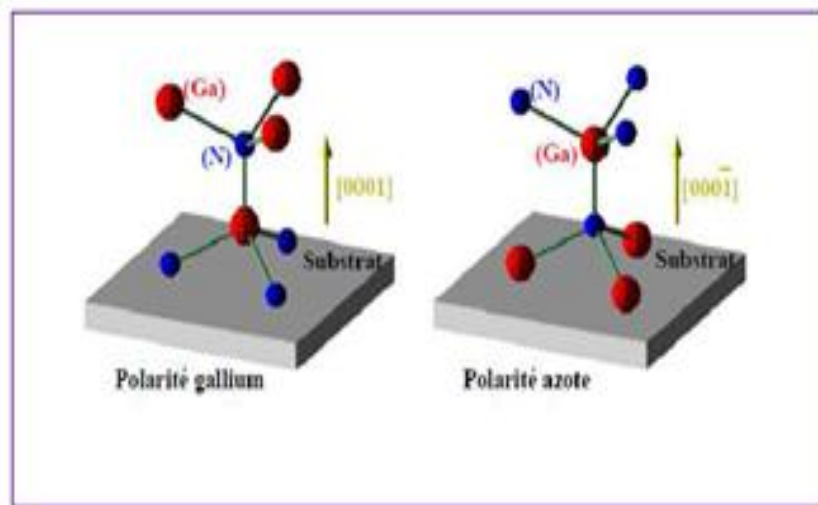


Figure I.3 : Orientations cristallographiques  $[0001]$  et  $[\bar{0001}]$  en fonction des polarités gallium et azote du GaN wurtzite.

### **I.2.3. Caractéristiques mécaniques.**

Dans le but d'éviter la création de dislocations nuisibles aux caractéristiques optiques des échantillons, on s'efforce d'obtenir des couches cohérentes lors de l'épitaxie d'une hétérostructure, comme un puits quantique GaN/AlGaN. Cette continuité du paramètre de maille permet d'atteindre cet objectif. Dans cette situation, il est nécessaire que le réseau se déforme afin de s'adapter à la discordance du paramètre de maille. Au-delà d'une certaine épaisseur, la couche déposée accumule une énergie élastique, au-delà de laquelle il devient plus bénéfique pour elle de décharger cette tension en créant des dislocations (ou, dans certains cas, des bouteilles quantitatives). Cette dimension, appelée « épaisseur critique », est plus délicate que le paramètre discordant de maille. L'écart en pourcentage entre les paramètres de maille du GaN et de l'AlN est de 2,4%, et l'épaisseur de certaines couches uniques change selon l'orientation. En outre, si un matériau autre que la couche tampon est présent, le substrat peut générer une tension dans la couche épitaxiale [41]. Une partie importante des propriétés du semi-conducteur est déterminée par son état de conductivité et les déformations locales ou globales du réseau cristallin. Cette déformation provoque en réalité un changement dans la position relative des atomes les uns par rapport aux autres, ce qui entraîne la réouverture des orbitales des atomes. Il en résulte une modification du diagramme de bandes, notamment de la taille de la bande interdite (écart).

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

### I.2.3. 1.Coefficients élastiques.

La loi de Hooke, fondée sur les coefficients d'élasticité du matériau (tableau I.1), établit un lien entre les contraintes et les déformations dans le cadre élastique. Elle reste un sujet de discussion, et les multiples tests expérimentaux produisent parfois des résultats considérablement divergents [42]. Dans le tableau I.2, on retrouve les coefficients d'élasticité du matériau nitrure de bore (NB) [43].

	GaN	AlN	InN
$C_{11}$ (GPa)	390	396	223
$C_{12}$ (GPa)	145	137	115
$C_{13}$ (GPa)	106	108	92
$C_{33}$ (GPa)	398	373	224

Tableau I.1 : Coefficients élastiques des III-nitrures en phase hexagonale [44].

<b>C11 GPa</b>	<b>982</b>
<b>C12 GPa</b>	<b>134</b>
<b>C13 GPa</b>	<b>74</b>
<b>C33 GPa</b>	<b>1077</b>

Tableau I.2 : Coefficients élastiques nitrure de bore en phase hexagonale [45].

Avec  $C_{11}$  la constante d'élasticité selon x [GPa] ,la constante d'élasticité dans le plan (x, y) [GPa] est  $C_{12}$ , dans le plan (x,z),  $C_{13}$  est la constante d'élasticité [GPa].La constante d'élasticité selon l'axe z [GPa] est  $C_{33}$ .

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

### I.2.4. Propriétés optiques.

Les semi-conducteurs à bande d'énergie directe, GaN et AlN en phase hexagonale, sont des matériaux. Le point  $\Gamma$  de la région de Brillouin se réfère à l'emplacement où la bande de valence atteint son pic et où la bande de conduction enregistre son creux. Plusieurs auteurs ont calculé les diagrammes de bande dans les nitrures [46-51]. La structure de bande pour le GaN et l'AlN, telle que déterminée par Christensen et al. [51] à l'aide de la méthode de densité locale (LDA pour Local Density Approximation), est illustrée à la figure I.4.

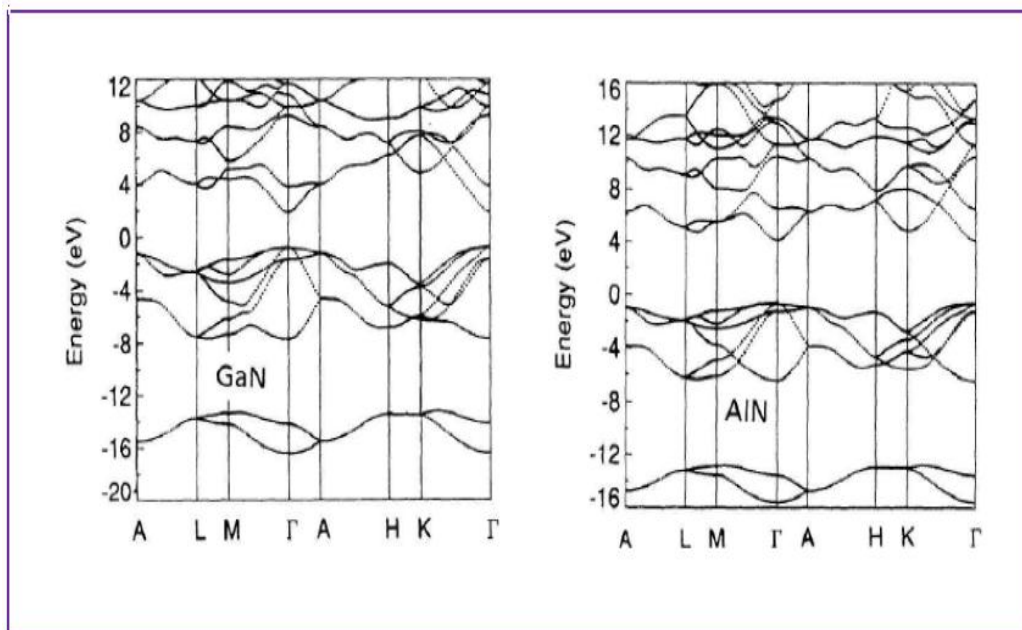


Figure I.4 : Structures de bandes GaN et AlN calculées par Christensen et al. [51].

La bande de conduction (symétrie  $\Gamma_7$ ) est exclusive au point de fuite  $\Gamma$ , alors que la bande de valence comprend trois sous-bandes, A, B et C. Ces bandes sont aussi connues sous les appellations hh (pour les conducteurs lourds), lh (pour les conducteurs légers) et ch (basée sur le spin-orbite), correspondant respectivement aux symétries  $\Gamma_9$ ,  $\Gamma_7$  et  $\Gamma_7$ . En raison de la symétrie plus faible du réseau hexagonal par rapport au réseau cubique, ainsi que de l'interaction spin-orbite, le champ cristallin provoque la dégénérescence des bandes de valence. Une représentation schématique de la structure de bande au vide du point  $\Gamma$  est présentée à la figure 1.5. Les dégénérescences résultant du couplage cristallin ( $\Delta_{cr}$ ) et spin-orbite ( $\Delta_{SO}$ ) sont respectivement d'environ 10 meV et 17 meV dans le GaN [44].

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

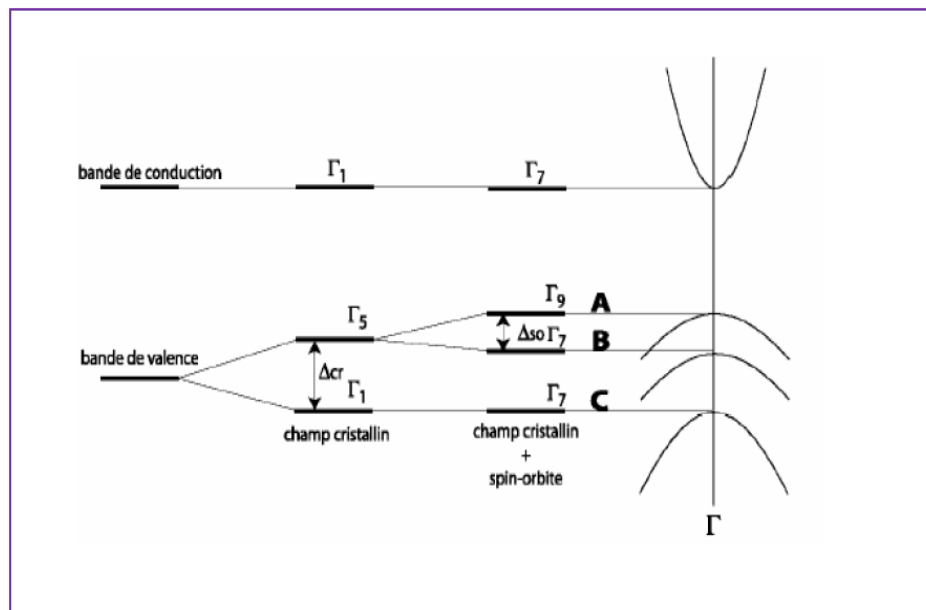


Figure 1.5 : Structure de bandes du GaN en phase wurtzite au voisinage de  $k = 0$  [52].

### I.2.5. Bande interdite.

Un paramètre crucial pour créer dispositifs est la valeur de la bande interdite, ou  $E_g$ . Environ 3,5 eV ont été trouvés lors des premières mesures de la bande interdite du GaN à basse température, qui remontent à 1970. La différence entre les nitrures a depuis fait l'objet de plusieurs études. Les longueurs d'onde dans l'ultraviolet profond (6,2 eV ou environ 200 nm) correspondent à la taille de la bande interdite de l'AlN. La valeur de la bande interdite par l'InN, qui est actuellement estimée entre 0,65 et 1,2 eV, est encore inconnue. Les valeurs des bandes interdites du GaN, de l'AlN et de l'InN sont regroupées dans le tableau I.3 [53]. De plus, un article expérimental précis sur le BN identifie des mesures optiques plus précises : le h-BN (nitrure de bore hexagonal) quasi-direct est de  $5,96 \pm 0,04$  eV, tandis que le c-BN (nitrure de bore cubique) indirect est de  $6,36 \pm 0,03$  eV [54].

Gap	GaN	AlN	InN
$E_g$ à 300K(eV)	3.39	6.2	0.65-1.2
$E_g$ à 2K (eV)	3.5	6.28	0.65-1.2

Tableau I.3 : Bandes interdites des nitrures d'éléments III cristallisés dans la phase wurtzite [53].

# Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

## I.2.6. Influence de la contrainte et de la température sur le gap.

Pour évaluer les effets des contraintes, il est essentiel de considérer la contrainte biaxiale qui fluctue selon le type de substrat utilisé ou la méthode de croissance adoptée pour chaque échantillon. La restriction affecte simultanément la dimension de la bande interdite et l'écart entre les trois niveaux de la bande de valence dans la phase hexagonale. La figure I.6 illustre de manière schématique l'évolution de la structure de bande du GaN, qu'elle soit hexagonale ou cubique, en fonction du type de contrainte [54].

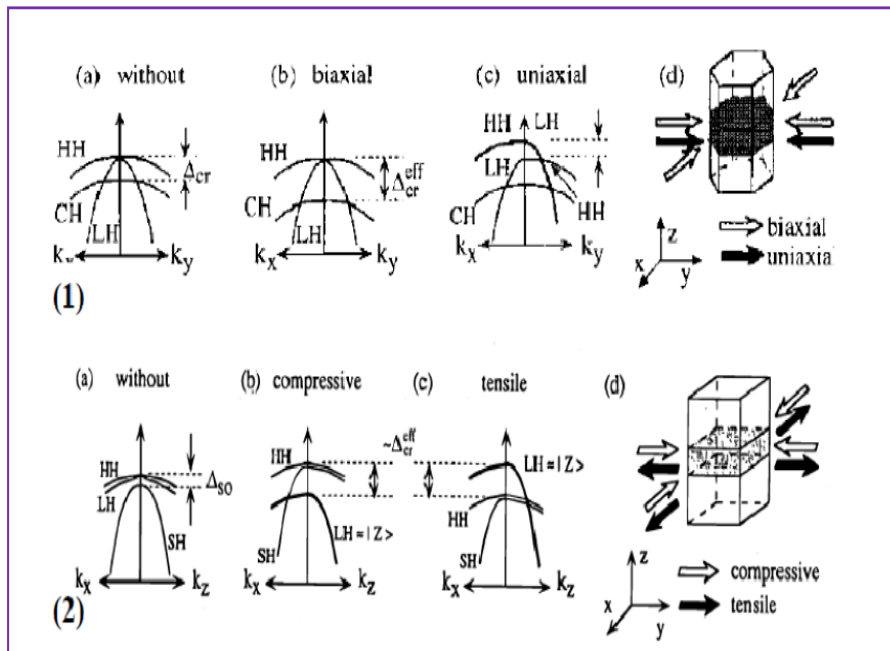


Figure I.6 : Représentation schématique de la structure de bande[54].

Pour le GaN hexagonal dans le plan  $k_x$ - $k_y$  autour du sommet de la bande de valence (1) : (a) sans contrainte, (b) avec une contrainte biaxiale, et (c) avec une contrainte uniaxiale dans le plan c. (d) Indiquez la direction de chaque contrainte. (2) : pour le GaN cubique avec (b) : compression biaxiale et (c) : tension biaxiale [54].

## I.2.7. Déformations structurelles.

Dans la plupart des cas, les défauts structurels des nitrures sont concentrés dans les couches déposées. Ils limitent donc le développement industriel et les performances des composants à base de nitrures. C'est pourquoi ils font l'objet d'études approfondies depuis 1990, à l'aide de calculs pré-implantation et de mesures post-implantation [55].

## **Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.**

### **I.2.7.1. Présentation des imperfections structurales dans un cristal.**

Plusieurs sortes de défauts peuvent être trouvées dans un cristal. Ils se divisent en deux types de défauts ponctuels, à savoir :

- les vides (sites atomiques vacants).
- Les anti-sites sont des atomes qui remplacent un autre atome, à l'instar d'un atome de gallium substituant un atome d'azote, ou vice versa.
- les impuretés par substitution (un atome étranger occupe un emplacement atomique ; par exemple, un atome de carbone remplace un atome de gallium) qui peuvent découler de précurseurs ou d'un gaz porteur qui n'est pas assez pur pour la croissance, l'assemblage, l'oxydation ou en cas de nettoyage insuffisant de la surface du substrat, la migration des atomes du substrat vers la couche déposée, etc.
- Les défauts interstitiels (une impureté ou un atome d'un matériau prenant place dans un site interstitiel, comme un atome de l'azote placé dans ce type de site). Et il existe de nombreux défauts :
- Les dislocations, c'est-à-dire les ruptures dans la structure cristalline. On distingue trois types : coin, vis et mixte. Elles résultent généralement de la détente plastique d'un matériau soumis à une contrainte.
- Les erreurs d'exécution (le respect de l'ordre d'exécution des atomes n'est plus garanti). Ce phénomène peut avoir lieu sur un ou deux plans atomiques.
- Les inclusions (par exemple, la précipitation ou le déplacement de phase cristalline à l'intérieur d'une zone du réseau).
- Les jonctions de grains (frontière entre deux cristaux ayant des orientations différentes). Dans les canapés qui ont été déposés par épitaxie, ce type de défaut est assez improbable.

### **I.2.8. Alliages d'aluminium et nitrure de gallium (AlGaN).**

Plusieurs études ont montré que le minimum absolu de la bande de conduction pour l'AlN binaire en phase cubique se situe au point X [56]. Étant donné que le maximum de la

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

bande de valence se trouve toujours au point G, l'AlN binaire cubique aurait un intervalle indirect. Le duo (GaAs,AlAs) présente le même comportement. Les calculs semblent indiquer que la transition entre les deux types se produit dans l'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  à une teneur en aluminium d'environ 57 % [57] (voir figure I.7). Un écart direct est prévu pour toutes les concentrations d'aluminium dans la phase hexagonale de l'alliage AlGaN. L'évolution de cet écart reste encore incertaine ; certaines personnes, contrairement à d'autres, mesurent un changement non linéaire de l'écart [58]. Par conséquent, nous constatons que la détermination de l'écart expérimental d'un matériau n'a pas encore été réalisée. Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, non seulement la composition du matériau entre en jeu, mais également la contradiction observée dans le canapé. Cela clarifie la dispersion des mesures expérimentales. Par conséquent, nous constatons que la détermination de l'écart expérimental d'un matériau n'a pas encore été réalisée.

### **I.2.9. Efficacité à grande échelle des transporteurs.**

Le seuil d'émission dans une structure avec des pompes quantitatives est supérieur à la masse effective des porteurs. Afin de parvenir à ce niveau, la population doit être inversée ; de plus, si la densité des états à inverser est forte, l'énergie requise pour cette inversion sera également importante. Autrement dit, la masse effective est en relation inverse avec la courbe d'une bande qui correspond proportionnellement à la densité d'état pour un puits quantitatif (figure I.7). Dans le cas où la masse effective des porteurs est importante, le seuil l'est aussi (comme par exemple avec un laser) [59].

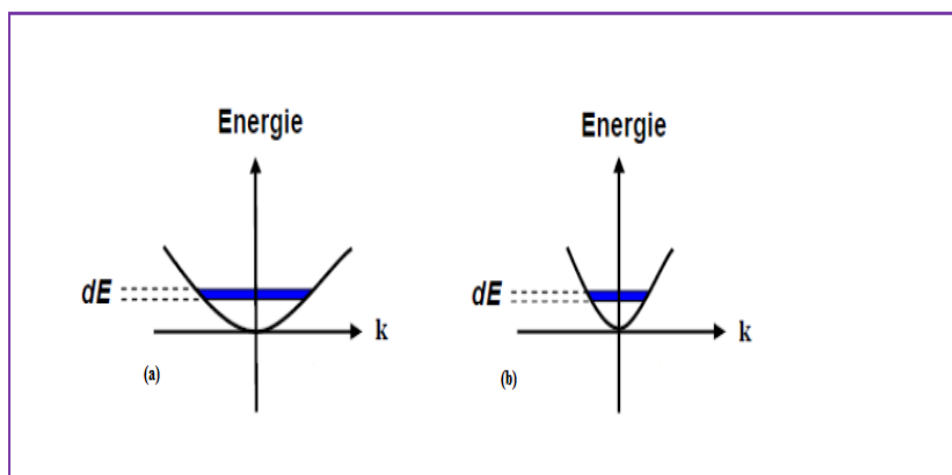


Figure I.7 : Densité d'états et masse effective.

Dans une bande de conduction, (a) Masse effective élevée faible courbure densité d'états élevée et (b) Masse effective faible courbure élevée densité d'états faible.

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

Dans une bande parabolique :

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \quad (\text{I-1})$$

C'est l'équation de dispersion d'un électron dans une bande de conduction parabolique (approximation près du minimum de bande).

La masse effective est liée à la courbure :

$$m^* = \frac{m^*}{\frac{d^2 E}{dk^2}}$$

- Grande masse effective → faible courbure.
- Petite masse effective → forte courbure.

Or que ;

- $E$  → énergie de l'électron
- $k$  → vecteur d'onde (lié à l'impulsion)
- $m^*$  → masse effective
- $\hbar$  → constante de Planck réduite

### **I.2.10. Substrats.**

Le choix du substrat pour les éléments de nitruration III est une décision délicate, car il impose des propriétés aux surfaces nitrurées et influence le type d'application souhaité. Il n'existe pas de substrat idéal, mais un substrat adapté à l'application souhaitée. L'émergence récente des substrats GaN n'a pas résolu le problème, car ils sont coûteux, difficiles à fabriquer et difficiles à réduire en termes de prix et d'augmenter en diamètre. Les substrats GaN sont coûteux et difficiles à fabriquer, ce qui rend difficile la réduction des prix et l'augmentation du diamètre, ce qui en fait un obstacle important pour les applications à grande échelle. Malgré une différence significative dans la taille des mailles (16 %) et une densité de défauts élevée, le saphir est le substrat le plus couramment utilisé pour l'épitaxie GaN en raison de son prix abordable, de sa grande disponibilité et de sa transparence visible. Malgré une densité élevée de défauts internes, les diodes électroluminescentes à émission InGaN/GaN possèdent près de 100 % de défauts internes. La zone active du composant n'est pas sensible aux défauts, ce qui indique qu'il s'agit d'une propriété remarquable indépendante de la nature du substrat, et sa faible conductivité thermique entraîne des problèmes de dissipation thermique. Le carbure de silicium (SiC) est l'un des substrats les plus couramment utilisés, le GaN et l'AlN présentant les meilleurs rapports de diamètre de maille. Cependant, la densité de défaillance du GaN n'est pas significativement plus élevée lorsqu'il est épitaxial sur

## Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.

SiC en raison de son coefficient de dilatation thermique plus faible. Il n'est pas possible d'augmenter l'épaisseur du film de GaN pour réduire la densité des défauts. Cependant, son excellente conductivité thermique en fait un substrat adapté aux dispositifs à base de GaN délivrant des poussées puissantes. Cependant, son excellente conductivité thermique en fait un substrat adapté aux dispositifs à base de GaN délivrant des poussées puissantes. Le substrat en silicium est proposé pour l'épitaxie GaN en raison de sa grande disponibilité, de son prix élevé sur le marché et de sa compatibilité avec les processus microélectroniques tels que le pressage et l'humide. Malgré une différence paramagnétique significative entre le GaN et le Si, le silicium est un choix idéal. Le développement d'un filtre en silicium pourrait permettre d'intégrer des nanoparticules III-III dans la microélectronique, mais son faible coefficient de dilatation thermique rend difficile la fabrication d'hétérostructures à base de GaN. Des solutions ont été proposées pour limiter le problème de contrainte importante, le silicium étant considéré comme un substrat potentiel pour les nitrures III et sélectivement incrusté après épitaxie, ce qui est particulièrement intéressant pour les applications optoélectroniques. La conductivité thermique élevée du silicium, similaire à celle du GaN, permet une dissipation thermique précise par les dispositifs de puissance.

	<b>Saphir</b>	<b>SiC</b>	<b>Si (111)</b>	<b>GaN</b>	<b>AlN</b>
<b>Paramètre de maille (Å)</b>	2.747	3.082	3.8401	3.1878	3.112
<b>Désaccord paramétrique avec GaN (%)</b>	16	3.4	-17	0.0	-2.4
<b>Coefficient de dilatation thermique (<math>10^{-6}/K</math>)</b>	7.5	4.7	2.59	5.59	4.2
<b>Conductivité thermique (<math>W.K^{-1}.cm^{-1}</math>)</b>	0.5	3.8	1.5	1.5	3
<b>Cout €</b>	~50	~1000	~30	~1200	

Tableau I.4: propriétés des substrats les plus souvent utilisés pour l'épitaxie de matériaux III-N [60].

### **I.3. Photodétecteurs ultraviolets**

La détection des rayons UV (longueur d'onde < 400 nm) a plusieurs utilisations dans les domaines militaire et civil, comme La détection de l'ozone, des polluants et des agents biologiques sont des exemples d'applications des capteurs biologiques et chimiques. Les détecteurs d'incendie comprennent les alarmes incendie, la détection des panaches de missiles et le contrôle de la combustion, communications optiques spatiales et intersatellites

## **Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.**

transferts de données sécurisés dans l'espace, calibrage d'imageurs et d'émetteurs UV tels que instruments, mesure des UV solaires et études astronomiques.

La majorité des photodétecteurs fonctionnent comme des filtres passe-tout et sont classés soit comme détecteurs aveugles au visible pour les longueurs d'onde comprises entre 280 et 400 nm, soit comme détecteurs aveugles au solaire pour les longueurs d'onde inférieures ou égales à 280 nm, en supposant que les UVC sont couplés par absorption atmosphérique.

### **I.3.1. Matériaux pour la détection des UV.**

Les semi-conducteurs ont d'abord été utilisés pour la détection des UV dans des matériaux à faible bande interdite, tels que le silicium, et certains matériaux III-V, tels que le GaP et le GaAsP. Ces matériaux présentent l'inconvénient d'être sensibles à la lumière visible et de se détériorer prématurément sous l'effet du rayonnement UV. Dans cette situation, l'installation de filtres optiques s'avère indispensable. Cela, cependant, accroît la taille et le poids de l'équipement tout en diminuant ses performances globales en termes de quantité. Au cours des vingt et une dernières années, une nouvelle catégorie de détecteurs UV a été développée, construite à partir de semi-conducteurs à grands intervalles comme le nitrure de gallium GaN, le carbure de silicium SiC et les alliages AlGaN.

#### **I.3.1 .1. Photodétecteurs MSM fabriqués à partir de silicium.**

La silice, qui présente un écart faible et indirect, est encore largement utilisée dans la production de composants optoélectroniques. Elle offre de nombreux avantages, notamment une résistance prononcée à l'obscurité, un bon coefficient d'absorption, des processus de dépôt à basse température et peu coûteux, ainsi qu'une intégration simple. Les régions visible et proche infrarouge du spectre constituent la majeure partie de la réponse spectrale du silicium. Néanmoins, beaucoup de travaux ont été réalisés sur ce sujet. Le silicium amorphe-cristallin a été utilisé par Li-Hang [61] pour réduire considérablement la densité du courant d'obscurité c-Si MSM-PD. En raison du courant d'émission thermo-ionique élevé causé par la fuite latérale de courant entre deux électrodes voisines, la majorité des photodétecteurs MSM à base de silicium ont un courant d'obscurité plus élevé.

## **Chapitre I : Propriétés des matériaux III nitrurés.**

### **I.3.1.2. Photodétecteurs MSM fabriqués à partir de SiC.**

Le carbure de silicium (SiC) est un bon candidat pour l'optoélectronique en raison de ses propriétés physiques et électroniques exceptionnelles. Ces dernières années, la détection de la lumière dans le spectre UV a suscité un vif intérêt pour des applications biologiques et chimiques. Le SiC, qui présente un écart plus important que le silicium, permet de créer des détecteurs UV avec un courant d'obscurité très faible. Ces derniers fonctionnent à des températures extrêmement élevées et sont insensibles au rayonnement visible ou infrarouge. Afin de fabriquer un photodétecteur UV MSM à base de SiC, Yan-Kuin Su [62] a utilisé de l'ITO, du Ni/ITO et du Ni comme matériaux d'électrode.

### **I.3.1.3. Photodétecteurs MSM à base des matériaux III-V.**

Les matériaux III-V, et en particulier ceux à base de nitrure, ont récemment suscité beaucoup d'intérêt en raison de leur bande interdite vaste et droite, de leur vitesse de saturation élevée et de leur conductivité thermique élevée. Ces caractéristiques ont rendu ces matériaux attrayants dans le domaine de l'optoélectronique. L'un des semi-conducteurs les plus importants dotés d'une bande interdite importante est le GaN. Il est largement utilisé dans plusieurs dispositifs optiques pour des applications ultraviolettes-bleues. Les alliages introduisent sur ce dernier apporter des performances de large gamme et une évolution énorme pour les créations de ces dispositifs et fait l'objet des recherches récentes.

## **I.4. Conclusion.**

Durant ce chapitre, nous avons examiné les caractéristiques de l'azote, notamment ses propriétés optiques, mécaniques et cristallines. Étant donné que notre travail repose sur ces matériaux, nous avons par la suite introduit les alliages AlGaN. Nous avons aussi présenté une vue d'ensemble des matériaux employés pour la détection des UV, qui est la finalité de notre piège.

*Chapitre I I : Photo - détecteurs  
ultraviolets*

## **Chapitre II :Photodétecteurs Ultrat Violets.**

### **II.1. Introduction.**

La couche d'ozone et les gaz présents dans l'atmosphère absorbent une grande proportion du rayonnement ultraviolet (UV) émis par le soleil. Seuls les rayons dont la longueur d'onde est supérieure à 280 nm atteignent la Terre. Les détecteurs de rayonnement UV, parfois appelés détecteurs « solar blind », doivent détecter les rayons UV inférieurs à 280 nm mais supérieurs à 265 nm, qui est la zone présentant les niveaux de rayonnement parasite les plus faibles. La détection des UV a des applications tant militaires que civiles, telles que les dosimètres pour les environnements riches en UV, la détection des incendies, l'identification des missiles par leur trajectoire et le guidage des missiles [63]. Actuellement, les photodétecteurs les plus couramment utilisés sont basés sur des films minces de diamant (par exemple, 5,4 eV ou  $\lambda = 230$  nm) ou de SiC (par exemple, 2,9 eV ou  $\lambda = 430$  nm). Cependant, ils n'ont pas une bonne sélectivité UV/visible et nécessitent l'utilisation de filtres. Les nitrures élémentaires de la colonne III présentent un grand intérêt pour la détection optique automobile ; l'écart entre les alliages AlBGaN peut varier de 1,9 eV (650 nm) à 6,2 eV (200 nm). En particulier, la détection UV peut être effectuée à l'aide des alliages AlGaN ; le GaN a une absorption à 365 nm et l'AlN à 200 nm. Dans un environnement chimique ou physique, les nitrures III-N présentent une plus grande stabilité [64]. Il existe plusieurs types de détecteurs UV, allant du photoconducteur, plus simple, à la photodiode (Schottky, p-i-n, MSM), plus complexe.

### **II.2. Systèmes de détection.**

Les dispositifs de détection de photons, qui incluent principalement les photomultiplicateurs et les équipements à semi-conducteurs, sont capables de compter les photons. Le photodétecteur excelle particulièrement dans la tâche du « comptage des photons ». Cette technique est cruciale dans les contextes où la luminosité est extrêmement faible, c'est-à-dire quand les photons se dissocient et que l'emploi de la mesure analogique classique devient extrêmement complexe. Le concept de la prochaine génération de détecteurs de photons, connus sous le nom de SiPM (Silicon-Photomultipliers), a vu le jour dans les années 2000. Ils sont sur le marché depuis janvier 2008, date à laquelle Hamamatsu les a introduits sous le nom de MPPC (Multi Pixel Photon Counter) et SensL sous le nom de SPM (Silicon Photomultiplier). Ce sont des matrices de photodiodes (par exemple  $32 \times 32 = 1024$  photodiodes) polarisées en mode Geiger, générant un détecteur unique et indestructible à surface de détection millimétrique. Chaque photon génère une impulsion de courant qui

## **Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.**

persiste pendant la durée du déplacement électronique à travers l'appareil, comme un photomultiplicateur, un APD-Geiger, un SiPM ou une photodiode à avalanche (APD). Dans un dispositif tel qu'un photomultiplicateur, un APD-Geiger, un SiPM ou une photodiode à avalanche (APD), Chaque photon produit une impulsion de courant qui persiste pendant la durée du transfert électronique. Le nombre d'impulsions témoignera du nombre de photons captés grâce à la sélection effectuée par le détecteur. Le compteur de photons peut inclure divers circuits afin de remédier aux nombreux problèmes spécifiques à chaque détecteur, y compris un amplificateur préliminaire rapide, un discriminateur de hauteur d'impulsion, une circuiterie de mise en forme, une FPGA pour le traitement des calculs, un tiroir de coïncidence, etc. Afin de filtrer les impulsions "non valides" provenant du détecteur, le discriminateur ne doit compter que les impulsions liées à l'événement mesuré. De plus, toute la chaîne de mesure peut être synchronisée avec l'événement mesuré. Les deux facteurs principaux qui limitent la détection sont le "temps mort" et le "déclenchement parasite" (bruit de fond). Le temps pendant lequel le détecteur est "non fonctionnel" après une détection est exprimé par le terme "temps mort." Le déclencheur parasite limite le minimum absolu de photons qui peuvent être mesurés à la seconde. On doit blâmer plusieurs restrictions inhérentes aux détecteurs, dont la création thermique de paires électron-trou dans les semi-conducteurs. Il devrait être inférieur au taux de signal. Des paramètres supplémentaires spécifiques à chaque détecteur et application, tels que la zone de détection, le ratio de surface réactive, l'efficacité quantitative, le facteur d'amplification, la résolution temporelle et le temps de démarrage qui décrit le délai requis pour que le détecteur atteigne ses performances standards ont également leur importance.

