

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

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

**Université de KHEMIS MILIANA**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de la Technologie**

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention de diplôme

**Master**

En

« Télécommunications »

Option :

« Systèmes de Télécommunications »

Titre :

Etude et Optimisation d'une Photodiode dans une  
Chaîne de Transmission par Fibre Optique.

Réalisé par :

ELOTREUCH Refka

BOUGHAR Souad

Encadré par :

Dr. KADDECHE Mourad

Année Universitaire 2016/2017



## *Dédicace*

*A tout ce que peut nous apporter le partage qu'il soit culturel ou  
humain.*

*Que le fait d'être lu puisse être et rester notre plus belle rétribution.*

*J'ai l'honneur de dédier ce travail*

*A mes chers parents ma mère qui lors, de toutes mes années d'études,  
m'encouragé et soutenue et mon père pour leur patience, leur soutien,  
qui ma donnée la force de continuer sans jamais baisser les bras*

*A mon frère et mes sœurs et toute ma famille*

*A tous mes collègues de la promotion Télécommunication 2017.*

*A tous mes proches amis.*

**ELOTREUCH Refka**

## *Dédicace*

*A tout ce que peut nous apporter le partage qu'il soit culturel ou  
humain.*

*Que le fait d'être lu puisse être et rester notre plus belle rétribution.*

*J'ai l'honneur de dédier ce travail*

*A mes chers parents ma mère qui lors, de toutes mes années d'études,  
m'encouragé et soutenue et mon père pour leur patience, leur soutien,  
qui ma donnée la force de continuer sans jamais baisser les bras.*

*A mon frère et mes sœurs et toute ma famille*

*A tous mes collègues de la promotion Télécommunication 2017.*

*A tous mes proches amis.*

**BOUGHAR Souad**

## *Remerciements*

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

*Nous adresse tout particulièrement Monsieur KADDECHE Mourad  
notre encadreur, nos sincères reconnaissances et nos remerciements les plus  
vifs, de nous avoir dirigé et guidé tout le long de ce travail. Ses critiques  
constructives, avec qui nous avons eu la chance de travailler, d'être dirigé,  
d'être enseigné.*

*Nous sommes très reconnaissantes aux membres du jury, qui nous ont  
fait l'honneur d'examiner notre travail. Nous les remercions pour le temps et  
de l'attention qu'ils ont consacrés à la lecture de notre manuscrit et pour les  
nombreuses améliorations qu'ils y ont apportées.*

*Nos remerciements les plus distinguées à nos chers parents dont le soutien  
aussi bien moral que matériel ne nous a jamais fait défaut.*

*Pour finir, nous tenons remercier toute personne qui a contribué de  
près ou de loin à la réussite de ce travail.*

---

## **Résumé**

Les photodétecteurs à semi-conducteurs III-V sont les plus utilisés dans une chaîne de transmission optique pour assurer une fiabilité maximale du transfert de l'information grâce aux caractéristiques optiques et électriques de leurs matériaux.

Ce projet de fin d'étude est consacré à la mise en évidence aux photodiodes à base de nitrures, principalement les photodiodes PIN AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. Notre travail est une simulation basée sur le logiciel SILVACO-Atlas. Pour obtenir une meilleure performance permettra d'avancer dans l'élaboration d'une photodiode qui peut être utilisée dans une chaîne de transmission par fibre optique.

Mot-clé : Photodiodes, nitrures, PIN, AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, SILVACO-Atlas, caractéristique optique et électrique.

## **Abstract**

The III-V semiconductor photodetectors are the most widely used in an optical transmission chain to ensure maximum reliability of information transfer due to the optical and electrical characteristics of their materials.

This end-of-study project is devoted to the demonstration to Nitride-based photodiodes, mainly AlGa<sub>N</sub> / Ga<sub>N</sub> PIN photodiodes. Our work is a simulation based on the SILVACO-Atlas software to obtain a better performance will advance in the development of a photodiode that can be used in a fiber optic transmission chain.

Keyword: Photodiodes, nitride, PIN, AlGa<sub>N</sub> / Ga<sub>N</sub>, SILVACO-Atlas, optical and electrical characteristic.

## *Liste des abréviations*

**GaN** : Le nitrure de galium.

**GaAs** :Arseniurde galium.

**Si**:silicium.

**Mg**: magnésium

**ZCE**:La Zone de Charge d 'Espace.

**DEL** : diodes électroluminescentes.

**DL**:diode laser.

**APD**: photodiodes à avalanches.

**SILVACO**: Silicon Valley Corporation

**CONMOB**: modèle de la concentration dépendante.

**FLDMOB**: modèle de dépendance du champ électrique.

**SRH**: modèle de Shockley-Read-Hall.

**N<sub>D</sub>**: la couche donneuse

**N<sub>A</sub>**: La couche accepteuse

## La liste des figures

<b>FigureI.1</b> :Tableau périodique partiel	03
<b>FigureI.2</b> : Le différentes structures de GaN: de type(a) wurtzite, (b) blende.	04
<b>FigureI.3</b> : Diagramme de bandes de GaN en phase hexagonale et cubique.	05
<b>Figure I.4</b> :Les transitions optiques directes et indirectes.	08
<b>FigureI.5</b> : Champs critiques de différents matériaux semi-conducteurs pour une, de leur gap (à 300 K).	09
<b>FigureI.6</b> :Liaisons atomiques dans le réseau cristallin du GaN (a) et position des dopants dans ce même réseau : (b) Si, dopage de type N et (c) Mg, dopage de type P	12
<b>FigureI.7</b> :La jonction PN	13
<b>FigureI.8</b> : Fonctionnement de jonction PN	14
<b>FigureI.9</b> : La jonction PN polarisée en direct.	15
<b>FigureI.10</b> :La jonction PN polarisée en inverse.	16
<b>FigureII.1</b> : Une chaîne de transmission par fibre optique	17
<b>Figure II.2</b> : Principe de fonctionnement d'une photodiode PN.	21
<b>Figure II.3</b> : symbole de photodiode PIN.	22
<b>Figure II.4</b> : Principe de fonctionnement de la jonction PIN.	24
<b>Figure II.5</b> : photodiode PDA.	25
<b>Figure II.6</b> : Mécanismed'avalanchedans le diagramme de banded'énergie	25
<b>Figure II.7</b> : Rapport signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN.	28
<b>Figure III.1</b> : Outil de simulation SILVACO.	33
<b>Figure III.2</b> : Entrées et sorties d'Atlas.	34
<b>FigureIII.3</b> : Groupes des commandes fondamentales dans un programme Atlas.	35
<b>FigureIII.4</b> :Structure proposé d'une photodiode PN.	36
<b>FigureIII.5</b> : La structure de maillage dans la photodiode PN AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .	38

<b>Figure III.6 :</b> La structure du photodiode PN AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> simulée par Silvaco, la représentation de différentes régions.	39
<b>Figure III.7 :</b> La structure du ALGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> simulée par Silvaco, la représentation d'électrodes dans la photodiode PIN.	40
<b>Figure III.8 :</b> La structure du dopage AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> de photodiode PN.	41
<b>Figure III.9 :</b> Affichage graphique des résultats par « TonyPlot ».	44
<b>Figure III.10 :</b> Les caractéristiques courant de cathode- tension I(V)	45
<b>Figure III.11 :</b> Les caractéristiques courant de cathode- tension I(V) pour les tensions de deux photodiodes PN et PIN.	46
<b>Figure III.12 :</b> Les caractéristiques courant- tension I(V) pour les tensions de deux photodiodes PIN Ga <sub>N</sub> / GaAs	47
<b>Figure III.13 :</b> L'effet du changement du dopage de la couche AlGa <sub>N</sub> sur la caractéristique I(V) de la photodiode AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> .	48
<b>Figure III.14 :</b> L'effet de variation du taux d'Aluminium sur la caractéristique I(V) de la photodiode AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> proposée.	49
<b>Figure III.15 :</b> L'effet du changement de l'épaisseur de la couche d'AlGa <sub>N</sub> sur la Caractéristique I(V) .	50
<b>Figure III.16 :</b> Les caractéristiques courant de (I-V-T), pour la gamme de température [300-700] K	51
<b>Figure III.17 :</b> structure simulé de PDA	52
<b>Figure III.18 :</b> profils de dopage dans l'APD bidimensionnelle.	53
<b>Figure III.19 :</b> Courbes IV d'obscurité et lumineux	54

# Table de matières

Remerciements

Résumé

Introduction générale.....1

## Chapitre 1 : Propriétés fondamentales des semi-conducteurs III-V

I.1 Introduction.....3

I.2 Semi-conducteur III-V.....3

I.2.1 Propriétés structurales.....4

I.2.2 Zone de Brillouin.....5

I.2.3 Structures des bandes.....5

I.2.4 Propriétés électriques et électronique.....6

I.2.4.1 La polarisation spontanée.....6

I.2.4.2 Polarisation piézoélectrique.....6

I.2.4.3 Polarisation totale.....6

I.2.5 Propriétés optiques.....7

I.2.5.1 La bande interdite.....7

I.2.5.2 Gap direct et indirect.....7

I.2.6 Propriété thermique.....8

I.2.6.1 Conductivité thermique.....8

I.2.6.2 Champ de claquage.....9

I.2.7 Caractéristique du matériau GaN comparées au Si et au GaAs.....10

I.2.7.1 Intérêt de GaN.....	11
I.3 Semi-conducteur Extrinsic.....	11
I.3.1 Définition.....	11
I.3.2 Notion de dopage.....	11
I.3.2.1 Dopage de type n ou donneur pour GaN.....	11
I.3.2.2 Dopage de type P ou accepteur.....	12
I.3.3 La jonction PN.....	13
I.3.3.1 Jonction non polarisée.....	13
I.3.3.2 Jonction P-N polarisée en direct.....	15
I.3.3.3 Jonction P-N polarisée en inverse.....	16
I.4 Conclusion.....	16

## **Chapitre 2 : Généralité sur les photodiodes**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Composants d'émission/réception.....	17
II.2.1 Composants d'émission.....	18
II.2.2 Composants de réception.....	18
II.3 Le photodétecteur.....	18
II.3.1 Principe de la photodétection.....	19
II.3.2 Caractéristiques du photodétecteur.....	19
II.3.3 Le bruit du photodétecteur.....	20
II.4 Les différents types des photodétecteurs.....	20
II.4.1 photodiode PN.....	20
II.4.1.1 Principe du fonctionnement.....	22

II.4.2 Photodiode PIN.....	22
II.4.2.1 Principe du fonctionnement PIN.....	23
II.4.2.2 Les photodiodes PN et PIN à base de GaN.....	24
II.4.3 Photodiode à avalanche PDA.....	24
II.4.3.1 L'effet d'avalanche.....	25
II.4.3.2 Principe du fonctionnement du PDA.....	26
II.4.3.3 Photodiodes à avalanche à base de GaN.....	26
II.4.3.4 Avantages de la photodiode à avalanche.....	27
II.4.3.5 Inconvénients de la photodiode à avalanche.....	27
II.4.3.6 Modes de fonctionnement photodiode.....	27
II.5 Comparaison entre les photodiodes PIN et PDA.....	27
II.6 Paramètres de performance d'une photodiode.....	28
II.7 Objectifs et limites de la photodiode.....	29
II.8 Applications photodiodes.....	29
II.9 Conclusion.....	30

### **Chapitre 3 : simulation d'une photodiode par Atlas-SIVACO**

III.1 Introduction.....	32
III.1.1 Le simulateur TCAD.....	32
III.1.2 Ordres de commandes d'Atlas.....	35
III.1.3 La spécification de la structure.....	36
III.1.4 Simulation du dispositif.....	36
III.1.4.1 La spécification de maillage.....	37
III.1.4.2 La spécification des régions.....	38

III.1.4.3 La spécification des électrodes.....	39
III.1.4.4 La spécification du dopage.....	40
III.1.5 Spécification des modèles des matériaux.....	41
III.1.5.1 La spécification du matériau.....	41
III.1.5.2 La spécification du Modele.....	42
III.1.5.3 Le contact.....	42
III.1.6 Les méthodes numérique.....	43
III.1.7 Spécification des solutions.....	43
III.1.8 Analyse des résultats.....	44
III.1.9 Etude caractéristiques des photodiodesà base d'hétérostructureAlGaN/GaN.....	44
III.1.9.1 Etude des caractéristiques courant- tension I(V) pour la structure proposée....	44
III.2.1 Etude comparative entre les deux photodiodes PN et PIN à base d'hétérostructure GaN selon les caractéristiques électriques.....	46
III.2.2 Etude comparative entre la photodiode PIN à base d'AlGaN/GaN et à base d'AlGaAs/AlGaAs selon les caractéristiques électriques.....	47
III.2.3 Influence des propriétés physiques du matériau sur les caractéristiques électriques du composant.....	48
III.2.3.1 L'effet du dopage (ND) de la couche AlGaN.....	48
III.2.3.3L'effet de la fraction molaire.....	49
III.2.4 Influence des paramètres technologiques de la structure sur les caractéristiques électriques.....	50
III.2.4.1 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche AlGaN.....	50
III.2.5 L'effet de la température.....	51

III.3.1 Etude des caractéristiques des photodiodes a avalanche (APD) avec ATLAS-SILVACO.....	52
III.3.2 Simulation bidimensionnelle d'une photodiode APD (à avalanche).....	52
III.3.3 profil de dopage dans l'APD proposée.....	53
III.3.4 Le courant d'obscurité et le courant lumineux.....	54
III.4 Conclusion.....	55
<b>Conclusion générale</b> .....	56

## **Bibliographie**

## **Annexe**

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Dans les débuts de télécommunications par fibre optique, le choix des sources s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteurs à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique.

Ce domaine, des structures en super-réseaux sont exploitées, les dimensions sont diminuées jusqu'à l'échelle du nanomètre, les lois quantiques sont explorées et des composants tout optique sont également considérés.

De plus, les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevé. Mais leur apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques ou optoélectroniques performants et leurs applications à se diversifier.

L'architecture d'une liaison, quel que soit le niveau du réseau auquel elle est destinée, est composée des mêmes blocs de base, à savoir, un émetteur, un module de transmission et un récepteur. L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique. Ce rôle est assuré par le photo détecteur, qui se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant.

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés des composés semi-conducteurs III-V sont préférables, on citera par exemple quelques composés binaires et tertiaires GaAs, GaN, InP, AlGaIn, AlGaAs. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs. Dans ces derniers, l'incidence de la lumière provoque la génération des porteurs, qui, si elles ne sont pas recombinées, peuvent contribuer au courant de composant. De cette façon, les jonctions PN et PIN sont largement utilisées comme dispositifs optiques, puisque le champ électrique présent dans la couche d'appauvrissement formée entre les deux régions (P et N) agissent pour séparer les paires électron-trou et pour augmenter le courant inverse de la diode. En outre, plus la taille de la couche d'appauvrissement est grande, plus la quantité d'absorption de lumière est élevée. D'autre part, pour avoir un champ électrique plus élevé, une couche d'appauvrissement plus petite est nécessaire.

Ainsi, la taille de la région d'appauvrissement est un compromis entre la vitesse de réponse et la sensibilité, car il doit être suffisamment grand pour permettre l'absorption du plus grand nombre possible de photons et suffisamment petit pour réduire le temps de transit de la génératrice transporteurs

Un cas particulier de la photodiode de jonction PN est le code PIN photodiode, qui est l'un des photodétecteurs les plus utilisées.

Nous avons donc vu dans le premier chapitre les caractéristiques et les propriétés du GaN sur le plan structurel, électrique, et optique.

Dans le deuxième chapitre nous avons vu les généralités sur les photodiodes et leurs principes de fonctionnement.

Dans le dernier chapitre, nous avons développé la présentation du logiciel de simulation "Atlas-Silvaco" des caractéristiques électriques I(V), que nous avons utilisé principalement pour modéliser et optimiser la structure du photodiode proposée, donc nous avons optimiser les performances de cette photodiode, nous avons choisi la structure du PIN en AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> et ensuite nous avons changé les paramètres physiques et technologiques donnant les meilleurs performances de la structure PIN à base d'hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>.

Le but de cette étude est d'optimiser les meilleures performances de la photodiode PIN en AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> pour l'utilisation dans une chaîne de transmission par fibre optique. Les résultats actuels confirment globalement que l'Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N représente le meilleur choix dans le domaine de la photo détection.

En fin de ce mémoire, nous donnerons une conclusion générale avec les perspectives.



# *Chapitre I*

---

## *Propriétés fondamentales des semi-conducteurs III-V*

## I.1.Introduction

Les propriétés physiques intrinsèques du Nitrure de Galium (GaN), notamment sa grande bande d'énergie interdite, présente un champ de claquage élevé, une forte densité d'électrons aussi ses mobilités électroniques élevées avec une grande stabilité thermique, ce qui a mené au développement des composants à base du GaN, pour les applications surtout en hyperfréquence, optoélectronique et micro-ondes.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les propriétés physiques, électriques, mécaniques et thermiques du GaN. Nous expliquons les notions de dopage et les différentes jonctions PN qui constitue l'élément de base des photo-détecteurs.

## I.2. Semi-conducteur III-V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à base d'un élément de la colonne V et d'un élément de la colonne III du tableau périodique de Mendeleïev (figure I.1). Ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés.

[1]

	III	IV	V	VI
	5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène
	13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium

Figure I.1 : Tableau périodique partiel [1]

### I.2.1. Propriétés structurales

La plupart des matériaux III-V cristallines dans la structure « Zinc blende ». Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant « C » est constituée sous-réseaux cubique à face centrées.

Le nitrure de gallium se présente sous trois formes cristallines : les structures de wurtzite, blende et NaCl. Celle de type wurtzite est la plus stable thermodynamiquement. Celle de type NaCl est la variété haute pression de GaN [2,3].

#### a/ structure wurtzite

La structure wurtzite est constituée de deux réseaux hexagonaux, l'un avec les atomes de gallium, l'autre avec les atomes d'azote [4].

#### b/structure blende de zinc

La structure blende de zinc est-elle constituée de deux sous réseaux cubiques faces centrées, chacun comprenant un type d'atome, interpénétrés et décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille [4].