### **II.2.1. Unités de mesure pour ces dispositifs.**

Le photon, considéré comme une particule de l'onde électromagnétique, est caractérisé par sa longueur d'onde, sa fréquence ou son énergie  $E$ , mesurée en électronvolts (eV). L'équation (II-1), qui intègre la vitesse de la lumière ( $c$ ) et la constante de Planck ( $h$ ), établit un lien entre ces trois paramètres.

$$E = h * \nu = \frac{h * c}{\lambda} \quad \text{(II-1)}$$

La figure II.1 présente l'ensemble du spectre électromagnétique, allant des ondes radio aux rayons gamma, avec la petite bande de lumière visible en prime ; la figure II.2 illustre les diverses unités photométriques pertinentes [65].

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

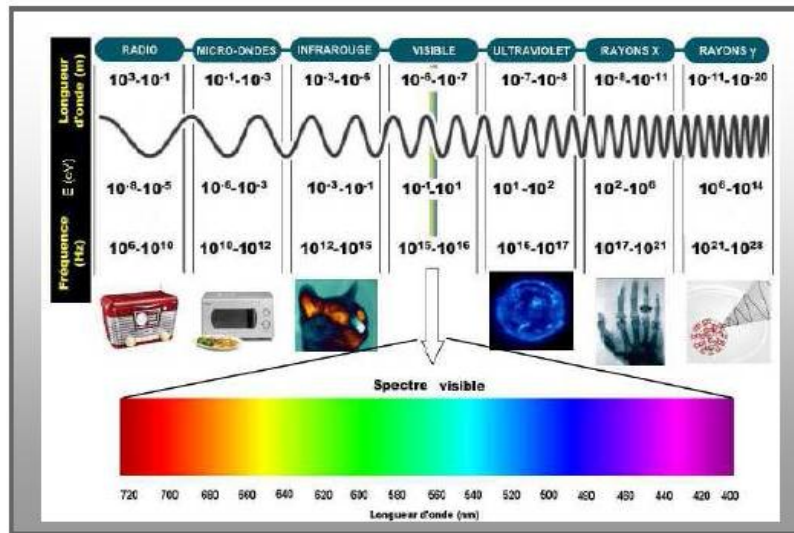


Figure II.1 : Les spectre électromagnétique [65].

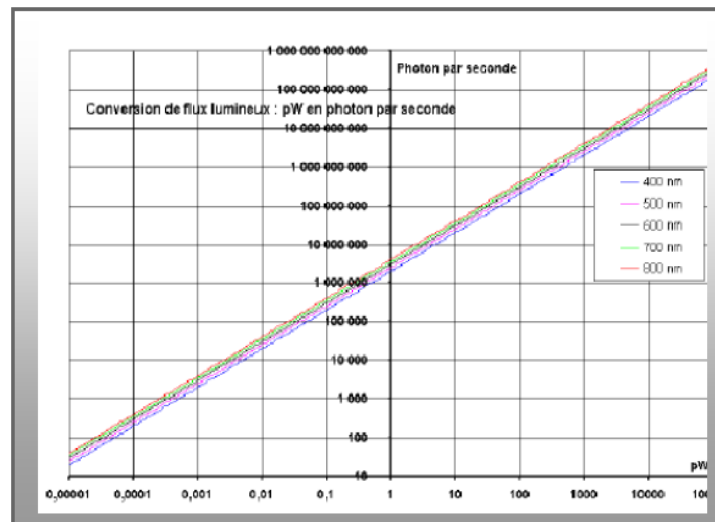


Figure II.2 : Conversion de flux lumineux pW en photon par seconde [65].

### II.3. Ultraviolets photodétecteurs.

Une large gamme de longueurs d'onde est couverte par l'ultraviolet (UV), allant de la limite visible (400 nm à 3,1 eV) jusqu'à la limite des rayons X de basse énergie (10 nm à 124 eV). Il a été arbitrairement divisé en quatre régions : UV A, qui s'étend de 400 à 320 nm (3,1 à 3,87 eV) pour les longueurs d'onde UV B entre 320 et 280 nm (de 3,87 à 4,43 eV), et Pour UV C les longueurs d'onde comprises entre 280 et 200 nm (4,43 à 6,20 eV), l'ultraviolet le plus éloigné s'étend de 200 à 10 nm (6,2 à 124 eV). Si la longueur d'onde est inférieure à 200

## **Chapitre II : Photodétecteurs Ultraviolets.**

nm, l'atmosphère terrestre ne laisse pas la lumière se propager librement. Cela nécessite un niveau de tension élevé, c'est pourquoi la lumière ultraviolette est parfois appelée "UV du vide" (vacuum UV ou VUV). Plusieurs utilisations significatives des détecteurs UV comme calibration des émetteurs : dosimétrie et imagerie UV, y compris les mesures d'illumination solaire et les études astronomiques, détecteurs de flammes (systèmes d'alarme incendie, systèmes de détection de missiles et systèmes de contrôle de la combustion des moteurs), communications optiques dans l'espace (communications intra- et inter-satellites sécurisées), et détections biologiques et chimiques (détection de l'ozone, détermination du niveau de pollution de l'air, détection d'agents biologiques, etc.). Pour ces applications, le photodétecteur idéal est généralement conçu pour présenter simultanément une réponse absolue élevée, un bon degré de variation de la fonction du photocourant en fonction de la puissance optique incidente, un faible niveau de bruit et une bonne réjection du visible (c'est-à-dire une haute sélectivité spectrale). Le niveau d'importance attribué à ces différents facteurs est certainement influencé par le type d'application envisagée. Des temps de réponse courts peuvent être très utiles dans les applications qui nécessitent un traitement rapide du signal, ce qui est généralement le cas dans le domaine de l'imagerie UV. Aujourd'hui, une grande variété de photodétecteurs UV adaptés à ces utilisations sont disponibles. Les photomultiplicateurs sont utilisés depuis longtemps pour détecter la lumière ultraviolette, et ils sont encore largement utilisés dans les laboratoires. Cependant, le besoin croissant de petits systèmes de détection UV pour des applications portables ou embarquées a incité au développement à grande échelle de photodétecteurs à semi-conducteurs. Les composants actifs sont principalement des photoconducteurs, des photodiodes à jonction Schottky, des photodiodes p-i-n ou des photodiodes métal-semiconducteur-métal (MSM). Tout d'abord, des semi-conducteurs à faible bande interdite, tels que le silicium et certains semi-conducteurs III-V (GaP, GaAsP), ont été utilisés pour réaliser la détection UV. Leurs énergies de bande interdite se trouvent souvent dans le visible très proche (rouge, GaAsP) ou dans l'infrarouge (Si). Cependant, il convient de noter que l'ajout coûteux de filtres passe-bande et de phosphore est nécessaire dans ces applications afin de fournir au système de photodétection la plage spectrale appropriée et, dans certains cas, d'empêcher la dégradation des matériaux semi-conducteurs sous la lumière UV. Il est également bien connu que l'utilisation de filtres interférentiels est essentielle dans les applications qui nécessitent un taux de rejet très élevé (de plusieurs ordres de grandeur par nanomètre). Une nouvelle génération de photodétecteurs UV pour semi-conducteurs a été récemment développée; elle utilise des semi-conducteurs bien reconnus avec de larges bandes interdites, tels que le carbure de silicium

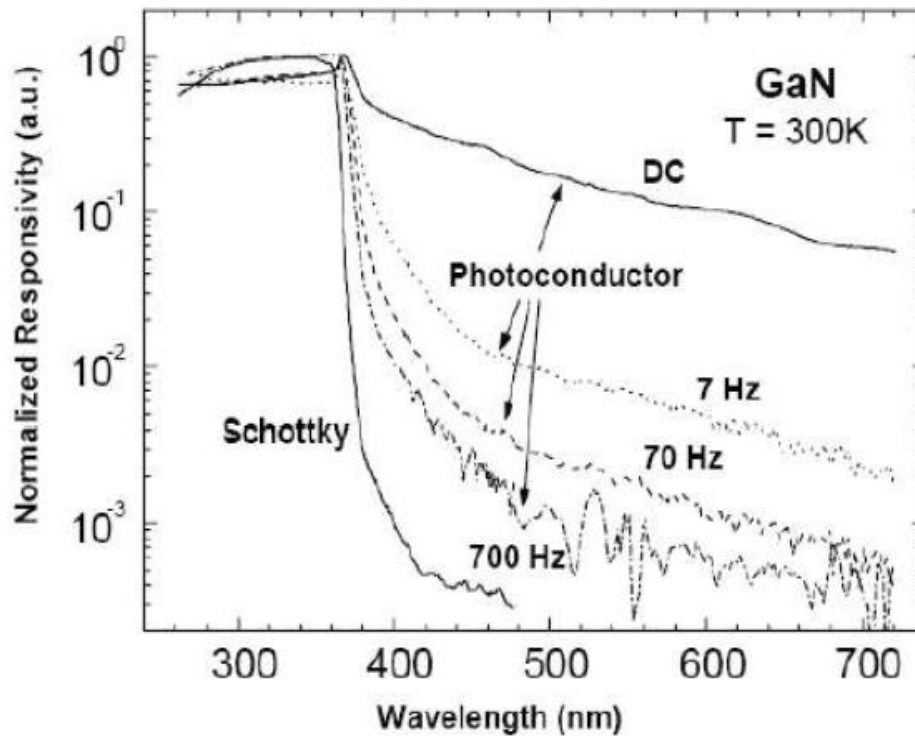
## **Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.**

(SiC), le diamant, le nitrure de gallium (GaN) ou les alliages AlGaN. Aujourd'hui, une des solutions techniques les plus intéressantes et adaptables pour ce type d'application est représentée par les nitrures des éléments III [66].

### **II.3.1. Photoconducteurs.**

Les photoconducteurs dopés au GaN ou à l'AlGaN, qui sont en silicium, présentent une caractéristique notable : leur réponse absolue est fortement influencée par la puissance lumineuse incidente  $P$  et est directement liée à  $P^{-\gamma}$  plus cinq décades. Ici,  $\gamma$  se situe dans l'intervalle de  $0,5 < \gamma < 0,95$  [67, 68]. La longueur de l'onde d'excitation n'a aucune incidence sur ce comportement. Par conséquent, la valeur de  $\gamma$  dépend de l'échantillon et diminue généralement avec la résistance électrique. Lors de l'émergence des effets de photoconductivité persistante (PPC), les détecteurs présentent une réponse très lente et non exponentielle, ce qui a également été observé par d'autres auteurs [69]. L'impact de la fréquence sur la réponse du spectre photoconducteur est visible dans la figure II.3. Ces résultats démontrent que la réponse spectrale du photoconducteur est dominée par un mécanisme de détection très lent (qui cause les effets PPC) et présente un faible degré de sélectivité spectrale. Le couplage spectral devient plus franc et tend à se déplacer vers une réponse photovoltaïque à mesure que l'effet de ce mécanisme de détection (lié à la charge de l'espace autour des dislocations) diminue en augmentant la fréquence de modulation du signal optique incident. Mais comme on peut le voir sur la figure II.3, même lorsque la fréquence de modulation est de 700 Hz [67], le facteur de réjection UV visible de la photodiode Schottky reste nettement supérieur à celui du photoconducteur.

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.



La figure II.3 : la réponse spectrale normalisée d'un photoconducteur [67].

GaN mesurée pour une gamme de valeurs de fréquence de modulation du signal optique incident. Les données expérimentales sont comparées à la réponse spectrale d'une photodiode GaN à Schottky arrière-empilé qui a été fabriquée en utilisant le même échantillon de GaN(Si) [67].

Néanmoins, un bon détecteur UV "aveugle au soleil" utilisant des photodétecteurs n'a pas encore été réalisé. Leur temps de réponse est de l'ordre de la milliseconde, ce qui est beaucoup trop long, et ils présentent un inconvénient non négligeable. La raison de ce temps de réponse lent est soit la présence de particules en équilibre thermique avec les porteurs, soit la recombinaison extrêmement rapide des porteurs, ce qui les empêche de participer [70].

### **II.3.2. Schottky photodiodes.**

Les photodiodes Schottky, dotées de contacts semi-transparents de Schottky et éclairées par l'avant, génèrent un photocourant qui varie de manière linéaire en fonction de la puissance incidente sur une vaste étendue de magnitudes (10mW/m<sup>2</sup> à 2kW/m<sup>2</sup>) (voir figure II.4) [71].

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

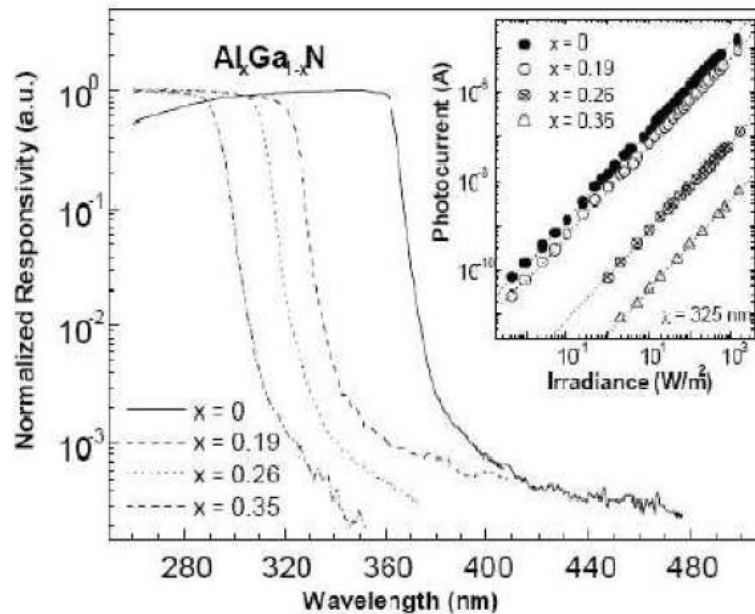


Figure II.4 : Réponse spectrale normalisée de la photodiode à la barrière de Schottky[71].

Dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  pour différentes valeurs de fraction molaire d'aluminium. Encart : Effet de la puissance de la lumière incidente sur la variation du photocourant à  $\lambda = 325 \text{ nm}$  [71].

Les réponses spectrales des diodes Schottky dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}(\text{Si})$  de différentes teneurs en aluminium ( $x = 0 - 0.19 - 0.26 - 0.35$ ) sont également incluses dans la figure II.4. Un contraste UV/visible qui est mesuré tous les trois décades. À mesure que le pourcentage molaire d'aluminium augmente, la longueur de couplage passe de 362 à 293 nm. Dans le domaine des longueurs d'onde plus courtes que la bande interdite, la réponse spectrale est logiquement constante. Lorsque la teneur en aluminium augmente, la réponse absolue au-dessus de la bande interdite diminue quelque peu. Pour  $x = 0-0,19-0,26-0,35$ , les maxima de réponse absolue des composants de la figure II.4 sont respectivement de 54, 45, 30 et 10 mA/W. Avec une augmentation du pourcentage molaire d'aluminium, cette diminution de la réponse absolue en fonction de  $x$  entraîne une diminution de la longueur de diffusion des porteurs. Il est évident, d'après le changement brusque du front de couplage, que la limitation du contraste UV/visible dans les photodétecteurs derrière Schottky est liée uniquement aux défauts profonds. Le cas des photoconducteurs n'est pas celui-ci.

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

### II.3.3. Photodiodes de type métal-semiconducteur-métal (MSM).

Bien que la structure d'une diode MSM soit symétrique, elle peut parfois se comporter de manière similaire à une photodiode p-i-n. Afin d'empêcher toute injection de courant, les connexions métalliques doivent être bloquées. Parce que l'écart entre les électrodes est si petit, il n'y a pas de recombinaison entre les électrons et les trous avant que ces derniers ne les capturent [70]. La structure d'une photodiode MSM, telle que déterminée par Monroy et al. [69], et sa réceptivité normalisée sont montrées dans la figure II.5. La longueur de l'onde de couplage peut être ajustée en modifiant la composition, tout comme avec les photodiodes p-i-n. En appliquant un courant de polarisation constant, il est possible d'augmenter la sélectivité en diminuant la réactivité en dehors de la zone de couplage [69].

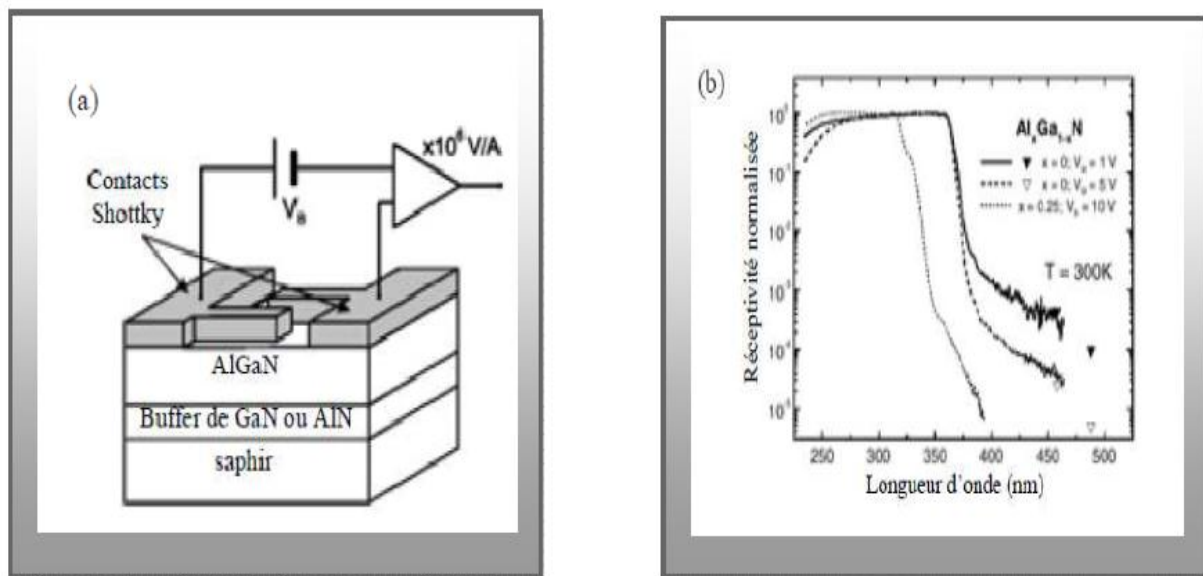


Figure II.5 : Structure (a) photodiode MSM ; (b) photodiode réceptivité normalisée de Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N MSM en fonction de la longueur d'onde [69].

Théoriquement, ce type de détecteur peut avoir des temps de réponse extrêmement courts, estimés à 10 ps. En pratique, ils ont des temps de réponse d'environ 10 ns, ce qui est au moins aussi bon que ceux des détecteurs UV précédemment décrits, ainsi qu'une détection et un NEP d'environ  $2,3 \text{ Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1} \text{ cm}$  et  $24 \times 10^{10} \text{ Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$  sous une polarisation de 28V [69]. En raison de l'utilisation de contacts Schottky, ces dispositifs sont techniquement difficiles à

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

mettre en œuvre ; par conséquent, leur mise en œuvre n'est actuellement qu'au stade de développement.

### II.3.4. Diodes photo p-i-n.

Les photodiodes p-n et p-i-n (où « i » signifie intrinsèque), présentent une performance équivalente aux photodiodes Schottky en matière de réceptivité, contraste, linéarité, temps de réponse et bruit à basse fréquence. On obtient régulièrement un bon contraste UV/visible supérieur à 10<sup>3</sup> et des délais de réponse avoisinant les 10 ns. Monroy et ses collègues, ont réalisé la construction d'une photodiode p-i-n AlGa<sub>x</sub>N/GaN [69] : est montrée dans la figure II.6, ainsi que sa réceptivité. Lorsqu'une fenêtre en Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N est utilisée, on observe que la réceptivité diminue pour des longueurs d'onde proches de la bande interdite du GaN. Effectivement, quand la longueur d'onde se réduit, l'absorption des photons devient plus superficielle et un nombre accru de porteurs se recombinaient avant d'être collectés [69].

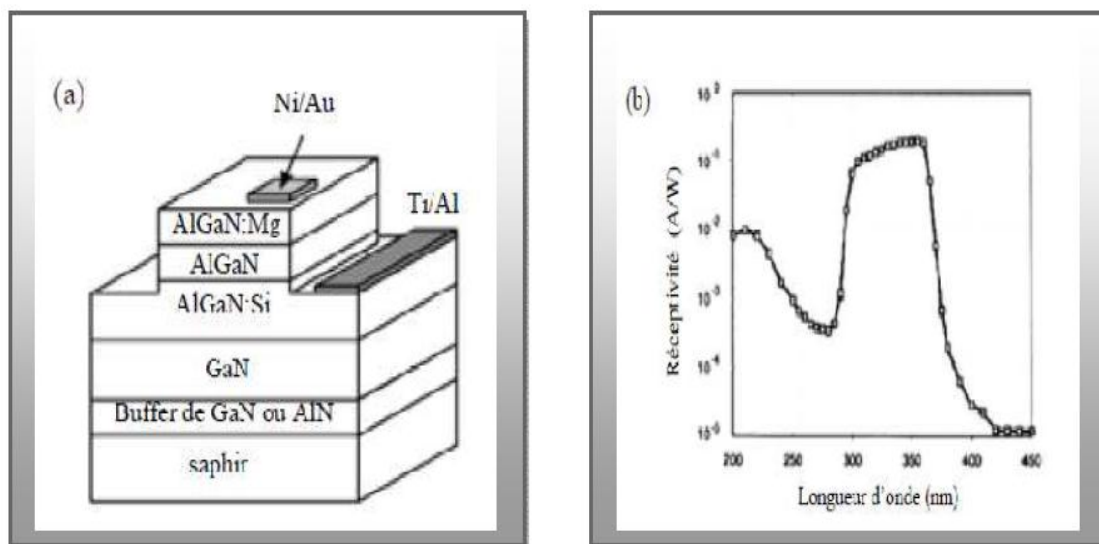


Figure II.6 : Structure (a) photodiode p-i-n ; (b) photodiode réceptivité p-i-nAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN en fonction de la longueur d'onde, à x=0.28 selon E. Munoz [69].

## II.4. Contacts en métal.

### II.4.1. Ohmiques contacts.

Un contact ohmique doit être établi afin de construire des composants électroniques. La capacité de rétablir ou d'injecter un courant dans la zone d'intérêt sans ajouter de résistance à la circulation du courant est en fait requise. Pour qu'un semi-conducteur de type N ait un bon contact ohmique, il doit être suffisamment dopé et avoir un faible travail de sortie du métal

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat violets.

(qui est intrinsèque à chaque métal) afin qu'il n'y ait aucune obstruction à la circulation des électrons. Il existe plusieurs études sur les contacts ohmiques de GaN [72], la plupart se concentrant sur une seule paire de métaux, généralement une relation entre le titane et l'aluminium. De manière générale, Les épaisseurs employées varient de 20 à plusieurs centaines de nanomètres pour le Ti et de quelques centaines pour l'Al. Le tableau II.1 présente une énumération des métaux couramment utilisés en tant que contacts ohmiques sur le GaN.

Métal	Type de GaN	Epaisseur en nm	Recuit (°C) en atmosphère	Durée de recuit	Résistance spécifique de contact ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
TiAl	N	300/700	600	$\phi$	$\phi$
TiAl	N	20/100	900, N <sub>2</sub>	30s	$8 \cdot 10^{-6}$
TiAl	N	$\phi$	600, N <sub>2</sub>	60s	$5-8 \cdot 10^{-8}$
TiAlReAu	N	15/60/20/50	750, N <sub>2</sub>	60s	$1.3 \cdot 10^{-6}$
TiAlTiAu	N	20/100/40/100	750-900, N <sub>2</sub>	60s	$3 \cdot 10^{-5}$
TiAlTiWAu	N	20/100/40/100	750-900, N <sub>2</sub>	60s	$2.3 \cdot 10^{-5}$
NiAu	P	5/5	500, N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	10min	$4 \cdot 10^{-6}$
NiAu	P	10/40	500, N <sub>2</sub>	20min	$7 \cdot 10^{-3}$
AuNiAu	P	4/2/4	500, N <sub>2</sub>	10min	$1.2-1.4 \cdot 10^{-1}$
PtAu	P	50/50	$\phi$	$\phi$	$5 \cdot 10^{-4}$
PtAl	P	2/150	$\phi$	$\phi$	$1 \cdot 10^{-3}$
pt	P	150	$\phi$	$\phi$	$2.8 \cdot 10^{-4}$

Tableau II.1 : Liste des métaux utilisés comme contacts ohmiques sur GaN[72].

Pour des circuits ayant une température comprise entre 400°C et 900°C, on observe fréquemment que la résistance de contact spécifique obtenue varie entre  $1 \times 10^{-4}$  et  $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ . Ces valeurs suggèrent la possibilité de développer des composants présentant un contact ohmique de haute qualité, tandis que les paramètres expérimentaux s'alignent parfaitement avec les méthodes traditionnelles employées dans le secteur de la microélectronique.

### II.4.2. . Schottky contacts.

Le cœur de notre construction est le contact Schottky. La hauteur de la barrière sera déterminée par cette interaction, qui sera faite par les porteurs responsables. En opposant le moins de résistance possible à leur passage, ce contact devrait permettre aux porteurs de passer en quelque sorte pour la tension de polarisation donnée. En d'autres termes, pour une polarisation maximale, cette barrière doit être suffisamment imperméable au flux de porteurs. Les hauteurs de barrière rapportées dans la littérature prennent en compte une variété de valeurs. Ces variations semblent être liées à un certain nombre de mécanismes de conduction

## **Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.**

ainsi qu'à des facteurs relatifs au matériau et aux processus de fabrication, tels que des défauts dans la couche épitaxiée, la qualité du nettoyage ou la rugosité. La recherche a permis de déterminer des hauteurs de barrière plus ou moins robustes. Les métaux avec un travail de sortie significatif ( $\phi_m > 4,5$  eV) sont généralement sélectionnés comme candidats pour une barrière de Schottky.

Selon Binari et al., un contact en titane avec un faible travail de sortie ( $\phi_m = 4,3$  eV) et une hauteur de barrière de 0,59 eV est inutilisable pour un composant Schottky de 600 V. La barrière "Platine", connue pour produire de fortes valeurs de barrière Schottky en raison de sa haute valeur de sortie ( $\phi_m = 5,65$  eV), a été le centre de recherche de Mohammad et al. et d'autres équipes. Ils ont rapporté des hauteurs de barrière d'environ 1,1 eV [73]. Selon Khan et al. [73], la barrière « Or » ( $\phi_m = 5,1$  eV) a une hauteur de 0,91 eV. Moins fréquemment, d'autres barrières telles que le rhodium ( $\phi_m = 5$  eV), le ruthénium ( $\phi_m = 4,7$  eV), le palladium ( $\phi_m = 5,12$  eV), le cobalt ( $\phi_m = 5$  eV), le chrome ( $\phi_m = 4,5$  eV), l'iridium ( $\phi_m = 5,46$  eV), le molybdène ( $\phi_m = 4,6$  eV), le cuivre ( $\phi_m = 4,65$  eV), l'argent ( $\phi_m = 4,26$  eV), le tungstène ( $\phi_m = 4,5$  eV), ou même le plomb ( $\phi_m = 4,25$  eV) ont été étudiées [72]. Les valeurs clés obtenues sont illustrées dans le tableau II.2. Un grand nombre de recherches ont été effectuées concernant le nickel ( $\phi_m = 5,15$  eV), produisant des résultats comparables, et faisant état de hauteurs de barrière variant entre 0,6 et 1,15 eV [73]. Selon des études récentes [73], les siliciures ou nitrures de W, Ni, Ta, ou TiW pourraient constituer de potentiels candidats pour servir de barrière de Schottky sur le GaN.

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat violets.

Métal	Type de GaN	Épaisseur en nm	Recuit (°C) en atmosphère	Durée de recuit	Hauteur de barrière (eV)	Facteur d'idéalité n
Cr	N	100-150	O	O	0.53	1.05
Au	N	100-150	O	O	1.03	1.15
Ni	N	100-150	O	O	1.15	1.17
Ti	N	50	O	O	0.59	O
Au	N	65	300-500, N <sub>2</sub>	60s	0.73-0.83	1.29-1.84
Au	N	O	O	O	0.91	1.04
Pt	N	O	O	O	1.03-1.13	1.10-1.21
Pd	N	O	O	O	0.91-1.11	1.10-1.14
Rh	N	50	300-500, N <sub>2</sub>	60s	0.51-0.56	1.20-1.25
Rh/Au	N	25/25	300-500, N <sub>2</sub>	60s	0.62-0.84	1.12-1.73
Ni/Au	N	10/330	500, N <sub>2</sub>	5min	0.88	1.18
Ni/Pt/Au	N	10/30/300	500, N <sub>2</sub>	5min	1.09	1.12
Ni/Pd/Au	N	10/30/300	500, N <sub>2</sub>	5min	0.78	1.14
Ni/Mo/Au	N	10/30/300	500, N <sub>2</sub>	5min	0.54	1.02
Ni/Ir/Au	N	10/30/300	500, N <sub>2</sub>	5min	1.05	1.13
Ru/Au	N	25/25	300, N <sub>2</sub>	60s	0.99	1.28
Cu/Au	N	50/25	300, N <sub>2</sub>	60s	0.77	1.20
W/Pt/Au	N	70/20/80	600, N <sub>2</sub>	O	O	O
TiWN <sub>x</sub>	N	200	650-850, N <sub>2</sub>	10s	0.62-0.76	1.14-1.54
WN <sub>x</sub>	N	200	650-850, N <sub>2</sub>	10s	0.8	1.09
WN	N	O	300-800	60s	1.07-1.21	1.24-1.42
NiSi	N	O	600	1h	0.8-1	1.15
Pd/Mo	N	30/30	300-600, N <sub>2</sub>	60s	0.78	1.4
Pd/Au	N	30/30	(-)183(+)137	O	0.23-0.97	3.5-1.9
Pt/Au	N	80/120	300-500, N <sub>2</sub>	60s	0.79-0.96	1.80-1.16
Pt/Au	N	30/100	300	O	1.05	1.01
Pt/Ti/Au	N	30/5/100	300	O	1.18	1.02
Ag	N	150	O	O	0.7	1.57
Pb	N	150	O	O	0.72	1.28
TaN	N	O	400-800, N <sub>2</sub>	10min	0.67-0.81	1.79-2.66

Tableau II.2 : métaux utilisés sur le GaN comme contact redresseur [73].

### II.5. Dopage.

#### II.5.1. Problématique.

Pour fabriquer des dispositifs optoélectroniques à base de semi-conducteurs, il est nécessaire de réguler la quantité d'impuretés résiduelles dans le matériau et de maîtriser l'intégration des impuretés spécifiquement pour le dopage n et p. Le dopage est généralement réalisé par trois méthodes : l'intégration pendant la croissance, la diffusion à l'état solide et l'implantation ionique. Des questions spécifiques, telles que celles impliquant les nitrures, font néanmoins encore l'objet de recherches approfondies. En effet, la complexité énorme du dopage de type P constitue un obstacle à l'avancement des diodes et des détecteurs UV.

## **Chapitre II :Photodétecteurs Ultrat Violets.**

### **II.5.2. Dopage de catégorie n**

La concentration en porteurs libres dans les nitrures du groupe III, due au dopage résiduel de type n, est approximativement de l'ordre de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  [74]. Certaines impuretés, notamment le Si et l'O, sont principalement responsables de ce dopage résiduel. Une variété de substances peuvent être utilisées pour le dopage de type N, cependant la silice est la plus largement utilisée. Dans le GaN, on retrouve principalement les atomes de Si sur les emplacements occupés normalement par le Ga, et le rayon de covalence du Si est plus similaire à celui du Ga qu'à celui du N [75]. L'effet de localisation des porteurs se renforce en fonction de la quantité d'aluminium présente dans les alliages non dopés  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ; lorsque la concentration atteint 50%, l'alliage tend à devenir moins semi-conducteur et davantage isolant. Lorsque ces alliages à forte teneur en aluminium sont dopés avec du silicium, une augmentation significative de la conductivité est observée à partir de  $[\text{Si}] > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Il est maintenant connu que les alliages  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  existent pour toutes les teneurs en aluminium, y compris 100% (AlN) [76]. Il est crucial de noter, cependant, qu'il existe une limite supérieure au dopage au silicium de type n de l'AlN. Un phénomène d'auto-compensation se produit et l'AlN redevient résistant si la concentration atomique de ce dernier dépasse  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [77].

### **II.5.3. Dopage de catégorie p.**

Notamment, le dopage à l'azote de type « p » présente des difficultés. Malgré l'étude d'autres accepteurs tels que le Li, le Na, le K, le Be, le Zn et le Ca, c'est le magnésium qui semble être le plus efficace grâce à sa solubilité supérieure dans le GaN [78]. Ainsi, à température ambiante, seul un petit pourcentage d'atomes de magnésium sont ionisés. Une concentration typique de magnésium de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  correspond à une concentration de trous d'environ  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [79]. De plus, les atomes de ce dernier ont tendance à s'accumuler sur les centres de dislocations, laissant derrière eux des zones de granite avec des propriétés électriques élevées. De plus, la qualité cristalline du matériau dopé se détériore car le ce semi-conducteur facilite la manifestation des défauts structurels (inclusions, domaines d'inversion) [80]. Fréquemment présent tout au long de la croissance, l'hydrogène joue également un rôle significatif dans le dopage du magnésium. Si la MOCVD (croissance par dépôt en phase vapeur avec précurseurs organométalliques) est utilisée, les atomes de magnésium doivent

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultraviolets.

être activés par rayonnement électronique ou recuit thermique sous  $N_2$  pour briser les complexes  $M_g-H$ .

Cependant, la présence d'atomes d'hydrogène favorise l'intégration du magnésium sans que l'hydrogène lui-même soit intégré lors de la croissance par épitaxie de jets moléculaires (MBE). Le taux d'incorporation est également fortement dépendant de la polarité de la surface; dans ce cas, la polarité du gallium est la plus avantageuse par rapport à celle de l'azote, puisqu'elle contient 30 fois plus d'atomes [81]. Cependant, l'état de l'art évolue rapidement, et les avancées dans le dopage de type P sont assez encourageantes. Depuis 1999, une équipe des États-Unis a annoncé avoir réussi à doper l' $Al_{0,09}Ga_{0,91}N$  avec une concentration en magnésium de  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [82]. En 2002, d'autres chercheurs américains ont fait état d'un dopage réussi avec des concentrations en aluminium variant de 0 à 27 %. La première apparition d'une diode comportant une couche p dopée  $Al_{0,5}Ga_{0,5}N$  a été constatée aux États-Unis en 2003. Enfin, en dopant les couches d' $Al_xGa_{1-x}N$  avec du magnésium, dont la teneur en aluminium dépasse 53%, des chercheurs japonais ont pu créer des conducteurs en 2004 [83]. Néanmoins, il est incertain de savoir comment les concentrations augmenteraient davantage, et les expériences de dopage de l' $AlN$  ont révélé qu'une très petite proportion d'atomes de magnésium (environ  $10^{-9}$ ) étaient activés à température ambiante [84]. Diverses stratégies ont été et continuent d'être examinées pour optimiser le dopage au magnésium dans les nitrures.

**Co-dopage :** En comparaison avec le dopage classique au magnésium, le codopage Mg-O dans le GaN offre une multiplication par dix de la densité de trous libres ( $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). La résistance diminue donc de  $8 \Omega \text{ cm}$  à  $0,2 \Omega \text{ cm}$ . Pour ce qui est des alliages, le codopage Mg-O dans  $Al_{0,08}Ga_{0,92}N$  a permis d'obtenir des niveaux de dopants de  $[Mg] = 1,3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et  $[O] = 3,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , ce qui équivaut à une concentration en trous de  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  [86].

**Dopage modulé spatialement :** Le dopage spatial, aussi appelé dopage  $\delta$ , booste la conductivité de l'échantillon et optimise la qualité du matériau (en minimisant la densité de défauts de compensation et de dislocation). Cette technique a engendré une densité de trous de  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  dans  $Al_{0,27}Ga_{0,73}N$  [87].

**Réalisation de super-réseaux :** L'ionisation profonde des accepteurs résulte de l'oscillation périodique des bandes causée par les effets de la polarisation spontanée et du champ piézoélectrique dans un super-réseau. Une accumulation de porteurs dans les nappes de trous en résulte. Par rapport au massif, la concentration de porteurs est énormément augmentée. Une telle concentration de trous supérieure à  $2,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  a été obtenue dans  $Al_{0,2}Ga_{0,8}N$  [88].

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

### II.6. Transports de phénomènes dans les semi-conducteurs.

Selon les trois degrés de liberté, les porteurs peuvent se déplacer librement à l'équilibre thermodynamique. Pour maintenir l'équilibre, leur énergie chimique doit être équivalente à leur énergie thermique. D'après la théorie de l'équipartition de l'énergie, on obtient une valeur de  $\frac{1}{2} kT$  d'énergie pour chaque degré de liberté. L'équilibre est donc représenté par l'équation ci-dessous :

$$\frac{1}{2} m_n v_n^2 = \frac{3}{2} kT \quad (\text{II-2})$$

Or que  $m_n$  ; la masse effective d'un électron,  $v_n$  ; la vitesse thermique moyenne des électrons (107cm/s) et  $K$  ; la constante de Planck .

Deux phénomènes de transport majeurs sont observés dans un semi-conducteur, au-delà de l'agitation thermique, liés à la mobilité des porteurs de charge (électron et trou). Ces mouvements sont provoqués soit par un gradient de concentration de charges, soit par l'effet d'un champ électrique. Dans le premier cas, il se produit une dérive de charges, tandis que dans le second, il se produit un phénomène de diffusion. Selon l'équation II-, les paramètres qui définissent ces deux formes de transport sont la mobilité ( $\mu$ ) et la diffusivité ( $D$ ).

$$\mu_{np} = q \frac{\tau_c}{m_{n,p}} [cm^2/V_s] \quad (\text{II-3})$$

Or que  $q$  ; la charge élémentaire de l'électrons ,  $m_{np}$  ; la masse effective du porteur et  $\tau_c$  le temps moyen écoulé entre deux collisions, appelé "le temps libre moyen" (1 ps environ).

Un indicateur qui souligne l'importance de l'effet d'un champ électrique sur le déplacement d'un porteur est sa mobilité.

Ici, les interactions avec les impuretés ionisées et les vibrations du réseau cristallin sont considérées dans le cadre des mécanismes de collision. Le terme « collision » se rapporte à toute interaction qui altère la trajectoire des porteurs et survient fréquemment en parallèle avec un transfert d'énergie vers les atomes de la structure cristalline. La mobilité offre la possibilité de quantifier la vitesse de déplacement d'un électron sous l'effet du champ électrique appliqué  $\zeta$  ;

$$v_D = \mu_{n,p} \zeta \quad (\text{II-4})$$

La formule suivante est utilisée pour obtenir la densité de courant globale de la dérivée  $J$  Dérive.

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

$$J_{Dérive} = ( \mu_{n,p} + q_p \mu_p ) \xi \quad (\text{II-5})$$

$$\mu = \frac{vd}{E} \quad (\text{II-6})$$

- $vd$  = vitesse de dérive (m/s)
- $E$  = champ électrique (V/m)

Ainsi, le mécanisme de diffusion dépend de la présence d'une variation spatiale dans la concentration des charges plutôt que d'un champ électrique. Les charges se déplacent d'une zone où la concentration est élevée vers une zone où la concentration est moins importante. Le coefficient de diffusion  $D$  décrit la relation entre le gradient de concentration  $dn / dx$  et le flux de charge qui en découle. Le calcul de la densité du courant de diffusion  $J_{Diff}$  se fait de la manière suivante :

$$J_{Diffnp} = q D_{n,p} \frac{D_{n,p}}{dx} \quad (\text{II-7})$$

La relation d'Einstein établit un lien entre les deux mécanismes de transport,  $\mu$  et  $D$  :

$$D_{n,p} = \left[ \frac{KT}{q} \right] \mu_{n,p} \quad (\text{II-8})$$

Pour le cas des électrons et des trous, l'intensité du courant global résultant d'un champ électrique et d'un gradient de concentration est déterminée en cumulant les contributions liées à la dérivation et à la diffusion, respectivement.

### **II.6.1. Incorporation de charges.**

On peut parvenir à l'équilibre thermodynamique en se basant sur la relation  $n.p = ni^2$ . Si davantage de charges électriques sont insérées dans le semi-conducteur, alors on a  $p.n > ni^2$ . L'expression « injection de charges » désigne le processus consistant à introduire un surplus de charges. Il y a différentes méthodes pour introduire des charges, comme l'excitation optique ou la polarisation directe d'une jonction, etc. Pour les électrons et les trous, l'écart des charges injectées est identique, donc  $\Delta p$  est égal à  $\Delta n$ .

L'injection faible se définit comme une situation où l'excès de porteurs de charge est insignifiant par rapport au dopage, autrement dit  $\Delta p = \Delta n \ll ND, A$  en fonction du type de couche concernée.

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat violets.

### II.6.2. Niveaux quasi-Fermi Injection de charges.

Dans le cadre de l'injection ou de l'extraction d'électrons ou de trous par des moyens optiques ou électriques, les concentrations des porteurs chargés hors de l'équilibre thermodynamique sont définies en termes des quasi-niveaux de Fermi. Afin d'avoir un équilibre thermodynamique avec une densité égale de porteurs libres (un état hors équilibre), ces quasi-niveaux de Fermi représentent l'emplacement que devrait avoir le niveau de Fermi (typique). Ils servent de remède au déséquilibre. Les conditions d'équilibre changent lorsqu'une jonction p-n est soumise à une tension de polarisation  $V$ . En effet, les énergies des électrons de part et d'autre de la jonction ne sont pas identiques, elles diffèrent plutôt d'une mesure  $qV$ . La différence d'énergie,  $E_{Fp} - E_{Fn} = qV$ , définit la séparation des quasi-niveaux de Fermi pour les électrons et les trous en dehors de la région de déplétion.

### II.7. Recombinaison et production.

#### II.7.1. Modèle SRH (Shockley-Read-Hall).

Ce modèle englobe la génération-recombinaison indirecte des porteurs via des états localisés au sein de la bande interdite. Il est possible de réaliser plusieurs transitions entre les bandes de valence et de conduction et les centres de génération-recombinaison (Figure II.7). Ces états localisés sont soit remplis par un électron, soit inoccupés.

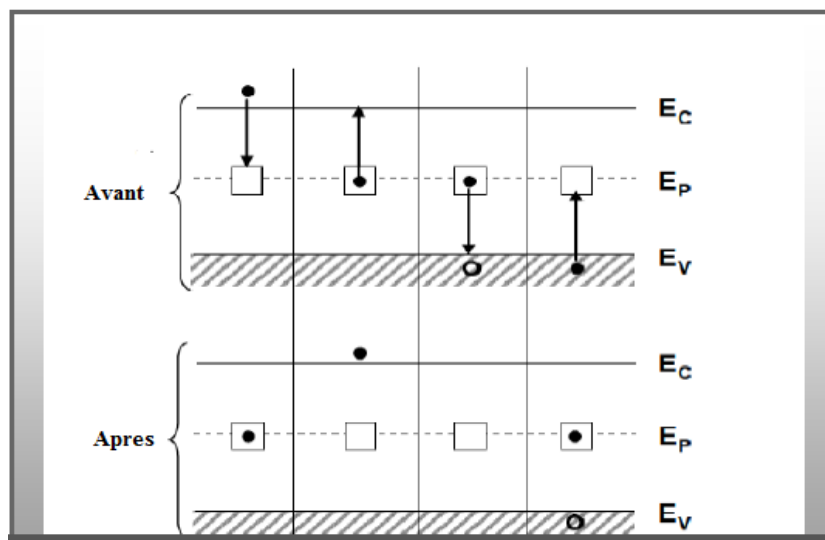


Figure II.7 les phénomènes de capture et d'émission d'électrons et de trous de la bande de valence à la bande de conduction.

Si un électron de la bande de conduction est piégé par un centre d'énergie  $E_p$ , le taux de capture peut être déterminé en fonction du temps et du volume  $C_n$ . Ce dernier est déterminé par la densité des centres disponibles ( $N_t(1-F)$ ) et des électrons libres  $n$ .

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

$$C_n = nv_n\sigma_n N_t [1 - F] \quad (\text{II-9})$$

La densité d'états localisée à l'énergie  $E_p$  est désigné par  $F$ , la fonction de Fermi qui décrit la probabilité qu'un électron occupe un centre d'énergie  $E_p$ , où  $v_n$  est la vitesse thermique de l'électron. Pour ce qui est de l'efficacité, la partie consacrée à l'efficacité de capture des électrons explique dans quelle mesure un centre est capable de capturer un électron. Il s'agit donc d'une évaluation de la distance à laquelle un électron doit se rapprocher pour être positionné.

Afin de capter un signal de la bande de valence, cela donne :

$$C_p = pv_p\sigma_p N_t F \quad (\text{II-10})$$

Dans ce cas, on doit tenir compte de la densité des sites occupés par des électrons ( $N_t.F$ ) et de la densité des trous libres. Le terme «  $\sigma_p$  » se rapporte à la partie qui saisit réellement un point. La proportionnalité entre le taux d'émission vers la bande de conduction et la densité des centres occupés par un électron est établie.

$$Ex_n = e_n N_t F \quad (\text{II-11})$$

Dans ce scénario, on calcule la probabilité de libération d'un électron en supposant que les taux de capture et de libération d'un type de porteur sont équivalents à l'état d'équilibre thermodynamique. On peut se servir de l'équation II.12 pour calculer la probabilité d'émission dans le cas où  $C_n$  équivaut à  $Ex_n$  et que la densité des électrons  $n$  est établie grâce à l'équation II.11.

$$n = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_f}{KT}\right] \quad (\text{II-12})$$

$$e_n = v_n \sigma_n N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_p}{KT}\right] \quad (\text{II-13})$$

Le dernier exemple concerne l'émission d'un photon vers la bande de valence, ce qui correspond en fait à la capture d'un électron de cette bande par un centre vide. Un trou est créé lorsqu'un électron se déplace à travers la bande de valence. En suivant la même logique que précédemment :

$$E_{xp} = e_p N_t (1 - F) \quad (\text{II-14})$$

$$e_p = v_p \sigma_p N_p \exp\left[-\frac{E_p - E_v}{KT}\right] = v_p \sigma_p N_v \exp\left[\frac{E_i - E_p}{KT}\right] \quad (\text{II-15})$$

## Chapitre II : Photodétecteurs Ultrat Violets.

La probabilité et, par conséquent, le taux d'émission d'électrons (c'est-à-dire les trous) augmentent à mesure que le centre d'énergie  $E_p$  s'éloigne de la bande interdite  $E_i$  et se rapproche de la bande de conduction (c'est-à-dire la valence). En fait, la différence d'énergie entre  $E_i$  et  $E_p$  crée une augmentation exponentielle de la probabilité d'émission. L'un des processus d'émission devient de plus en plus probable au détriment de l'autre lorsque  $E_p$  est en dehors de la bande interdite. Cela rendra en fait le centre de recombinaison moins efficace. Ceci est dû au besoin que le trou soit saisi immédiatement après qu'un électron ait été absorbé par un centre d'énergie  $E_p$  pour finaliser le processus de recombinaison. Cependant, il est plus probable que l'électron soit orienté vers la bande de conduction après sa capture si le centre  $E_p$  se trouve près de la bande, par exemple. Dans ce cas, le processus de recombinaison n'est pas entièrement achevé. On a constaté qu'un centre de recombinaison fonctionne plus efficacement lorsque les deux probabilités d'émission sont équivalentes, ce qui indique que son niveau d'énergie  $E_p$  est proche de la largeur de la bande interdite [89]. Ces centres seront aussi plus performants pour créer des charges. Pour préserver l'équilibre électrique, il est essentiel que la différence entre les taux de capture et d'émission de chaque porteur soit identique.

$$C_n - Ex_n = C_p - Ex_p \quad (\text{II-16})$$

L'équation suivante (II-16) fournit la valeur de la fonction d'occupation F :

$$\frac{nv_n\sigma_n + e_p}{nv_n\sigma_n + pv_p\sigma_p + e_p + e_n} \quad (\text{II-17})$$

On peut facilement calculer le taux de recombinaison net de la façon suivante.

$$C_n - E_n \text{ ou } C_p - E_p \quad (\text{II-18})$$

Cette équation sera utile pour le futur afin de calculer la densité du courant d'obscurité d'une diode [89].

### **II.8. Conclusion.**

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents types de photodétecteurs ultraviolets ainsi que leurs différents types d'électrodes et différents dopages introduits dans ces dispositifs et les phénomènes de transport dans les semiconducteurs qui les composent. Et à la

## **Chapitre II :Photodétecteurs Ultrat Violets.**

fin, nous avons décrit le modèle physique de Shockley-Read-Hall (SRH) qui est utilisé pour la réalisation des composants électroniques.

*Chapitre I. I. I. : Methodes de  
Croissance*

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.1. Introduction.

Ces dernières années, les capteurs de radiation ultraviolette ont attiré une attention considérable [90]. La détection UV trouve des applications dans le domaine civil, comme les dosimètres humains pour les environnements à forte exposition UV et la détection d'incendies, mais aussi dans le domaine militaire, notamment pour l'identification de missiles grâce à leur trajectoire ou même leur guidage [91-93]. Les nitrides des éléments de la colonne III suscitent un vif intérêt pour la détection optique, étant donné que l'écart de bande entre le GaN, l'AlN et leurs alliages AlGaN peut fluctuer de 1,9 eV (650 nm) à 6,2 eV (200 nm), et ils affichent des performances solides [94,95]. On emploie différentes tactiques de développement. Actuellement, l'épitaxie par jets moléculaires (EJM) et l'épitaxie en phase vapeur aux organo-métalliques (EPVOM) sont les deux techniques les plus couramment employées pour le dépôt de nitrides. Nous nous limiterons à l'exposé de ces deux techniques. Avant toute expansion, il est nécessaire de sélectionner un substrat qui convient le mieux à la couche épitaxiée souhaitée.

### III.2. Croissance épitaxiale : concepts et méthodes.

Quand un cristal monocristallin est déposé sur un autre cristal du même type, il établit l'orientation des deux cristaux (le lien d'épitaxie). On distingue différents types d'épitaxie, chacun présentant des caractéristiques distinctes. L'épitaxie en phase liquide, où les particules à déposer sont dispersées dans un liquide (comme du gallium en fusion).

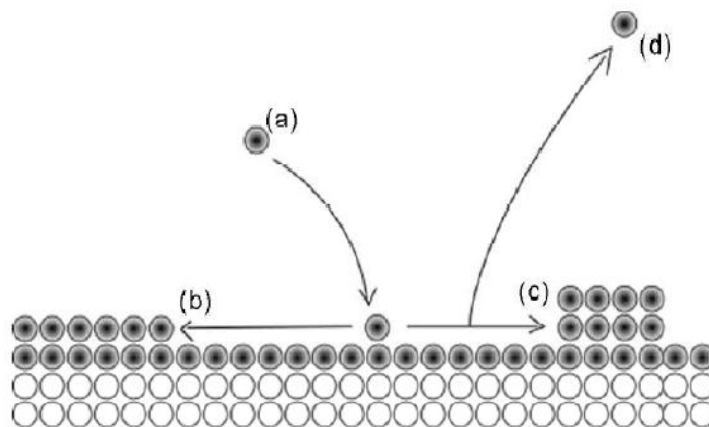


Figure III-1 : Croissance épitaxiale.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.2.1. Expansion sur du saphir.

Maruskas et Tietjen ont été les premiers à utiliser le saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) comme substrat pour l'hétéroépitaxie du GaN en 1969, en recourant à l'épitaxie hybride en phase vapeur (HVPE) [96]. Malgré une différence marquée entre le coefficient de dilatation thermique et le paramètre de maille du GaN, le saphir est désormais couramment utilisé comme substrat. Ces fluctuations provoquent des déplacements, des défauts de montage et d'autres imperfections dans le matériau GaN, ce qui réduit la performance des dispositifs. Actuellement, la résolution de ce problème implique l'abandon de l'interface en plaçant des coussins considérables (plusieurs microns). Par ailleurs, le coût élevé du saphir rend son emploi à une échelle étendue impraticable.

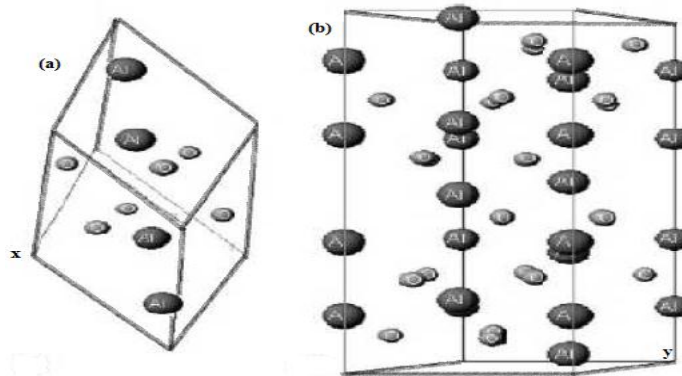


Figure III-2 : La disposition élémentaire de la maille du saphir est (a) rhomboédrique et (b) hexagonale [97].

### III.2.2. Expansion sur AlN.

Grâce à sa large bande interdite (6,2 eV), ses qualités diélectriques et piézoélectriques supérieures, sa conductivité thermique élevée, sa remarquable stabilité et son expansion minimale à haute température, le nitrure d'aluminium (AlN) représente un substrat idéal. Toutefois, le principal reproche à l'AlN est qu'il n'est pas possible de le produire en masse pour une application industrielle. Il est surtout utilisé comme matériau tampon, car il n'existe pas en tant que couche épitaxiée dans le saphir. En outre, les films d'AlN ont servi à fabriquer des dispositifs acoustiques en surface, des résonateurs mécaniques, des transducteurs piézoélectriques et des détecteurs de gaz [98].

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.2.3. Expansion sur Si.

Du fait de ses propriétés physiques, de sa qualité cristalline supérieure et de son coût raisonnable, la silice (Si) constitue un substrat particulièrement prisé pour les composants utilisant le GaN. Cela permet aussi l'intégration de composants optoélectroniques en GaN avec des éléments électroniques en silicium. Il se trouve dans l'espace symétrique et possède une structure cubique qui rappelle celle du diamant. On peut représenter sa structure par deux sous-réseaux cubiques à faces centrées (cfc) qui s'entrecroisent et qui sont dimensionnés à une distance équivalente à un quart de la diagonale de la maille élémentaire. On peut observer la configuration du cristal de silicium dans différentes orientations sur la Figure III-3. Le substrat fréquemment adopté pour cultiver le GaN en forme de wurtzite est Si(111) [97].

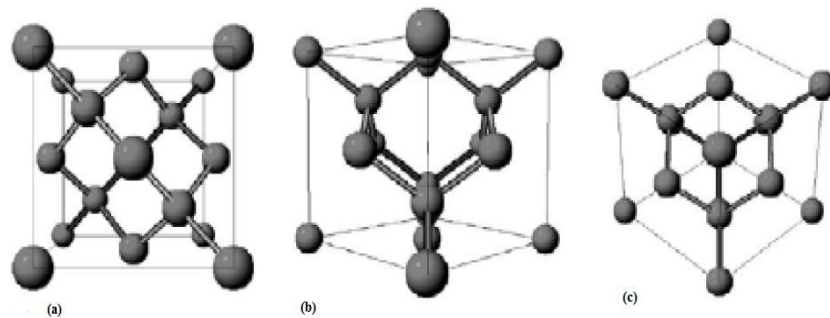


Figure III-3 : Diagramme de la maille élémentaire du silicium selon les directions (a) [001], (b) [011], et (c) [111] [97].

Lorsque le GaN est directement cultivé sur Si(111), il acquiert la polarité N, cependant lorsqu'un coussin tampon est introduit dans l'AlN, il acquiert la polarité Ga [97].

### III.2.4. Expansion sur SiC .

On parle souvent du carbure de silicium (SiC) comme étant un substrat alternatif au saphir. On connaît l'existence de plus de 250 polytypes (versions unidimensionnelles des structures d'empilement des plans biologiques) de SiC. Chaque polytype a pour élément essentiel un tétraèdre de carbone contenant un atome de silicium en son centre, ou l'inverse, comme illustré par la Figure III-4.

### Chapitre III Méthodes de croissance.

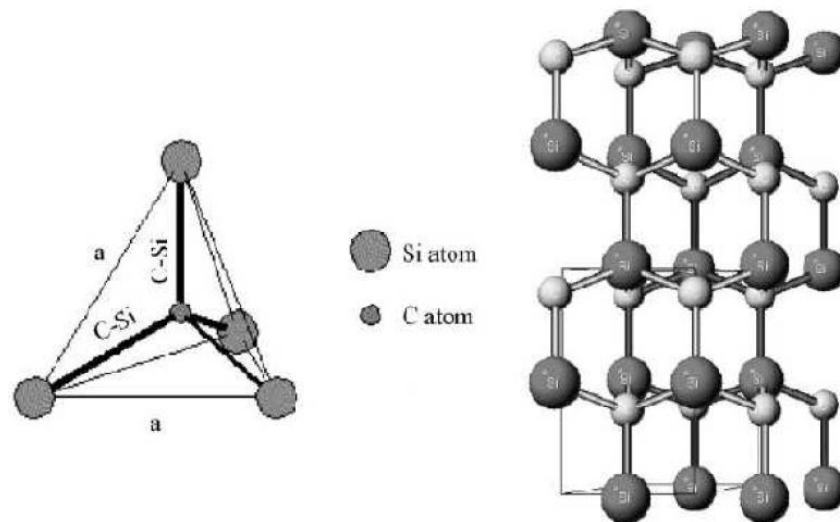


Figure III-4 : Maille élémentaire de SiC avec 4 atomes de silicium et un atome de carbone en son centre [97].

Observation : la structure d'émission du 2H-SiC. L'axe vertical du graphique représente l'orientation [0001] du cristal [97]. On peut ajuster la polarité de l'épitaxie du GaN en présentant ce substrat sous ses deux polarités, Si et C. En outre, le SiC présente plusieurs désavantages :

L'un des premiers est que la faible mouillabilité du GaN empêche la croissance directe. On peut mettre en place une couche intermédiaire d'AlN ou d'AlGaIn pour remédier à cette difficulté ; néanmoins, cela entraîne un accroissement de la résistance entre la couche de GaN et le substrat.

Le second désavantage du SiC est qu'il ne s'accorde pas avec le GaN. Malgré qu'elle soit bien infectée à celle du saphir, elle est néanmoins suffisante pour provoquer plusieurs défauts dans la couche épitaxiée. Sa rugosité significative, d'environ 1 nm RMS (0,1 nm RMS pour le saphir), représente le troisième inconvénient du SiC et pourrait être responsable des défauts présents dans la couche de GaN. On peut lisser la surface et diminuer le nombre de défauts grâce à la gravure chimique ou au recuit haute température sous hydrogène, néanmoins, ces deux techniques impliquent des phases supplémentaires de production et engendrent une hausse du coût du substrat [99].

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.2.5. Expansion sur ZnO.

En raison de son paramètre de maille similaire à celui du GaN (3,25 Å, soit une discordance de maille de 1,9 %), l'oxyde de zinc (ZnO) est également apparu comme substrat. Il se trouve sous la structure wurtzite. L'énergie de stabilisation du niveau de Fermi se trouve seulement à 0,2 eV sous la bande de conduction du ZnO, ce qui entraîne une densité électronique importante sans besoin de dopage délibéré, à l'instar des nitrures [100]. L'illustration III-5 présente le schéma de bandes du ZnO en plus de celui d'autres semi-conducteurs du groupe II-VI. Ainsi, le ZnO peut agir en tant que contact N pour la récupération des électrons. Actuellement, le ZnO peut être acheté sous forme de substrat massif, mais son coût élevé [101] limite son utilisation à grande échelle. Il peut servir de couche intermédiaire entre le GaN et un autre substrat afin de réduire les coûts tout en préservant les bénéfices de ce matériau. Grâce à l'angle de 30° des dislocations qui favorise leur annihilation lors d'une rencontre, le ZnO possède une propriété exceptionnelle de diminuer la densité de défauts (dislocations) provoquée par l'incompatibilité de maille avec le substrat. Ceci justifie l'emploi du ZnO dans les structures en tant que couche intermédiaire entre le substrat et le GaN. Selon Li et al. [102], la croissance de couches d'InGaN contenant 43 % d'indium sur ZnO sans ségrégation de phase a été rapportée, ce qui pourrait faciliter la production de couches d'InGaN présentant une haute qualité cristalline. Un autre bénéfice du ZnO est que l'InGaN contenant 17 % d'indium est compatible avec le ZnO.

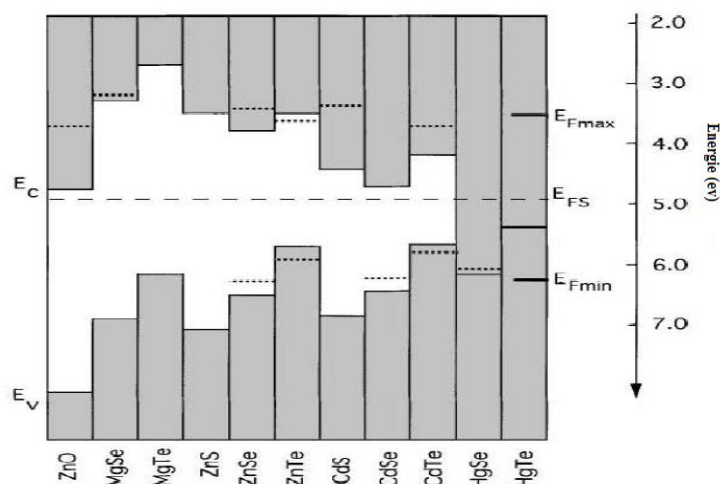


Figure III-5 : Position des bandes et du niveau de stabilisation du niveau de Fermi dans les composés II-VI [102].

## Chapitre III Méthodes de croissance.

Pour un matériau spécifique, les lignes en pointillés dénotent les positions du niveau de Fermi qui correspondent aux concentrations de trous et d'électrons les plus élevées rapportées [100].