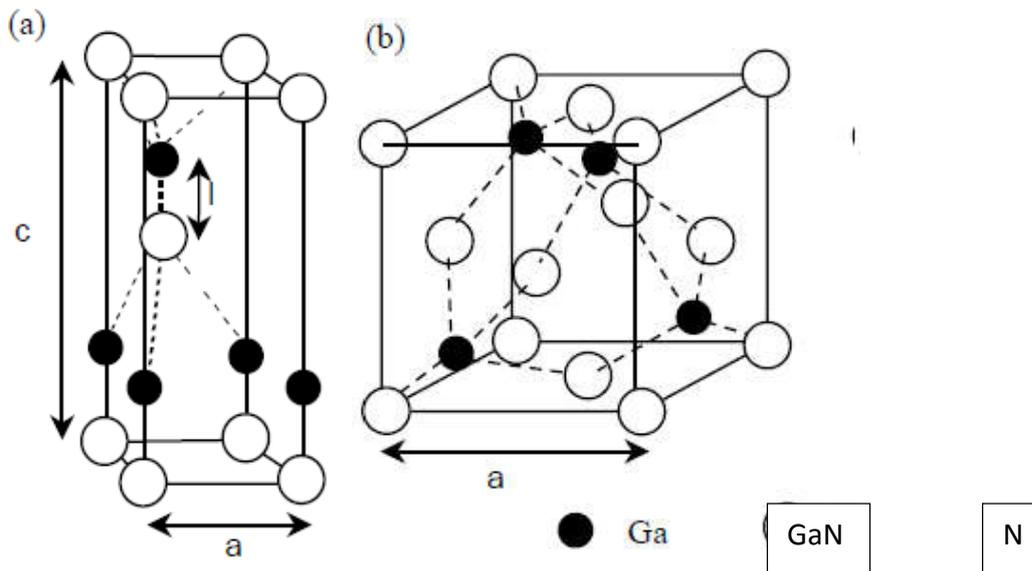


Figure I.2 : Les différentes structures de GaN : de type (a) wurtzite, (b) Zinc blende [4]

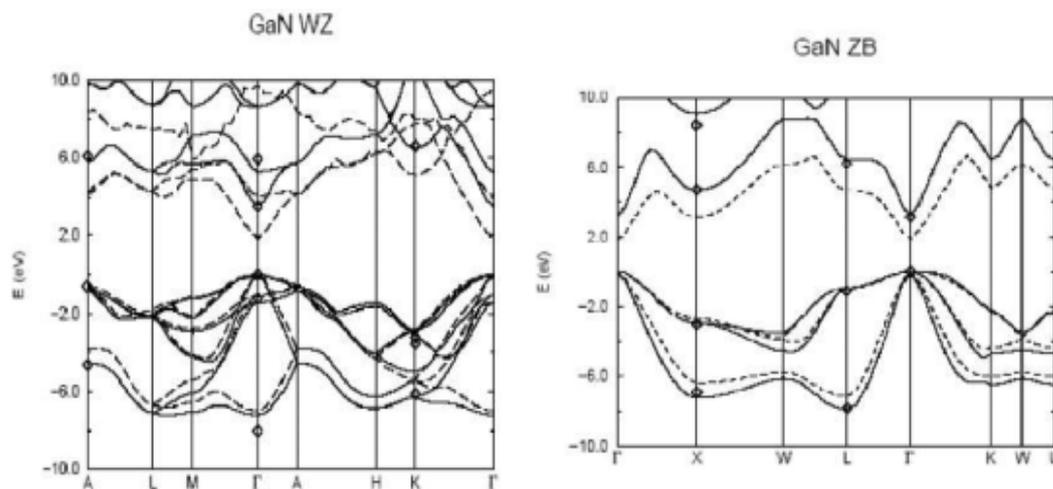
### I.2.2. Zone de Brillouin

En effet, la zone de Brillouin va correspondre au domaine d'influence d'un atome sur les autres atomes voisins.

Le cristal étant périodique, les paramètres internes (comme la densité des électrons) ont la périodicité du réseau. Le réseau direct est défini par la première zone de Brillouin. Les grandeurs sont périodiques dans la maille élémentaire du réseau pour les reconnaître dans tout le cristal. Il est de même pour l'espace réciproque, il suffit de les voir dans la première zone de Brillouin [5,6].

### I.2.3. Structures des bandes

Les deux polytypes de GaN représentent, comme la plupart des matériaux III-V, une bande interdite directe au point  $\Gamma$ , centre de la première zone de Brillouin ( $k=0$ ) [4].



**Figure I.3** :Diagramme de bandes de GaN en phase hexagonale et cubique [4].

Dans la structure cubique, le couplage spin orbite divise le haut de trous lourds et de trous légers, dégénérées en  $\Gamma$ .

Dans le cas du GaN hexagonal, la non cubicité de la maille donne lieu, de plus, à un champ électrique appelé champ cristallin qui induit une levée de dégénérescences au pont  $\Gamma$  des trous lourds et trous légers optiques du GaN résultent des transitions électroniques entre les niveaux de la bande de valence la plus haute et de la conduction la plus basse, les transitions

peuvent impliquer des interactions entre les paires électron-trou et les niveaux énergétiques dus à des impuretés ou des défauts ses propriétés optiques dépendent donc beaucoup de l'échantillon lui-même. Les mesures optiques donnant des informations sur la structure et la composition du matériau [4].

## **I.2.4. Propriétés électriques et électroniques[7]**

### **I.2.4.1. Polarisation spontanée**

La polarisation spontanée peut également interférer dans le comportement d'un composant ;

Par exemple, si le champ associé à la polarisation du matériau sépare spatialement les électrons et les trous réduisant ainsi la probabilité de recombinaisons radiatives, la polarisation va améliorer les performances du composant s'il s'agit de collecter les porteurs ou alors limiter le rendement s'il s'agit d'émettre de la lumière.

### **I.2.4.2. Polarisation piézoélectrique**

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux à produire un dipôle électrique proportionnel à la contrainte mécanique (tension ou compression) qui les déforme. En appliquant une certaine pression sur les matériaux nitrures.

### **I.2.4.3. Polarisation totale**

En l'absence de polarisation externe, la polarisation totale dans un matériau à structure wurtzite est égale à la somme des polarisations spontanée et piézoélectrique :

$$\vec{P} = \vec{P}_{sp} + \vec{P}_{pz} \quad (I.1)$$

## **I.2.5. Propriétés optiques**

Les propriétés optiques d'un matériau regroupent principalement son indice de réfraction et son coefficient d'absorption. Ces propriétés sont primordiales pour les composants optoélectroniques puisqu'elles régissent le déplacement de la lumière dans le composant. Par exemple, dans un dispositif composé de différents matériaux, la lumière a tendance à se

propager dans les matériaux ayant le plus fort indice de réfraction. On peut alors confiner la lumière dans une couche particulière, comme c'est le cas pour les lasers. Cette propriété est aussi très intéressante pour les applications photodiodes afin d'augmenter l'efficacité d'absorption de la lumière.

Les propriétés optiques des semi-conducteurs sont intimement liées à leur structure électrique dans la mesure où elles mettent en jeu des transitions entre différents états électroniques [2,7].

### I.2.5.1. La bande interdite

Par définition, la bande interdite représente l'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Le GaN possède la plus large bande interdite (3,3 eV), l'évolution de la largeur de bande en fonction de la température [8].

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

Avec :  $E_g(0) = 3.47 \text{ eV}$  ;  $\alpha = 0.00077 \text{ eV/K}$  et  $\beta = 600 \text{ K}$

Un matériau à bande directe comme le GaAs, pour lequel électrons et trous se retrouvent sur les maximums de leurs bandes respectives qui sont tous les deux au point  $K=0$ , est un très bon émetteur de lumière [2].

### I.2.5.2. Gap direct et indirect

Le Gap est par définition la largeur de la bande interdite, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le minimum absolu de la bande de conduction et le maximum absolu de la bande de valence, les structures représentées dans la figure (I.4) font apparaître deux cas fondamentaux de semi-conducteur.

Les semi-conducteurs à Gap indirect, dont lesquels le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence sont situés en des points différents de l'espace des  $K$  et les semi-conducteurs à Gap direct pour lesquels ces extrema sont situés au même point de l'espace des  $K$  (au centre de la zone de Brillouin, en  $K=0$ ).

Dans les semi-conducteurs à Gap direct, le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobiles. Par contre ceux qui ont

un Gap indirect. Leur bande de conduction correspond à des électrons de grande masse effective, donc ayant une faible mobilité [2].

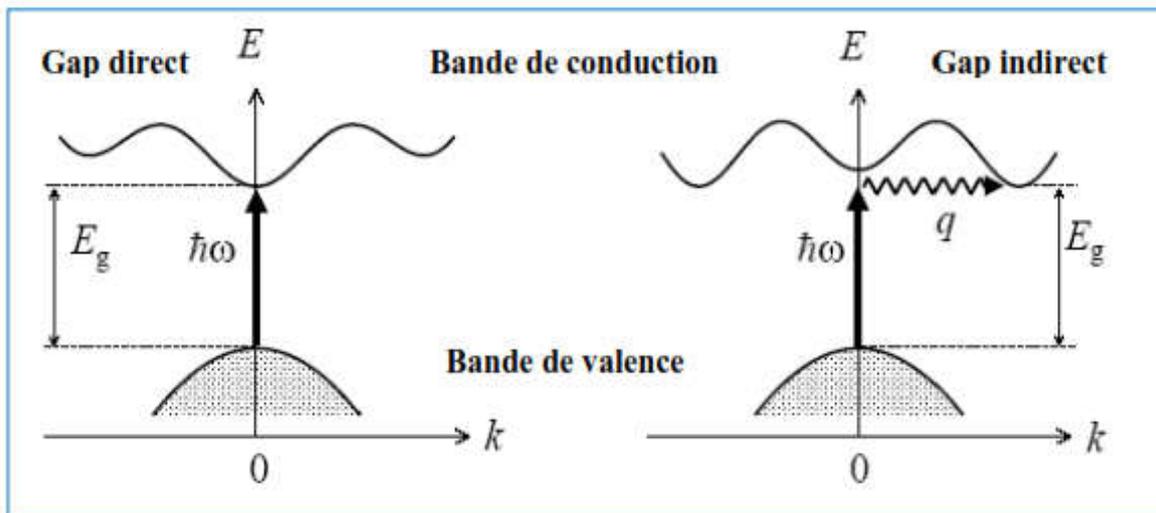


Figure I.4 : Les transitions optiques directes et indirectes [2]

## I.2.6. Propriété thermique

### I.2.6.1. La conductivité thermique

La conductivité thermique du matériau traduit sa capacité à évacuer la chaleur provenant de la puissance dissipée lors de fonctionnement du composant. En l'absence d'une bande conductivité thermique la puissance dissipée provoque une augmentation de la température du composant ce qui engendre une chute de la mobilité des électrons et une diminution des performances.

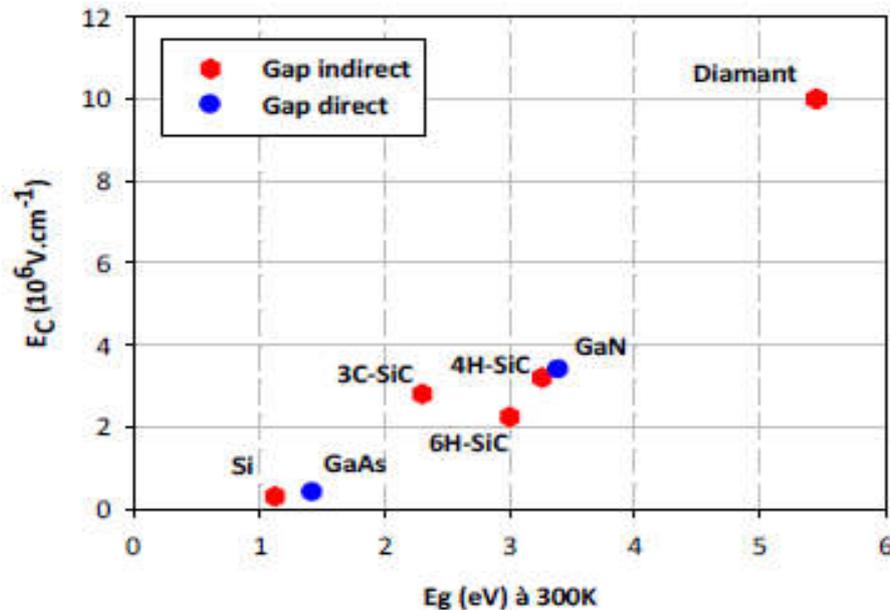
Avec une conductivité thermiques (1,3 W/k/cm), le GaN est nettement plus attractif comparativement au GaAs dont la conductivité thermique ne dépasse pas (0,5W/km/cm) [8].

### I.2.6.2 Champ de claquage

Une autre caractéristique qui a son importance lorsque l'on s'intéresse à l'électronique de puissance est le champ de claquage ou champ critique. De ce paramètre va dépendre la tension maximale de fonctionnement du composant. En effet, plus sa valeur sera élevée, plus il sera aisé de fabriquer des composants avec un fort dopage et de taille réduite, avec les conséquences

bénéfiques que cela a sur les caractéristiques de ce dispositif, comme des résistances d'accès plus faibles [9].

La valeur du champ de claquage théorique du GaN est mise en regard de celui d'autres semi-conducteurs dans la figure suivante :



**Figure I.5 :** Champs critiques de différents matériaux semi-conducteurs pour une, de leur gap (à 300 K) [9].

On constate que les matériaux à large bande interdite possèdent un champ de claquage supérieur à celui d'autres matériaux comme le Si ou le GaAs. Le champ électrique critique du diamant (environ  $10 \text{ MV.cm}^{-1}$  à 300K) est théoriquement 30 fois plus élevé que celui du Si.

Celui du GaN est de l'ordre de  $3,4 \text{ MV.cm}^{-1}$  à 300K soit 11 fois plus élevé que le champ critique du Si [9].

### I.2.7. Caractéristique du matériau GaN comparées au Si et au GaAs

Les composants à base GaAs représentent une bonne alternative pour remplacer la technologie silicium.

La technologie GaAs reste pénalisée en densité de puissance en raison de son faible champ de claquage et une forte densité d'électrons apparaît comme une solution incontournable.

	Si	GaAs	GaN
<b>Bande interdite (eV) 300° C</b>	<b>1.1 Indirect</b>	<b>1.4 Direct</b>	<b>3.4 Direct</b>
<b>Mobilité des trous (<math>cm^2/V.s</math>)</b>	<b>600</b>	<b>400</b>	<b>30</b>
<b>Vitesse de saturation des électrons (<math>10^7</math> cm/s)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>
<b>Champ de claquage (<math>10^6</math> V/cm)</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>&gt;5</b>
<b>Conductivité thermique (<math>W.cm^{-1}.K^{-1}</math>)</b>	<b>1.5</b>	<b>0.46</b>	<b>1.3</b>

**Tableau I.1** : caractéristique du matériau GaN comparées Si et au GaN [8].

D'après le tableau, on peut remarquer que le GaN possède un champ de claquage important comparé aux autres matériaux. Ce champ de claquage élevé favorise l'obtention d'une puissance de sortie élevée. La bonne conductivité thermique du GaN qui est de l'ordre de  $1.3 W.cm^{-1}.k^{-1}$  contre seulement  $0.46 W.cm^{-1}.k^{-1}$  pour le GaAs, autre vitesse de saturation des électrons relativement importante ( $3.10^7$  cm/s) favorisant les applications hautes fréquences [8].

### I.2.7.1. Intérêt de GaN

Le GaN présente les avantages d'une bande interdite, d'une grande sensibilité chimique, de très bonnes propriétés mécaniques. La large bande interdite permet également d'envisager son utilisation dans les photodétecteurs [4].

### I.3. Semi-conducteur Extrinsèque

#### I.3.1. Définition

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés dopantes au tout simplement dopants. On obtient alors un semi-conducteur extrinsèque au dopé [5].

#### I.3.2. Notion de dopage

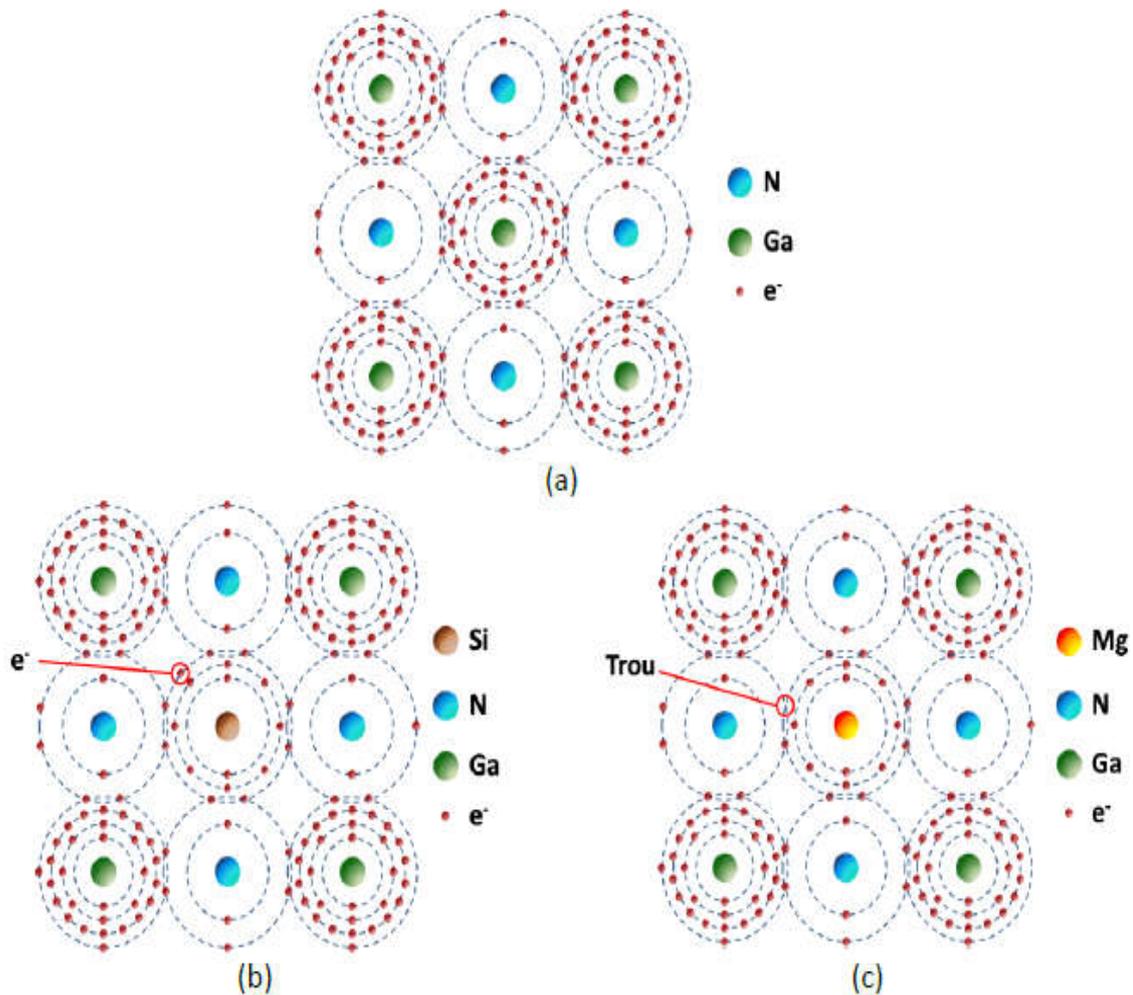
Le dopage électronique des matériaux (dopage N et P) est généralement obtenu selon deux techniques principales : soit par diffusion d'atomes A dans les atomes B du substrat, soit par implantation ionique d'atomes A dans le substrat [10].

##### I.3.2.1. Dopage de type N ou donneur pour GaN

Dopage de type N est facilement atteint pour le GaN et ses alliages en utilisant le silicium comme donneur. GaN est involontairement de type N, Les donneurs Si ont un niveau de 15-25 meV qui se situe au-dessous de la bande de conduction. Le di silane est utilisé comme précurseur pour le dopage par silicium. La concentration des porteurs augmente linéairement avec le débit du di silane. Le niveau de Dopage est entre  $10^{17}$  et  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . La Mobilité d'environ  $300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  pour les niveaux de dopage. La partie supérieure du dopage n limités est déterminée par la morphologie de la surface. Quand le GaN est trop fortement dopé (typiquement  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), la surface devient très agitée [6].

##### I.3.2.2. Dopage de type P ou accepteur

Le dopage P des couches de GaN est généralement obtenu en y incorporant le magnésium comme accepteur. Les résultats expérimentaux semblent donner une valeur limite à l'incorporation du Mg de quelques  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dans le GaN hexagonal. Au-delà, la morphologie est dégradée. Dans le GaN cubique, il apparaît que l'incorporation de Mg sature autour de  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Son énergie d'activation est de l'ordre de 200 meV dans le GaN (il n'existe pas d'accepteur léger dans GaN). Par conséquent, seulement quelques pour-cent des accepteurs sont activés à température ambiante [4].



**Figure I.6 :** Liaisons atomiques dans le réseau cristallin du GaN (a) et position des dopants dans ce même réseau : (b) Si, dopage de type N et (c) Mg, dopage de type P [9].

### I.3.3. La jonction PN

L'ensemble d'un semi-conducteur dopé P et autre dopé N on obtient une jonction P-N qui est la base de l'électronique moderne [10].

La jonction PN est physiquement la juxtaposition de deux régions dopées différemment dans un même cristal semi-conducteur, la zone frontière de passage de la région de type N à la région de type P s'appelle la région métallurgique.

Lorsque le matériau semi-conducteur est le même pour les deux zones dopées différemment cette jonction est appelée homojonction. Quand les matériaux sont différents, c'est

le cas dans les composants à base de composés semi-conducteur III-V on parle d'hétérojonction. Donc ce dernier cas, il faut une compatibilité des réseaux cristallins [5].

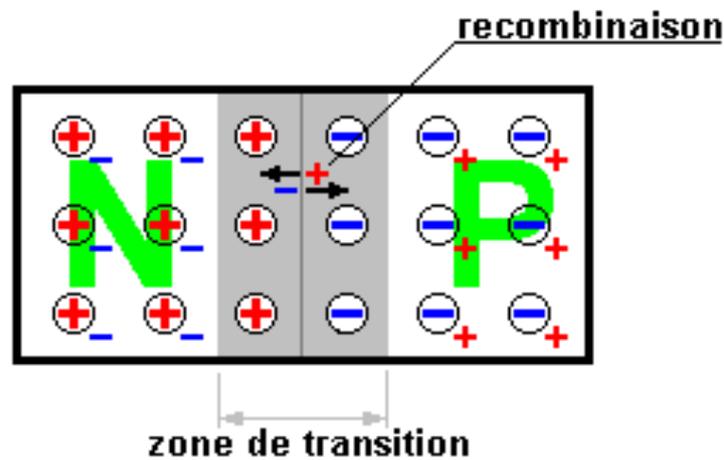


Figure I.7 : La jonction PN

### I.3.3.1. Jonction non polarisée

Une jonction est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N (jonction P-N). Les connexions avec le milieu extérieur sont réalisées par des contacts métalliques. Par construction, les jonctions entre métal et semi-conducteurs sont purement ohmiques (non redresseuses) [11].

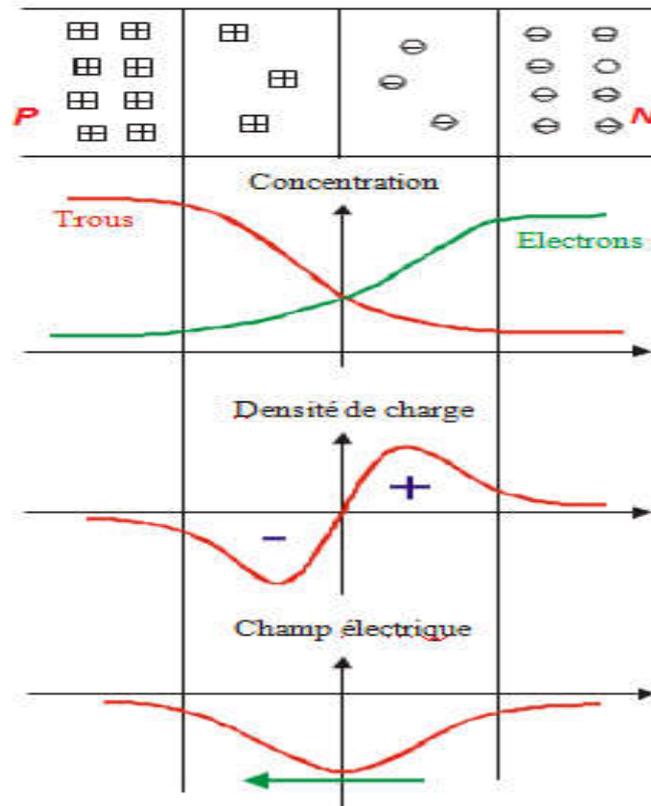


Figure I.8 : fonctionnement de jonction PN [11].

- Dans cette zone, les taux de dopages et donc le nombre de porteurs libres varie avec la distance.
- Dans la zone P les porteurs majoritaires sont les trous.
- Les atomes accepteurs constituent un réseau d'ions négatifs.
- De même dans la zone N les porteurs majoritaires sont les électrons. Les atomes donneurs constituent un réseau d'ions positifs.
- Les trous ont tendance à gagner la zone N où ils se recombinent avec des électrons. De même des électrons de la zone N vont combler des trous de la zone P.

Dans la zone de transition existe une charge d'espace due aux charges non compensées des noyaux des impuretés. En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs.

Les porteurs minoritaires induisent le courant de diffusion; les porteurs majoritaires créent le courant de saturation. En l'absence de polarisation, ces deux courants sont égaux [11].

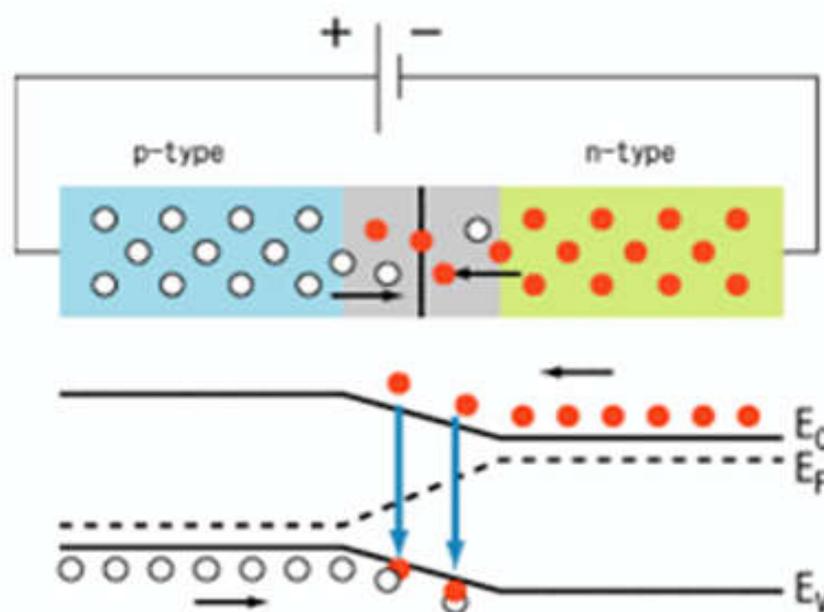
- **La Zone de Charge d'Espace (ZCE)**

Les électrons majoritaires du côté "N" ont tendance à diffuser du côté "P", où ils sont minoritaires. Quand un électron arrive du côté "P", il se recombine avec un trou, et, en disparaissant, il laisse du côté "N" un atome donneur ionisé positivement non compensé électriquement.

Les trous majoritaires du côté "P" ont tendance à diffuser du côté "N" où ils sont minoritaires. Quand un trou arrive du côté "N", il se recombine avec un électron libre, et, en disparaissant, il laisse du côté "P" un atome accepteur ionisé négativement non compensé électriquement [12].

### I.3.3.2. Jonction PN polarisée en direct

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction [11].



**Figure I.9** : la jonction PN polarisée en direct

### I.3.3 Jonction P-N polarisée en inverse

La partie "P" de la jonction à un potentiel négatif par rapport à la partie "N". La différence de potentiel créée par la source extérieure au niveau de la jonction est négative [13].

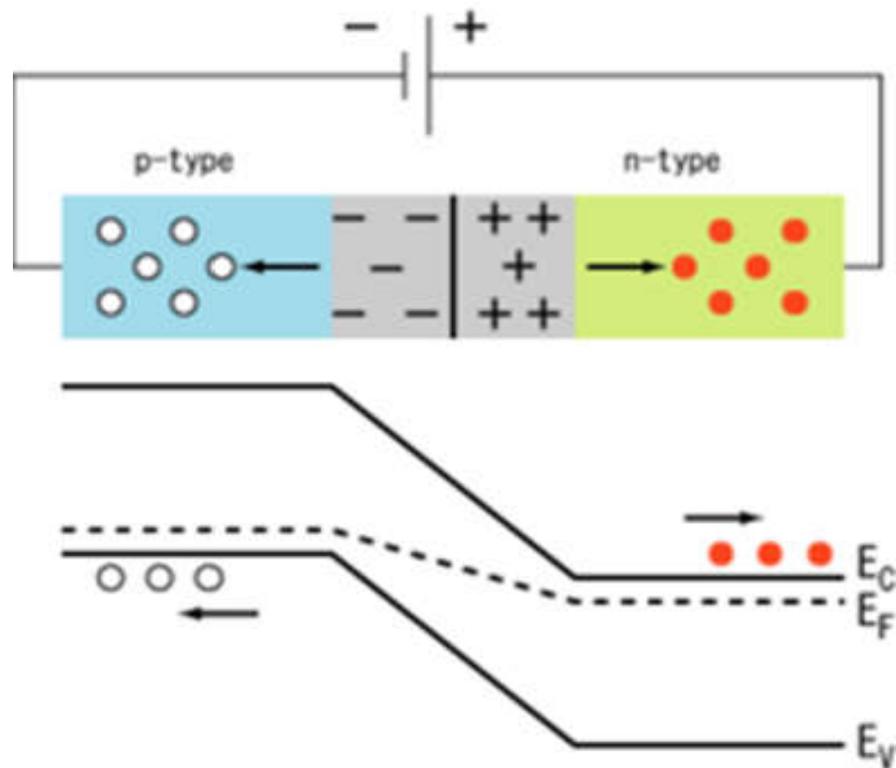


Figure I.10 : la jonction PN polarisée en inverse

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

Dans ce chapitre, nous avons vu les caractéristiques remarquables des semi-conducteurs III-V, et nous avons vu les propriétés optiques très intéressantes pour les applications photodiodes afin d'augmenter l'efficacité d'absorption de la lumière principale qui donne au GaN son importance pour l'utilisation en communication optique. On a présenté aussi l'hétérojonction PN, très utilisée dans les photo-détecteurs à base de composés III-V.

# *Chapitre II*

---

## *Généralités sur les photodiodes*

## II.1 Introduction

Le principe de toute transmission de données est de faire circuler des informations entre un émetteur et un récepteur en minimisant les risques de déformation du signal reçu, de façon à assurer une fiabilité maximale du transfert de l'information. Ces signaux sont injectés dans la fibre optique. À la sortie de la fibre, les signaux sont reçus sur une photodiode puis amplifiés avant d'être décodés pour être remis sous sa forme initiale. Dans la chaîne de transmission de la figure ci-dessous, on va détailler les composants Emission/ Réception.

Dans ce chapitre nous allons étudier les types de photodétecteurs et leurs principes de fonctionnement

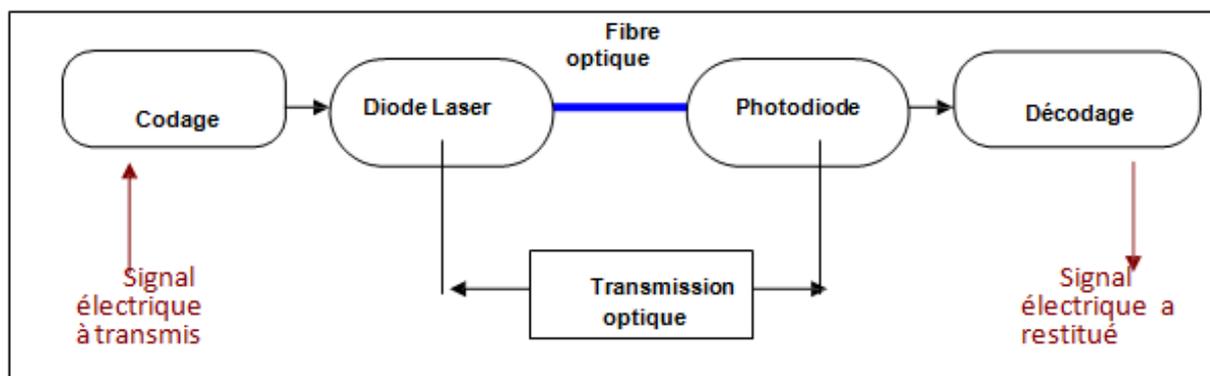


Figure II.1 : Une chaîne de transmission par fibre optique[19].

## II.2 Composants d'émission/réception

Le principe de fonctionnement des composants d'émission/réception repose sur l'interaction lumière/matière dans les semi-conducteurs III/V. (émission spontanée, émission stimulée, et absorption), ainsi que sur la physique des dispositifs électroniques, la jonction PN en particulier [24].

### **II.2.1 Composants d'émission :**

On distingue classiquement les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL) selon le type de mécanisme mis en jeu pour l'émission de lumière (émission spontanée pour les DEL et émission stimulée pour les DL). Dans le cas des liaisons haut débit, seules les diodes laser, nettement plus performantes, sont utilisées. Dans une description de type « système » des liaisons par fibre optique, les diodes laser interviennent essentiellement par leurs caractéristiques statiques et par leurs caractéristiques dynamiques [18].

### **II.2.2 Composants de réception**

La détection est un point clef des liaisons par fibre optique. En général, les signaux reçus sont très faibles (typiquement le nW) et rapides (le débit binaire des liaisons peut atteindre 40 Gbits. $s^{-1}$ ). Il est donc nécessaire que le système de détection soit sensible et rapide. Le rayonnement incident crée, par génération bande à bande, des paires électron-trou séparées par un champ électrostatique, puis collectées par des contacts électriques. Ce flux de charges donne lieu à un photocourant  $I_{ph}$ .

Le système de détection comprend, en plus de l'élément photodétecteur proprement dit (par exemple une photodiode PN, PIN, PDA), un ensemble de circuits électroniques, à commencer par un pré-amplificateur faible bruit. Du point de vue des liaisons par fibre, les principaux paramètres qui interviennent pour caractériser la détection sont : la longueur d'onde de coupure, la sensibilité du détecteur  $S_\lambda$  (A/W) qui chiffre le rapport entre le photocourant recueilli et la puissance optique incidente, le rendement quantique, et le courant d'obscurité du détecteur (les caractéristiques des photodétecteurs)[19,26].

## II.3 Le photodétecteur

Un photodétecteur convertit les photons incidents en courant d'électrons ; il transforme le signal optique en signal électrique. Un bon photodétecteur doit être très sensible à la longueur d'onde utilisée, générer un minimum de bruit et doit être suffisamment rapide. Les photodétecteurs à semi-conducteurs sont les plus utilisés car ils sont très rapides, peu coûteux et de dimension compatible avec les fibres optiques [14].

### II.3.1 Principe de la photodétection

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou.

Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher l'électron de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés.

Pour effectuer la photodétection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN [20].

### II.3.2 Caractéristiques du photodétecteur

Un photodétecteur est caractérisé par :

- **Le rendement quantique ( $\eta$ )** : représente le rapport du nombre de paires de porteurs « photocréées et collectées » au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il est souvent compris entre 0,5 et 0,9 et pour une photodiode idéale il est égal à 1.

- **Le courant d'obscurité** : Le courant d'obscurité est le courant circulant en l'absence de toutes sources lumineuses. Son origine est thermique et il augmente de 10% pour une augmentation de température de 1°C.
- **La sensibilité (S)** : définit le rapport du photocourant  $I_{th}$  au flux énergétique (ou puissance optique  $P_{opt}$ ) reçu (e) et s'exprime en (A/W).
- **La bande passante** : permet de savoir si le courant peut suivre une variation brusque du flux de photons, et que c'est le facteur de proportionnalité entre le temps de montée ou de descente du photocourant et ceux du flux lumineux [15].

### II .3.3 Le bruit du photodétecteur

Certains électrons du courant utile peuvent être générés sans qu'un photon ait été absorbé. Ils s'ajoutent aux photoélectrons et parasitent le courant.

Lorsqu'on détecte un signal optique au moyen d'une photodiode (PIN), la contribution de bruit dominante est celle des sources de bruit thermique des circuits de charge (résistance de charge, bruit du préamplificateur). La sensibilité du récepteur est en conséquence limitée par le bruit thermique.