### III.2.6. Expansion sur verre.

L'élaboration de cellules solaires sur verre est fascinante puisqu'elle diminue les dépenses liées aux matériaux et offre une multitude d'opportunités, comme des panneaux solaires intégrés dans les constructions. On distingue plusieurs variétés de verre, depuis le verre sodocalcique, employé dans les récipients ou les vitrages, jusqu'au verre à oxyde d'aluminium, utilisé pour les verres opaques. On trouve également le verre borosilicate (Pyrex) et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) [103]. En raison de leur coût inférieur, nous ne traiterons que du verre sodocalcique et du verre borosilicate dans la suite de notre propos. Le verre, ayant une structure amorphe, comporte de nombreux défauts et impuretés. Sa structure à l'échelle microscopique fait qu'il n'existe pas d'ordre sur de longues distances. La figure III-6 illustre un diagramme de structure cristalline d'un verre silicaté contenant des cations tels que le (Na, K ou Ca).

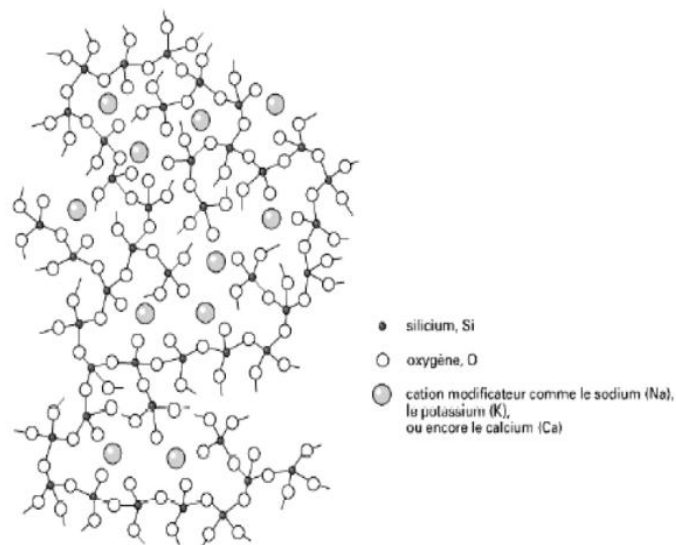


Figure III-6 : Un verre silicaté avec une structure cristalline qui contient des cations (Na, K ou Ca) [104].

On peut définir le verre par sa température de transition vitreuse, ou  $T_g$ , qui correspond à la température à laquelle le verre se transforme d'un état solide à un état fluide visqueux. Le verre sodocalcique se traduit approximativement par  $570\text{ }^\circ\text{C}$ , tandis que le verre borosilicate correspond à environ  $820\text{ }^\circ\text{C}$  [103]. On peut donc identifier trois principaux défis à relever

## **Chapitre III Méthodes de croissance.**

pour favoriser la croissance du GaN sur le verre. Le premier est l'émergence d'un matériau sur un substrat amorphe. Cela entraîne généralement une haute densité de défauts et des canapés multicristallins [105]. La faible température de transition des verres par rapport à la température de croissance du GaN est la deuxième. Pour obtenir un cristal de haute qualité, La croissance du GaN nécessite une température minimale de 800 °C, ce qui dépasse la température de transition des verres. Lorsque les substrats sont déformés et connaissent des modifications de leur structure cristalline, la qualité des coussins déposés sera restreinte. Le troisième défi réside dans la propagation de substances impures présentes dans le verre, susceptibles de se déplacer vers les couches de GaN et d'occasionner des défauts localisés. Selon un article de Nature Photonics [106], les chercheurs de Samsung ont développé des LED basées sur le GaN, quasi-monocristallines et intégrées sur du verre.

### **III.3. Méthodes d'expansion.**

#### **III.3.1. Oxygénation en phase vapeur organique (EPVOM).**

Cela implique d'appliquer la pyrolyse à la surface d'un substrat chauffé pour libérer de l'ammoniac, une source d'azote, et un composé organométallique. Pour GaN, les organométalliques les plus souvent utilisés sont le triéthylgallium (TEGa) ou le triméthylgallium (TMGa), et pour AlN, le triéthylaluminium (TMAI). Cependant, en raison de la réactivité extrêmement élevée des radicaux, l'utilisation de ces composés comme précurseurs peut entraîner une contamination par le carbone de la couche épitaxiée. Il semble que l'utilisation de TMGA comme précurseur soit directement responsable de plusieurs défauts électriquement actifs résultant de cette contamination. Dans l'EPVOM, le magnésium et la silice sont fréquemment utilisés pour obtenir des dopages de type P et de type N, respectivement. Typiquement, le biscyclopentadiényl ( $Cp_2Mg$ ) est la source de magnésium, tandis que le méthylsilane ( $MeSiH_3$ ) est la source de silicium. Le début de la croissance est l'un des facteurs influençant le développement d'un canapé de haute qualité. Par conséquent, Yoshida et al. ont démontré que L'amélioration de la qualité de la couche de GaN a été réalisée en appliquant une couche tampon d'AlN sur le substrat en saphir avant cette dernière. En suivant cette approche, Amano, Hiramatsu, Akasaki et leurs collaborateurs ont ultérieurement prouvé qu'il était possible de produire une couche de GaN de haute qualité sur saphir grâce à une méthode en deux phases. Lors de la première phase, une mince couche intermédiaire d'AlN ou de GaN est déposée à une température basse. On positionne ensuite le canapé principal à une température supérieure. La basse température de croissance pour la

### **Chapitre III Méthodes de croissance.**

couche tampon facilite la réduction de la désorption des espèces chimiques et optimise leur diffusion à la surface. Cela permet une distribution uniforme des atomes sur la surface du substrat, créant une haute densité de sites de nucléation qui soutiennent la croissance latérale saine de la couche primaire. La couche tampon est amorphe dans ces conditions de dépôt, et elle se cristallisera lorsque la couche primaire croîtra à une température plus élevée. L'épaisseur de la couche tampon, la rampe de température et la température de croissance finale de la couche principale sont les facteurs qui déterminent l'acquisition d'une couche de haute qualité en utilisant cette méthode. Une couche tampon trop épaisse ne permettra pas une cristallisation totale. Une sélection inappropriée de la rampe de température nuit à la couche tampon. Une température de croissance trop élevée favorise une mobilité accrue des atomes de surface, ce qui conduit à un regroupement dans une cavité et entraîne une croissance 3D inégale. Afin d'améliorer et de réarranger l'état de surface, le substrat est initialement soumis à une température élevée, dépassant les 1000°C. Il est exposé à cette température en même temps qu'un flux d'hydrogène ou d'ammoniac, Cela entraîne une « nitruration » de la surface qui favorise la nucléation de la couche tampon. Après cette procédure, une couche de tampon en GaN ou AlN est déposée à une température d'environ 550°C. Pour stabiliser sa surface, l'échantillon est par la suite chauffé sous un courant d'ammoniac à la température où se forme normalement la couche de nitrure primaire, habituellement autour de 1050°C. Par conséquent, la température pour le dépôt de la couche finale, il est essentiel de maîtriser des paramètres tels que le taux d'accroissement, la gestion de la stoechiométrie et l'épaisseur de la couche. Finalement, le cadre pour la croissance de ces canapés est assez limité. Pour finir, nous voulons souligner que cette technique de croissance offre des taux de dépôt remarquablement élevés (0,5  $\mu\text{m}/\text{min}$ ), des frais d'exploitation très faibles et une qualité de matériau à la fine pointe de la technologie. Son désavantage est qu'il peut générer des résidus issus de la décomposition des précurseurs, ce qui pourrait causer des impuretés dans les produits. Comme cette technique requiert des températures très hautes pour décomposer la molécule d'ammoniac, elle paraît moins appropriée pour l'expansion de la phase cubique du GaN, qui, de par sa stabilité face aux métaux, demande des températures de croissance plus réduites. Toutefois, plusieurs groupes sont réputés pour adopter cette méthode afin de déposer des cubiques, tout en opérant à des températures et pressions basses. Il y a ceux qui ont employé le GaAs comme substrat, et d'autres qui ont opté pour des pseudo-substrats 3CSiC/Si [107].

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.3.2. Synthèse par jets de molécules (EJM).

Les composants qui constituent le matériau épitaxié sont déposés sur un substrat chauffé lors d'une croissance par EJM. Ces composants, qui résultent de l'évaporation ou de la sublimation de sources solides, sont transportés vers le substrat sous forme de jets moléculaires ; par conséquent, ce processus nécessite l'utilisation d'un ultra-vide dans la structure. Les particules qui arrivent avec une certaine énergie sont adsorbées sur la surface, où elles ont la possibilité de se déplacer (voir Figure III-7). La durée durant laquelle les atomes demeurent sur la surface du substrat est dictée par sa température ; une température trop élevée favorisera la désorption des atomes. À la surface, les atomes se déplacent pour se regrouper avec un autre petit ensemble d'atomes ou pour former un noyau, qui constitue un tremplin déjà existant. Les noyaux poursuivent leur développement (l'étape de nucléation) pour atteindre une densité critique, à partir de laquelle de petites îlots peuvent commencer à se former. Un moment donné, les îlots fusionneront pour former une monocouche épitaxiale. Le film épitaxié final est le fruit de cette méthode itérative.

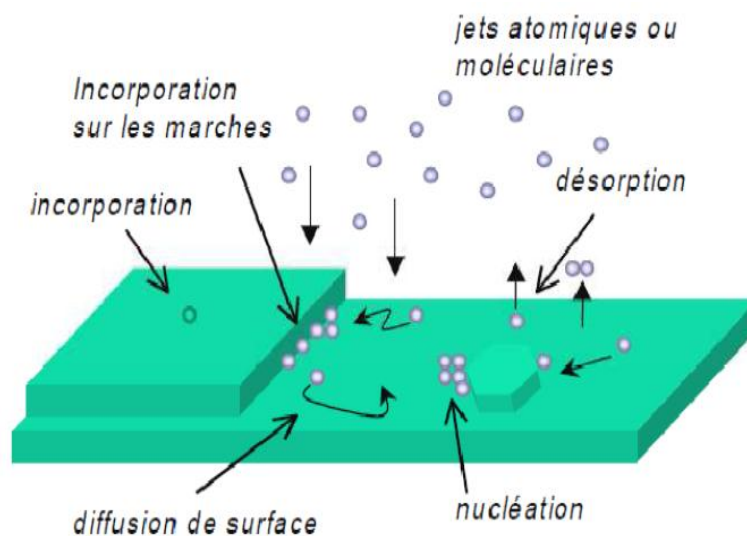


Figure III-7 :Modèle conceptuel de la croissance par épitaxie à jets moléculaires.

En ce qui concerne les nitrures, on extrait le gallium et l'aluminium atomiques par sublimation à partir de matières solides. En ce qui concerne l'azote, il provient d'un précurseur gazeux qui peut être soit de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), soit la molécule  $\text{N}_2$ . Dans cette situation, la molécule  $\text{N}_2$ , qui présente une grande stabilité chimique, est décomposée grâce à la radiofréquence (source RF d'azote) ou via la résonance électron-cyclotron (ECR).

## **Chapitre III Méthodes de croissance.**

traditionnelle, la température du substrat pour le dépôt de nitrures par EJM se situe généralement entre 450°C et 850°C. Ces températures, plutôt inférieures à celles de l'EPVOM, sont idéales pour la croissance des nitrures cubiques qui requièrent une température comprise entre 630°C et 700°C. Cette méthode offre divers bénéfices, tels que la possibilité de vérifier sur place la qualité structurale et l'épaisseur de la couche en utilisant la mesure RHEED (diffraction d'électrons à incidence rasante). Elle convient également parfaitement à la croissance d'hétérostructures requérant des interfaces abruptes, car elle offre un contrôle extrêmement précis de la quantité de chaque espèce intégrée. Il est possible de contrôler assez bien les dopages p et n, Parce que l'EJM s'appuie sur des sources de magnésium et de silicium d'une grande pureté. Il n'y aura pas d'intégration accidentelle de restes provenant d'une décomposition chimique dans la couche. Cependant, cette technique présente le désavantage de générer des taux de croissance relativement bas (quelques monocouches par minute). Un autre inconvénient réside dans le coût élevé de l'entretien d'une structure.

### **III.4. Nitrure d'aluminium de gallium AlGaN**

#### **III.4.1. Introduction.**

En raison des enjeux économiques et stratégiques importants liés aux diverses applications des semi-conducteurs au nitrure de gallium dans les domaines civils et militaires, une importance particulière a été accordée aux matériaux basés sur le nitrure d'éléments III (comme le GaN, l'InGaN et l'AlGaN). Le (Al,Ga)N solide est utilisé dans divers dispositifs : il agit comme une couche de confinement optique pour les lasers, comme une couche d'étalement du courant dans les diodes électroluminescentes, comme une couche active pour les photodétecteurs UV, et comme une couche génératrice d'électrons dans les transistors à effet de champ bidimensionnel, sans oublier son utilisation dans les appareils à ondes acoustiques de surface, entre autres . Il reste à déterminer les effets de la contrainte hétéroépitaxiale et de la variation du paramètre de champ cristallin en fonction de la composition. Le fait que les coefficients de courbure des trois gaps doivent être pris en compte est appuyé par la proximité des trois sommets de la bande de valence dans les nitrures et la variation de polarité du champ cristallin entre GaN et AlN.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.4.2. Propriétés du ternaire $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

Le semi-conducteur à base de « AlGaN » a attiré le plus d'intérêt parmi les alliages de la famille des nitrures (III-N), grâce à ses perspectives d'applications dans les hétérostructures AlGaN/GaN. Depuis la première mention d'une solution solide GaN-AlN en 1976 [108], plusieurs chercheurs ont réussi à synthétiser l'AlGaN. En 1978, Baranov [109] a réussi à obtenir de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  avec une concentration d'aluminium qui a atteint 45%. Les analyses par rayons X ont révélé que chacun des échantillons présente une conductivité de type n, avec une mobilité qui diminue proportionnellement à la fraction molaire  $x$  ; et ils renferment de petites zones cubiques d'AlGaN [110].

### III.4.3. Changement du gap d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de la proportion de mole $x$ (Al).

L'une des caractéristiques essentielles d'un alliage est la relation entre le gap et la composition. Selon l'équation (III.1), cet écart s'accroît avec la proportion molaire d'Al.

$$Eg_x = xEg(\text{AlN}) + (1 - x)Eg(\text{GaN}) - bx(1 - x) \quad (\text{III-1})$$

En remplaçant  $Eg(\text{AlN})$  et  $Eg(\text{GaN})$  par leurs valeurs à 300K, en utilisant un coefficient de courbure  $b = 1$ , dans l'équation (III.1), nous obtenons les formules suivantes [111] qui définissent le gap de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en fonction de  $x$  :

$$\left[ \begin{array}{ll} Eg1(x) = x^2 + 1.64x + 3.3eV & \text{(cubique)} \\ Eg2(x) = x^2 + 1.98x + 3.43eV & \text{(hexagonal)} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (\text{III-2}) \\ (\text{III-3}) \end{array}$$

La différence d'énergie se renforce, et le sommet de la bande de valence au point  $\Gamma$  se déplace vers le bas quand la concentration en aluminium s'accroît. Dans la figure III.8, nous démontrons l'évolution du gap d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  en relation avec le ratio de moles d'Al.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

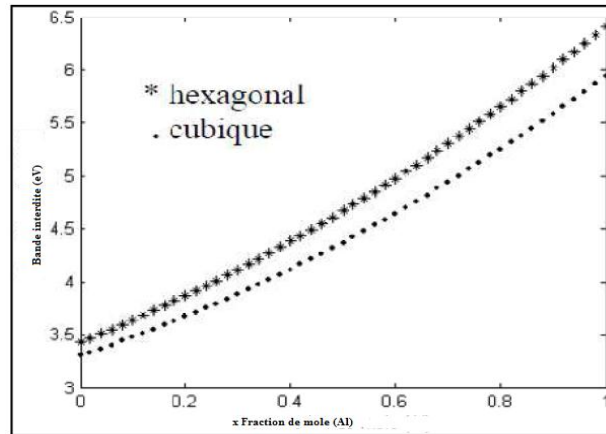


Figure III-8: Changement du bandgap dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , selon la proportion d'Al [111].

### III.4.4. Paramètre de courbure.

Dans l'expression phénoménologique de la bande interdite de l'alliage, le coefficient du terme parabolique est désigné comme le paramètre de courbure. Sa valeur fluctue en fonction des conditions de croissance, ce qui rend sa mesure complexe. Plusieurs études [112-123] ont examiné ce paramètre.

### III.4.5. Dopage.

Du fait des niveaux donneurs et accepteurs profonds liés à la composition en Al, le dopage du  $(\text{Al,Ga})\text{N}$  s'avère plus complexe que celui du GaN. Cependant, il n'y a pas de problème jusqu'à  $x \text{ Al} = 0.42$  pour le dopage n, et jusqu'à  $x \text{ Al} = 0.13$  pour le dopage p [124].

#### III.4.5.1. Dopage de de catégorie n.

Les nitrures des éléments du groupe III montrent une impureté résiduelle de type n, avec une concentration de porteurs libres qui est égale ou supérieure à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Ce dopage résiduel est principalement dû à la présence de certaines impuretés, telles que le Si et l'O. On peut recourir à diverses substances pour le dopage de type n, le silicium étant l'élément le plus couramment utilisé. Dans le GaN, la majeure partie des atomes de silicium se fixe sur les emplacements occupés par le gallium, car le rayon de covalence du silicium correspond davantage à celui du gallium qu'à celui de l'azote [124, 125]. Dans l'alliage  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  non dopé, l'effet de localisation des porteurs devient plus marqué à mesure que la quantité d'aluminium augmente. Cependant, lorsque la concentration dépasse 50%, cet alliage perd son caractère semi-conducteur pour se transformer en isolant. L'emploi du silicium pour doper

## **Chapitre III Méthodes de croissance.**

cet alliage riche en aluminium entraîne une notable amélioration de la conductivité de type n dès que la concentration en Si dépasse  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Nous maîtrisons à présent la manière d'intensifier les alliages  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  pour toutes les concentrations en aluminium, y compris 100% (AlN). Il est néanmoins crucial de noter qu'il existe un plafond au dopage par type n que peut réaliser le silicium. Si la densité atomique de ce dernier dépasse  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , un processus d'auto-compensation est initié, rétablissant ainsi la résistance de l'AlN.

### **III.4.5.2. Dopage de de catégorie p.**

Le dopage par les nitrures de type p est particulièrement complexe [124]. Différents accepteurs ont été examinés (tels que Li, Na, K, Be, Zn et Ca), mais il apparaît que le magnésium (Mg) est le seul efficace en raison de sa meilleure solubilité dans GaN. La difficulté principale du Mg réside dans son énergie d'activation élevée, qui s'accroît davantage avec la concentration en aluminium. Par conséquent, à température ambiante, seuls quelques pourcents d'atomes de Mg sont ionisés. Pour une densité typique de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , la concentration des lacunes est d'environ quelques  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  [125]. En outre, les atomes de Mg ont une propension à se regrouper au niveau des noyaux de dislocations, créant ainsi des zones déficientes en Mg autour d'eux dont les propriétés électriques subissent des modifications. La pureté cristalline du matériau dopé est également influencée, car le Mg encourage l'apparition de défauts structuraux (inclusions, domaines d'inversion). Le dopage au Mg, qui a généralement lieu pendant la période de croissance, est grandement influencé par la présence de l'hydrogène. Pour la croissance par dépôt en phase vapeur utilisant des précurseurs organométalliques (MOCVD), l'activation des atomes de Mg est nécessaire via une irradiation électronique ou un traitement thermique sous  $\text{N}_2$  pour dissocier les complexes Mg-H. Par ailleurs, dans le cadre de l'expansion par épitaxie à jets moléculaires (MBE), la présence d'atomes d'hydrogène facilite l'incorporation du Mg, sans que l'hydrogène lui-même soit assimilé. La polarité de la surface a également un impact considérable sur l'incorporation. L'idéal est la polarité gallium, qui autorise l'incorporation de jusqu'à 30 fois plus d'atomes en comparaison avec la polarité azote. Toutefois, les progrès dans le dopage p semblent très prometteurs.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

### III.4.6. Vitesse de saturation dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ selon la valeur de $x$ .

D'après l'ajustement réalisé par Anwar et al. [126], le tableau III-1 présente la vitesse de saturation, où les constantes  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont influencées par le dopage.

$V_S(x) = a+bx+cx^2(\times 10^7 \text{ cm/s})$			
$N_D \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$		
	$a$	$b$	$c$
$10^{17}$	1.3425	0.574	- 0.3215
$10^{18}$	1.3045	0.646	- 0.3545
$10^{19}$	1.290	0.3708	- 0.3632

Tableau III-1 : Vitesse de saturation selon la fraction molaire d'aluminium[126].

### III.4.7. Mobilité des électrons dans $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ en fonction de $x$ .

Conformément à le modèle calibré par Anwar et ses collaborateurs [107], la courbe illustrant la mobilité des électrons dans ces alliages est estimée par l'équation mentionnée dans le tableau III.2, où les paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  dépendent de la température.

$\mu(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$				
T	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$			
	$a$	$b$	$c$	$d$
100K	1787.9	- 1925.6	1071.4	- 520.8
300K	1157.9	- 1329.6	- 283.7	671.3
500K	815.6	- 1331.6	427.6	298.4

Tableau III-2 : Mobilité des électrons dans  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  selon de la fraction molaire Al [107].

Dans des conditions de champ réduit, une hausse du ratio de moles d'Al entraîne une diminution de la mobilité (voir figure III.9). Cela est en partie dû à la masse effective qui est

## Chapitre III Méthodes de croissance.

plus élevée dans la vallée centrale de l'AlN comparée au GaN. De plus, à mesure que  $x$  augmente, la diffusion des phonons acoustiques s'intensifie alors que celle des phonons optiques polaires se réduit. Le troisième mécanisme en compétition reste la dispersion des impuretés ionisées.

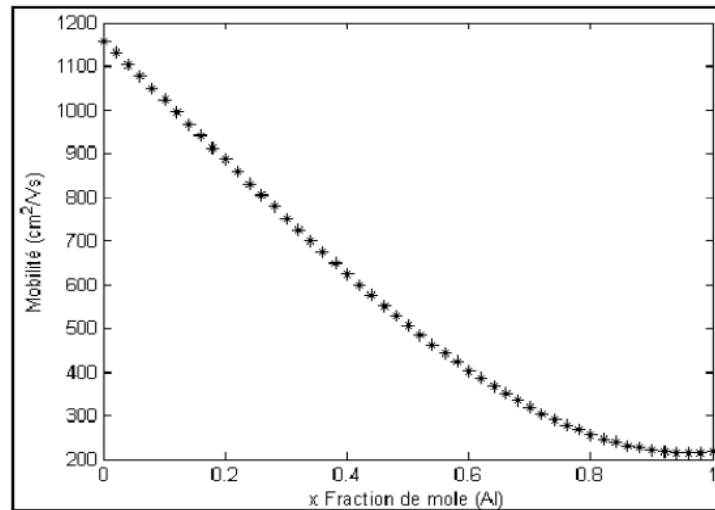


Figure III.9 : Mobilité des électrons en fonction de la fraction molaire Al [111].

### III.4.8. Elaboration du ternaire AlGaInN.

L'optimisation des performances des dispositifs électroniques et optoélectroniques s'effectue via l'utilisation d'hétéro structures dérivées des alliages. Par exemple, les structures de puits quantiques AlGaInN / GaN sont des dispositifs basés sur des nitrures d'éléments III. La conception d'alliages ternaires présente un intérêt pour les applications en optoélectronique, car l'énergie de bande des nitrures peut être ajustée. Les possibilités d'application du GaN pour la fabrication de dispositifs optoélectroniques dans le spectre allant du bleu à l'UV sont fortement conditionnées par le développement d'alliages contenant du GaN avec de BN et de l'AlN [126].

### III.4.9. Principe d'élaboration.

La figure III.10. démontre l'idée de la fabrication d'alliages ternaires à partir d'une combinaison binaire. Nous travaillons dans un environnement saturé en éléments C (N pour les nitrures) à partir de la couche binaire (BC). Par la suite, nous intégrons l'autre métal A (In ou Al) pour pallier le manque du métal B (Ga dans le GaN). En ajustant la proportion des deux substances concernées, il est possible de produire des alliages qui englobent toute la gamme de compositions. Cependant, la démarche est complexe et requiert le déplacement des espèces à la surface, la sensibilité du coefficient d'incorporation à la température du

## Chapitre III Méthodes de croissance.

substrat, sans oublier les impacts potentiels des surfactants... Ces facteurs rendent difficile le contrôle de la production d'alliages, à la fois pour atteindre une composition désirée et pour garantir une qualité optique satisfaisante [126].

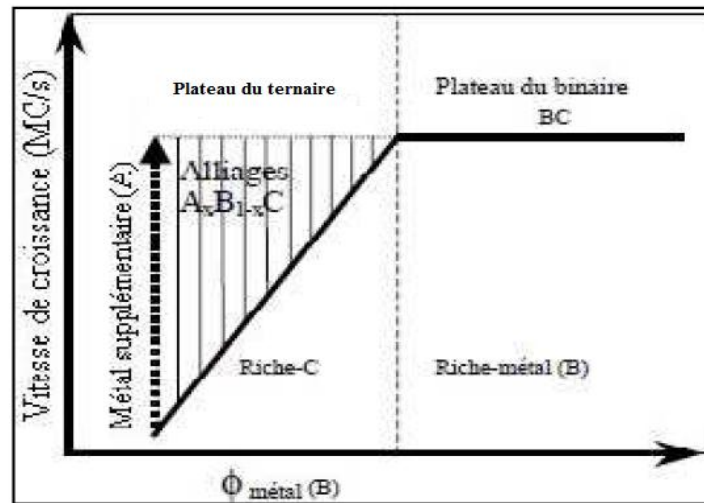


Figure III-10 : Principe d'élaboration des alliages ternaires [126].

### III.4.10. Incorporation d'Al dans GaN.

Étant donné que le GaN et l'AlN hexagonaux conservent leur stabilité thermique entre 600 et 750°C, il est plausible de penser qu'en situation de déficit en métal, le coefficient d'incorporation du Ga et de l'Al est important à une température déterminée. On contrôle le débit de Ga pour la mise en œuvre du GaN dans un environnement riche en azote, avant d'ajouter un flux supplémentaire d'Al pour la production de l'AlGaN. Les variations de RHEED permettent d'estimer le rythme de croissance de cet alliage et d'examiner le comportement de ces espèces lorsqu'elles sont présentes sur le front de croissance. La figure (III.11.) dépeint la progression des oscillations de REED pour l'alliage AlGaN [126].

### Chapitre III Méthodes de croissance.

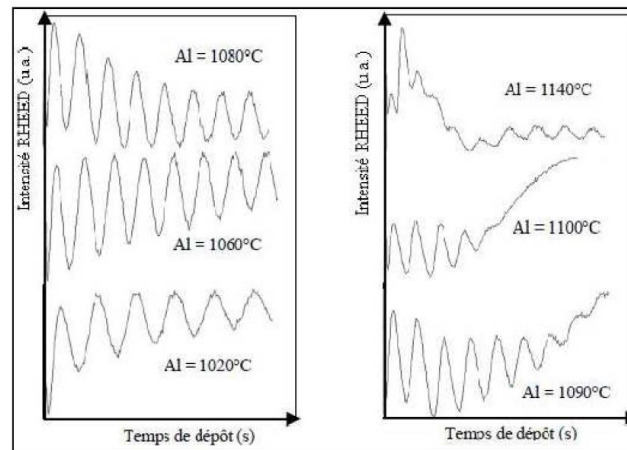


Figure III-11: Variation des oscillations de RHEED en lien avec la température de la cellule d'Al, lorsque celle-ci est en présence de Ga sur GaN. Pour le réglage des conditions riches en N du GaN, la température de la cellule de Ga est établie à 980°C et le débit de N<sub>2</sub> s'établit à 0.5cm. Le substrat est à une température de 700°C [126].

À faible débit d'Al ; lorsque la température de l'aluminium excède 1090°C, la durée totale des oscillations RHEED demeure constante. Cette méthode permet d'estimer la vitesse de croissance d'AlGaN en déterminant l'inverse de la période des oscillations RHEED. Pour des températures allant jusqu'à ou inférieures à 1090°C, trois transitions sont observées au commencement de la modification de l'intensité du RHEED. On ne remarque que ce transitoire dans l'intervalle de températures (1100-1130°C) de la cellule d'Al. Pour un flux d'Al plus élevé et une température dépassant 1130°C, on observe de nouveau des oscillations après le transitoire, avec une période qui excède celle-ci. Cette fluctuation des oscillations de RHEED en fonction des températures d'Al suggère une modification dans la dynamique des espèces à la surface. Dans la Figure (III.12 a), on note qu'une unique oscillation transitoire est perceptible lorsque la surface de GaN est traitée avec de l'aluminium seul ; en revanche, lorsqu'elle est en contact avec l'Al et le Ga, trois oscillations sont observées (Figure III.12 b) [127].

## Chapitre III Méthodes de croissance.

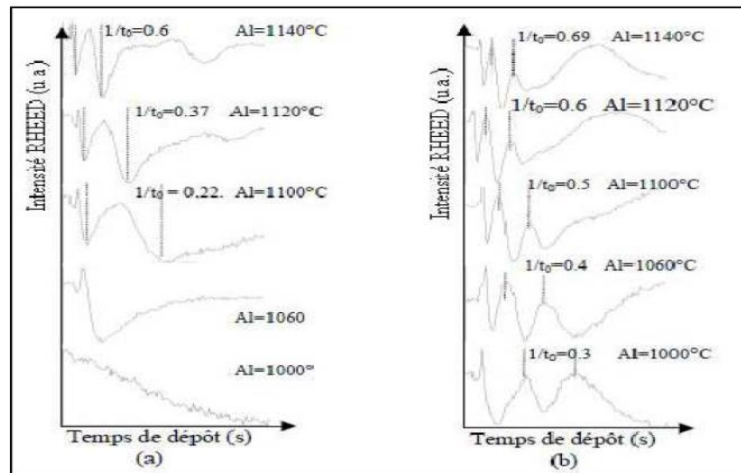


Figure III-12 : Évolution du transitoire en réponse au flux d'Al lorsque la surface de GaN est exposée (a) uniquement à l'Al, (b) à la fois à l'Al et au Ga sur la surface de GaN. Dans cette situation finale, on fixe la température de la cellule de Ga à 1030°C [127].

L'opposé du temps de passage fait référence à la modification de la pression de vapeur d'Al, qui varie en fonction de la température de la cellule. En effet, lorsque la présence d'Al sur la surface du GaN devient notable, Al tend à se cumuler plutôt qu'à s'intégrer. L'établissement du taux de croissance se réalise en fonction des fluctuations cycliques. Pour les flux d'Al à faible intensité, le taux de croissance est similaire à celui du binaire, malgré la prépondérance du flux de Ga, étant donné que l'incorporation d'Al pallie le déficit de Ga et oriente vers le binaire. Lorsque la concentration d'aluminium est forte sur le front de croissance, celui-ci ne réussit pas à l'absorber complètement et tend à s'accumuler en surface. Cela est dû à la possibilité que le Ga puisse provoquer la réduction de l'Al. En résumé, les fluctuations de RHEED jusqu'au niveau stable signalent un changement dans la composition de l'alliage., comme en témoigne le changement de vitesse de croissance observé. L'analyse des oscillations RHEED est perturbée par un transitoire causé par la formation d'une couche métallique au-delà du plateau. Lors d'un flux important d'Al en présence de Ga, l'incorporation de Ga est considérablement diminuée en raison de sa taille conséquente ; tandis que l'intégration d'Al est favorisée, grâce à sa taille modeste. Cela signifie que pour des flux d'Al élevés, on privilégiera le dépôt d'AlN plutôt que d'AlGaN.

### **III.4.11. Intégration du Ga dans l'AlN.**

Dans le cas contraire, Ga est intégré à AlN ; la figure III.13 [127] illustre les résultats des oscillations de RHEED.

### Chapitre III Méthodes de croissance.

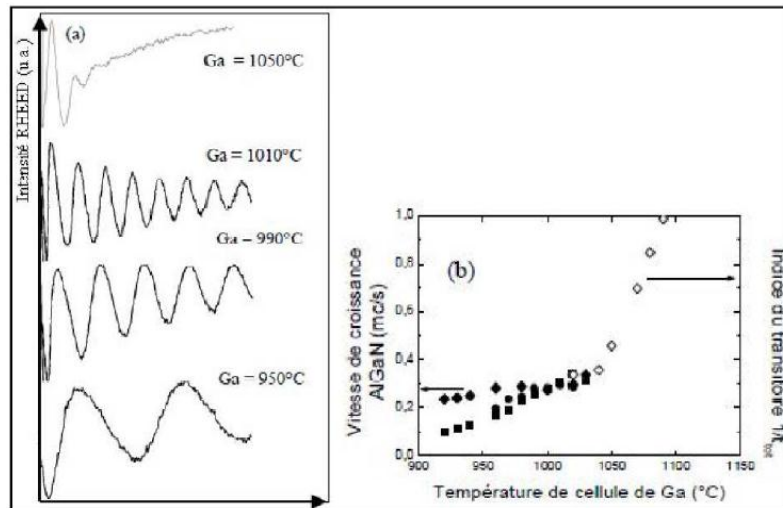


Figure III-13 : (a) Variation des oscillations de RHEED selon la température de la cellule de Ga en présence d'Al. Le substrat est chauffé à 700°C et le flux de N<sub>2</sub> est fixé à 0,5. (b) Taux de croissance de l'alliage AlGaIn en fonction de la température du Ga lorsqu'il est associé à l'Al, aux températures de 1020°C (carrés pleins), 1060°C (cercles pleins), 1100°C (losanges pleins) et oscillant autour de 1100°C (losanges vides) [127].

On observe une forte ressemblance avec le cas antérieur. L'intervalle d'oscillation demeure stable pour une température de Ga spécifiée, et s'accroît lorsque la T Ga se hausse. On observe ce comportement jusqu'à une température de Ga qui correspond au plateau de la stoechiométrie. Ainsi, l'alliage se développe en mode stratifié lorsqu'il est en présence d'Al, et l'incorporation de Ga n'est pas entravée par la présence d'Al. Quand T Ga est basse et T Al est haute, la vitesse de croissance atteint le pic de la stoechiométrie, car l'inclusion de Ga compense la carence en métal jusqu'à atteindre la vitesse limite (losanges et carrés fermés sur la figure III.13 b). Pour résumer, les observations concernant l'intégration de Ga dans AlN ressemblent à celles faites lors de l'incorporation d'Al dans GaN. L'accélération de la croissance jusqu'à présent doit être associée à un changement dans la composition de l'alliage, tandis que le phénomène transitoire observé avec un fort flux de Ga indique une accumulation du métal à la surface. L'évolution d'Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N est assez compliquée, puisque les atomes d'Al à la surface se déplacent moins facilement que ceux de Ga, et aussi parce que l'Al a une propension à interagir principalement avec l'azote. De plus, les différences locales dans la composition de l'alliage sont assez importantes. Tout d'abord, au cours de la croissance, l'alliage peut subir une réorganisation atomique qui engendre spontanément une succession de superréseaux AlN/GaN avec une périodicité variable selon les proportions des flux des espèces diverses [122]. Par ailleurs, on remarque une tendance de l'aluminium à se focaliser

## **Chapitre III Méthodes de croissance.**

autour des dislocations, créant des zones appauvries en aluminium à quelques nanomètres des centres de ces dislocations [128]. Les zones riches en Al peuvent afficher des concentrations qui surpassent de plus de 70% celles des régions moins riches.

### **III.5. Méthodes de caractérisation.**

#### **III.5.1. Photoluminescence.**

Les semi-conducteurs sont des substances qui ont la capacité d'émettre de la lumière lorsqu'elles sont exposées à une stimulation externe. On peut distinguer plusieurs sortes de sources d'excitation : une émission de lumière (photoluminescence), une émission d'électrons (cathodoluminescence) ou un courant électrique (électroluminescence). L'approche de la photoluminescence est fréquemment mise en œuvre dans l'industrie des semi-conducteurs afin d'analyser les couches. Autrement dit, cette technique nécessite l'emploi d'un laser dont la longueur d'onde est plus courte que celle liée à l'écart des matériaux pour éclairer l'échantillon. Les photons produits par le laser sont ensuite absorbés dans la couche, à une profondeur qui varie en fonction de la longueur d'onde et des propriétés du matériau. Par conséquent, chaque photon génère une paire électron-trou. Ces deux particules, qui se trouvent au départ dans un état excité, vont progressivement se stabiliser (se thermalisent) vers des états ayant une énergie minimale, et cela, dans une fenêtre temporelle d'environ une femto-seconde. Par conséquent, ces deux particules ont la possibilité de se recombiner soit de façon non radiative en générant des phonons ou par le biais d'une transition électronique (effet Auger), ou bien de manière radiative, ce qui entraîne l'émission d'un photon. L'échantillon génère un signal de photoluminescence qui est focalisé par une lentille sur les fentes d'entrée du monochromateur (HR 640). Ce signal sera ensuite divisé par un réseau de diffraction ayant 600 lignes/mm, avec une blaze à 400nm. Le signal optique est ensuite converti en signal électrique par un photomultiplicateur, ensuite filtré grâce à une détection synchrone, avant d'être finalement transmis à un système d'acquisition connecté à un micro-ordinateur qui enregistre le spectre. L'utilisation d'un cryostat à l'hélium liquide permet d'obtenir des spectres pour des températures d'échantillon allant de 8K à 300K. Le dispositif est illustré par la Figure III-14. Les spectres que nous avons obtenus nous permettent d'accéder aux propriétés intrinsèques (telles que l'énergie de gap), ainsi qu'à certaines propriétés extrinsèques du matériau (comme le degré de dopage, les défauts structuraux...). En résumé, la photoluminescence est une technique rapide et non intrusive qui permet de juger la qualité optique d'une couche semi-conductrice [107].

## Chapitre III Méthodes de croissance.

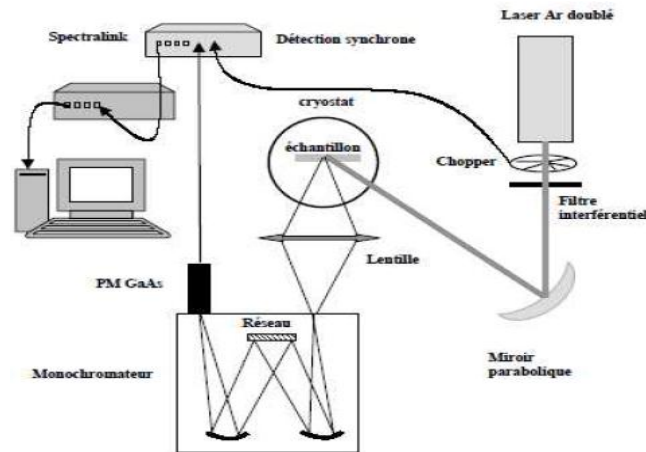


Figure III-14 : Modèle de système de photoluminescence UV [107].

### III.5.2. Capacité à réfléchir la lumière ou une autre forme d'énergie.

La Figure III-15 illustre la méthode d'étude de réflectivité des alliages AlGaN cubiques dans le domaine ultraviolet et visible. Les mesures se font à une température de milieu ambiant. Le faisceau d'étude est issu d'une lampe Xe de 150 W, dispersé par un monochromateur Jobin-Yvon HR 640 grâce à un réseau de 600 lignes/mm. Un hachoir gère la détection synchrone en coupant le faisceau lumineux. Une première lentille permet d'atteindre la condition de faisceau parallèle, indispensable pour effectuer les mesures. Un diaphragme est utilisé pour choisir une portion du faisceau incident, Le faisceau réfléchi à un angle habituelle est dirigé vers le détecteur de photons composé de silicium par une lame séparatrice. Le signal est finalement capté et analysé par le système d'acquisition pour prendre en compte les diverses réponses spectrales de tous les éléments du banc expérimental. Garantissant ainsi que l'ensemble du faisceau incident est réfléchi sur l'échantillon de dimensions réduites.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

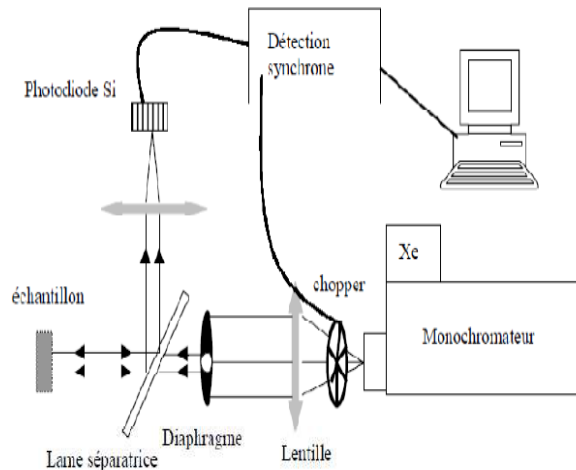


Figure III-15 : Mise en œuvre expérimentale des mesures de réflectivité [107].

### III.5.3. Réfraction photonique (PR).

La photoréflectivité est une technique de modulation dérivée de la réflectivité. Cette méthode rend plus aisée la caractérisation des transitions optiques pour des couches épaisses de semi-conducteurs, d'hétérostructures fondées sur des puits quantiques, ainsi que d'appareils. Cette méthode est non destructive et n'exige aucune préparation particulière de l'échantillon, à part un simple nettoyage de la surface. Cela la rend tout aussi séduisante que la photoluminescence. Elle peut, tout comme cette dernière, être réalisée à température ambiante ou à basse température. Cependant, la distinction entre ces deux techniques se trouve dans le genre de transitions optiques qu'elles sont capables d'explorer. La PR est un instrument qui aide à mesurer l'énergie requise pour générer une paire électron-trou, ce qui correspond à l'absorption du matériau, l'énergie de la bande interdite d'un matériau dense ou les niveaux énergétiques quantifiés d'un puits. Quant à la photoluminescence, elle permet de quantifier l'énergie de recombinaison radiative des couples électron-trou. Si les porteurs se dispersent sur des niveaux à l'intérieur de la bande interdite avant leur recombinaison, cette énergie peut être inférieure à celle du gap du matériau [107].

## III.6. Nitrure de gallium-bore $B_xGa_{1-x}N$ .

### III.6.1. Introduction.

Le BGaN est un alliage constitué de nitrure de bore (BN) et de nitrure de gallium (GaN). L'attention portée aux films de nitrure de bore à large bande interdite est particulièrement marquée en raison de leurs caractéristiques exceptionnelles, tels que la conductivité

## **Chapitre III Méthodes de croissance.**

thermique, la résistance et une remarquable stabilité chimique. De plus, il est possible d'ajuster les constantes du réseau de l'alliage BGaN pour qu'elles soient en adéquation avec celles du SiC ou de l'AlN, à condition d'atteindre une concentration suffisante de bore dans le réseau. Les propriétés électroniques et structurelles fondamentales du BGaN ne sont pas encore bien comprises. D'après Harrison, on devrait s'attendre à une réduction de l'écart des paramètres de réseau avec une augmentation du taux de bore dans l'alliage [129]. D'après la théorie du diélectrique quantique, la bande interdite de l'alliage  $B_xGa_{1-x}N$  s'élargit à mesure que la proportion de bore  $x$  augmente [130]. Polyakov et al. [131] ont présenté les premiers résultats expérimentaux signalant que la solubilité maximale du bore dans le GaN, produit à 1000 °C sur le saphir, était approximativement de 1%. Wei et ses collègues [132] ont rapporté un alliage BGaN sur AlN/SiC avec la plus forte concentration en bore, atteignant 1,5%. Récemment, Ougazzaden et son équipe [133] ont rapporté une intégration de 5% de bore dans les couches minces BGaN/GaN. Cependant, l'expansion des nitrures de bore reste un défi et nécessite une avancée technologique plus avancée pour optimiser la concentration en bore. La théorie stipule qu'en raison d'un déficit notable de miscibilité, la concentration maximale en bore dans l'alliage  $B_xGa_{1-x}N$  est de 5% [134].

### **III.6.2. Propriétés du BGaN .**

#### **III.6.2.1.Changement de l'écart du $B_xGa_{1-x}N$ en fonction du rapport molaire $x$ .**

L'énergie de gap de l'alliage  $B_xGa_{1-x}N$  est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$Eg_{B_xGa_{1-x}N} = xEg_{BN} + (1 - x)Eg_{GaN} - x(1 - x)b \quad (\text{III-4})$$

$b$  symbolise le facteur de courbure, dont la valeur se trouve à peu près entre 9.2 et 9.7 eV, alors que l'énergie de gap du nitrure de bore est approximativement de 5.5 eV [135,136].

La figure III-16 illustre la relation entre l'énergie de gap et les paramètres de structure pour les matériaux nitrurés, qu'ils soient de composition binaire ou ternaire. La figure III-16 illustre la relation entre l'énergie de gap et les paramètres de structure pour les matériaux nitrurés, qu'ils soient de composition binaire ou ternaire.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

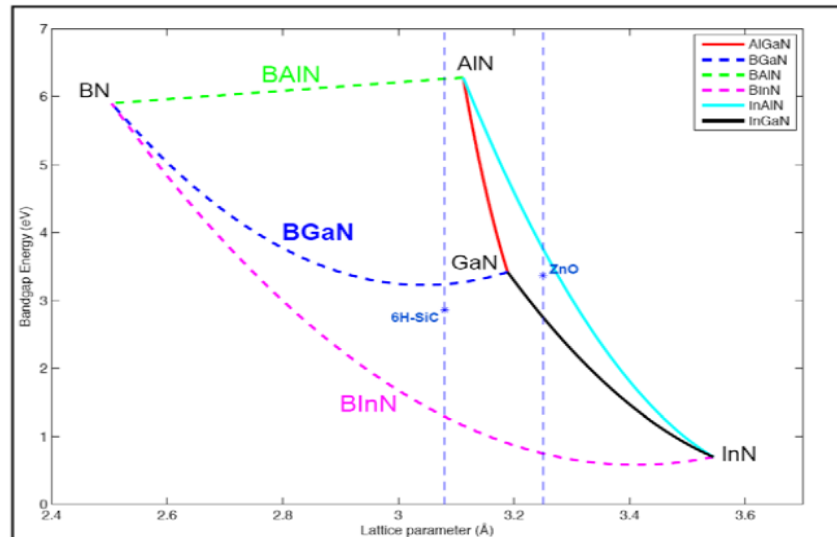


Figure III-16 : Énergie du gap selon les paramètres de la maille, incluant une représentation des composés nitrurés classiques (lignes continues) et des matériaux à base de nitrure de bore (lignes en pointillés) [137].

### III.6.2.2. Propriétés électriques.

Selon Baghdadli et al., l'incorporation de bore dans l'alliage BGaN a une forte influence sur la résistivité électrique, alors que la mobilité s'élève jusqu'à 290 cm<sup>2</sup>/V pour un taux de bore de 1,75%, comme illustré par la figure (III-16) [138]. Une haute densité de porteurs est présente dans l'alliage BGaN pour une teneur en bore qui est inférieure à 0,3 %. Selon Stampfl et ses collaborateurs, une importante réduction de la concentration en porteurs a été notée dans l'alliage AlGaN, possiblement associée à une baisse de la densité des porteurs [139]. Il est possible que la situation soit similaire pour l'alliage BGaN, dont la résistivité s'accroît avec l'intégration de bore dans les alliages BGaN.

## Chapitre III Méthodes de croissance.

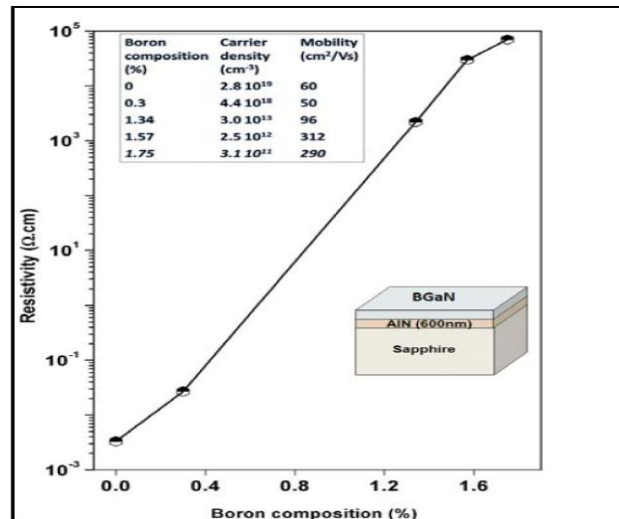


Figure III-17 : La résistivité électrique en fonction de la concentration en bore dans l'alliage BxGa1-xN à température ambiante. Le tableau en incrustation montre la densité de porteurs et la dépendance de la mobilité avec la teneur en bore [138].

### III.6.2.3. Propriétés optiques.

Il est encore assez rare d'étudier les propriétés optiques de l'alliage BxGa1-xN, qui impliquent généralement une comparaison entre le spectre de photoluminescence (PL) de BxGa1-xN et celui du GaN [140-145]. Bien que diverses études aient rapporté l'élargissement de la bande interdite en raison de l'augmentation du contenu en bore [141-146], d'autres recherches ont démontré une réduction de la bande interdite pour l'alliage BxGa1-xN à faible teneur en bore [143-145], ce qui est en accord avec les conclusions des travaux théoriques [146, 147]. D'autres éléments, comme l'indice de réfraction, ont aussi été influencés par la quantité de bore intégrée dans l'alliage. Watanabe et ses collaborateurs ont déterminé la dépendance de la longueur d'onde ainsi que les indices de réfraction du BxGa1-xN et du BAlN dans le domaine des ultraviolets [148]. Une forte corrélation entre l'indice de réfraction et la composition en bore a été démontrée. La figure (III-17) illustre la variation de l'indice de réfraction en fonction du taux de bore dans les alliages BxGa1-xN et BAlN.

### Chapitre III Méthodes de croissance.

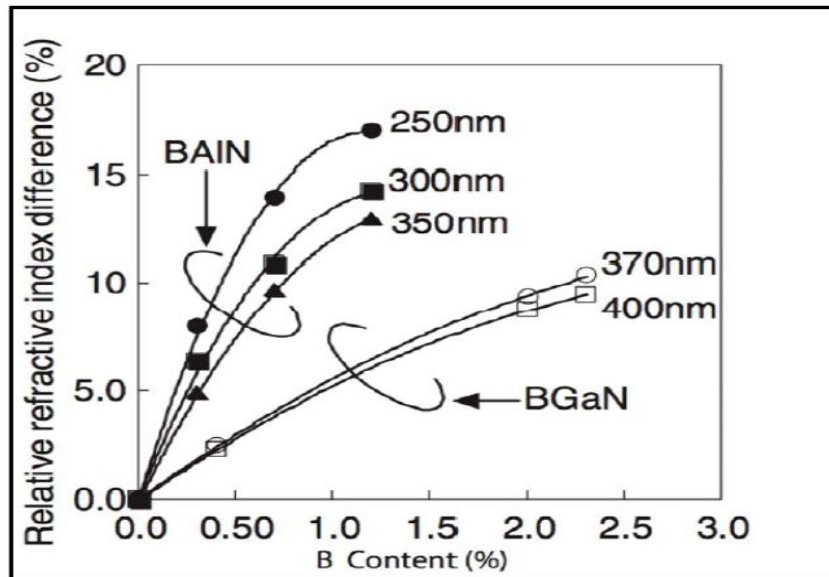


Figure III-18: Indice de réfraction en fonction de la concentration en bore dans les alliages BGaN et BAIN [149].

### III.7. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons introduit les nitrures binaires et ternaires tels que le nitrure de gallium (GaN), le nitrure d'aluminium (AlN), le nitrure de bore (BN), le nitrure de gallium-aluminium (AlGaN) et le nitrure de gallium-bore (BGaN). On a présenté leurs structures cristallographiques ainsi que leurs diverses propriétés.

:

*Chapitre VI: Résultats et  
discussion*

## **Résultats et discussion**

### **VI.1. Introduction.**

L'objectif de la modélisation des appareils électroniques est de prévoir leurs spécifications et performances avant d'entrer dans l'étape de production, qui engendre une dépense significative. Ce chapitre commence par l'introduction de l'instrument de simulation utilisé tout au long de cette thèse ; nous poursuivons par la présentation des résultats obtenus et leur étude.

### **IV.2. Présentation du logiciel de simulation “SILVACO”.**

« Silvaco », aussi appelée « Silvaco International », est une société américaine établie à Santa Clara en Californie. Elle offre des programmes de simulation par méthode des éléments finis et de conception assistée par ordinateur. Les instruments de conception assistée par ordinateur (TCAD : Technology Computer Aided Design) sont des outils de simulation permettant de reproduire le fonctionnement et le traitement des dispositifs électroniques. Ces outils sont utilisés dans l'industrie de la microélectronique pour les activités de recherche, développement et conception de dispositifs basés sur la technologie des semi-conducteurs. L'expansion de Silvaco, les transactions commerciales ainsi que le matériel de support sont stratégiquement répartis à travers l'univers pour répondre aux exigences de sa clientèle. Le modèle d'affaires de Silvaco se fonde principalement sur sa compétence à déployer des ingénieurs technico-commerciaux compétents et aguerris pour l'assistance à la clientèle sur place dans les zones clés de production de semi-conducteurs [150]. C'est en 1984 que le Dr. Ivan Pesic a fondé l'entreprise. Le produit initial, Utmost (Universal Transistor Modeling SofTware), est vite devenu la norme de référence dans l'industrie pour l'extraction des paramètres, la caractérisation et la modélisation des dispositifs. C'est en 1985 que SmartSpice a fait connaître Silvaco dans le domaine de la simulation de circuits SPICE. Par la suite, SmartSpice a été amélioré avec une série de produits de simulation de circuits dédiés à l'analogique, au signal mixte et à la RF. Silvaco a fait son entrée sur le marché du TCAD en 1987 et s'est imposé comme fournisseur dominant dans ce domaine en 1992 grâce à ses simulateurs de processus Athena et Atlas. Plus tard, celles-ci se développeront en une gamme complète de produits pour la simulation de processus, ainsi que pour les dispositifs et contraintes en 2D et 3D. Le simulateur est apte à anticiper la configuration finale de plusieurs étapes (simulation du processus de fabrication) ou à prévoir le comportement électrique d'un appareil basé sur des semi-conducteurs sous des conditions de polarisation spécifiques. Le simulateur d'appareil exploite les propriétés du matériau qui compose l'appareil, de même que

## **Résultats et discussion**

les mesures et les modèles de dopage pour l'ensemble de l'appareil. De plus, on intègre des modèles physiques qui illustrent le comportement des porteurs. Ensuite, une structure est discrétisée en établissant un maillage et en répartissant toutes les propriétés physiques des zones à différents nœuds (points du maillage). Par la suite, le simulateur gère un ensemble d'équations physiques et de modèles élaborés pour prévoir le comportement électrique de l'appareil.

### **IV.2.1. Équations fondamentales des semi-conducteurs**

Des années de recherche dans le domaine de la physique des dispositifs ont abouti à la création d'un modèle mathématique qui s'applique à tous les dispositifs semi-conducteurs [151]. Ce modèle est constitué d'une suite d'équations fondamentales reliant le potentiel électrostatique aux densités de porteurs dans un domaine de simulation. Les équations dérivées des lois de Maxwell et intégrant l'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport, sont mises en œuvre dans tous les simulateurs d'appareils généraux. Équation de Poisson : elle décrit la relation entre les variations du potentiel électrostatique et les densités de charge locales. Équation de continuité et de transport : elles démontrent comment les densités d'électrons et de trous évoluent en fonction des processus de transport, de génération et de recombinaison.

#### **IV.2.1. 1.Équation de Poisson.**

Elle crée une liaison entre les variations du potentiel électrostatique et les densités de charge dans l'espace :

$$\text{div}(\varepsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (\text{IV-1})$$

Or que  $\psi$  : le potentiel électrostatique,  $\varepsilon$  : la permittivité et  $\rho$  : la densité de charge d'espace locale.

L'addition des contributions de toutes les charges fixes et mobiles, ainsi que des électrons, trous et impuretés ionisées, détermine la densité de charge d'espace locale. On utilise le gradient du potentiel pour calculer le champ électrique.

$$\vec{E} = -\nabla \psi \quad (\text{IV-2})$$

## Résultats et discussion

### IV.2.1. 2. Équation de protection des porteurs.

Les équations qui définissent la continuité pour les électrons et les trous sont exprimées de cette manière :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{j}_n + G_n - R_n \quad (\text{IV-3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{j}_p + G_p - R_p \quad (\text{IV-4})$$

Ici,  $n$  et  $p$  représentent respectivement la densité d'électrons et de trous, tandis que  $(j_n)^\rightarrow, (j_p)^\rightarrow$  symbolisent les flux de courant des électrons et des trous.  $G_n$  et  $G_p$  : représentent les taux de génération d'électrons et de trous,  $R_n$  et  $R_p$  : correspondent aux taux de recombinaison des électrons et des trous, tandis que  $q$  : symbolise la taille de la charge d'un électron.

### IV.2.1. 3. Équation de transport.

Les équations de continuité et l'équation de Poisson fournissent une représentation générale pour modéliser les dispositifs. Pour établir les modèles physiques de  $J_n, J_p, G_n, R_n, G_p$  et  $R_p$ , il faut disposer d'équations secondaires. Les modèles de transport de charge, également connus sous le nom d'équations de densité de courant, sont généralement issus de l'équation du transport de Boltzmann par le biais de différentes approximations et simplifications. Ces présuppositions peuvent aboutir à différents modèles de transport, tels que le modèle de diffusion-dérive, le modèle de bilan énergétique et le modèle hydrodynamique. Or que Modèle de dérive diffusion et le modèle le plus élémentaire en matière de transport de charge, convenant pratiquement à tous les dispositifs techniquement envisageables. Ce modèle considère que les électrons ont une température équivalente à celle du réseau cristallin. Tandis que le modèle thermodynamique (TD) est une version améliorée du modèle DD qui intègre les effets d'auto-échauffement dans l'appareil. Cela se fait en résolvant l'équation de transfert de chaleur sur réseau et les équations de conservation du courant, permettant ainsi d'évaluer l'influence du gradient sur les densités de courant en fonction de la température. En tenant compte d'une température uniforme pour les électrons, les trous et le réseau du dispositif. Ainsi, le modèle de transport du bilan énergétique (Energy Balance) incorpore des équations de continuité pour les températures des porteurs. Il gère les mobilités et les coefficients d'ionisation d'impact basés sur les températures des porteurs plutôt que sur le champ électrique local, ainsi que le modèle hydrodynamique : Ce modèle intègre l'idée de température, car il prend en compte le scénario où les électrons détiennent de

## Résultats et discussion

l'énergie. Dans cette situation, il évalue une température des électrons qui excède celle du réseau cristallin.

### IV.3. Présentation à l'instrument ATLAS

« Atlas » est un simulateur en deux et trois dimensions pour les appareils, basé sur la physique des semi-conducteurs. Il anticipe le comportement électrique des structures semi, offrant ainsi une meilleure compréhension des mécanismes physiques associés à l'usage interne des dispositifs. Il peut être utilisé de façon indépendante ou comme instrument dans la simulation de l'environnement du noyau, également appelé VWF (Virtual Wafer Fab.) de Silvaco, comme le montre la Figure IV-1. Afin d'analyser l'impact des variables de processus sur le fonctionnement de l'équipement, la simulation a été combinée à la modélisation du processus et à l'extraction grâce au programme SPICE (Simulation Programme with Integrated Circuit Emphasis) [152].

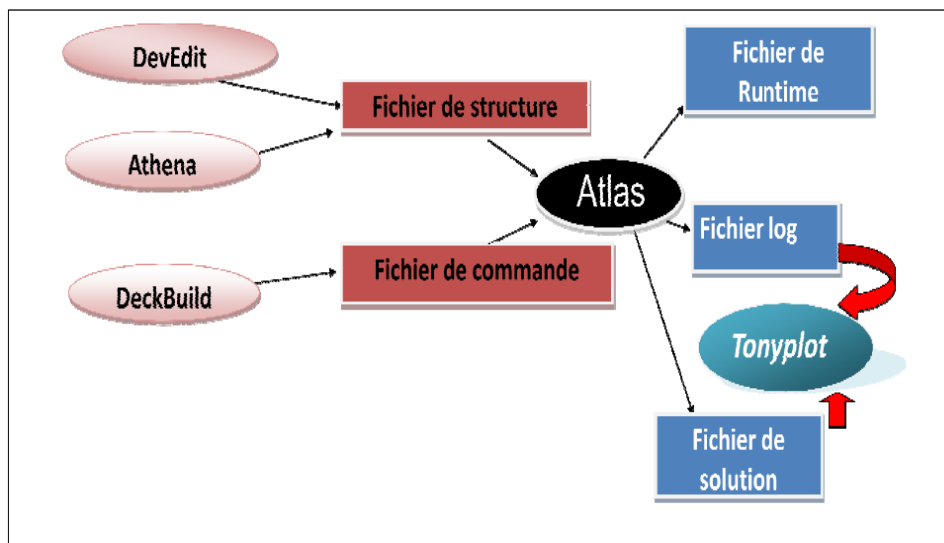


Figure IV-1: Fichiers d'entrée et de sortie d'ATLAS [152].

DevEdit : c'est un éditeur conçu pour la structuration en 2D, 3D et le maillage. Il sert aussi d'outil interactif pour le maillage et l'affinement.

ATHENA : offre la faculté de reproduire les étapes technologiques et les différentes phases nécessaires à la création de l'équipement.

## **Résultats et discussion**

DeckBuild : il offre un environnement d'exécution interactif. Il fonctionne comme un point d'accès pour différents outils de simulation.

ATLAS : il s'agit d'un simulateur 2D et 3D pour les dispositifs semi-conducteurs. Il anticipe le comportement électrique des structures définies et offre une vue d'ensemble des mécanismes physiques internes liés à l'opération de l'appareil.

TonyPlot : c'est un outil qui rend plus aisée la visualisation des résultats de simulation.

Document d'exécution : ce dossier aborde les progrès, les erreurs et les alertes survenant durant la simulation. Il faut lancer la commande PRINT dans MODELS pour activer ce fichier.

Fichier d'exécution : garde les caractéristiques définies par ATLAS. Dans les simulations en courant continu, cela concerne les courants et les tensions associés à chaque électrode. Dans le contexte de simulations transitoires, l'heure est consignée. Dans les simulations AC, on enregistre la fréquence du signal, ainsi que les valeurs de conductance et de capacité.

### **IV.3.1.Ordre des commandes ATLAS.**

L'ordre dans lequel les commandes apparaissent dans un fichier d'entrée ATLAS est crucial. Dans sa logique de programmation, ATLAS intègre cinq groupes distincts de commandes. Il est indispensable de structurer ces groupes de façon adéquate. Si l'ordre des groupes n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît fréquemment, ce qui peut entraîner une défaillance ou la cessation du programme. Par exemple, si les configurations ou les modèles du matériau employé ne sont pas établis correctement, ils ne seront pas exploitables dans les calculs. L'arrangement des instructions dans la configuration du maillage, la définition structurelle et les ensembles de solutions est aussi crucial pour la précision des résultats. Le schéma IV-2 illustre la séquence des instructions dans la logique de programmation d'ATLAS [152].