Les détecteurs à gain interne tels que les photodiodes à avalanches (APD), dans lesquels un photon incident n'engendre plus un seul photo-électron, mais plusieurs, grâce à un processus de multiplication, peuvent être une solution pour augmenter la puissance de signal électrique pour une même puissance optique incidente, et donc améliorer le rapport signal sur bruit. Toutefois ce phénomène de gain interne s'accompagne aussi d'un bruit de grenaille additionnel. Ce bruit est lié à la nature corpusculaire (ou granulaire) de la lumière reçue, et donc du photocourant qu'engendre la détection. Néanmoins, si celui-ci reste faible devant le bruit thermique, le photodétecteur à gain interne apporte une amélioration du rapport signal sur bruit.

Dans la notation de rapport signal sur bruit (S/B) d'une liaison à fibre optique, ces électrons permettent alors de caractériser le dénominateur de ce rapport. La qualité du signal dépend bien évidemment de la source émettrice et de la qualité des fibres optiques [15, 16].

## II.4 Les différents types des photodétecteurs

Dans cette partie nous présentons brièvement les différents types de photodiodes :

### II.4.1 photodiode PN

La photodiode de jonction PN est la première forme de photodiode développée. Il s'agit des diodes ; c'est-à-dire des composants constitués de deux matériaux semi-conducteurs accolés et dopés l'un par des donneurs (type N) l'autre des accepteurs (type P). Dans le cas où les deux matériaux sont de même nature, on parle d'homojonction. Dans le cas contraire on parle d'hétérojonction.

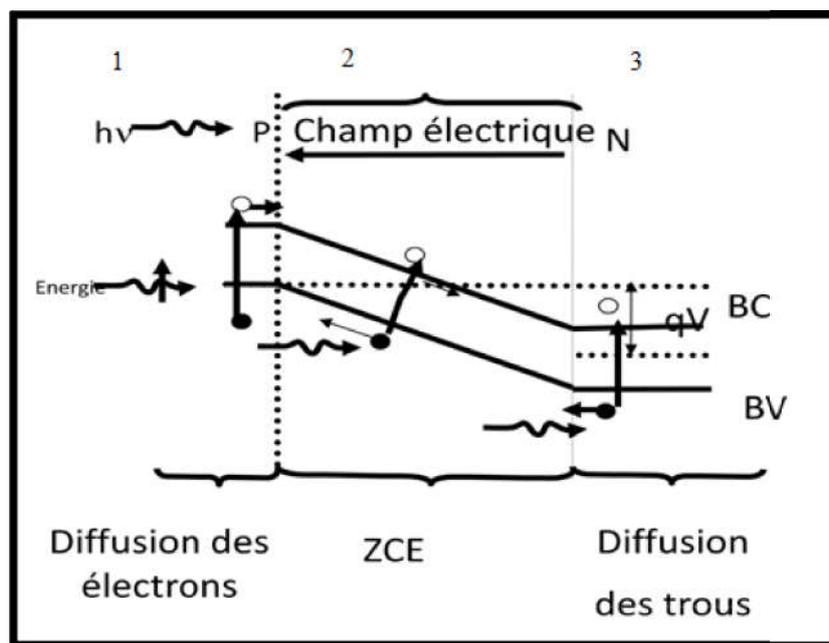


Figure II.2 : Principe de fonctionnement d'une photodiode PN [9].

Il apparaît donc à l'équilibre au voisinage immédiat de la jonction une zone vide de porteurs libres, semblable à un condensateur chargé, du côté N, les donneurs ionisés positivement et du côté P, les accepteurs ionisés négativement c'est la ZCE (zone de charge d'espace). La présence des donneurs et accepteurs chargés produit un champ électrique, qui forme en équilibre, une barrière d'énergie. La largeur de la zone de charge d'espace est une fonction décroissante des niveaux de dopage du matériau.

Une paire électron-trou produite dans cette ZCE est donc séparée par l'effet du champ électrique interne de la jonction et ne donne pas lieu à une recombinaison. Ce sont ces

porteurs qui contribuent au photocourant. La structure de bande de la jonction implique que le photocourant soit constitué de porteurs minoritaires. Pour cette raison, le photocourant circule dans le sens de polarisation inverse du diode, ou le sens direct est par définition le sens d'écoulement des porteurs majoritaires (de la région N vers la région P, et inversement pour les trous) [18].

#### II.4.1.1 Principe du fonctionnement

- Augmenter l'épaisseur de la zone de charge d'espace.
- Intercaler une couche de semi-conducteur intrinsèque.
- Transfert rapide des charges.
- Temps de réponse court

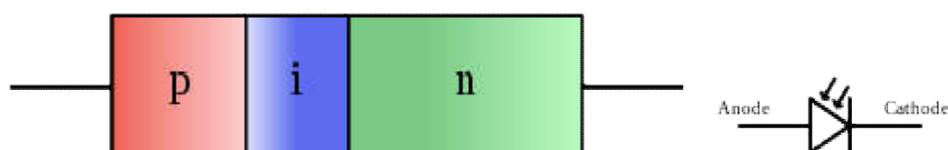
#### II.4.2 photodiode PIN

La principale qualité d'une photodiode PIN est que la composante d'entraînement du photocourant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone I. En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode.

Les photodiodes PIN sont développées à partir des photodiodes de jonction PN. Le fonctionnement de la photodiode PIN est similaire à la photodiode de jonction PN sauf que la photodiode PIN est fabriquée différemment pour améliorer ses performances.

La photodiode PIN est développée pour augmenter le courant de porteur minoritaire et la vitesse de réponse.

Les photodiodes PIN génèrent plus de courant électrique que les photodiodes de jonction PN avec la même quantité d'énergie lumineuse [20,22].



**Figure II.3** : Symbole de photodiode PIN[23].

#### **II.4.2.1 Les Couches de photodiode PIN**

Une photodiode de jonction PN est constituée de deux couches, à savoir des semi-conducteurs de type p et de type n, tandis que la photodiode PIN est constituée de trois couches, à savoir le type p, le type n et le semi-conducteur intrinsèque.

Dans la photodiode PIN, une couche d'addition appelée semi-conducteur intrinsèque est placée entre le semi-conducteur de type p et le type n pour augmenter le courant de porteuse minoritaire[19].

#### **II.4.2.2 Principe du fonctionnement PIN :**

Une photodiode PIN est constituée d'une région P et d'une région N séparées par une couche intrinsèque hautement résistive. La couche intrinsèque est placée entre la région P et la région N pour augmenter la largeur de la région d'épuisement. Les semi-conducteurs de type P et de type N sont fortement dopés. Par conséquent, la région P et la région N de la photodiode PIN ont un grand nombre de porteurs de charge pour transporter du courant électrique. Cependant, ces porteurs de charge ne transporteront pas de courant électrique sous une condition de polarisation inverse.

D'autre part, semi-conducteur intrinsèque est un matériau semi-conducteur non dopé. Par conséquent, la région intrinsèque n'a pas de porteurs de charge pour conduire le courant électrique. En condition de polarisation inverse, les porteurs de charge majoritaires dans la région N et la région P s'éloignent de la jonction. En conséquence, la largeur de la région d'épuisement devient très large. Par conséquent, les porteurs majoritaires ne transporteront pas de courant électrique sous une condition de polarisation inverse.

Cependant, les transporteurs minoritaires porteront le courant électrique parce qu'ils éprouvent la force répulsive du champ électrique externe. Dans la photodiode PIN, les porteurs de charge générés dans la région d'épuisement transportent la majeure partie du courant électrique. Les porteurs de charge générés dans la région P ou dans la région N ne portent qu'un faible courant électrique. Lorsque l'énergie lumineuse ou photonique est appliquée à la diode PIN, la majeure partie de l'énergie est observée par la région intrinsèque ou d'épuisement en raison de la largeur d'épuisement[19,22].

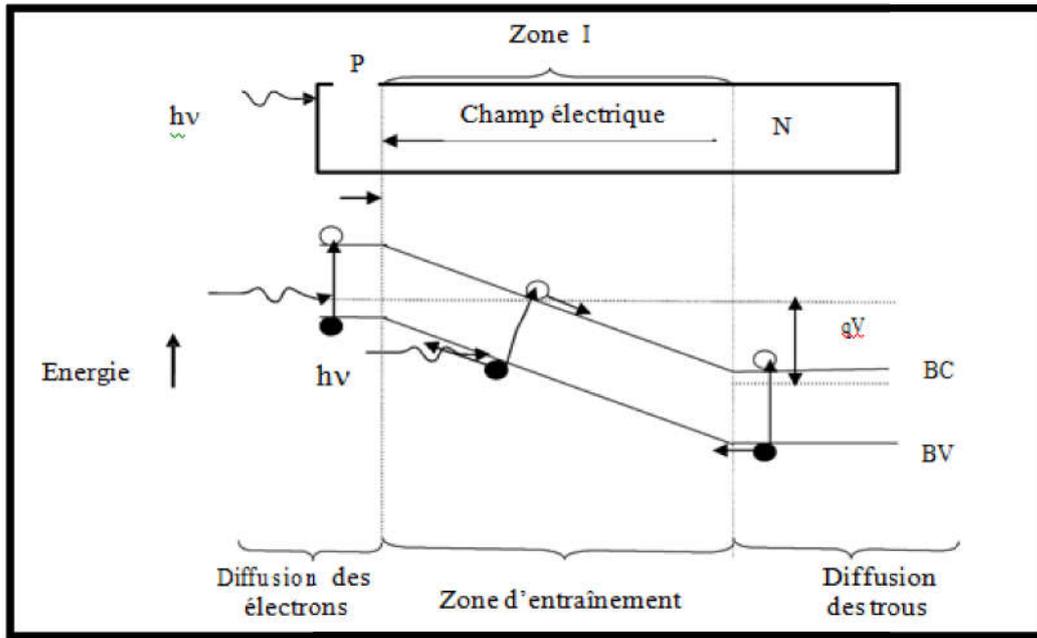


Figure II.4 : Principe de fonctionnement de la jonction PIN [9].

### II.4.2.3 Les photodiodes PNet PIN à base de GaN :

Les performances des photodiodes GaN à base de jonctions PN ont été limitées en raison de la forte résistivité électrique de la couche P causée par des difficultés d'obtenir un dopage de type P, avec une forte résistivité des contacts ohmiques.

Des photodiodes à base de jonction PN ont été obtenues avec des temps de réponse de 105 ns et un niveau de bruit de  $61 \text{ fWHz}^{-1/2}$  avec une tension de polarisation  $V_{\text{inV}}$  de l'ordre de 3 V. Les performances sont même été améliorées par l'insertion de dopant non intentionnel (photodiodes PIN). Cependant, l'optimisation de ces dispositifs demeure difficile en raison du niveau de dopage de type P.

Les valeurs de sensibilité typiques des photodiodes homojonction PNetPIN se trouvent dans la gamme de  $100\text{--}150 \text{ mA W}^{-1}$ , ce qui correspond à 30 à 44% de la valeur de rendement quantique externe [9].

### II.4.3 Photodiode à avalanche PDA

Les photodiodes à avalanchesontdesdispositifs attractifscarilsbénéficient d'un gaininternedûàlamultiplication desporteursgénérésparl'absorption delalumière incidente.

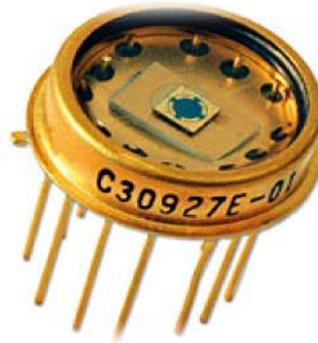
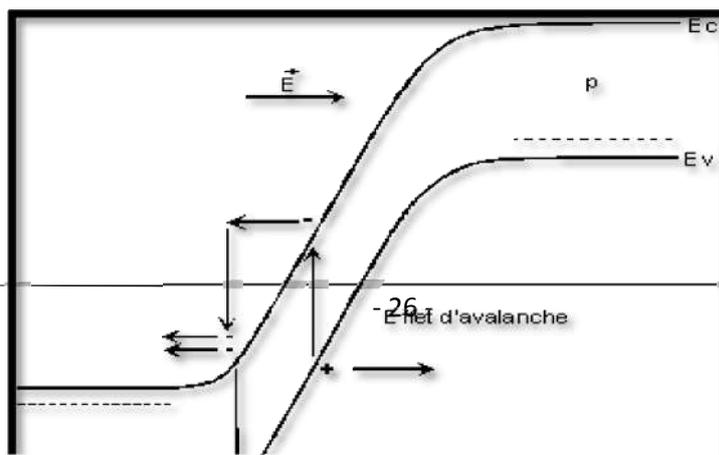


Figure II.5 :photodiode PDA

### II.4.3.1 L'effet d'avalanche

Lorsque le champélectrique dansla zonedecharge d'espace est suffisamment élevé ( $>10^5$  V/cm), les porteurs libres entraînéspar le champ peuvent acquérir une énergiecinétique suffisante pour créer une paireélectron-trou supplémentaire par collision avec un électron de valence (ionisation par choc). Les porteurs supplémentairespeuvent à leurtour acquérirune énergie permettant lacréationdepairesadditionnelles, il y a alors multiplication des porteurs et la diode devient le siège d'un phénomène d'avalanche qui est linéaire au courant d'origineet multiplié par un facteurM-gain-contrôlableparletensioninverse  $V_{inv}=-V_d$ :  $M=[1-(V_{inv}/V_c)^m]^{-1}$

OùMunnombredépendantdumatériauetdeladiode[25].



**Figure II.6** : Mécanisme d'avalanche dans le diagramme de bande d'énergie[25].

#### II.4.3.2 Principe du fonctionnement de la photodiode PDA :

Le fonctionnement de la photodiode à avalanche est similaire à la jonction PN et à la photodiode PIN, sauf qu'une tension de polarisation inverse élevée est appliquée en cas de photodiode à avalanche pour obtenir une multiplication par avalanche.

L'application d'une tension de polarisation inverse élevée à la photodiode d'avalanche n'augmentera pas directement la génération de porteurs de charge. Cependant, il fournit de l'énergie aux paires électron-trou générées par la lumière incidente.

Lorsque l'énergie lumineuse est appliquée à la photodiode d'avalanche, des paires électron-trou sont générées dans l'épuisement. Les paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région d'épuisement et au champ électrique externe.

Dans une photodiode à avalanche, une tension de polarisation inverse très élevée fournit une grande quantité d'énergie aux porteurs minoritaires (paires électron-trou).

Les transporteurs minoritaires qui gagnent une grande quantité d'énergie sont accélérés à des vitesses plus élevées.

Lorsque les électrons libres se déplaçant à grande vitesse entrent en collision avec l'atome, ils frappent plus d'électrons libres. Les électrons libres nouvellement générés sont de nouveau accélérés et entrent en collision avec d'autres atomes. En raison de cette collision continue avec les atomes, un grand nombre de porteurs minoritaires sont générés. Ainsi, les photodiodes d'avalanche génèrent plus de porteurs de charges que les photodiodes PN et PIN

Les photodiodes d'avalanche sont utilisées dans les applications où un gain élevé est un facteur important [18,22].

#### **II.4.3.3 Photodiodes Avalanche à base de GaN :**

Les Photodiodes à avalanche offrent des avantages combinés d'un fonctionnement rapide, une grande sensibilité et d'un gain optique élevé. Elles sont polarisées en inverse où la polarisation appliquée est proche de la tension de claquage. Les porteurs photo-générés traversent la structure avec une vitesse de saturation en raison de l'intense champ électrique appliqué, et ils sont capables de produire des secondes paires électron-trou par le moyen de collisions ionisantes avec le réseau. Ces nouveaux électrons et trous dérivent dans des directions opposées, et certains d'entre eux sont en mesure de produire des porteurs supplémentaires. Ce processus de génération est responsable de l'augmentation du gain [6].

#### **II.4.3.4 Avantages de la photodiode à avalanche**

- Haute sensibilité
- Plus grand gain

#### **II.4.3.5 Inconvénients de la photodiode à avalanche :**

- Génère un niveau de bruit élevé qu'une photodiode PN

#### **II.4.3.6 Modes de fonctionnement photodiode**

- Une photodiode peut être utilisée dans l'un des deux modes : photovoltaïque ou photoconducteur.
- La sélection du mode de fonctionnement de la photodiode dépend des exigences de vitesse de l'application et de la quantité de courant sombre qui est tolérable [22].

### **II.5 Comparaison entre les photodiodes PIN et PDA :**

Une comparaison entre leurs performances est présentée dans le tableau ci-dessous :

Typesdephotodiode	Photodiodes	
	PIN	PDA
Tensiondecommande(V)	Faible	Elevé
Fréquencedecoupure(GHz)	>60	Quelques
Rendementquantique(%)	Faible	Elevé
Bandepassante(GHz)	Large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300et1550	1300et1550

Tableau II.1: Comparaison des caractéristiques des photodiodes PIN et PDA [15].

Le choix du photodétecteur est particulièrement déterminé par le rapport signal à bruit (S/B) qui est défini par le rapport du photocourant engendré par la puissance du signal optique sur le courant de bruit du photodétecteur plus le courant de bruit de l'amplificateur. Pour de faibles niveaux, le rapport S/B est meilleur avec une photodiode à avalanche alors que pour des niveaux plus forts [15].

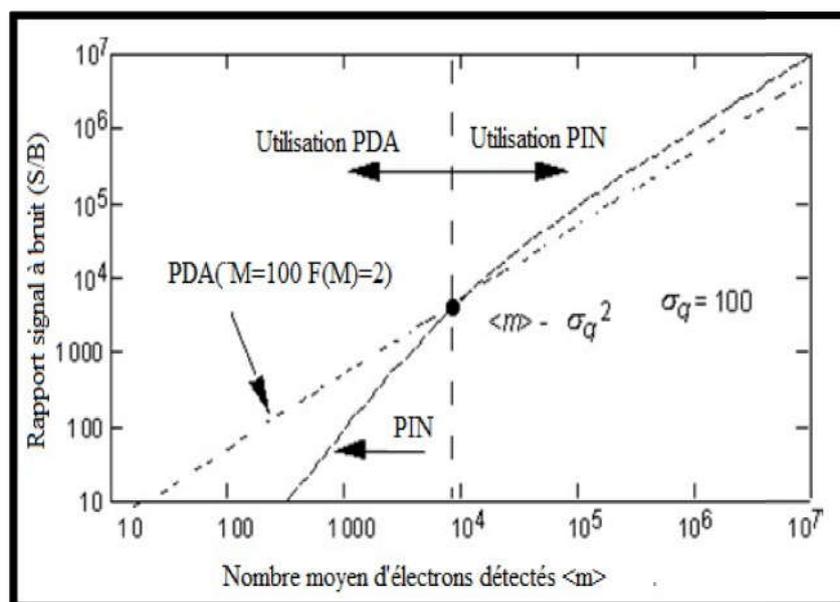


Figure II.7: Rapports signal à bruit en fonction de l'intensité du signal émis pour les photodiodes PDA et PIN [15].

## II.6 Paramètres de performance d'une photodiode

- **Réactivité**

La sensibilité est le rapport entre le photocourant généré et la puissance lumineuse incidente.

- **Efficacité quantique**

L'efficacité quantique est définie comme le rapport du nombre de paires électron-trou (photoélectrons) généré aux photons incidents.

- **Temps de réponse**

Le temps de réponse d'une photodiode est défini comme le temps qu'il faut pour que les porteurs de charge générés par la lumière franchissent la jonction p-n [22].

## II.7 Objectifs et limites de la photodiode

- La photodiode doit toujours être utilisée en situation de polarisation inverse.
- La tension de polarisation inverse appliquée doit être faible.
- Générer un bruit faible
- Gain élevé
- Vitesse de réponse élevée
- Haute sensibilité à la lumière
- Faible sensibilité à la température
- À bas prix
- Petite taille
- Longue durée de vie

## **II .8 Applications photodiodes**

- ✓ Ladétection rapidedesignauxfaibles
- ✓ L'asservissement
- ✓ Laphotométrie
- ✓ Lesinstrumentsdemesure
- ✓ Latélécommunication par fibre optique
- ✓ L'imageriemédicale Lecteurs de disques compacts
- ✓ Détecteur de fumée
- ✓ Applications spatiales
- ✓ Les communications optiques.
- ✓ La mesure des intensités lumineuses extrêmement faibles.

## **II.9 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu la définition de photo-détecteur ou bien la photodiode. En principe la détection de l'énergie lumineuse, la collecte des charges et le transfert en signal électrique se fait par ce composant très utilisée en communication optique. La définition de ces composants ouvre donc un vaste domaine d'utilisation car leurs caractéristiques est remarquables.

# *Chapitre III*

---

*Simulation d'une photodiode  
par Logiciel «ATLAS-SILVACO»*

### **III.1 Introduction**

Le logiciel Silvaco avec l'outil de simulation ATLAS est spécialement conçu pour la modélisation 2D et 3D des composants basés sur la physique des semi-conducteurs, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs.

Dans ce chapitre, nous exposons les résultats de simulation numérique bidimensionnelle des caractéristiques courant-tension des photodiodes PN, PINet APD (à avalanche) en AlGaIn / GaN et on choisit la meilleure structure pour faire cette dernière avec différents paramètres technologiques et physiques tels que l'effet de la variation d'épaisseur de la couche donneuse et le dopage puis la fraction molaire et enfin l'influence de la température.

## **Partie 1 : Présentation du logiciel «Atlas –Silvaco »**

### **III.1.1 Le simulateur TCAD**

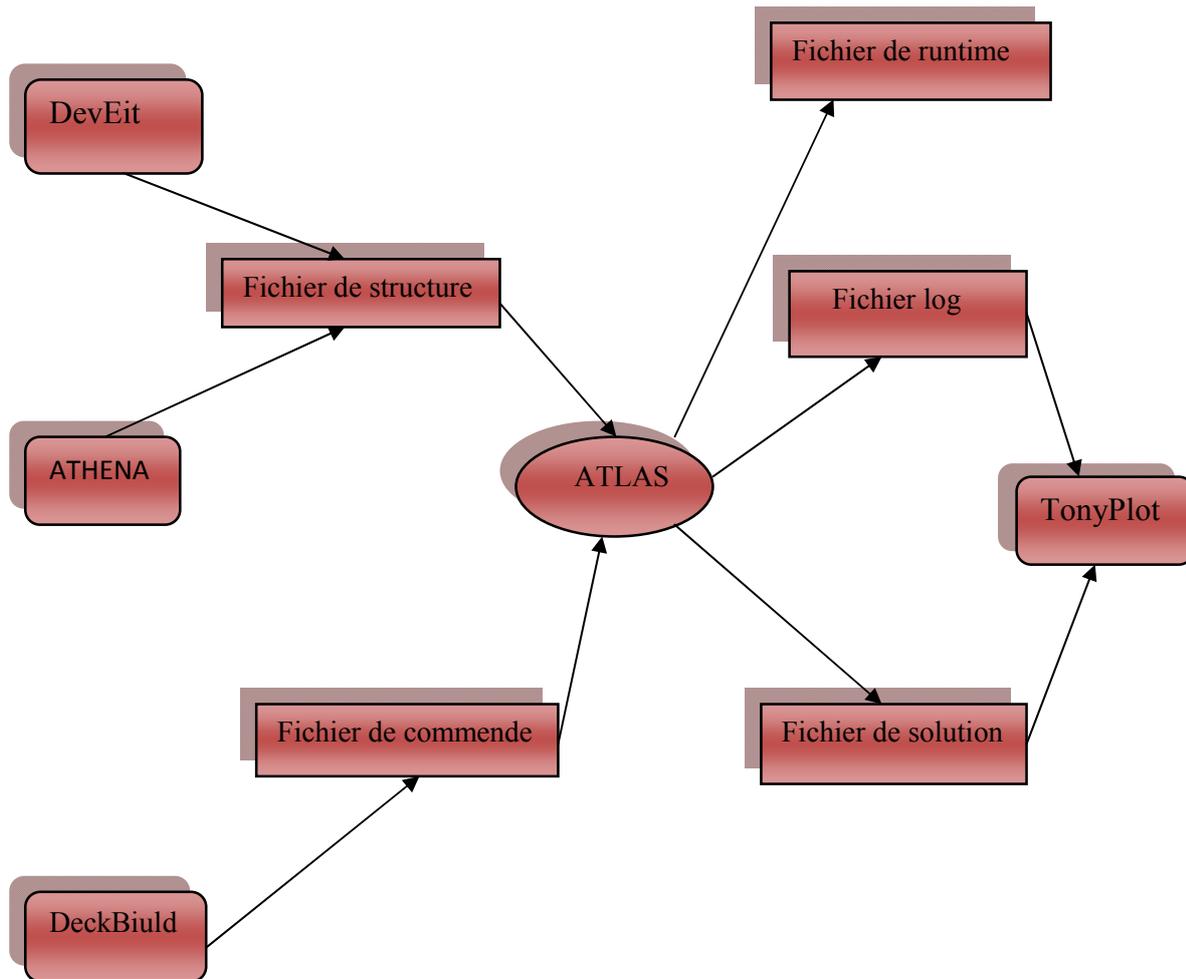
Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, autant de données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques [3].



**Figure III.1** :Outil de simulation SILVACO

SILVACO (SiliconValley Corporation) est un environnement de logiciels qui permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à semi-conducteur. Cet outil sert à la modélisation des dispositifs à semi-conducteur avant leur fabrication. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches il inclut des nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation des solutions linéaires, tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de celles de la pratique. L'avantage majeur de ce type de simulateurs est qu'il donne la possibilité de visualiser des phénomènes physiques difficilement accessibles et donc observables [1].



**Figure III.2:** Entrées et sorties d'Atlas [1].

Dans le schéma de la figure III.1 nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas ». La plupart des simulations réalisées par « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée.

- Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'Atlas exécute (représenté par « Fichier de commande »).
- Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure qui va être simulée.

A la sortie « d'Atlas », nous avons trois types de fichiers.

- Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.
- Le deuxième type de fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique).
- Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier)[27].

### III.1.2 Ordres de commandes d'Atlas

Après la présentation de l'outil de simulation « d'Atlas » de SILVACO TCAD, sa composition interne et son fonctionnement nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ». Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (Figure 3.2). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte [1].



Figure III.3: Groupes des commandes fondamentales dans un programme Atlas[1].

### III.1.3 La spécification de la structure

Notre structure de référence que nous allons étudier (par simulation) qui représenté dans la figure III.3 est une photodiode PN.

Dans cette étude, nous utilisons l'hétérostructure des photodiodes PN et PIN à base de AlGaIn/ GaN avec une épaisseur  $15\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  dopée uniforme à une concentration en donneurs et accepteurs de  $3 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$  et  $3 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$  successivement.



Figure III.4 : Structure proposé d'une photodiode AlGaIn/GaN

### III.1.4 Simulation du dispositif

Pour effectuer cette simulation sous SILVACO-Atlas, il nécessaire de bien définir la structure utilisée. On doit spécifier le domaine physique de la simulation pour cela en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage

### III.1.4.1 La spécification de maillage

Pour procéder à la simulation numérique et garantir la fiabilité des résultats, il est nécessaire de définir le maillage de la structure. Il joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations.

L'outil ATLAS-SILVACO permet de définir les dimensions de la structure simulée, les paramètres des zones dopées (l'emplacement, le type, le niveau et le profil de dopage), de placer les contacts électriques sur la structure et de définir le maillage [17].

Le format général pour définir le maillage est :

X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>

Un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis. Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat dans la simulation [1].

La maille conçue pour notre dispositif est montrée sur la figure III.4 ci-dessous.

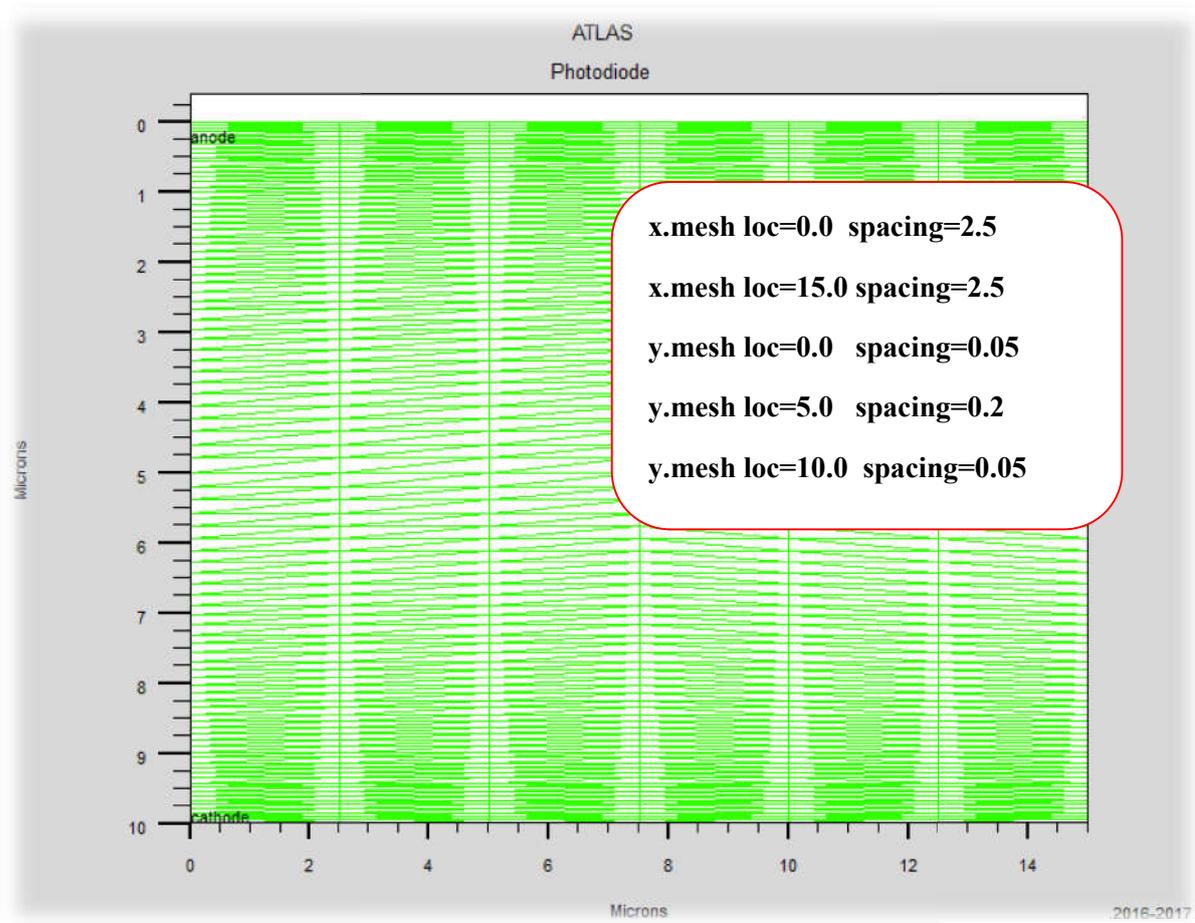
x.mesh loc=0.0 spacing=2.5

x.mesh loc=15.0 spacing=2.5

y.mesh loc=0.0 spacing=0.05

y.mesh loc=5.0 spacing=10.0

y.mesh loc=10.0 spacing=0.05



**Figure III.5 :**La structure de maillage dans la photodiode PN AlGaIn/GaN

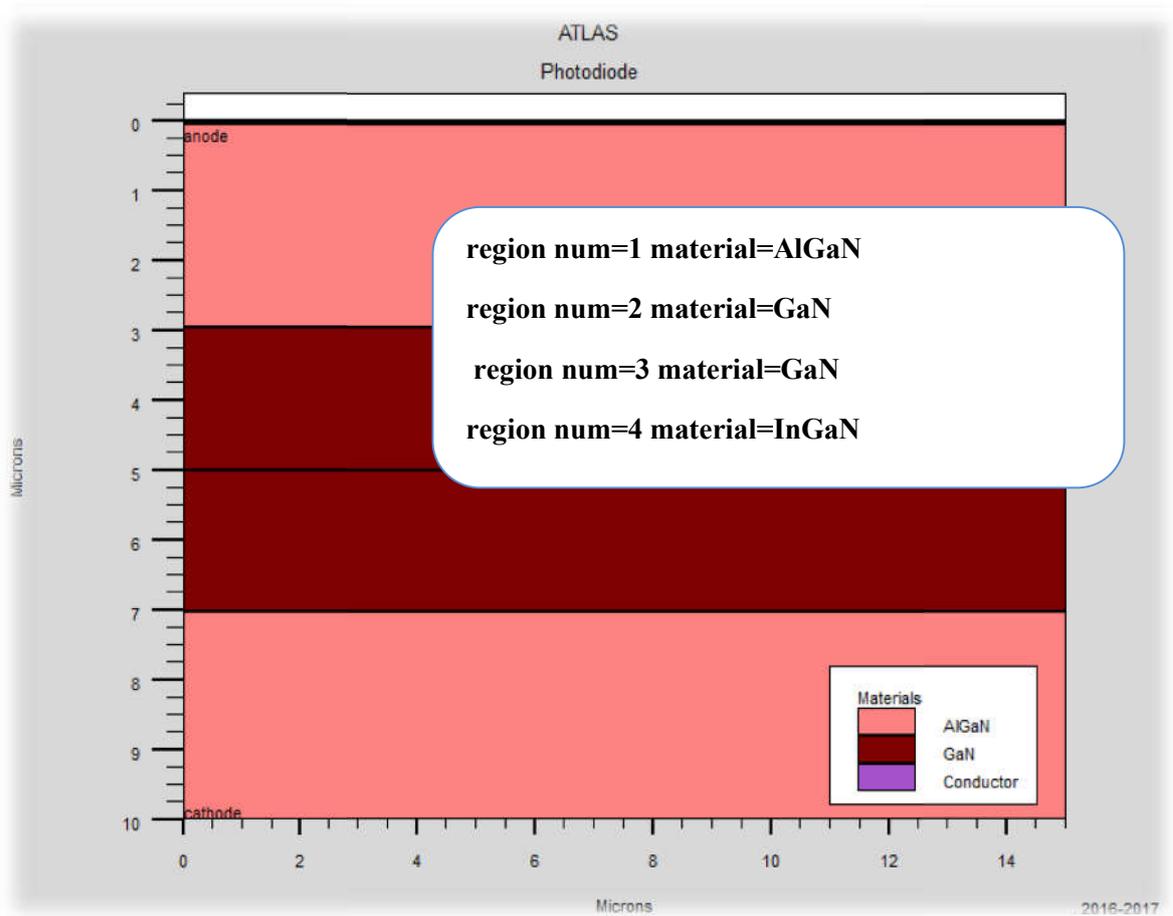
Par exemple, x.mesh à entre  $0\mu\text{m}$  et  $15\mu\text{m}$  a un espacement de  $2.5\mu\text{m}$ , pour y.mesh est défini d'une façon suivant : de  $0\mu\text{m}$  à  $5\mu\text{m}$  a un espacement de  $0.05$  et  $0.2$  respectivement, puis pour y.mesh entre  $5\mu\text{m}$  à  $10\mu\text{m}$  l'espacement change à  $0.2\mu\text{m}$  à  $0.05\mu\text{m}$ .

#### III.1.4.2 La spécification des régions

Après avoir déterminé le maillage, il est maintenant nécessaire de définir les régions. Le format pour définir les régions est comme suit :

REGION number=<integer><material\_type><position parameters>

La figure III.6 montre les commandes utilisées pour identifier les régions. On distingue bien six régions, les limites de chaque région sont explicitement identifiées dans les axes  $x$  et  $y$ . Il reste à attribuer pour chaque région un matériau [1].



**Figure III.6:** La structure de la photodiode PN AlGaIn /GaIn simulée par Silvaco, la représentation de différentes régions.