## Résultats et discussion



Figure IV-2 : Séquence des groupes de commandes d'ATLAS suivie de leurs instructions [152].

Les directives de base pour chaque groupe sont les suivantes [152] :

REGION : pour déterminer la localisation des matériaux et leurs frontières géométriques.

ÉLECTRODE : cette directive définit l'emplacement et les noms des électrodes.

DOPING : décrit le profil de dopage dans chaque région ou matière.

MATERIAL : cette directive permet l'établissement des propriétés matérielles des zones spécifiées.

MODEL : pour indiquer les processus physiques à vérifier lors de la simulation.

CONTACT : cette directive simplifie la définition des propriétés physiques des électrodes.

INTERFACE : cette directive est applicable lorsque la structure renferme un matériau isolant. Elle permet la définition des paramètres d'interface semi-conducteur/isolant.

METHOD : permet de spécifier la technique numérique à utiliser pour résoudre les équations ainsi que les paramètres liés à ses algorithmes pendant la simulation.

LOG : pour enregistrer les résultats définitifs dans un document. (log : indique le format du fichier et LOG : la commande employée dans le programme).

SOLVE : cette commande permet l'implémentation d'une solution pour des points de polarisation précis.

## **Résultats et discussion**

LOAD : cette commande est exclusivement destinée à la récupération de la solution sauvegardée dans ATLAS ou à l'importation des solutions précédentes issues de fichiers en tant qu'hypothèses initiales vers d'autres points de polarisation. Avant d'effectuer une commande LOAD, il est essentiel de déterminer le maillage, les électrodes, le dopage, les régions, les paramètres de contact, les paramètres du matériau et également les modèles et méthodes numériques.

SAVE : pour enregistrer les résultats de la simulation dans des fichiers de sortie.

EXTRACT : les extractions peuvent être effectuées une fois la simulation terminée. Pour obtenir les résultats d'une simulation MIXEDMODE, il est indispensable de préciser l'instruction EXTRACT après une remise à zéro d'ATLAS (GO ATLAS). Par conséquent, la commande EXTRACT est utilisée pour extraire les paramètres des fichiers de solution et de log.

TONYPLOT : cette instruction active le programme TonyPlot, un outil visuel pour le post-traitement des données.

### **IV.4. Les modèles physiques.**

L'utilisation des instructions MODELS et IMPACT permet de spécifier les modèles physiques. On peut classer ces modèles en cinq catégories [152] :

- Mobilité.
- Recombinaison.
- Statistiques des porteurs.
- Ionisation par impact.
- Effet tunnel.

L'instruction MODELS détaille tous les modèles, à l'exception de celui par impact de l'ionisation qui est décrit dans la déclaration IMPACT.

#### **IV.4.1. Définition des Modèles.**

Les champs électriques accélèrent les électrons et les trous, cependant, ils perdent de leur dynamisme à cause des phénomènes de diffusion, qui comprennent :

- Statistiques des porteurs.
- Ionisation par impact.

## **Résultats et discussion**

- Effet tunnel.

L'instruction MODELS détaille tous les modèles, à l'exception de celui par impact de l'ionisation qui est décrit dans la déclaration IMPACT.

Voici les modèles qui sont fréquemment utilisés et qui revêtent une grande importance :

### **IV.4.1.1.Modèle de mobilité.**

Les électrons et les trous sont accélérés par les champs électriques, toutefois, leur dynamisme est atténué par des phénomènes de diffusion qui incluent :

- Les vibrations de réseau (phonons)
- Les ions d'impuretés
- Les défauts dans les matériaux tels que la texture de surface.

Voici les modèles physiques qui caractérisent la mobilité [152] :

- CONMOB (Concentration Dépendante) : ce modèle prend en considération que la mobilité dépend de la concentration.
- CCSMOB (Carrier-Carrier Scattering): Ce modèle est essentiel lorsque la densité des porteurs est élevée.
- FLDMOB (Parallel Electric Field Dependence): ce modèle, qui prend en compte la dépendance de la mobilité au champ électrique parallèle, est indispensable pour simuler toute sorte d'effet de saturation de vitesse.
- ANALYTIC (Concentration and Temperature Dependent): dans ce modèle, la mobilité dépend de la concentration et de la température. Il est conçu pour des températures variant de 77 à 450 K.
- CVT (Lombardi (CVT) Model): il s'agit d'un modèle complet. Il prend en compte les effets de la concentration du dopant, de la température ainsi que des champs parallèles et perpendiculaires, ce qui le rend approprié pour les dispositifs non planaires
- .KLA (Klaassen Model): ce modèle prend en compte le lien entre la mobilité et la densité électronique, la concentration de l'agent dopant ainsi que la température. Il fait une distinction entre la mobilité des porteurs majoritaires et celle des porteurs minoritaires : son utilisation est conseillée pour les systèmes bipolaires.

## **Résultats et discussion**

### **IV.4.1.2. Modèle de fusion-recombinaison des porteurs.**

Le mécanisme par lequel le matériau semi-conducteur essaie de retrouver son état d'équilibre après avoir été perturbé est le processus de génération-recombinaison des porteurs. Voici les processus qui produisent la génération-recombinaison [152] :

- ✚ Transitions de phonons
- ✚ Transitions de photons
- ✚ Transitions d'Auger
- ✚ Recombinaison de surface
- ✚ Ionisation par impact.

les modèles physiques qui régissent la génération et la recombinaison des porteurs sont :

- SRH (Shockley-Read-Hall) Ce modèle utilise des durées de vie fixes pour les porteurs minoritaires. Il devrait être utilisé dans la plupart des simulations.
- CONSRH (Concentration Dependent) : Ce modèle décrit la recombinaison Shockley-Read-Hall, ce qui signifie qu'il prend en compte la dépendance de la durée de vie et de la concentration. Il est recommandé pour le Si.
- AUGER : Ce modèle décrit le processus de recombinaison Auger, essentiel pour obtenir des densités de courant élevées.

### **IV.4.1.3. Modèles analytiques des porteurs.**

Boltzmann : modèle par défaut.

- FERMI (Fermi-Dirac) : ce modèle diminue les concentrations de porteurs dans les zones fortement dopées (méthode statistique).
- BGN (Bandgap Narrowing) : On recommande ce modèle pour les régions fortement stimulées. Il utilise le modèle de Klaassen.
- 

### **IV.4.1.4. Modèle d'ionisation par pression.**

Le terme de génération pure fait référence à l'ionisation par impact. Pour chaque électron produit dans la bande de conduction, un trou équivalent est également créé dans la bande de valence. Une région de charge d'espace créant une polarisation inverse assez intense induit un champ électrique qui accélère les porteurs libres. Si la force du champ électrique est assez importante et que l'intervalle entre les collisions des porteurs est approprié pour une accélération rapide, les porteurs libres emmagasinent suffisamment d'énergie avant de

## **Résultats et discussion**

percuter les atomes du cristal ; ce qui entraîne une hausse du nombre de porteurs libres créés. Si le taux de production de porteurs libres est important, une avalanche peut se produire.

les modèles physiques qui caractérisent l'ionisation par impact :

- ❖ IMPACT SELB (Selberherr's Model) : c'est un modèle recommandé dans la plupart des contextes. Il englobe les paramètres affectés par la température.
- ❖ IMPACT CROWELL (Crowell-Sze) : il s'appuie sur la dépendance liée à la longueur de diffusion du porteur.

### **IV.4.1.5. Modèles de passage et modèles d'incorporation de porteurs.**

- FNORD (Fowler-Nordheim (electrons)) : c'est un modèle qui permet de calculer le tunneling à travers des isolants. On l'utilise dans les EEPROM.
- FNHOLES (Fowler-Nordheim (holes)) : ce modèle est identique à FNORD, mais il prend en compte les trous.
- BBT.STD (Band-to-Band (standard)) : c'est un modèle conçu pour les transitions directes. Il est recommandé pour des champs à des altitudes très élevées.
- BBT.KL (Klaassen Band-to-Band) : il couvre les transitions directement et indirectement.

### **IV.5.Méthodes numériques.**

On peut utiliser de diverses techniques numériques pour résoudre les problèmes liés aux dispositifs semi-conducteurs. Les instructions METHOD du fichier d'entrée contiennent les méthodes numériques. On distingue trois méthodes de résolution : Gummel, Newton et Block.

Si la même instruction METHOD mentionne diverses méthodes, celles-ci seront appliquées successivement jusqu'à ce qu'une convergence soit atteinte. On appliquera les méthodes de résolution dans l'ordre suivant : Gummel, Block, ensuite Newton. En l'absence d'une méthode de résolution spécifiée, la méthode de Newton est employée par défaut.

- ✚ Gummel (découplé) La méthode de Gummel s'attaque à chaque variable inconnue de façon séquentielle, en gardant les autres fixes et en répétant le processus jusqu'à obtenir une solution stable. Cette méthode autorise des suppositions initiales relativement modestes. Généralement, cela est avantageux lorsque le système

## **Résultats et discussion**

d'équations présente un faible lien, mais ne démontre qu'une convergence de type linéaire.

- ✚ Block La méthode Block gère certaines équations de façon entièrement couplée, tandis que d'autres le sont de manière découpée. C'est utile quand des équations relatives à la température du réseau ou à l'équilibre énergétique sont incorporées.
- ✚ Newton (entièrement couplé) : La méthode de Newton traite l'intégralité du système d'inconnues. C'est avantageux lorsque le système d'équations est fortement lié et montre une convergence de type quadratique. Il pourrait allouer plus de temps à traiter des volumes essentiellement fixes ou faiblement connectés. Cependant, cette méthode est souvent recommandée et elle représente l'approche conventionnelle dans la majorité des cas. Dans les contextes suivants, il est essentiel d'indiquer la méthode de Newton pour les simulations de diffusion-isotherme : Conditions aux limites pour le courant, étude en courant alternatif et ionisation par impact.

### **IV.6. Résultats de la simulation.**

#### **IV.6.1.Introduction.**

L'objectif de ce travail est de modéliser les caractéristiques électriques et optiques de cette diode et d'essayer de les améliorer. Cette recherche s'appuiera sur les caractéristiques physiques et optiques des matériaux utilisés et devrait aboutir à la création de structures efficaces.

#### **IV.6.2. Structures examinées ainsi que leurs paramètres physiques et géométriques.**

Le photodétecteur métal semi-conducteur métal ALGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> (Figure IV-3 (a)) est fabriqué à partir d'un substrat de saphir de type C et se compose d'une couche tampon en Ga<sub>N</sub> de 50 nm d'épaisseur, d'une couche de Ga<sub>N</sub> mesurant 100 nm (dopage  $n = 1e16 \text{ cm}^3$ ), suivie par une zone de nucléation Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N de 8 nm (dopage  $N = 1e16$ ), et enfin, d'une couche active Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N ayant une épaisseur de 6 nm (dopage  $N = 5e18 \text{ cm}^3$ ). En ce qui concerne le contact Schottky de type n, on utilise des électrodes métalliques en platine (pt) d'une épaisseur de 1 nm. cette configuration améliore la surface photosensible tout en laissant le comportement dynamique inchangé. En conséquence, cette structure planaire, le photodétecteur MSM Al-GaN/BGa<sub>N</sub> qui a une conception similaire à celle d'un transistor à effet de champ et une large bande passante, en fait un composant idéal pour les circuits

## Résultats et discussion

intégrés optoélectroniques [153]. Sur la Figure (IV-3 (b)), on observe une structure identique, avec en complément, une couche de  $B_{0.03}Ga_{0.99}N$  de 3 nm d'épaisseur intercalée entre la couche n-GaN et la couche tampon GaN, désignée par (b) photodétecteur AlGaN/GaN/BGaN/MSM.

La structure de dispositif proposée a été modélisée et finement maillée tout au long de la simulation en résolvant de manière computationnelle les équations de continuité des électrons et des trous ainsi que l'équation de Poisson bidimensionnelle en un nombre fini de points qui composent le maillage de la structure mentionnée. Les paramètres de simulation fondamentaux pris en compte à  $300K^{\circ}$  sont présentés dans le Tableau IV-1 [154]-[155]-[156]-[157]-[158]-[159].

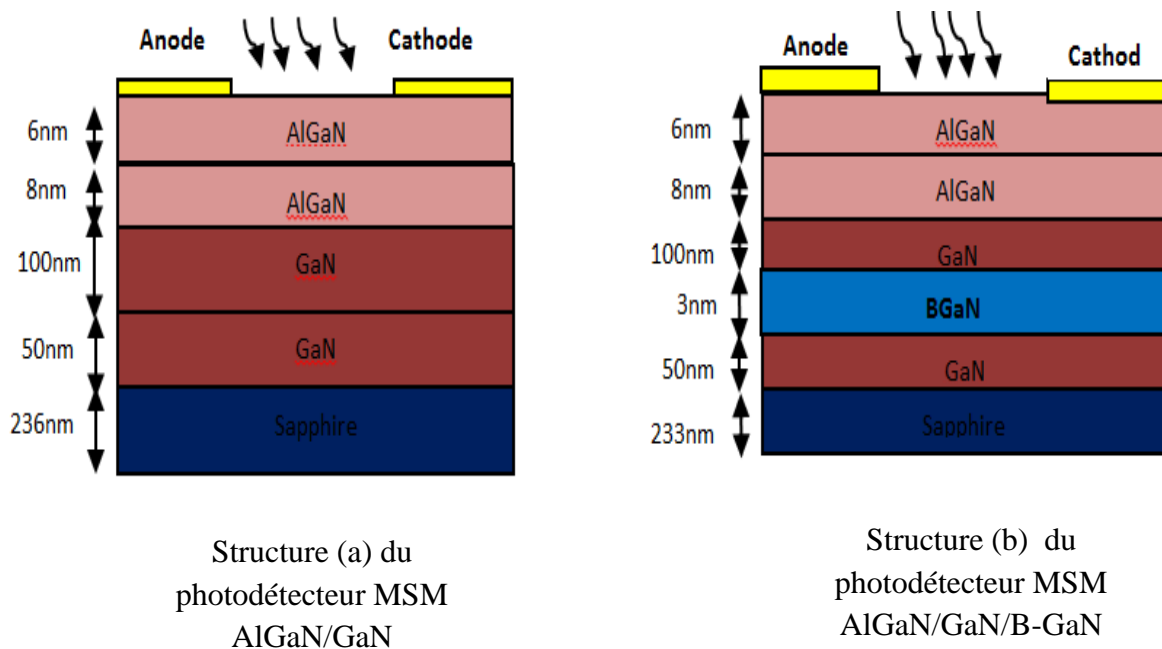


Figure IV-3 : Structure schématique du photodétecteur MSM .

Paramètres	INDICATION	GaN	$Al_xGa_{1-x}N$	$B_xGa_{1-x}N$
Bandgap energy	$E_g$	3.4 eV	3.88eV	3.32eV
Material permittivity	$\epsilon_r$	9,5	10.32	8.859
The carrier lifetimes of electrons	$\tau_n$	$1 \times 10^{-9}s$	$1 \times 10^{-9}s$	$5 \times 10^{-9}s$
The carrier lifetimes of holes	$\tau_p$	$1 \times 10^{-9}s$	$1 \times 10^{-9}s$	$5 \times 10^{-12}s$
Mobility of electron	$\mu_e$	$900 \text{cm}^2/V \text{ s}$	$600 \text{cm}^2/V \text{ s}$	$50 \text{cm}^2/V \text{ s}$
Mobility of hole	$\mu_h$	$10 \text{cm}^2/V \text{ s}$	$10 \text{cm}^2/V \text{ s}$	$40 \text{cm}^2/V \text{ s}$
The electron affinity	$\chi$	4.1	3.82	4.108
The electron density of states	$N_c$	$1,08 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$2,07 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	$2,96 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
The hole density of states	$N_v$	$1,16 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$1,16 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	$3,96 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

## Résultats et discussion

Tableau IV-1. Les paramètres du modèle physique supposés à  $T = 300\text{ K}$   
Fraction molaire pour AlGaN  $x=25\%$  et B GaN  $x=3\%$ .

### IV.6.2.1. Maillage et structure simulée.

Avec 3D-DevEDIT, un simulateur de dispositifs optiques lumineux 3D sophistiqué, le photodétecteur MSM AlGaN/GaN/BGaN est réalisé en trois dimensions (Figure IV-4) (a) et (b).

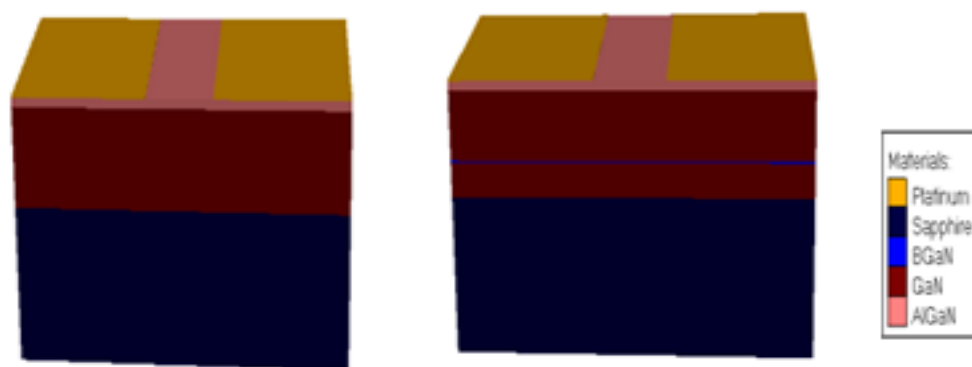
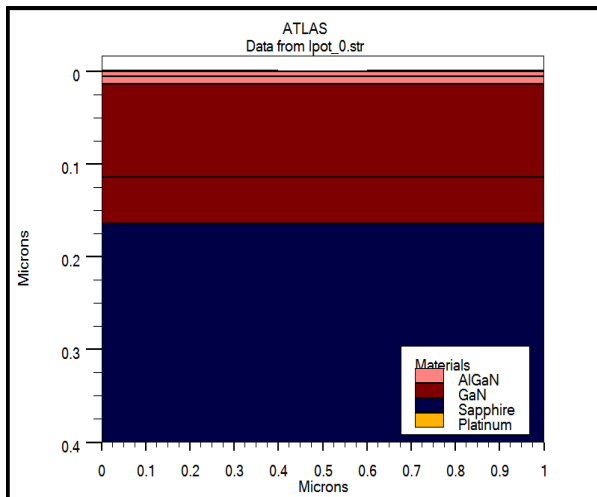


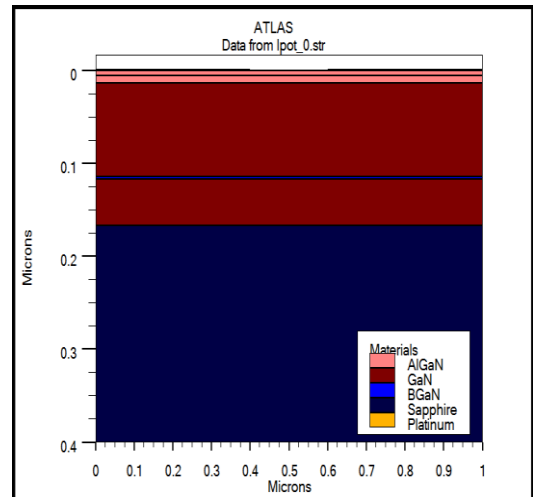
Figure IV-4 : Structure schématique 3d de (a) photodétecteur MSM AlGaN/GaN et (b) photodétecteur MSM AlGaN/GaN/BGaN.

Il est nécessaire de sélectionner une méthode de maillage raffinée pour le maillage de l'appareil afin d'obtenir de bons résultats. Dans la Figure IV-5, nous montrons une section transversale 2D de notre dispositif avec les différentes régions d'AlGaN, GaN et B GaN avec une lumière lumineuse pour la création de 2DEG. Parce que la photodétection dans un semi-conducteur est basée sur ou fonctionne avec la règle générale, c'est la formation de paires électron-trou sous l'action de la lumière lorsque les photons ont une énergie égale ou inférieure à la bande interdite ( $E_g$ ) du semi-conducteur.

## Résultats et discussion



(a)

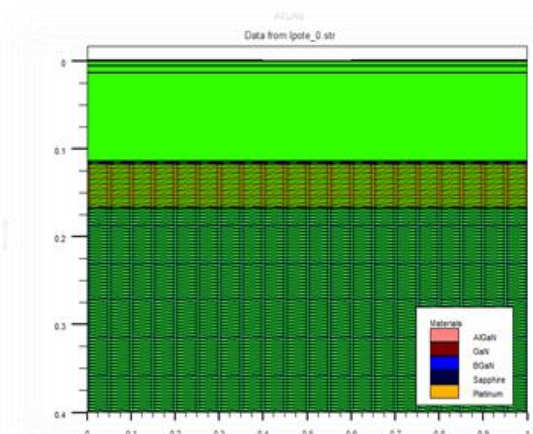
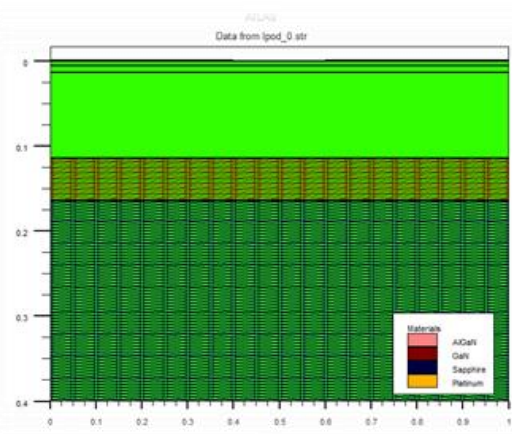


(b)

Figure IV-5 : section transversale 2D de (a) photodetecteur MSM AlGaIn/GaN et (b) photodetecteur MSM AlGaIn/GaN/BGaIn.

Nous avons établi la configuration de l'appareil en deux dimensions : x et y. On a employé ATLAS pour examiner les propriétés optoélectroniques en présence de lumière et d'obscurité. ATLAS ne renferme pas toutes les caractéristiques requises pour des matériaux composites tels que l'AlGaIn. L'instruction MESH est généralement utilisée pour définir le maillage, étant donné qu'ATLAS utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les équations. Le maillage joue un rôle crucial dans la simulation d'un dispositif. La figure IV-6 illustre ce point : il est raffiné dans les zones qui influencent le f

onctionnement de l'appareil, et il est étendu ailleurs.



## Résultats et discussion

(a) Meshing

(b) Meshing

Figure IV-6 : Structure schématique et maillage du (a) photodétecteur MSM AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et (b) photodétecteur MSM AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub>.

### IV.6.2.2. Diagramme de bandes d'énergie.

La figure IV-7 illustre le diagramme de bande d'énergie pour un photodétecteur MSM AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub> en condition d'obscurité et de lumière. La simulation numérique est une méthode très efficace pour examiner les phénomènes physiques dans les dispositifs qui affectent les caractéristiques électriques et optiques. Les résultats de simulation à température ambiante ont été produits en employant le logiciel Atlas Silvaco et le modèle Shockley-Read-Hall (SRH) à 300 K. Le modèle du diagramme de bande d'énergie a été réalisé à l'aide de BLAZE, qui est interfacé avec ATLAS. Pour les dispositifs III-V, II-VI et ceux avec des structures de bande dépendantes de la position (hétérojonctions), BLAZE est un simulateur de dispositifs 2-D polyvalent. Les modifications apportées aux équations de transport de charge dans BLAZE prennent en compte les impacts des structures de bande dépendantes de la position.

Deux barrières de Schottky liées dos à dos constituent le bloc de construction fondamental d'une structure MSM. Le total des deux largeurs de déplétion augmente en tandem avec la tension appliquée. L'électron de toute la barrière est bien plus grand que la barrière elle-même. Les deux zones de déplétion entrent en contact l'une avec l'autre à la tension de percée,  $V_{rt}$ , et le total correspond précisément à la tension de bande plate,  $V_{FB}$ . À mesure que la tension appliquée fait diminuer la barrière de trous effective, le courant de trous augmente rapidement.

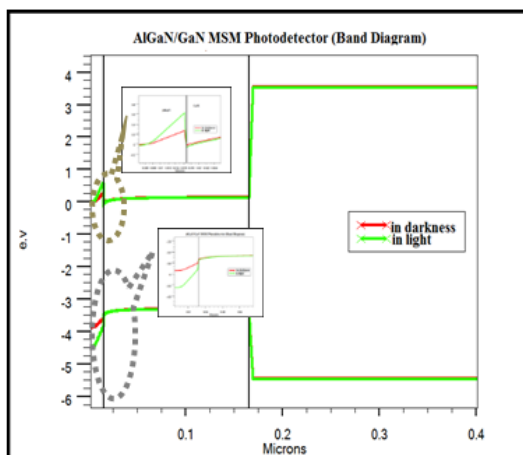


Diagramme de bande du photodétecteur MSM (c) AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>.

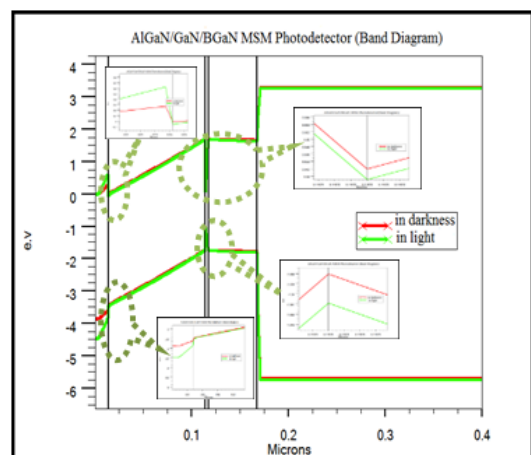


Diagramme de bande du photodétecteur MSM (d) AlGa<sub>N</sub> /Ga<sub>N</sub>/BGa<sub>N</sub>

## Résultats et discussion

comme référence. La simulation nécessitait la résolution de cinq équations en utilisant la méthode d'itération de Newton [160].

$$R_c^{opt} = C_c^{opt} (pn - n_i^2) \quad (IV-5)$$

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{p0} [(n+n_i) \exp(\frac{E_t}{KT})] + \tau_{n0} [(p+n_i) \exp(-\frac{E_t}{KT})]} \quad (IV-6)$$

$$R_{Augr} = C_n (pn^2 - nn_i^2) + C_p (p^2n - pn_i^2) \quad (IV-7)$$

$$R_{surf} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p^{eff} [(n+n_i) \exp(\frac{E_t}{KT})]} \quad (IV-8)$$

$C_c^{opt}$  le taux de porteurs de capture ;  $C_n$  et  $C_p$  les coefficients Auger pour les électrons et les trous, respectivement ;  $n$  et  $p$  les concentrations d'électrons et de trous à l'équilibre ;  $E_t$  est le niveau de piège de l'énergie ;  $n_i$  est la concentration intrinsèque de porteurs ;  $\tau_{n0}$  et  $\tau_{p0}$  les durées de vie des électrons et des trous, respectivement ;  $\tau_n^{eff}$  et  $\tau_p^{eff}$  les durées de vie effectives des électrons et des trous, respectivement [160].

Dans ce contexte, le courant d'obscurité du photodétecteur a été simulé en considérant les éléments suivants :  $I_{DIF}$ , le courant de diffusion des porteurs générés thermiquement dans les zones neutres ;  $I_{GR}$ , le courant de génération-recombinaison des porteurs au sein de la zone d'appauvrissement ; et  $I_{TUN}$ , le courant tunnel des porteurs qui passent à travers les barrières. Néanmoins, afin d'élargir l'analyse, nous avons considéré à la fois le courant de tunnel assisté par pièges ( $I_{TAT}$ ) et le courant de tunnel bande à bande ( $I_{BTB}$ ). On peut exprimer le courant net sous la forme [160] : C'est le taux de porteurs de capture.

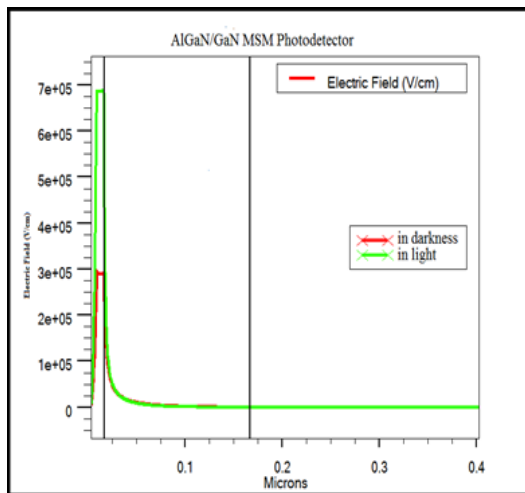
$$I = I_{GR} + I_{TUN} + I_{TAT} + I_{BTB} \quad (IV-9)$$

### IV.7. Champ électrique.

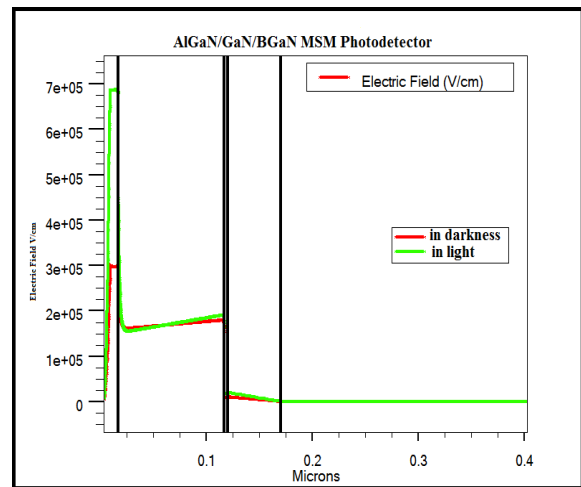
Dans le cas de faibles champs électriques, la vitesse des porteurs de charge est liée à celui-ci par une proportionnalité qui est décrite par un coefficient appelé mobilité. Cette dernière est indépendante du champ électrique appliqué. « La figure IV-8) montre, que le photodétecteur MSM à champ électrique dans des conditions d'obscurité et de lumière avec et sans le B GaN. Sans la couche B GaN, le champ électrique à l'interface de la couche qui reçoit l'illumination (AlGaIn) passe de 2,94 e5 V/cm dans l'obscurité à 6,88 e5 V/cm à la lumière ; toutefois, lorsque la couche B GaN a été utilisée, le champ électrique a augmenté à 3,01 e5 V/cm dans l'obscurité et à 6,93 e5 V/cm à la lumière. L'analyse de la transmission des ondes

## Résultats et discussion

électromagnétiques, ou analyse des semi-conducteurs, peut être utilisée pour analyser le flux d'énergie à travers les photodétecteurs MSM.



(e) Champ électrique de photodétecteur MSM AlGaIn/GaN.



(f) Champ électrique de photodétecteur MSM AlGaIn/GaN/BGaIn.

Figure IV-8 : Champ électrique du photodétecteur MSM (e) AlGaIn/GaN et (f) AlGaIn/GaN/BGaIn.

### IV.8. Simulation des performances et discussion des résultats.

#### IV.8.1. Introduction.

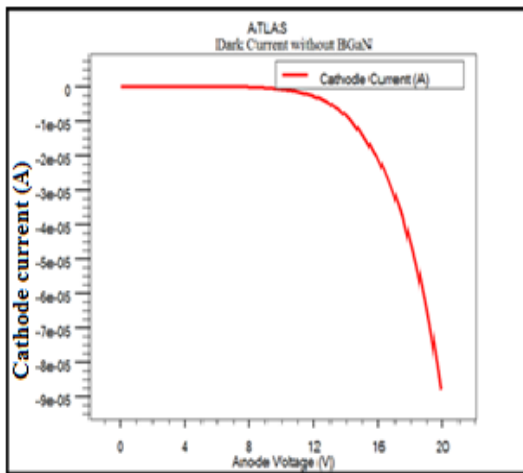
Les résultats de la simulation ont été réalisés en élaborant le programme au sein de l'interface DECKBUILD, associée à ATLAS, pour les photodétecteurs AlGaIn/GaN MSM et AlGaIn/GaN/BGaIn ultraviolet à une température de 300K. Suite à l'élaboration de photodétecteurs dans DevEdit, nous avons pu établir les propriétés des matériaux utilisés dans cette configuration : bande d'énergie pour les électrons, densités de conduction et de valence, mobilités des trous et des électrons, permittivité... [152].

#### IV.8.2. Caractéristique courant-tension sous lumière et en obscurité.

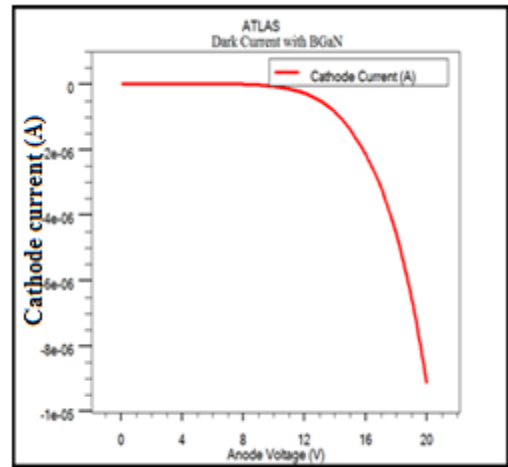
On peut expliquer le contact Schottky en considérant la hauteur de la barrière due aux effets de tunnel, au champ électrique interfacial et à la recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace du contact métal-semi-conducteur [161-163]. Figure (IV-9), montre la propriété (I-V) du photodétecteur MSM dans des environnements sombres et lumineux,

## Résultats et discussion

avec et sans BGaN. Sans BGaN, nous obtenons  $8,74 \times 10^{-5}$  A dans l'obscurité et 0,026 A en éclairage à  $V_{\text{anode}} = 20$  V ; la sensibilité ( $I_{\text{éclairage}}/I_{\text{obscurité}}$ ) est de 286. En conséquence, avec le BGaN, nous obtenons  $9,2 \times 10^{-5}$  A dans l'obscurité et 0,027 A en éclairage à  $V_{\text{anode}} = 20$  V. La sensibilité ( $I_{\text{éclairage}}/I_{\text{obscurité}}$ ) est de 293,4. Grâce à la gestion efficace des gaz bidimensionnels dans le canal GaN et le BGaN, ce dispositif est clairement une meilleure option pour les applications de photosensibilité, car il présente un courant d'obscurité plus faible et une photosensibilité plus élevée avec et sans BGaN. Figure 5(IV-10), nous montrons les courants d'illumination dans le photodétecteur MSM avec et sans BGaN.

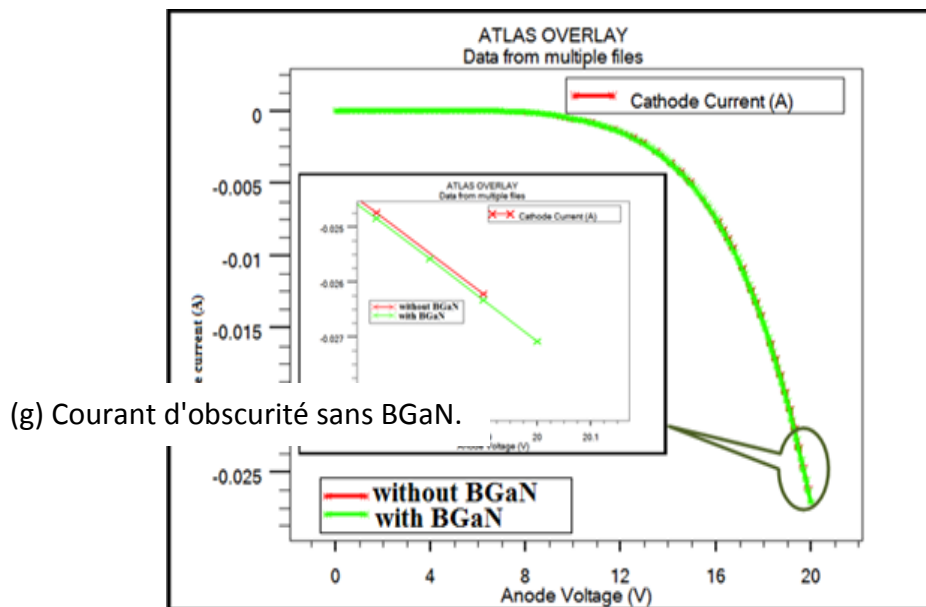


(g) Courant d'obscurité sans BGaN.



(h) Courant d'obscurité avec BGaN.

Figure IV-9 : Caractéristiques I-V des photodétecteurs (g) AlGaIn/GaN MSM et (h) AlGaIn/GaN/BGaN/MSM dans l'obscurité.



(g) Courant d'obscurité sans BGaN.

## Résultats et discussion

Figure IV-10 : Courants d'illumination dans le photodétecteur MSM UV avec et sans BGaN.

Le courant produit à la suite de l'absorption de photons est appelé photocourant, également connu sous le nom de courant photogénéré. Le courant d'obscurité est le courant qui existe lorsqu'aucune lumière ne frappe le détecteur et qui est produit thermiquement ou par interaction phononique. Lorsque la lumière contenant des photons d'une énergie suffisamment élevée frappe la surface d'un semi-conducteur, le photon peut être absorbé et des paires électron-trou peuvent se former. Pour qu'un photon soit absorbé, se produise et déplace un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, son énergie doit être supérieure ou égale à la bande interdite du matériau semi-conducteur. L'énergie du photon peut être liée à la longueur d'onde ou à la fréquence de la lumière, comme illustré. En utilisant une couche de BGaN, les performances d'un photodétecteur sont déterminées par le courant d'obscurité ; mieux vaut que sa valeur soit faible. La comparaison du courant d'obscurité et le courant photoélectrique à une température de 300 K pour une tension de 20 V du MSM photodétecteur avec et sans couche BGaN est présentée dans le tableau IV-2. Pour une concentration en bore de 3 %, nous avons obtenu une forte augmentation de la résistivité de la couche, le courant d'obscurité dans le BGaN diminuant.

Device	Dark current	Illumination current	Ref
A study of <u>BGaN/GaN Photo-detector UV/Blue</u>	Between 10-4A and 10-3A	between 0.002A and 0.007A	[24]
<u>AlGaN/GaN MSM photodetector UV without BGaN</u>	8.74e-5A	0.026A	This work
<u>AlGaN/GaN MSM photodetector UV without BGaN</u>	9.2 e-5A	0.027A	This work

<b>High Detectivity and Fast MoS2 Monolayer MSM Photodetector</b>	<b>5.39 e-9A</b>	<b>10e-5A</b>	<b>[164]</b>
---	------------------	---------------	--------------

Tableau IV-2 : Comparaison de courant dans l'obscurité et sous 'illumination des dispositifs.

### **IV.8.3. photocourant disponible (available photocurrent).**

## Résultats et discussion

Figure (IV-11) , nous illustrons que le photocourant disponible est en fonction de la longueur d'onde. Le photocourant maximal est obtenu à environ 0,350  $\mu\text{m}$  de lumière incidente, car le semi-conducteur absorbe le plus de lumière à cette longueur d'onde ; nous obtenons  $1,56 \cdot 10^{-7}$  A sans BGeN et  $1,85 \cdot 10^{-7}$  A avec BGeN dans le photodétecteur UV MSM.

➤  $E = h\nu = h * c / \lambda$  (IV-10)

➤  $e_{\text{photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$  or  $h * c = 1.24$  (IV-11)

➤  $E_g \text{ AlGaIn } 3.88 \text{ eV}$

➤  $\lambda = \frac{1.24}{e_{\text{photon}}}$

➤  $\lambda = \frac{1.24}{e_{\text{photon}}}$

➤  $\lambda = \frac{1.24}{3.88}$

➤  $\lambda = 0.320 \mu\text{m}$

Ici, E représente l'énergie du photon, h symbolise la constante de Planck,  $\nu$  correspond à la fréquence optique du photon, c dénote la vitesse de la lumière et  $\lambda$  désigne la longueur d'onde à laquelle le photon de moindre énergie peut être détecté, ayant une énergie équivalente à la bande interdite. être identifié et dont l'énergie est équivalente à la bande interdite.

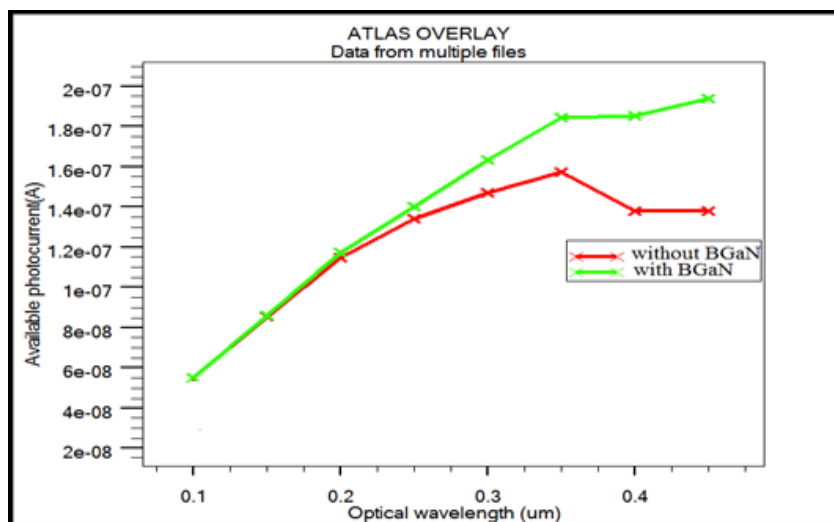


Figure IV-11 : Réponse spectrale de photodétecteur UV MSM.

## Résultats et discussion

### IV.8.4. Responsivité de photodétecteur UV MSM.

Figure (IV-12), nous montrons la réponse optique du photodétecteur UV MSM avec et sans BGaN. Nous avons obtenu une responsivité maximale de 19 A/W sans BGaN et de 23 A/W avec BGaN à une longueur d'onde optique de 0,350  $\mu\text{m}$ . Le rapport entre la sortie électrique et l'entrée optique est la mesure de la sensibilité d'un photodétecteur. Sa définition est le rapport entre la puissance optique incidente et le courant photogénéré. La réactivité est fréquemment exprimée en ampères par watt, ou en volts par watt, par rapport à la puissance radiante incidente. La réactivité est affectée à la fois par la longueur d'onde de la lumière incidente et par la bande interdite du matériau utilisé pour créer le photodétecteur.

$$R = n \frac{e}{h\omega} = R_{max} = n \frac{\lambda[\mu\text{m}]}{1.24} \longrightarrow n = \frac{R \cdot 1.24}{\lambda[\mu\text{m}]} \quad (\text{IV-12})$$

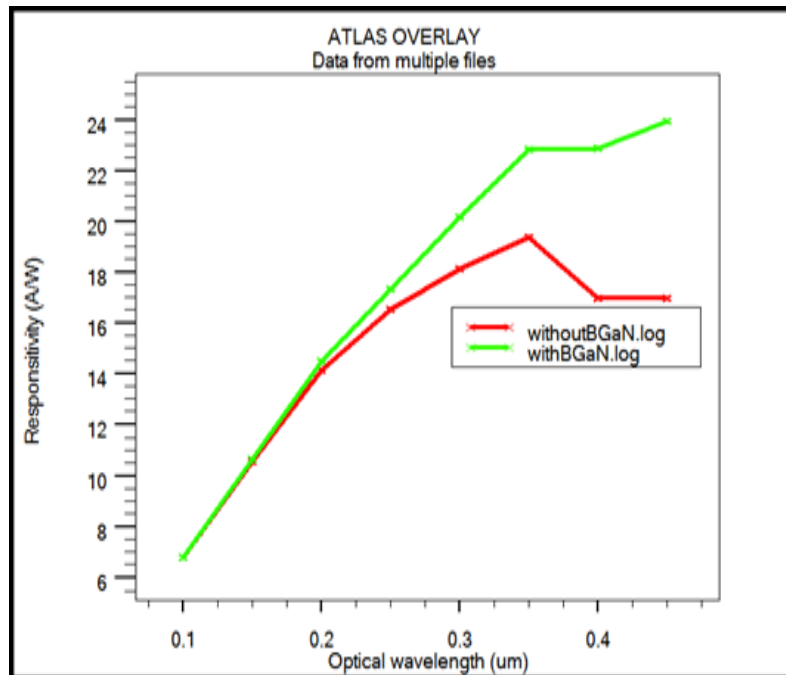


Figure IV-12 : Responsivité de photodétecteur UV MSM.

### IV.8.5. Rendement quantique du photodétecteur UV MSM.

Dans la Figure (IV-13), nous montrons l'efficacité quantique du dispositif. Nous avons obtenu un  $\eta$  max de 88% sans BGaN et de 90% avec BGaN, et à  $\lambda = 0,350 \mu\text{m}$ , nous avons obtenu un  $\eta$  de 68% sans BGaN et de 81% avec BGaN. Le dispositif est capable de détecter principalement le rayonnement UV. L'efficacité quantique ( $\eta$ ), définie comme le ratio entre le

## Résultats et discussion

nombre d'électrons générés et le nombre de photons atteignant le détecteur, est un indicateur essentiel pour juger la performance du détecteur. Autrement dit, elle est fréquemment exprimée en pourcentage et peut être définie comme l'efficacité de la transformation d'un photon en électron. Un détecteur de lumière ayant une efficacité quantique de 1 serait idéal. En réalité, l'efficacité quantique de tous les photodétecteurs est en dessous de un.

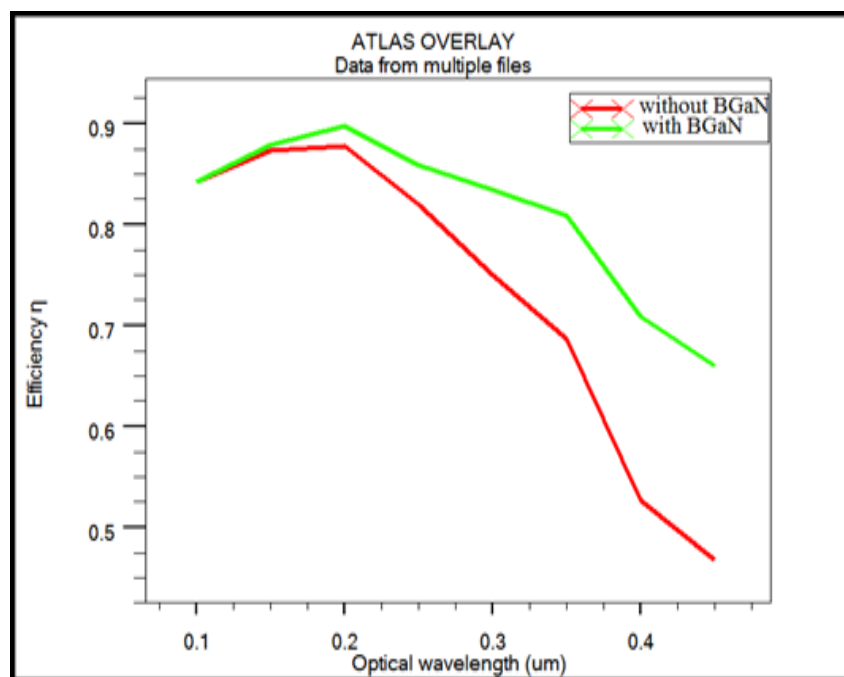


Figure (IV-13) : Rendement quantique du photodétecteur UV MSM.

### **IV.8.6. Absorption et diffusion en rapport avec la lumière.**

Figure (IV-14) illustre l'absorption et la transmission du photodétecteur MSM UV selon la longueur d'onde de la lumière incidente. L'absorption peut être élargie en utilisant les alliages (Al, Ga, B) N ; le seuil de détection peut être ajusté pour collecter le maximum de photons tout en minimisant la transmission des photons. Ils sont meilleurs que ceux d'un photodétecteur sans BGaN . Cela a un impact direct sur l'efficacité  $\eta$ . Nous avons obtenu une absorption de 0,97 avec BGaN et de 0,88 sans BGaN à  $\lambda = 0,350 \mu\text{m}$ , ainsi qu'une transmission de 0,03 avec BGaN et de 0,12 sans BGaN.

## Résultats et discussion

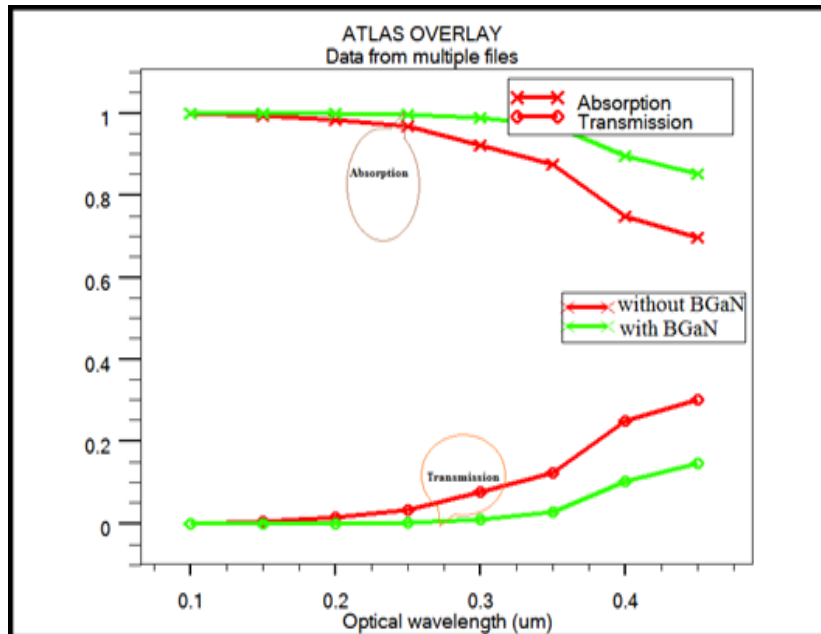


Figure IV-14 : Absorption et Transmission d'un Photodétecteur UV MSM.

### IV.8.7. Capacité en rapport avec la tension de l'anode.

La figure (IV-15) montre comment la capacité varie en fonction de la tension d'anode, avec et sans B GaN. La capacité par unité de surface du semi-conducteur totalement épuisé correspond à celle d'un condensateur à deux plaques parallèles. On peut exploiter deux gammes de tension pour illustrer la variation de la capacité différentielle d'une structure MSM. Lorsque  $V < V_{RT}$ , la capacité résultante par unité de surface est due à deux capacités mises en série. Le semi-conducteur est entièrement saturé à  $V > V_{RT}$ , et la capacité par unité de surface correspond à celle d'un condensateur à plaques parallèles. Dans ce contexte, notre appareil utilise la capacité totale par unité de surface issue de deux zones de déplétion situées entre les électrodes métalliques et le semi-conducteur, soit deux diodes Schottky connectées en série.

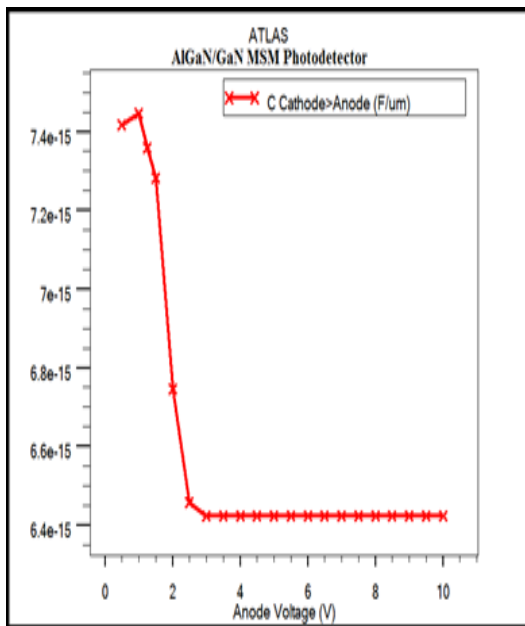
$$C_{MSM} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \quad (IV-12)$$

Notre dispositif a une structure planaire et symétrique, donc  $C1=C2$ .

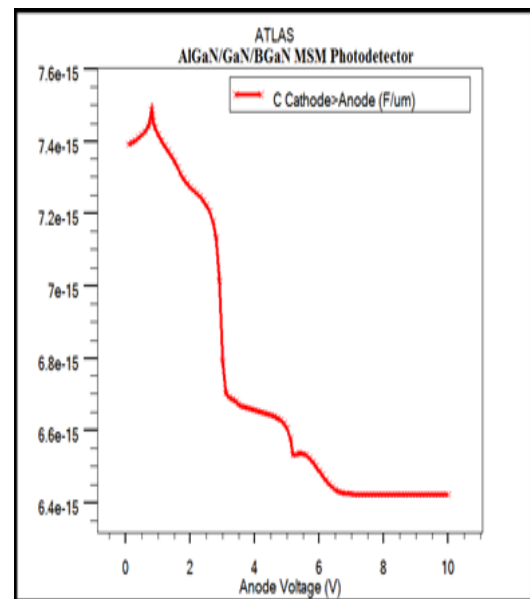
$$C_{MSM} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon q_s N_D}{2(V_{bi}+V)}} \quad (IV-13)$$

## Résultats et discussion

Où  $q$  est la charge élémentaire,  $\epsilon$  est la permittivité du semi-conducteur,  $ND$  est la concentration de dopage (donneur),  $V_{bi}$  est le potentiel intégré, et  $V_{RT}$  est la tension de seuil atteinte. Nous obtenons avec B GaN  $7,49 \text{ e-15 F}$  et sans B GaN  $7,44 \text{ e-15 F}$ , qui sont des valeurs basses indiquant un faible courant de fuite par rapport à ce qui existe dans la littérature.



(i) Capacité sans B GaN.



(j) Capacité avec B GaN.

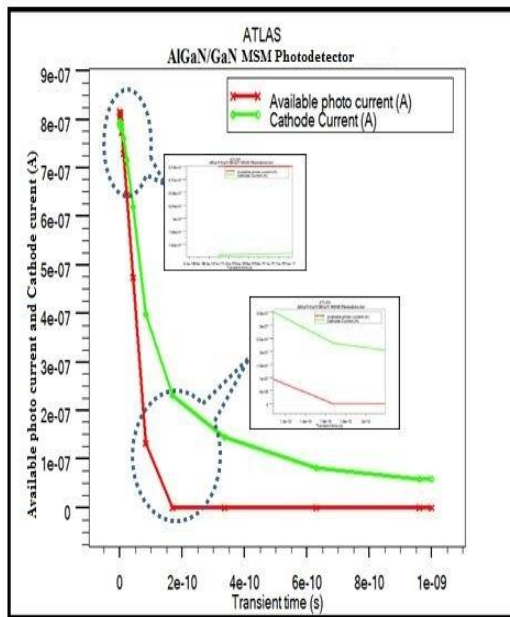
Figure IV-15 : Les capacités du photodétecteur (i) MSM AlGaIn/GaN et (j) du photodétecteur MSM AlGaIn/GaN/B GaN .

### IV.8.8. Temps de réponse.

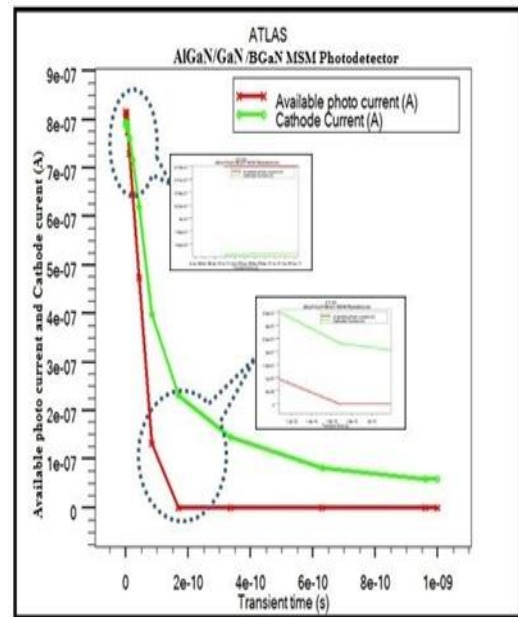
La rapidité de réponse d'un photodétecteur est souvent soulignée comme un critère de performance et de qualité ; la figure (IV-16) Montre la vitesse du photodétecteur MSM avec et sans B GaN. Nous analysons la réponse en temps de montée de notre structure planaire avec et sans B GaN. Dans le courant de cathode à 0V de polarisation, c'est-à-dire en mode cellule solaire, la réponse transitoire est analysée car, avec la tension de polarisation, les porteurs dérivent plus rapidement, donc nous ne pouvons pas prédire le comportement transitoire intrinsèque du dispositif. À partir de ce graphique, nous avons constaté que la vitesse du photodétecteur avec et sans B GaN est presque la même. Nous observons que notre

## Résultats et discussion

dispositif a une réponse transitoire rapide avec et sans BGaN. Notre photodétecteur MSM avec et sans BGaN fonctionne dans la gamme de  $1 \text{ e}17 \text{ kHz}$  avec un photocourant de  $7,82 \text{ e-}7 \text{ A}$ . La vitesse du photodétecteur est l'un des principaux paramètres à prendre en compte lors de l'évaluation des performances du photodétecteur.



(k) Réponse transitoire sans BGaN



(l) Réponse transitoire avec BGaN

Figure IV-16 : Réponse transitoire du photodétecteur (k) MSM AlGaIn/GaN et du photodétecteur (l)MSM AlGaIn/GaN/BGaN .

### IV.9.Conclusion.

On présente dans ce chapitre, les résultats de la simulation et les outils avec lesquels nous avons travaillé. Le simulateur DevEdit et ATLASTCAD a été employé pour réaliser la modélisation et la simulation d'un photodétecteur MSM AlGaIn/GaN/BGaN. Initialement, nous avons présenté le programme que nous avons utilisé. Dans la seconde partie, nous avons examiné l'impact de nitrure de Bore (BN) dans la couche de barrière arrière dont on a retiré les caractéristiques optiques et électriques de notre dispositif avec et sans introduction de cette dernière, dont on a constaté d'après Les résultats que la structure de photodétecteur UV AlGaIn/GaN/BGaN MSM de haute qualité proposée est un dispositif à faible coût. Ce dispositif peut être utilisé dans différentes applications dans la gamme UV.

# *Conclusion générale et perspectives*

## **Conclusion générale et perspectives**

Les photodétecteurs métal-semiconducteur-métal (MSM) utilisant des alliages AlGa<sub>x</sub>N/GaN/BGa<sub>1-x</sub>N ont fait l'objet de recherches approfondies ces dernières années, en raison de leurs performances exceptionnelles dans la détection ultraviolette (UV). L'objectif de notre travail est de faire plus de performance. Cette recherche illustre des avancées significatives dans le développement de photodétecteurs UV établis sur des alliages AlGa<sub>x</sub>N/GaN/BGa<sub>1-x</sub>N, soulignant leur potentiel pour des applications nécessitant une détection UV efficace. Notre article présente une exploration approfondie des structures de photodétecteurs UV MSM AlGa<sub>x</sub>N/GaN de grande surface sur des wafers de saphir, visant à étudier l'élimination des défauts cristallins et la réduction de la densité de dislocations dans la structure épitaxiale du photodétecteur UV MSM. Les principaux objectifs de ce travail sont de fabriquer des PD UV MSM en utilisant la structure sélectionnée et de caractériser leurs courants d'obscurité et photocourants, leur responsivité, leur détectivité spécifique, et de réaliser des simulations optiques sur des hétérostructures AlGa<sub>x</sub>N/GaN avec et sans nitrure de bore et de gallium BGaN. Pour cela nous avons rappelé les propriétés des matériaux III nitrurés dans le premier chapitre, leurs phases cristallines ; Polarité, propriétés mécaniques ; coefficients élastiques ; propriétés optiques ; bande interdite ; influence de la contrainte et de la température sur le gap ; défauts structuraux ; présentation des défauts structuraux dans un cristal ; Alliages AlGa<sub>x</sub>N ; masse effective des porteurs ; substrats. Et pour terminer ce chapitre, on a présenté des photodétecteurs ultraviolets ainsi que les matériaux pour la détection UV et à la fin nous avons présenté des photodétecteurs métal semi-conducteur métal à plusieurs bases. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différents types de photodétecteurs ultraviolets ainsi que leurs différents types de contacts et de dopage et on a expliqué le phénomène de transport dans les semi-conducteurs ; Recombinaison et génération et on a terminé ce chapitre par la présentation du modèle physique de Shockley-Read-Hall (SRH) qui est le modèle utilisé pour notre simulation de notre dispositif. Au cours du troisième chapitre, nous avons détaillé la croissance épitaxiale sur les matériaux nitrurés ainsi que leurs différentes techniques de croissance et nous avons aussi donné toutes les propriétés du ternaire Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N et sa variation du gap ; Paramètre de courbure ; différents types de son ; dopage ; Vitesse de saturation dans Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N en fonction de x ; Mobilité des électrons dans Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N en fonction de x ; Principe d'élaboration ; incorporation d'Al dans GaN ; incorporation de Ga dans AlN et techniques de caractérisation. Ensuite on a présenté la photoluminescence et la réflectivité. Nous avons finalisé notre chapitre par des propriétés de base du ternaire nitrure de gallium-bore B<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. Dans le dernier chapitre, nous avons décrit l'outil de la simulation avec lequel nous avons travaillé dans la première partie et dans la deuxième partie, nous

## **Conclusion générale et perspectives**

avons présenté tous nos résultats en détail des caractéristiques optiques et électriques de notre photodétecteur MSM AlGa<sub>x</sub>N/GaN/BGa<sub>1-x</sub>N. De plus, la structure du nitrure de gallium et de bore (BGaN) peut être moins stable que celle du GaN ou de l'AlGa<sub>x</sub>N, surtout à des concentrations élevées de bore. Enfin, bien que les études montrent des améliorations significatives des performances, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la stabilité à long terme et la fiabilité des dispositifs utilisant le BGaN comme couche de barrière arrière.

## **Références**

- [1] John E. Bowers, Tin Komljenovic, Michael Davenport, Jared Hulme, Alan Y. Liu, Christos T. Santis, Alexander Spott, Sudharsanan Srinivasan, Eric J. Stanton, and Chong Zhang, "Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems", Recent advances in silicon photonic integrated circuits, Proc. SPIE 9774, V, (2016), 977402.
- [2] Tewfik. BAGHDADLI, Study of the structural and electronic properties of new materials based on III-N alloys for optoelectronics, doctorate thesis (2009).
- [3] E. Ozbay, N. Biyikli, I. Kimukin, T. Tut, T. Kartaloglu, and O. Aytur, High-performance solar-blind photodetectors based on Al/sub x/Ga/sub 1-x/N heterostructures, IEEE J. Quantum Electron, (2004), 10-742.
- [4] N. Biyikli, I. Kimukin, T. Tut, O. Aytur, and E. Ozbay, Solar-blind AlGa<sub>N</sub>-based Schottky photodiodes with low noise and high detectivity, Appl. Phys. Lett, (2002), 81-3272.
- [5] M. Razeghi and A. Rogalski, Semiconductor ultraviolet detectors, J. Appl. Phys. 79, (1996). 7433 .
- [6] R. W. Chuanga, S. P. Chang, and S. J. Chang, Gallium nitride metal-semiconductor-metal photodetectors prepared on silicon substrates Journal of Applied Physics 102, (2007), 073110.
- [7] X. Li, J. D. Beck, M. A. Kinch, A. Huntington, L. A. Coldren, J. Decobert, and N. Tschertner, IEEE J. Quantum Electron, (2004), 10-777.
- [8] N. Biyikli, I. Kimukin, O. Aytur, M. Gokkavas, M. S. Unlu, and E. Ozbay, High-speed visible-blind GaN-based indium–tin–oxide Schottky photodiodes, Appl. Phys. Lett, (2001), 79, 2838.
- [9] C. J. Collins, T. Li, A. L. Beck, R. D. Dupuis, J. C. Campbell, J. C. Carrano, M. J. Schurman, and I. A. Ferguson, improved devices performance using a semi transparent p-contcat AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Heterojunction Positive-Intrinsic-Negative Photodiode, Appl. Phys. Lett, (1999), 75-2138.
- [10] T. Kashima, R. Nakamura, M. Iwaya, H. Katoh, S. Yamaguchi, H. Amano, and I. Akasaki, Microscopic Investigation of Al<sub>0.43</sub>Ga<sub>0.57</sub>N on Sapphire, Jpn. J. Appl. Phys, (1999), Part 2 38, L1515.