### III.1.4.3 La spécification des électrodes

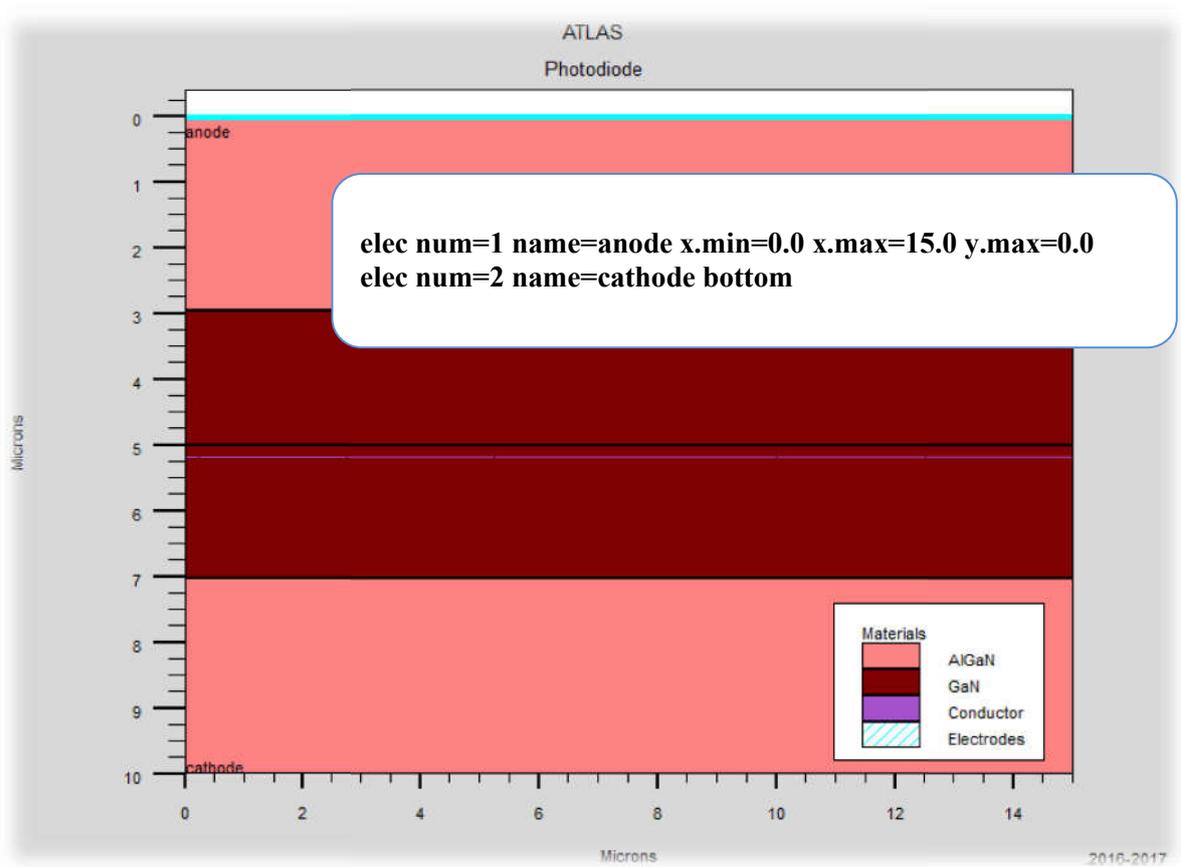
La prochaine spécification de la structure correspond aux électrodes (Figure III.6)

Dans notre simulation, il n'y a que deux électrodes, l'anode et la cathode[1].

Le format pour définir les régions est le suivant :

ELECTRODE NAME=<electrode name><position parameters>

Sur la figure la commande « Electrode » est utilisée pour définir l'anode et la cathode.



**Figure III.7:** La structure du ALGaIn /GaN simulée par Silvaco, la représentation d'électrodes dans la photodiode PN.

#### III.1.4.4 La spécification du dopage

La dernière spécification de la structure est le dopage. Le format pour définir le dopage est le suivant :

DOPING<distribution type><dopant\_type><position parameters>

La figure montre les types et les niveaux de dopages utilisés dans notre structure. Le dopage peut être du type **N** ou du type **P**, [1].

Dans notre exemple, un dopage avec une distribution uniforme de type n et p d'une valeur  $1.e18 / cm^3$  est donné par :Doping n.typeconc=3.e18uniform ;Doping p.type conc=3.e19

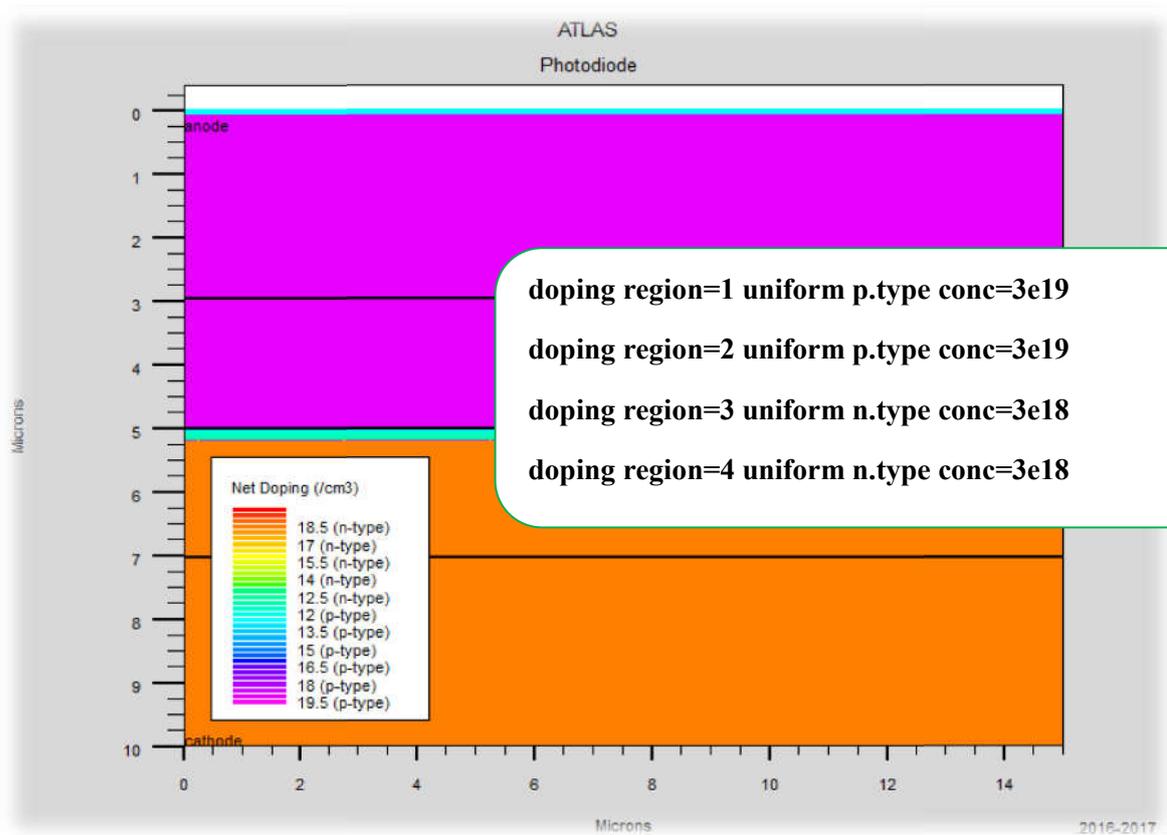


Figure III.8 : La structure du dopage AlGaIn/GaNde photodiode PN.

### III.1.5 Spécification des modèles des matériaux

Après la spécification du maillage et du dopage, on peut facilement modifier les caractéristiques des matériaux utilisés (électrodes, substrat) et changer leurs paramètres qu'ATLAS prend par défaut et définir notre choix du modèle physique qui sera utilisé pendant la simulation. Ces actions sont accomplies par les instructions suivantes : CONTACT, MATERIAL et MODELS [27].

#### III.1.5.1. La spécification du matériau

Le format d'Atlas pour définir le matériau est le suivant :

```
MATERIAL <localization><material_définition>
```

Exemple :

```
material material=AlGaN
```

```
material material=GaN
```

### III.1.5.2. La spécification du model

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels. La syntaxe de la commande Model est la suivante:

```
MODELS <model flag><generalparameter><model dependentparameters>
```

Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation. L'exemple ci-dessous active plusieurs modèles.

- **CONMOB** est le modèle de la concentration dépendante.
- **FLDMOB** est le modèle de dépendance du champ électrique.
- **SRH** est le modèle de Shockley-Read-Hall.

Exemple :

```
models k.p fermi incomplete consrh auger optr print
```

```
models srh auger conmob fldmob
```

### III.1.5.3 Contact

Le contact détermine les attributions des électrodes. La syntaxe du contact est la suivante:

```
Contact nombre = <n> | NOM = <name> | ALL
```

Cette expression montre la déclaration «contact»

Exemple:

```
CONTACT NAME=anode current
```

### III.1.6 Les méthodes numériques

Après la spécification du modèle des matériaux, le choix de la méthode numérique doit être spécifié. La seule commande qui s'applique pour la sélection de la méthode numérique est `Method [1]`.

Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des Systems d'équation, trois types :

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton trap

### III.1.7 Spécification des solutions

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de solution. La spécification de solution se décompose des commandes suivantes :

#### a. Log

LOG enregistre toutes les caractéristiques du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistré. La commande suivante montre un exemple de la commande LOG:

```
LOG OUTFILE=myoutputfile.log
```

#### b. Solve

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une Solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de la commande SOLVE.

#### c. Beam

Le numéro du faisceau optique lors de l'analyse de photogénération AC. `SS.PHOT` est le petit signal d'analyse AC, `SS.LIGHT` est l'intensité de la partie de petit signal du faisceau optique lors de l'analyse du signal de photo génération AC, `MULT.F [1]`.

#### d. Load et save

La commande LOAD entre les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de nœud dans un fichier de sortie. Ce qui suit sont des exemples des instructions LOAD et SAVE.

### III.1.8 Analysedesrésultats

Les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec « TonyPlot »

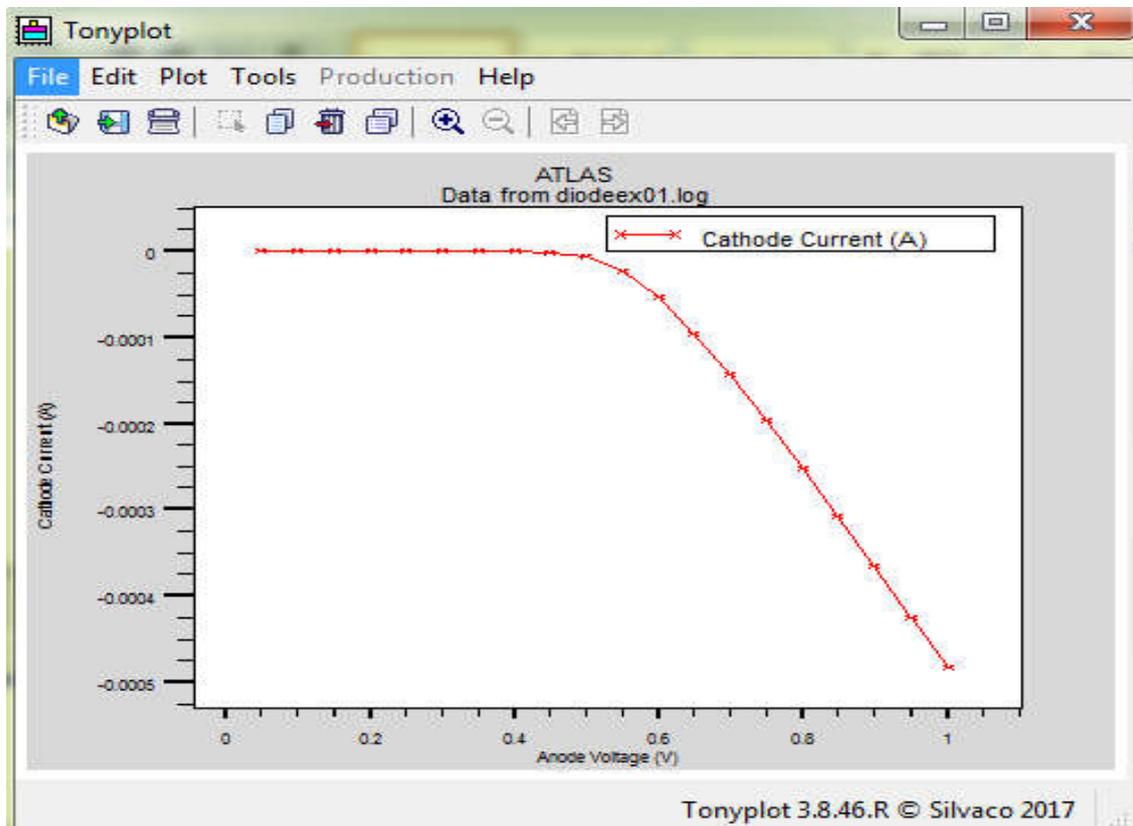


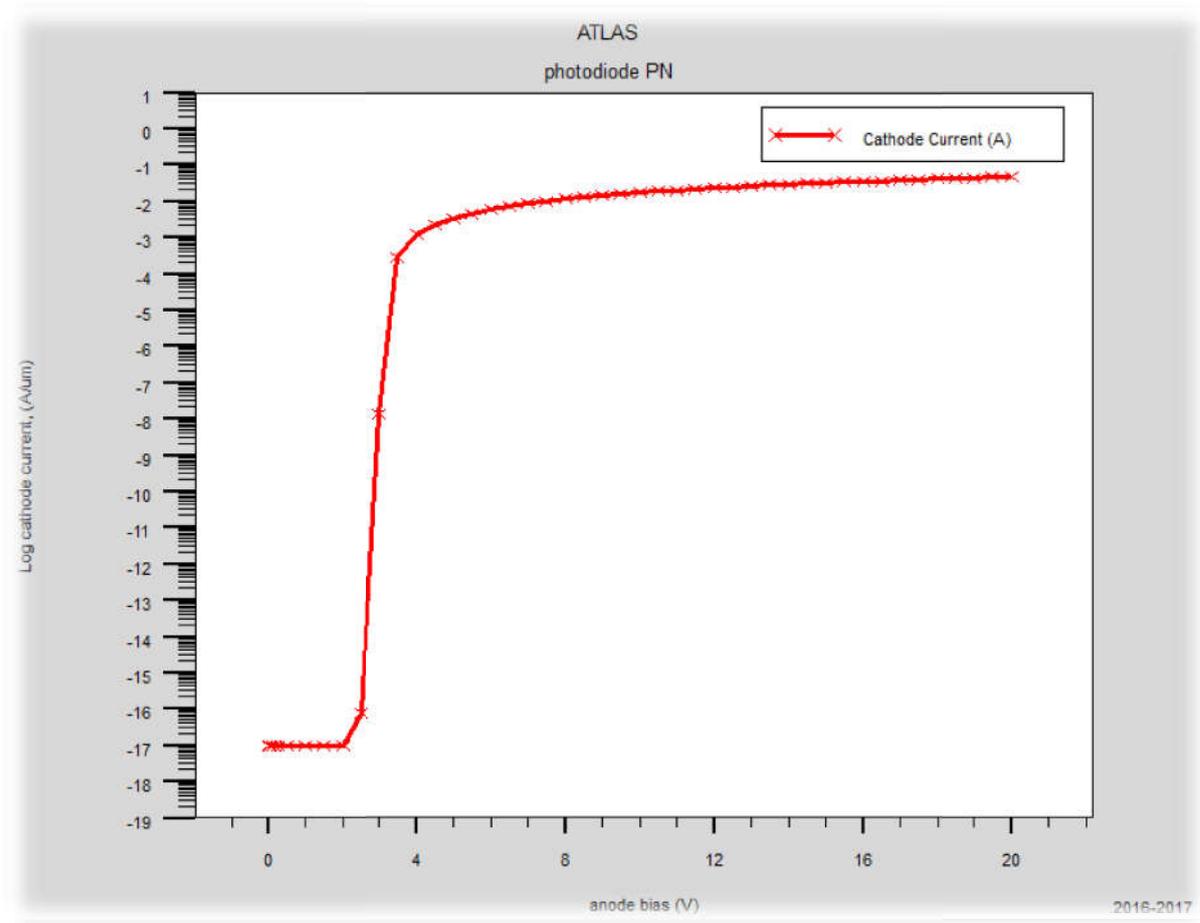
Figure III.9 : Affichage graphique des résultats par « TonyPlot ».

## Partie 2 : Résultats de simulation numérique

### III.I.9 Etude des caractéristiques des photodiodes à base d'hétérostructure AlGaIn/GaN

#### III.I.9.1 Etude des caractéristiques courant- tension I(V) pour la structure proposée

Les caractéristiques courant- tension I(V) de la photodiode à base d'hétérostructure AlGaIn/GaN pour les tensions inverse allant de [0 ; 20v] avec un pas 0.5 volt, sont illustrées par la figure III.10

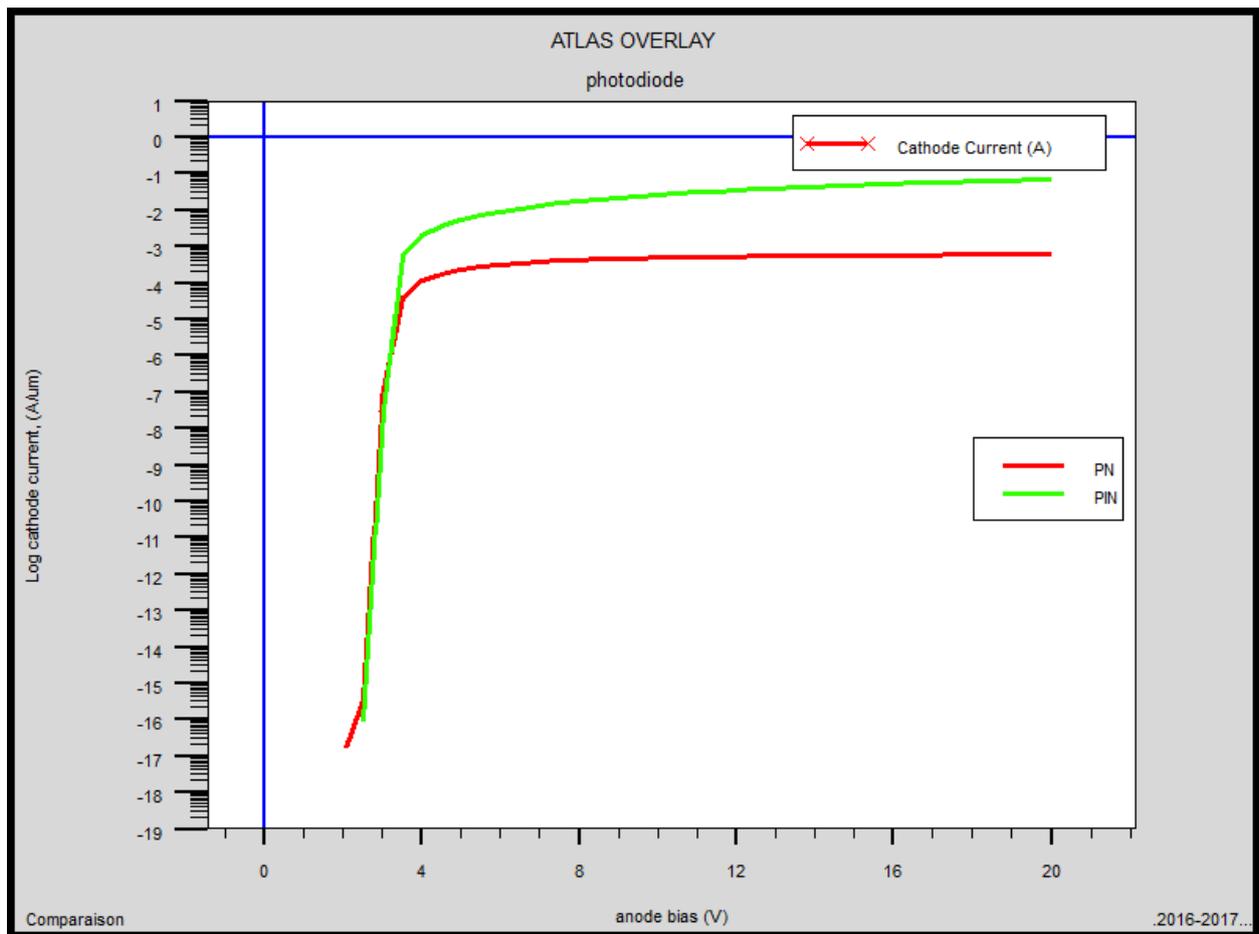


**Figure III.10:** Les caractéristiques courant de cathode- tension  $I(V)$ .

Les caractéristiques courant-tension  $I(V)$  est une propriété principale de la photodiode de façon générale. Le courant croît de façon linéaire en fonction de la tension, plus la tension augmente et plus la mobilité des électrons dans le canal augmente, induisant un accroissement du courant. Ensuite, nous remarquons à partir de 4 volt un effet de saturation donc le courant de cathode est quasi-constant en fonction des tensions de l'anode. Plus la tension diminue et plus la mobilité des électrons diminuent, induisant un décroissement du courant  $I$ .

### III.2.1 Etude comparative entre les deux photodiodes PN et PIN à base de GaN/AlGaN selon les caractéristiques électriques :

Dans cette partie de notre travail, nous avons présenté la structure de photodiode PIN en appliquant les mêmes paramètres de PN (le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage) et on obtient ce résultat de la simulation numérique sur la figure suivante :



**Figure III.11** : Les caractéristiques courant-tension  $I(V)$  pour les tensions de deux photodiodes PN et PIN

Cette figure montre une augmentation du courant de la photodiode PIN donc une amélioration d'environ 30% par rapport à la photodiode PN. Cela est principalement dû à l'augmentation du champ électrique latéral grâce à l'introduction du diélectrique dans la hétérojonction PN et qui a une zone de charge d'espace ZCE plus large. Lorsque l'énergie lumineuse est appliquée à la photodiode PIN, des paires électron-trou sont générées dans la ZCE, ces paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région

d'épuisement et au champ électrique externe et qui mène à l'augmentation du courant de la photodiode.

### III.2.2 Etude comparative entre les deux photodiodes PIN à base de AlGaN/GaN et AlGaAs/AlGaAs selon les caractéristiques électriques :

Nous avons fait la comparaison de deux photodiodes PIN à base d'hétérojonction AlGaN/GaN et l'autre à base d'AlGaAs/AlGaAs

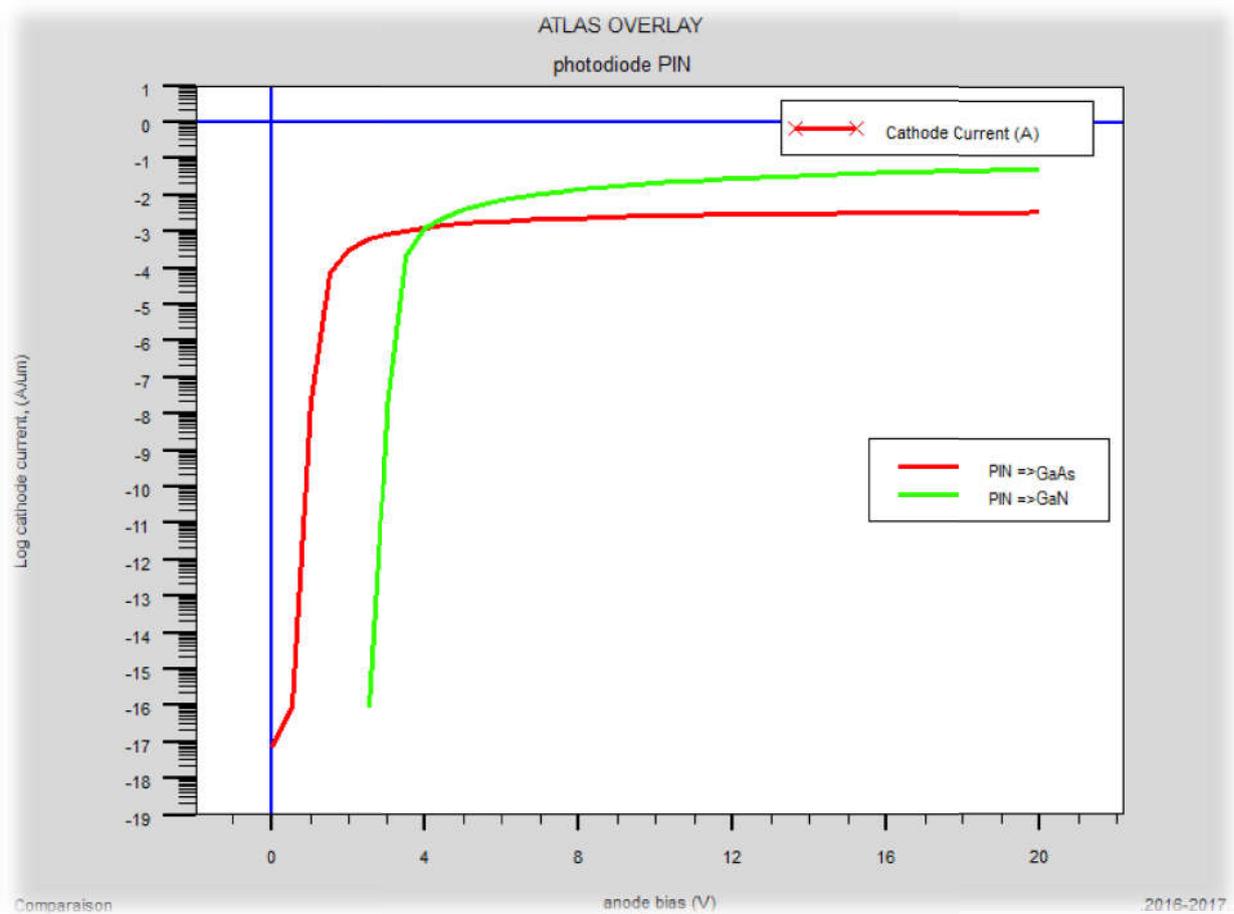


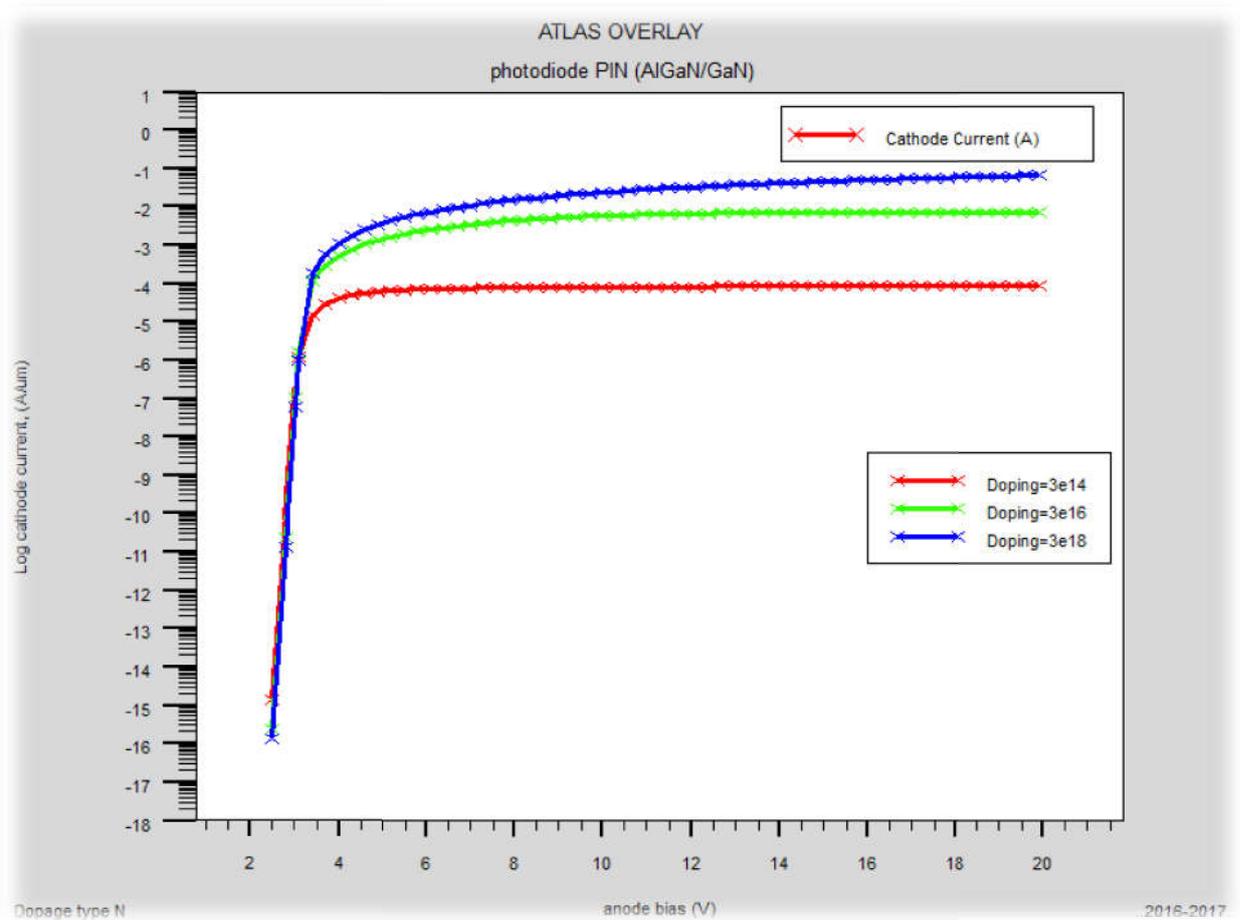
Figure III.12 : Les caractéristiques courant- tension I(V) pour les tensions de deux photodiodes PIN GAN et PIN GaAs.

L'introduction du GaN dans la structure PIN étudiée entraînant une augmentation de la densité des porteurs libres et donc une augmentation du courant I. Donc la structure PIN à base d'hétérojonction AlGaN/GaN représente les meilleurs caractéristiques électriques para-ports à l'autre à base d'AlGaAs/GaAs.

### III.2.3 Influence des propriétés physiques du matériau sur les caractéristiques électriques du composant AlGaIn/GaN

#### III.2.3.1 L'effet du dopage ( $N_D$ ) de la couche AlGaIn

L'effet de la variation du dopage ( $N_D$ ) de la couche donneuse AlGaIn sur les caractéristiques électriques  $I(V)$  de la photodiode est représenté sur la Figure III.12



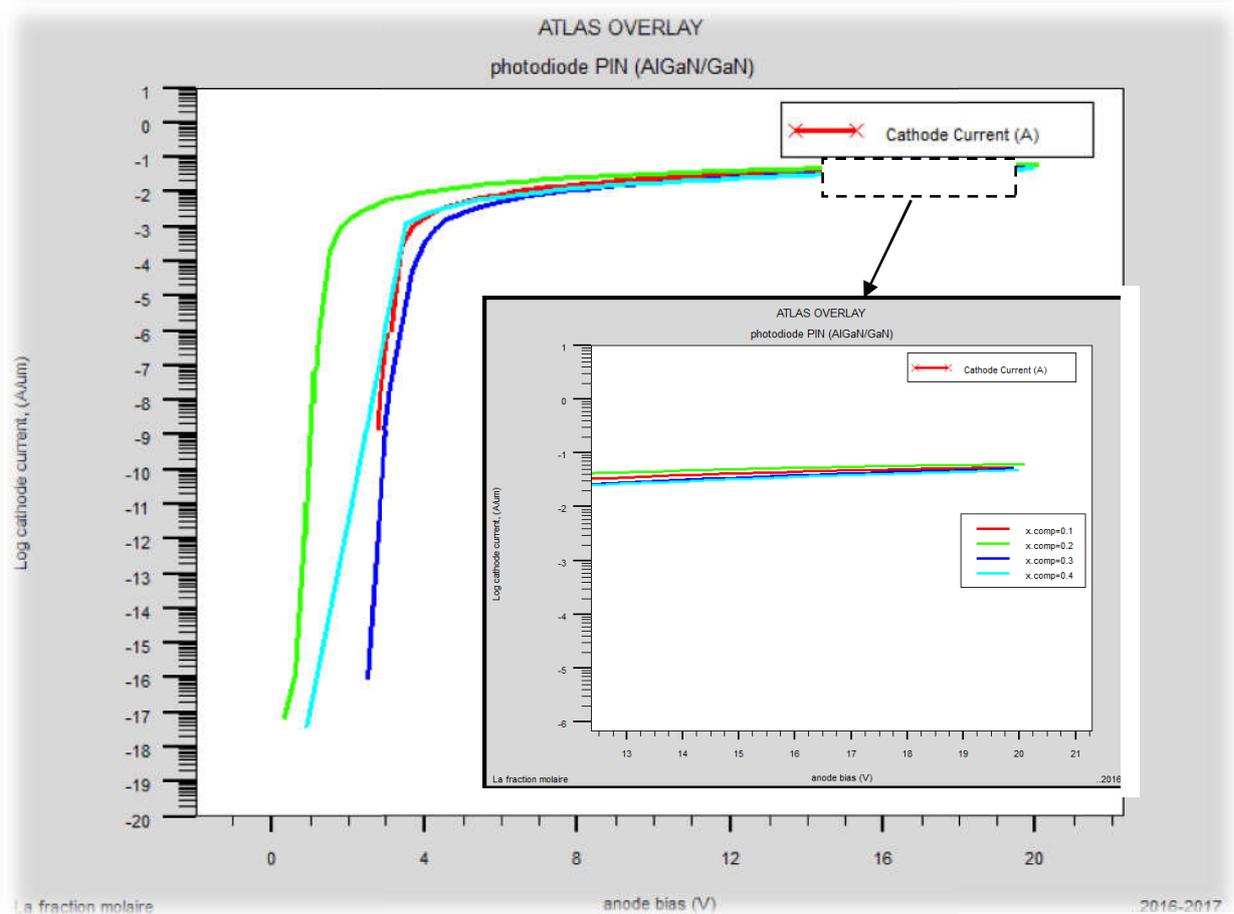
**Figure III.13:** L'effet du changement du dopage de la couche AlGaIn sur la caractéristique  $I(V)$  de la photodiode AlGaIn/GaN.

On observe que la densité du courant augmente avec l'augmentation de la concentration de dopage ( $N_D$ ) de la couche AlGaIn. La densité d'électrons augmente à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres.

### III.2.3.3 L'effet de la fraction molaire

Les caractéristiques de transfert de la photodiode sont représentées sur la figure III.14 à différentes fractions molaires d'Aluminium de la couche AlGa<sub>N</sub>.

Dans ce cas, nous fixons les paramètres physiques et technologiques de notre photodiode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>. L'épaisseur de la couche AlGa<sub>N</sub> est de 3 μm et son dopage est de  $3 \cdot 10^{19}$  atomes/cm<sup>3</sup>. Puis nous faisons varier le taux d'aluminium de 0.1 à 0.4.



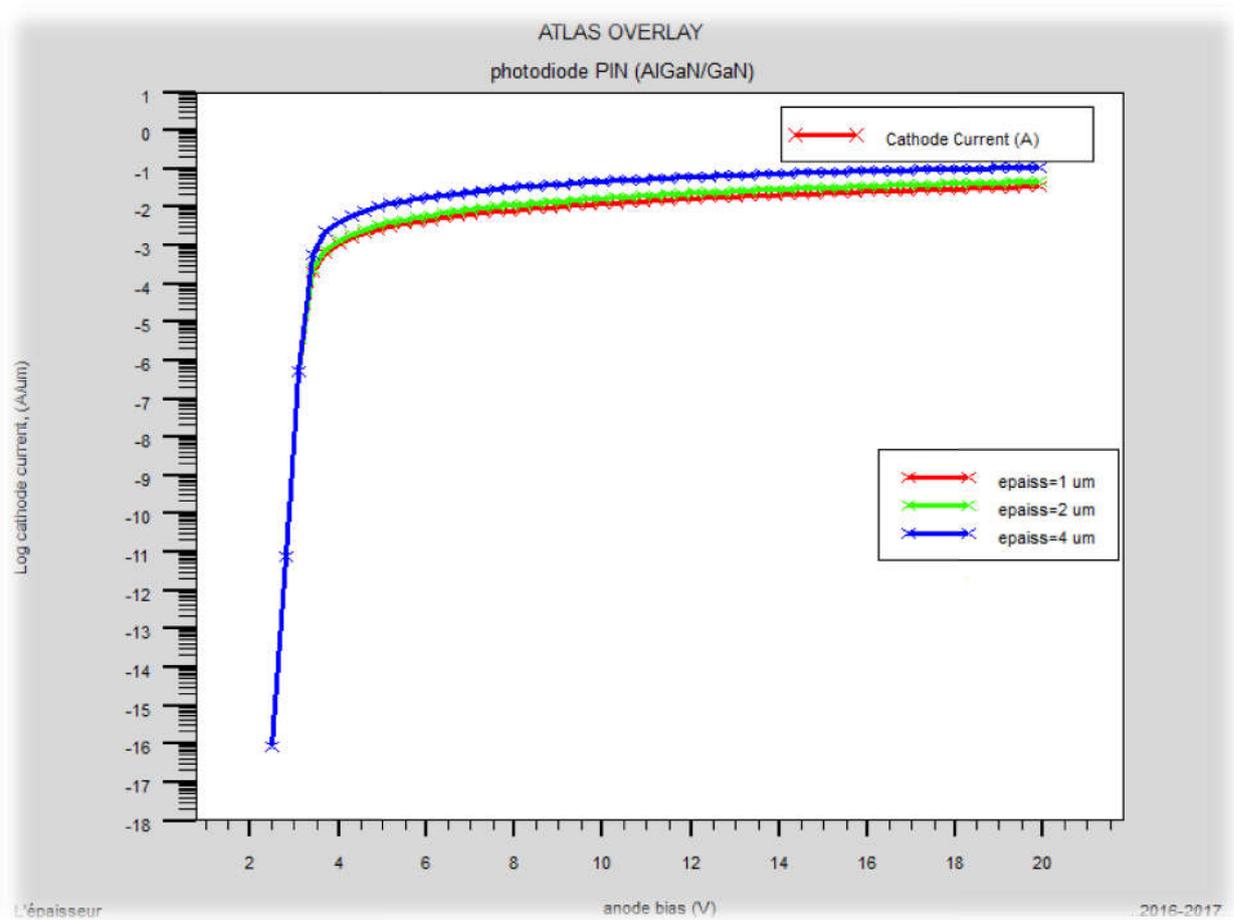
**Figure III.14:** L'effet de variation du taux d'Aluminium sur la caractéristique I(V) de la photodiode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> proposée.