## **Références**

- [11] E. Monroy, F. Omnes, and F. Calle, Semicond. Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors, *Sci. Technol.*, (2003), 18-R33.
- [12] Gao W. Khan, A. Berger, P.R, Hunsperger R.G, Zydzik G. O, Bryan, H.M, Sivco .D, Cho A.Y, In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes with Transparent Cadmium Tin Oxide Schottky Contacts *Appl. Phys. Letts.* 65, 1930-1932 (1994).
- [13] Su Y.K, Chiou Y.Z, Juang F.S, Chang S.J, Sheu J.K, GaN and InGaN Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors with Different Schottky Contact Metals *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, 2996-2999 (2001).
- [14] Pierre Masri, Silicon carbide and silicon carbide-based structures, the physics of epitaxy, *Surface Science Reports* 48, 1-51 (2002).
- [15] Mc. Clintock R, Mayes. K, Yasan .A, Shiell. D, Kung .P, Razeghi .M, Avalanche multiplication in AlGa<sub>N</sub> based solar-blind photodetectors, *Applied Physics Letters*, (2005), Vol.86, No.1, p.011117.
- [16] Zhao D. G, Jiang D. S, Zhu J. J, Liu Z. S, Zhang S. M, Liang J. W, Yang H, Li X, Li X. Y, Gong H. M, Influence of defects in n-GaN layer on the responsivity of Schottky barrier ultraviolet photodetectors, *Applied Physics Letters*, (2007), Vol.90, No.6, p.062106.
- [17] J. C. Carrano, T. Li, P. A. Grudowski, R. D. Dupuis, and J. C. Campbell, Improved detection of the invisible, *IEEE Circuits Devices Mag*, (1999), Vol. 15, pp. 15.
- [19] K. Kishino, M. Yonemaru, A. Kikuchi, and Y. Toyoura, "Resonant-Cavity-Enhanced UV Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodetectors Based on AlGa<sub>N</sub> System," *Physica Status Solidi A Appl Res*, vol. 188, no. 1, pp. 321–324, 2001, doi: 10.1002/1521-396X(200111)188:1<321::AID-PSSA321>3.0.CO;2-8.
- [20] Y. Z. Chiou, Y. C. Lin, and C. K. Wang, "AlGa<sub>N</sub> photodetectors prepared on Si substrates," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 28, no. 4, pp. 264–266, 2007, doi: 10.1109/LED.2007.893224.
- [21] S. J. Chang et al., "AlGa<sub>N</sub> ultraviolet metal-semiconductor-metal photodetectors grown on Si substrates," *Sens Actuators A Phys*, vol. 135, no. 2, pp. 502–506, 2007, doi:10.1016/j.sna.2006.09.017.

## **Références**

- [22] Pandit, S., et al. (2023). Development of a highly sensitive UV photodetector based on graphene electrode structure in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT with p-GaN mesa configuration. Wiley Online Library. DOI: 10.1002/admi.202202379.
- [23] Kilin, A., et al. (2025). Optimization of MSM photodetector design based on Ga<sub>N</sub> and In<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub> for UV detection. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2503.14670>.
- [24] Allam, M., et al. (2024). Study of the effect of B<sub>GaN</sub> layer incorporation in photodetector structure: Optical absorption and photocurrent enhancement in the UV range. Taylor & Francis Online. DOI: 10.1080/03772063.2024.2390091.
- [25] B. G. Vasallo, N. Wichmann, S. Bollaert, A. Cappy, T. Gonzalez, D. Pardo & J. Mateos. "Monte Carlo Comparison between InP-Based Double-Gate and Standard HEMTs," Proceedings of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference, (2006) 304-307, Manchester UK.
- [26] Beatriz G. Vasallo, Nicolas Wichmann, Sylvain Bollaert, Yannick Roelens, Alain Cappy, Senior Member, IEEE, Tomás González, Senior Member, IEEE, Daniel Pardo & Javier Mateos, "Comparison Between the Dynamic Performance of Double- and Single-Gate AlInAs/InGaAs HEMTs, " IEEE Trans on electron devices 54, 11 (2007).
- [27] S. Zafar a, b, A. Kashifa, S. Hussain b, N. Akhtar a, N. Bhatti a & M. Imran a, "Designing of Double Gate HEMT in TCAD for THz Applications," Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST) Islamabad, Pakistan, 15th - 19th Jan. 2013.
- [28] Saravana Kumar R, Mohanbabu A, Mohankumar N & Godwin Raj D, "Simulation of InGaAs Sub-channel DG-HEMTs for analog / RF applications," International Journal of Electronics,(2017) 1-21.
- [29] J. Jurkevičius, J. Mickevičius, A. Kadys, M. Kolenda, and G. Tamulaitis, "Photoluminescence efficiency of B<sub>GaN</sub> epitaxial layers with high boron content," Phys. B Condens. Matter, vol. 492, pp. 23–26, 2016, doi: 10.1016/j.physb.2016.03.033.
- [30] T. Honda, M. Shibata, M. Kurimoto, M. Tsubamoto, J. Yamamoto, and H. Kawanishi, "Band-gap energy and effective mass of B<sub>GaN</sub>," Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap., vol. 39, no. 4 B, pp. 2389–2393, 2000, doi: 10.1143/jjap.39.2389.

## **Références**

- [31] R. J. Kaplar, A. A. Allerman, A. M. Armstrong, M. H. Crawford, J. R. Dickerson, A. J. Fischer, A. G. Baca, and E. A. Douglas, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 6, Q3061 (2017).
- [32] K. Nagata, K. Takeda, Y. Oshimura, K. Takehara, H. Aoshima, S. Ito, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, H. Amano, H. Yoshida, M. Kuwabara, Y. Yamashita, and H. Kan, *Phys. Status Solidi C* 8, 2384 (2011).
- [33] H. Yoshida, Y. Yamashita, M. Kuwabara, and H. Kan, *Appl. Phys. Lett.* 93, 241106 (2008).
- [34] C. Pernot, S. Fukahori, T. Inazu, T. Fujita, M. Kim, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, M. Iwaya, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano, *Phys. Status Solidi A* 208, 1594 (2011).
- [35] V. Adivarahan, W. H. Sun, A. Chitnis, M. Shatalov, S. Wu, H. P. Maruska, and M. A. Khan, *Appl. Phys. Lett.* 85, 2175 (2004).
- [36] H. Hirayama, S. Fujikawa, N. Noguchi, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki, and N. Kamata, *Phys. Status Solidi A* 206, 1176 (2009).
- [37] Z. G. Shao, D. J. Chen, H. Lu, R. Zhang, D. P. Cao, W. J. Luo, Y. D. Zheng, L. Li, and Z. H. Li, *IEEE Electron Device Lett.* 35, 372, (2014).
- [38] L. H. Yang, K. R. Lai, B. H. Zhang, X. L. Fu, J. J. Wang, and W. Wei, *Phys. Status Solidi A* 212, 698 (2015).
- [39] Can Bayram, and Manijeh Razeghi, "Ultraviolet detectors: Nitrides push performance of UV photodiodes"; 2009.
- [40] A. Trampert, O. Brandt, and K. Ploog, "Chapter 7: Crystal Structure of Group {III} Nitrides," in *Gallium Nitride (GaN)*, ser. *Semiconductors and Semimetals*, J. I. Pankove and T. D. Moustakas, Eds. Elsevier, 1997, vol. 50, pp. 167 { 192.
- [41] Fabrice Enjalbert, *Etude des hétérostructures semi-conductrices III-nitrides et application au laser UV pompé par cathode à micropointes*, p(30), 2004.

## **Références**

- [42] Ez-zejjari, I.; Ghazi, H.E.; Belaid, W.; En-nadir, R.; Abboudi, H.; Sali, A. Hydrostatic-Pressure Modulation of Band Structure and Elastic Anisotropy in Wurtzite BN,AlN, GaN and InN:A First-Principles DFT Study.Crystals202515,648.<https://doi.org/10.3390/cryst15070648>
- [43] I. Vurgaftman, J. R. Meyer; “Band parameters for nitrogen-containing semiconductors”; J.Appl. Phys.94, 3675 (2003).Appl. Phys.94, 3675 (2003).
- [44]Shimada, K., T. Sota, K. Suzuki, First-principles study on electronic and elastic properties of BN, AlN, and GaN. J. Appl. Phys. 84, 9 (1998), 4951-4958.
- [45]S. K. Pugh, D. J. Dugdale, S. Brand, R. A. Abram, Electronic structure calculations on nitride semiconductors, Semicond. Sci. Technol. 14, 23 (1999).
- [46]M. Goano, E. Bellotti, E. Ghilino, G. Ghione, and K. F. Brennan, Band structure nonlocal pseudopotential calculation of the III-nitride wurtzite phase materials system. Part I. Binary compounds GaN, AlN, and InN,J. Appl. Phys. 88, 6467 (2000).
- [47] B. J. Min, C. T. Chan, et K. M. Ho, First-principles total-energy calculation of gallium nitride, Phys. Rev. B 45, 1159 (1992).
- [48] A. Rubio, J. L. Corkill, M. L. Cohen, E. L. Shirley, S. G. Louie, Quasiparticle band structure of AlN and GaN,Phys. Rev. B 48, 11810 (1993).
- [49] J.-M. Wagner, et F. Bechstedt, Properties of strained wurtzite GaN and AlN: Ab initio studies,Phys. Rev. B 66, 115202 (2002).
- [50] N. E. Christensen, et I. Gorczyca, Optical and structural properties of III-V nitrides under pressure,Phys. Rev. B 50, 4397 (1994).
- [51] Bernard Gil,Group III nitride semiconductor compounds,Ed. Oxford Science Publication, (1998).
- [52]Maria TCHERNYCHEVA, Physique des transitions intersousbandes des hétérostructures de GaN/AlN pour l’optoélectronique à  $\lambda= 1, 3 - 1, 55 \mu\text{m}$ ,p23 (2005).

## **Références**

- [53] Determination of the optical band-gap energy of cubic and hexagonal boron nitride using luminescence excitation spectroscopy January 2008 Journal of Physics: Condensed Matter 20(7):075233 DOI: 10.1088/0953-8984/20/7/075233.
- [54] Suzuki, M. and Uenoyama, T. Electronic and optical properties of GaN-based quantum wells in Group III nitride semiconductor compounds: physics and applications. in B. Gil. Group III nitride semiconductor compounds. Oxford: Clarendon press, 1998, p (307-342).
- [55] Vanessa Gorge, Caractérisations de matériaux et tests de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V, 16(2012).
- [56] Rubio, A., Corkill, J.L., Cohen, M.L., Shirley, E.L., and Louie, S.G. Quasiparticle band structure of AlN and GaN. Physical review B, 1993, vol.48, n°16, p. 11810-11816.
- [57] Pugh, S.K., Dugdale, D.J., Brand, S., and Abram, R.A. Band-gap and k.P. parameters for GaAlN and GaInN alloys. J. Appl. Phys., 1999, vol.86, n°7, p. 3768-3772.
- [58] Lee, S.R., Wright, A.F., Crawford, M.H., Petersen, G.A., Han, J., and Biefeld, M. The band gap bowing of AlGaN alloys. Appl. Phys. Lett., 1999, vol.74, n°22, p. 3344-3346.
- [59] S. H. Park, S. L. Chuang "Comparison of zinc-blende and wurtzite GaN semiconductors with spontaneous polarization and piezoelectric field effects" J. Appl. Phys. 87, 353 (2000).
- [60] Jean-Christophe Moreno ; thèse "Etude de la croissance et des propriétés de films minces d'AlN épitaxies par jets moléculaires sur substrat silicium : application aux résonateurs acoustiques et perspectives d'hétérostructures intégrées sur silicium "; 2011; p19.
- [61] Li Hong Lai, Jyh-Chang Wang, Yen-Ann Chen, Tean-Sen Chen, Wen-Chin Tsay, Jyh-Wong Hong "Characteristics of Si based MSM photodetectors with an amorphous-crystalline
- [62] Yan-Kuin Su, Yu-Zung Chiou, Chia-Sheng Chang, Shoou-Jinn Chang, Yi-Chao Lin, Jone F. Chen "4H-SiC metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors with Ni/ITO electrodes", Solid-state electronics 46 (2002) 2237-2240.

## **Références**

- [63] S.V. Averine, P.I. Kuznetsov, V.A. Zhitov, N.V. Alkeev, "Solar-Blind MSM-Photodetectors Based on Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN Heterostructures Grown by MOCVD," *Solid-State Electronics* 52,(2008),pp.618–624.
- [64] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle, "Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors," *Semicond.Sci. Technol.*, 18 (2003), pp. R33–R51.
- [65] M.A. Khan, M. Shatalov, H.P. Maruska, H.M. Wang, E. Kuokstis, III–Nitride UV Devices, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005), pp. 7191–7206.
- [66] M. Razeghi, A. Rogalsky, Semiconductor ultraviolet detectors, *J. Appl. Phys.*, 79 (1996), p.7433.
- [67] Yuan Tian, Soo-Jin Chua, Hong Wang, Theoretical study of characteristics in GaN metal semiconductor metal photodetectors, *Solid-State Electronics* 47 (2003),pp. 1863–1867.
- [68] Reine M B, Hairston A, Lamarre P et al. Solar-blind AlGa<sub>N</sub> 256×256 p-i-n detectors and foca plane arrays. *Proc SPIE*,2006, 6119,pp.1-15.
- [69] Maruskas, H.P. and Tietjen, J.J. The preparation and properties of vapor-deposited single crystalline GaN. *Applied Physical Letters*.1969, Vol. 15, 327.
- [70] Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering*, R. 2002, Vol. 37, 61.
- [71] Cagla Ozgit, Inci Donmez, Mustafa Alevli, and Necmi Biyikli, "Self-limiting low temperature growth of crystalline AlN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition, *Thin Solid Films*", Vol. 520, Issue 7, 31 January 2012, pp. 2750–2755.
- [72] Romanyuk, Y.E., et al. Molecular beam epitaxy of InGa<sub>N</sub> thin films on Si(111): Effect of substrate nitridation. *Thin Solid Films*. 2009, Vol. 517, pp. 6512-6515.
- [73] Walukiewicz, W. Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors. *Physica B*. 2011, Vols. 302-303, pp. 123-134.
- [74] MTI Corporation. Crystals substrates: A-Z. [Online] [Cited: 11 16, 2011.] <http://www.mtixtl.com/crystalssubstratesa-z.aspx>.
- [75] Li, N., et al. Suppression of phase separation in InGa<sub>N</sub> layers grown on lattice-matched ZnO substrates. *Journal of Crystal Growth*.2009, Vol. 311, 4628.

## **Références**

- [76] Barton, J. and Guillemet, C. Le Verre, Science et Technologie. s.l. : EDP Sciences, 2005. ISBN 2- 86883-789-1.
- [77] Bertrand, H. and Dequincey, O. Obsidienne / bordure figée : physique et chimie des laves. Eduscol .[Online] ENS de Lyon. [Cited: 01 31, 2012.] <http://planet-terre.enslyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-obsidienne.xml>.
- [78] Tampo, H., et al. Growth of high-quality polycrystalline GaN on glass substrate by gas source molecular beam epitaxy. Journal of Crystal Growth. 2001, Vols. 227-228, 442.
- [79] Choi, J.H., et al. Nearly single-crystalline GaN-emitting diodes on amorphous glass substrates. Nature Photonics. 2011, Vol. 5, 763.
- [80] Stéphane Fanget, “Matériaux et hétérostructures à base de nitrures d’éléments III en phase cubique et hexagonale pour l’optoélectronique”, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [81] M D. Lyutaya and T.S. Barntnitskaya, Inorg. Mater. 9, 1052 (1973).
- [82] B. Burgov, L. Daweritz, V. B. Gutan, G. Jungk, H. Neuman and H. Raidt, Phys. Status Solidi AZ 49, 629 (1978).
- [83] S. Strite and H. Morkoç. GaN, AlN, and InN: A Review, Materials Research Laboratory and Coordinated Science Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, 1992.
- [84] Hamdoune AEK. « Elaboration du nitrure de gallium ; Etude de ses propriétés et Applications ». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2006.
- [85] M. A. Khan, R. A. Skogman, R. G. Schulze, and M. Gershenson, Appl. Phys. Lett. 43, 492 (1983).
- [86] S. Yoshida, S. Misawa, and S. Gonda, J. Appl. Phys. 53, 6844 (1982).
- [87] G. A. Korkotashvili, A. N. Pikhtin, I. G. Pichugin, and A. M. Tsaregorodtsev, Sov. Phys. Semicond. 18, 913 ~1984 .
- [88] T. Wethkamp, K. Wilmers, N. Esser, W. Richter, O. Ambacher, H. Angerer, G. Jungk, R. L. Johnson, and M. Cardona, Thin Solid Films 313, 745 (1998).

## **Références**

- [89] Q. S. Paduano, D. W. Weyburne, L. O. Bouthillette, and M. N. Alexander, Proceedings of the Seventh International Workshop on Wide Band gap III-Nitrides, Richmond, VA, 10–14 March 2002, Abstract book, p. 21.
- [90] S.V. Averine, P.I. Kuznetsov, V.A. Zhitov, N.V. Alkeev, “Solar-Blind MSM-Photodetectors Based on  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  Heterostructures Grown by MOCVD,” *Solid-State Electronics* 52,(2008),pp.618–624.
- [91] E. Monroy, F. Omnes, F. Calle, “Wide-bandgap semiconductor ultraviolet photodetectors,” *Semicond.Sci. Technol* , 18 (2003), pp. R33–R51.
- [92] M.A. Khan, M. Shatalov, H.P. Maruska, H.M. Wang, E. Kuokstis, III–Nitride UV Devices, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005), pp. 7191–7206.
- [93] M. Razeghi, A. Rogalsky, Semiconductor ultraviolet detectors, *J. Appl. Phys.*, 79 (1996), p.7433.
- [94] Yuan Tian, Soo-Jin Chua, Hong Wang, Theoretical study of characteristics in GaN metal semiconductor metal photodetectors, *Solid-State Electronics* 47 (2003),pp. 1863–1867.
- [95] Reine M B, Hairston A, Lamarre P et al. Solar-blind AlGaN 256×256 p-i-n detectors and foca plane arrays. *Proc SPIE*,2006, 6119,pp.1-15.
- [96] Maruskas, H.P. and Tietjen, J.J. The preparation and properties of vapor-deposited single crystalline GaN. *Applied Physical Letters*.1969, Vol. 15, 327.
- [97] Liu, L. and Edgar, J.H. Substrates for gallium nitride epitaxy. *Materials Science and Engineering*, R. 2002, Vol. 37, 61.
- [98] Cagla Ozgit, Inci Donmez, Mustafa Alevli, and Necmi Biyikli, “Self-limiting low temperature growth of crystalline AlN thin films by plasma-enhanced atomic layer deposition, *Thin Solid Films*”, Vol. 520, Issue 7, 31 January 2012, pp. 2750–2755.
- [99] Romanyuk, Y.E., et al. Molecular beam epitaxy of InGaN thin films on Si (111): Effect of substrate nitridation. *Thin Solid Films*. 2009, Vol. 517, pp. 6512-6515.
- [100] Walukiewicz, W. Intrinsic limitations to the doping of wide-gap semiconductors. *Physica B*. 2011, Vols. 302-303, pp. 123-134.

## **Références**

- [101]MTI Corporation. Crystals substrates: A-Z. [Online] [Cited: 11 16, 2011.]<http://www.mtixtl.com/crystalssubstratesa-z.aspx>.
- [102] Li, N., et al. Suppression of phase separation in InGaN layers grown on lattice-matched ZnO substrates. *Journal of Crystal Growth*.2009, Vol. 311, 4628.
- [103]Barton, J. and Guillemet, C. *Le Verre, Science et Technologie*. s.l. : EDP Sciences, 2005.ISBN 2- 86883-789-1.
- [104]Bertrand, H. and Dequincey, O. *Obsidienne / bordure figée : physique et chimie des laves*.Eduscol .[Online] ENS de Lyon. [Cited: 01 31, 2012.] <http://planet-terre.enslyon.76.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-obsidienne.xml>.
- [105]Tampo, H., et al. Growth of high-quality polycrystalline GaN on glass substrate by gas source molecular beam epitaxy.*Journal of Crystal Growth*.2001, Vols. 227-228, 442.
- [106] Choi, J.H., et al. Nearly single-crystalline GaN-emitting diodes on amorphous glass substrates.*Nature Photonics*.2011, Vol. 5, 763.
- [107] Stéphane Fanget, “Matériaux et hétérostructures à base de nitrures d’éléments III en phase cubique et hexagonale pour l’optoélectronique”, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [108] M D. Lyutaya and T.S. Barinitskaya, *Inorg. Mater.*9, 1052 (1973).
- [109] B. Burgov, L.Daweritz, V. B. Gutan, G. Jungk, H. Neuman and H. Raidt, *Phys. Status Solidi AZ* 49, 629 (1978).
- [110] S. Strite and H. Morkoç. GaN, AlN, and InN: A Review, Materials Research Laboratory and Coordinated Science Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, 1992.
- [111] Hamdoune AEK. « Elaboration du nitrure de gallium ; Etude de ses propriétés et Applications ». Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2006.
- [112] M. A. Khan, R. A. Skogman, R. G. Schulze, and M. Gershenson, *Appl. Phys. Lett.* 43, 492 (1983).
- [113] S. Yoshida, S. Misawa, and S. Gonda, *J. Appl. Phys.* 53, 6844 (1982)

## **Références**

- [114] G. A. Korkotashvili, A. N. Pikhtin, I. G. Pichugin, and A. M. Tsaregorodtsev, *Sov. Phys. Semicond.* 18, 913 ~1984!.
- [115] T. Wethkamp, K. Wilmers, N. Esser, W. Richter, O. Ambacher, H. Angerer, G. Jungk, R. L. Johnson, and M. Cardona, *Thin Solid Films* 313, 745 (1998).
- [116] Q. S. Paduano, D. W. Weyburne, L. O. Bouthillette, and M. N. Alexander, *Proceedings of the Seventh International Workshop on Wide Band gap III-Nitrides*, Richmond, VA, 10–14 March 2002, Abstract book, p. 21.
- [117] S. A. Nikishin, N. N. Faleev, A. S. Zubrilov, V. G. Antipov, and H. Temkin, *Appl. Phys. Lett.* 76, 3028 (2000).
- [118] W. Shan, J. W. Ager III, K. M. Yu, W. Walukiewicz, E. E. Haller, M. C. Martin, W. R. McKinney, and W. Yang, *J. Appl. Phys.* 85, 8505 ~1999!.
- [119] Ü. Özguñ, G. Webb-Wood, H. O. Everitt, F. Yun, and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.* 79, 4103 (2001).
- [120] J. Wagner, H. Obloh, M. Kunzer, M. Maier, K. Kohler, and B. Johs, *J. Appl. Phys.* 89, 2779 (2000).
- [121] H. Jiang, G. Y. Zhao, H. Ishikawa, T. Egawa, T. Jimbo, and M. Umeno, *J. Appl. Phys.* 89, 1046 (2001).
- [122] T. J. Ochalski, B. Gil, P. Lefebvre, M. Grandjean, M. Leroux, J. Massies, S. Makamura, and H. Morkoc, *Appl. Phys. Lett.* 74, 3353 (1999).
- [123] S. R. Lee, S. R. Lee, A. F. Wright, M. H. Crawford, G. A. Petersen, J. Han, and R. M. Biefeld, *Appl. Phys. Lett.* 74, 3344 (1999).
- [124] K. H. Ploog, O. Brandt, *Doping of group III nitrides*, *J. Vac. Sci. Technol. A* 16, 1609 (1998).
- [125] J. K. Sheu, G. C. Chi, *The doping process and dopant characteristics of GaN*, *J. Phys.:Condens. Matter* 14, R657 (2002).
- [126] Vurgaftman L. R. Ram-Mohan and J. R. Meyer, *Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys*, *journal of applied physics* volume 89, number 11, 2001.

## **Références**

- [127] Q. Z. Liu, S. S. Lau, A review of the metal-GaN contact technology, *Solid-State Electron.* 42, 677 (1998).
- [128] Bremser M.D., Perry W.G., Zheleva T., Edwards N.V., Nam O.H., Parikh, N., Aspnes D.E., Davis R.F., *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* 1, (1996) 8.
- [129] W. A. Harrison, *Electronic Structure and the Properties of Solids: The Physics of the Chemical Bond* (Dover, New York, 1989).
- [130] H. Kawanishi, M. Haruyama, T. Shirai, and Y. Suematsu, *Proc. SPIE* 2994, 52 (1997).
- [131] T. Honda, M. Shibata, M. Kurimoto, M. Tsubamoto, J. Yamamoto, and H. Kawanishi, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* 39, 2389 \_2000\_.
- [132] V. V. Ilyasov, T. P. Zhadanova, and I. Ya. Nikiforov, *Phys. Solid State* 48, 654 (2006).
- [133] S. Gautier, C. Sartel, S. Ould-Saad, J. Martin, A. Sirenko, and A. Ougazzaden, *J. Cryst. Growth* 298, 428 (2007).
- [134] S. Sakai, Y. Ueta, and Y. Terauchi, "Band gap energy and band lineup of III-V alloy semiconductors incorporating nitrogen and boron," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 4413{4417, October 1993.
- [135] S. L. Rumyantsev, M. E. Levinshtein, A. D. Jackson, S. N. Mohammad, G. L. Harris, M. G. Spencer, and M. S. Shur, in *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, edited by M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, and M. S. Shur \_Wiley, New York, pp. 67–92, 2001
- [136] V. Bougrov, M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, and A. Zubrilov, in *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, edited by M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, and M. S. Shur Wiley, New York, pp. 1–30, 2001.
- [137] 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 \_lms," *Applied Physics Letters*, vol. 93, August 2008.
- [138] T. Baghdadli et al. electrical and structural characterizations of B<sub>G</sub>GaN thin films by metal-organic vapor phase epitaxy. *Phys. Stat. Sol. C*, 6:S1029, 2009.
- [139] C. Stampfl and C. G. Van de Walle, *App. Phys. Lett.* 72(4), 459 (1998).

## **Références**

- [140] Wei C H, Xie Z Y, Edgar J H, Zeng K C, Lin J Y, Jiang H X, Chaudhuri J, Ignatiev C and Braski D N 2000 J. Electron. Mater. 29 452
- [141] Honda T, Shibata M, Kurimoto M, Tsubamoto M, Yamamoto J and Kawanishi H, Japan. J. Appl. Phys. 1 39 2389, 2000.
- [142] Honda T, Kurimoto M, Shibata M and Kawanishi H, J. Lumin. 87–89 1274, 2000.
- [143] Gautier S et al 2011 J. Cryst. Growth 315 288
- [144] Malinauskas T, Kadys A, Stanionytė S, Badokas K, Mickevičius J, Jurkevičius J, Dobrovolskas D and Tamulaitis G 2015 Phys. Status Solidi B 252 1138
- [145] Ougazzaden A, Gautier S, Moudakir T, Djebbour Z, Lochner Z, Choi S, Kim H J, Ryou J-H, Dupuis R D and Sirenko A A 2008 Appl. Phys. Lett. 93 083118
- [146] Polyakov A Y, Shin M, Skowronski M, Greve D W, Wilson R G, Govorkov A V and Desrosiers R M 1997 J. Electron. Mater. 26 237
- [147] Ilyasov V V, Zhdanova T P and Nikiforov I Ya 2006 Phys. Solid State 48 654
- [148] S. Watanabe et al. Refractive indices of  $B_xGa_{1-x}N$  ( $x=0-0.012$ ) and  $ByGa_{1-y}N$  ( $y=0-0.023$ ) epitaxial layer in ultraviolet region. Phys. Stat. Sol., 7:2691-2694, 2003.
- [149] Simon Gautier. Thesis: Elaboration par MOVPE des nouveaux matériaux B(Ga, Al)N pour les applications dans l’ultraviolet et l’électronique de puissance, 2007. Références.
- [150] SILVACO :<http://www.silvaco.com/>
- [151] C. K. Maiti, "Computer Aided Design of Micro- and Nanoelectronic Devices", World Scientific, 2016.
- [152] ATLAS User’s Manual Version 5.10.0.R, SILVACO International, Santa Clara, CA95054 (2005).
- [153] P.N.J. DENNIS, Photodetectors , Plenum Press, New York, (1986).
- [154] S. Poncé, D. Jena, and F. Giustino, “Route to High Hole Mobility in GaN via Reversal of Crystal-Field Splitting,” Phys. Rev. Lett., vol. 123, no. 9, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1103/PhysRevLett.123.096602.

## Références

- [155] C. Boudaoud, A. Hamdoune, and Z. Allam, “Simulation and optimization of a tandem solar cell based on InGaN,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 167, 2020, doi: 10.1016/j.matcom.2018.09.007.
- [156] S. Sharma, A. Sumathi, and C. Periasamy, “Photodetection properties of ZnO/Si heterojunction diode: A simulation study,” *IETE Tech. Rev.*, vol. 34, no. 1, pp. 83–90, 2017.
- [157] S. Ould Saad Hamady, T. Baghdadli, S. Gautier, M. Bouchaour, J. Martin, and A. Ougazzaden, “Raman scattering study of BxGa1-xN growth on AlN template substrate,” *Phys. status solidi c*, vol. 5, no. 9, pp. 3051–3053, 2008.
- [158] S. Cornelius, M. Vinnichenko, N. Shevchenko, A. Rogozin, A. Kolitsch, and W. Möller, “Achieving high free electron mobility in ZnO: Al thin films grown by reactive pulsed magnetron sputtering,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 4, p. 42103, 2009.
- [159] Z. Allam, C. Boudaoud, A. M. Benahmed, and A. Soufi, “Simulation of the Electric Properties of a Structure Based on Two Gan P-N Junctions Grown on an Undoped ZnO Nanosheet,” in *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*, 2020, pp. 946–957.
- [160] A.D.D. Dwivedi, A. Mittal, A. Agrawal, P. Chakrabarti, *Infrared Physics & Technology* 53 (2010), pp. 236–245.
- [161] Abdulmecit Turut, Sebahattin Tuzemen, Muhammet Yildirim, Bahattin Abay, Mustafa Saglam, *Solid-State Electron.* 35(10), (1992), 1423.
- [162] T. L. Tansley, R. J. Egan, *Physica B*.185 (1993), 190.
- [163] V. L. Rideout, *Solid-State Electron.* 18 (1975), 541.
- [164] High Detectivity and Fast MoS<sub>2</sub> Monolayer MSM Photodetector Ruchi Singh Chandrabhan Patel Pawan Kumar Mayank Dubey Sharath and Sriram Shaibal Mukherjee\* *ACS Applied Electronic Materials* Vol 4/Issue 12.