Nous pouvons observer que le courant, diminue avec l'augmentation de la fraction molaire (m) d'Al de la couche AlGa<sub>N</sub>. Pour les taux d'aluminium de 0.1 et 0.2, on a pratiquement le même courant. Puis il chute pour des taux plus élevés. Ce comportement est dû à l'augmentation des dislocations par l'introduction de l'aluminium, suite au désaccord de maille entre AlGa<sub>N</sub> et Ga<sub>N</sub> avec forte discontinuité de la bande de conduction.

### III.2.4 Influence des paramètres technologiques de la structure sur les caractéristiques électriques

#### III.2.4.1 Effet de la variation de l'épaisseur de la couche d'AlGaN

La dépendance de la caractéristique de transfert de la photodiode pour différentes valeurs de largeurs (épaisseurs) de la couche d'AlGaN est montrée sur les figures suivantes :



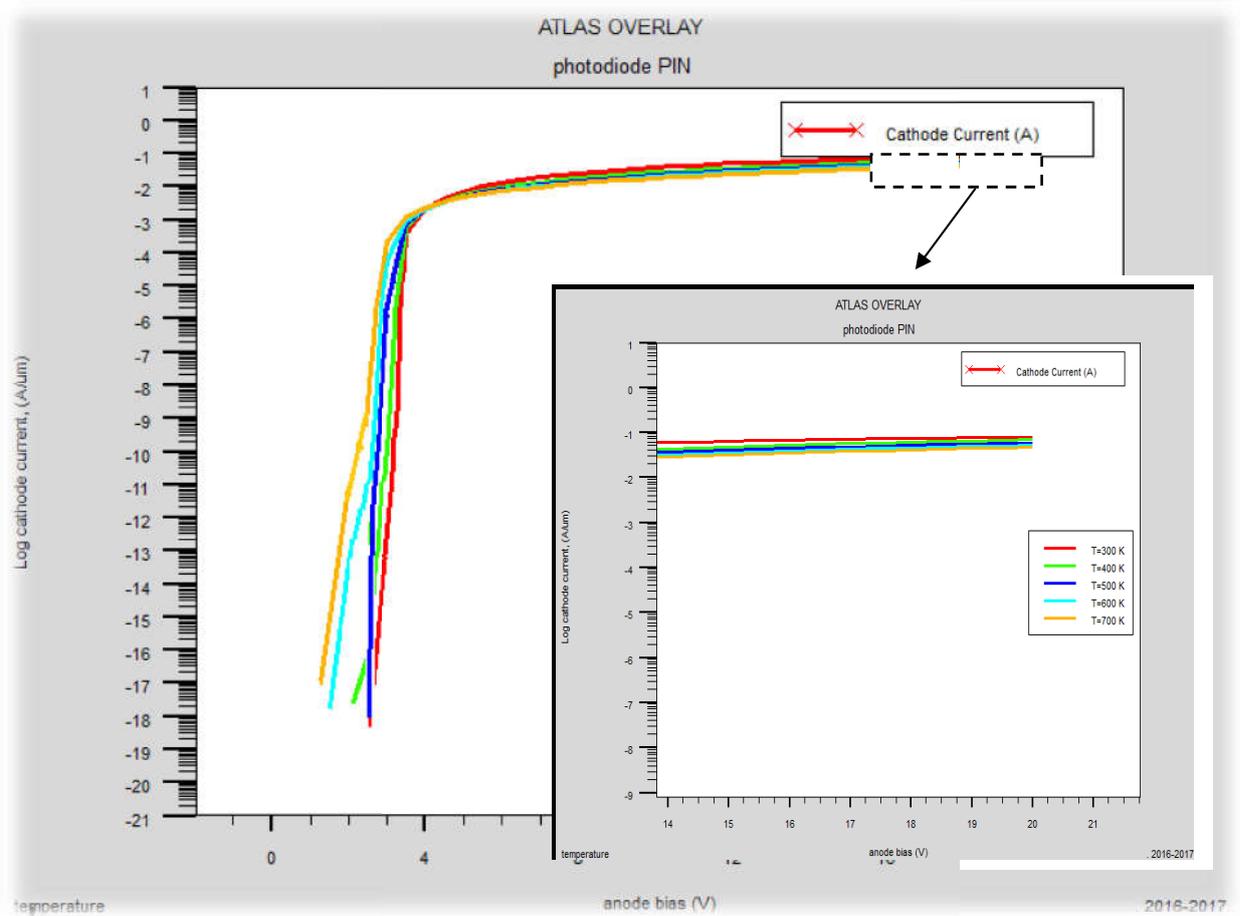
**Figure III.15:** L'effet du changement de l'épaisseur de la couche d'AlGaN sur la Caractéristique I(V)

Nous pouvons observer que le courant de la photodiode augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche donneuse et accepteuse AlGaN, à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres et par conséquent une amélioration des performances du

dispositif. Les meilleurs résultats sont effectués avec une épaisseur de 4  $\mu\text{m}$  de la couche donneuse.

### III.2.5L'effet de la température

La figure III.16 montre la caractéristiques courant-tension (I-V-T), pour différentes températures d'une photodiode PIN AlGa<sub>N</sub> /Ga<sub>N</sub> :



**Figure III.16:** Les caractéristiques courant de (I-V-T), pour la gamme de température [300-700]K

On peut voir que le courant diminue lorsque la température augmente. On peut également montrer à partir de cette figure que le courant de photodiode varie considérablement avec la température dans la région linéaire [1,4 volt].

### III.3.1 Etude des caractéristiques des photodiodes à avalanche (APD) avec ATLAS-SILVACO

Les détecteurs de comptage à un seul photon sont utilisés dans une large gamme de applications, y compris l'astronomie, les communications optiques, les capteurs biologiques et les utilisations militaires. Photomultiplicateur

Des photodiodes d'avalanche d'absorption et de multiplication séparées par des ultraviolets isolées avec des couches épitaxiales GaN/Silicon déposées sur un substrat ont été fabriquées. Un courant sombre <1 pA à 90% de tension de claquage, un gain de multiplication maximal de ~105 et une capacité de réponse supérieure à 4,2 A / W à 365 nm ont été atteints.

### III.3.2 Simulation bidimensionnelle d'une photodiode APD (à avalanche)

Dans cette simulation, nous utilisons la photodiode PDA à base de GaN/Silicon avec une épaisseur 06µm x 40µm dopée uniforme à une concentration en donneurs et accepteurs de  $3e10^{18} cm^{-3}$  et  $3e10^{19} cm^{-3}$  successivement est dans la figure III.17.

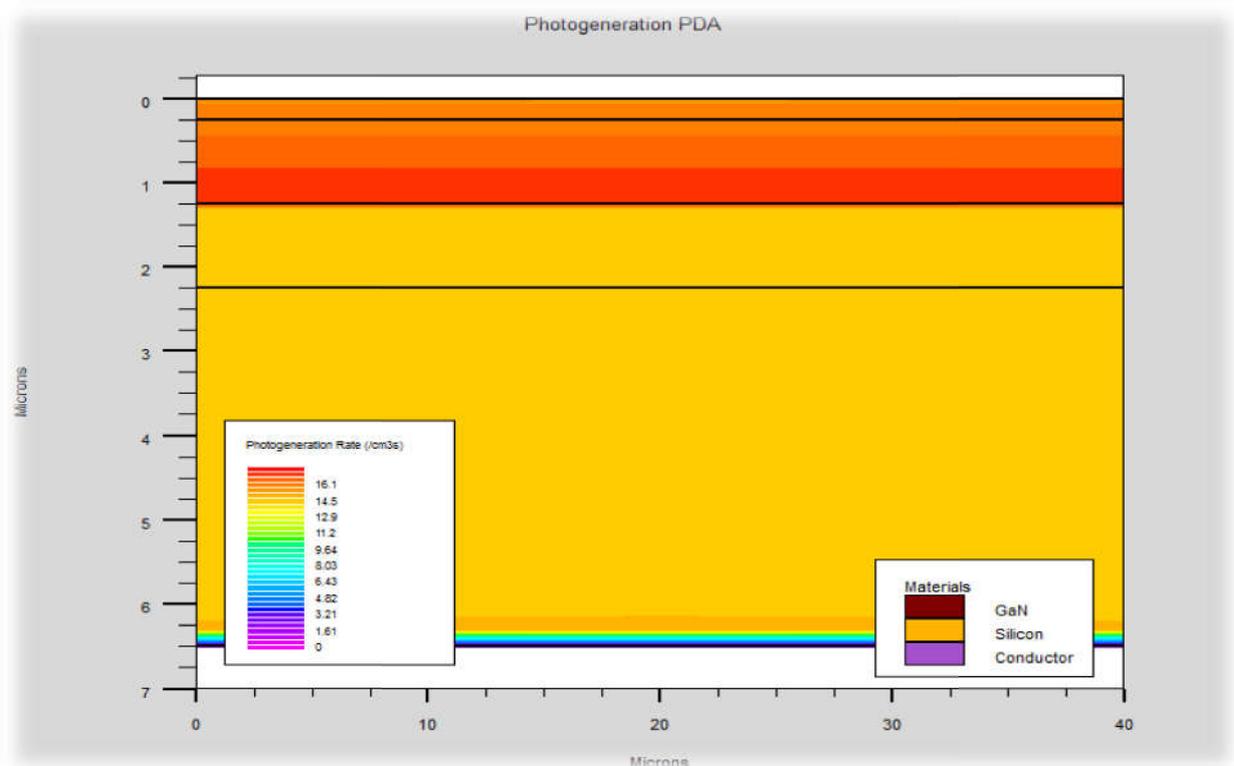
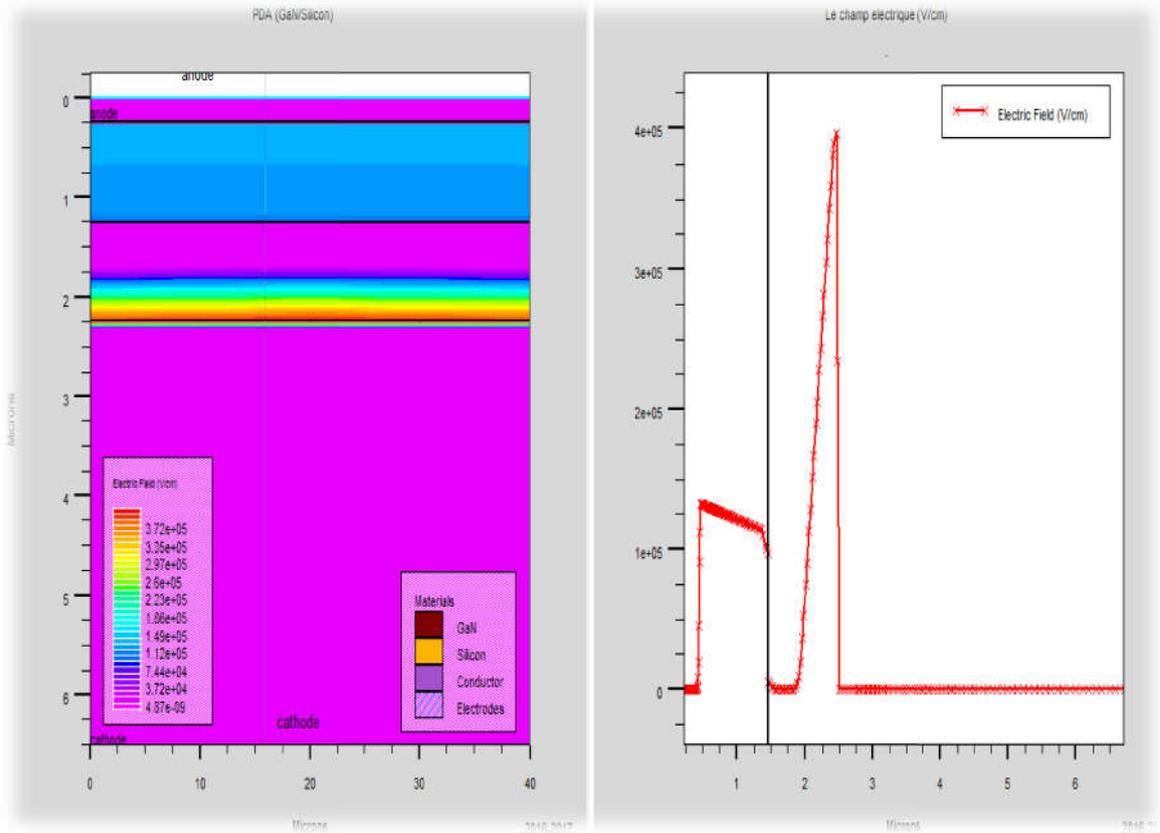


Figure III.17: Structure simulée de PDA

Cette figure montre une simulation d'une structure APD proposée dont les régions d'absorption et multiplication sont séparées, la région d'absorption est GaN et la région de multiplication est le silicium.

### III.3.3 Profils de dopage dans l'APD proposée



**Figure III.18 :** profils de dopage dans l'APD bidimensionnelle.

Comme le montre la figure III.18, une simulation complète de cette APD avec l'équation de Poisson et les équations de continuité et de l'opérateur avec impact d'ionisation montre une tension de claquage d'environ 22 volts. La région légèrement dopée de la photodiode de silicium a un champ élevé (pic à  $4 \times 10^5$  V/cm). Lorsque l'énergie lumineuse est appliquée à la photodiode d'avalanche, des paires électron-trou sont générées dans l'épuisement. Les paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région d'épuisement et au champ électrique externe.

### III.3.4 Le courant d'obscurité et le courant lumineux

Le courant d'obscurité est le courant qui traverse la diode en polarisation et en absence de lumière, c'est la contribution de plusieurs courants de génération et tunnel ; la connaissance de cette grandeur sert à retrouver le comportement de la diode pour différents polarisations. La figure III.19 montre comparaison entre le courant dans l'état lumineux et l'état d'obscurité.

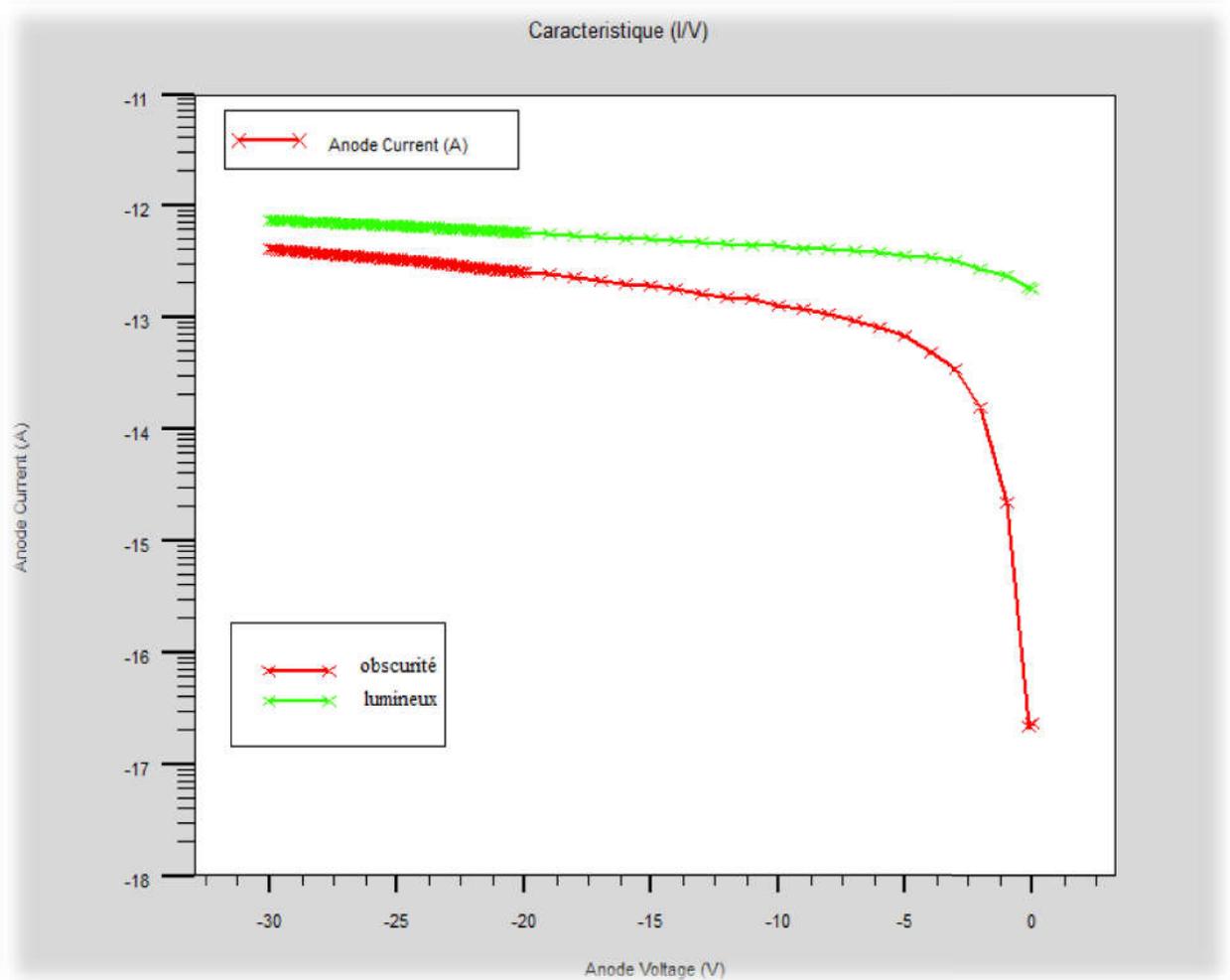


Figure III.19: Courbes IV d'obscurité et lumineux

A partir de cette figure on peut voir que les courants d'obscurité et d'éclaircissement sont quasi-constants de façon décroissante en fonction des tensions de l'anode, plus la tension augmente et plus la mobilité des électrons diminue, induisant un décroissement du courant I, vers

la tension du claquage. Cette figure montre bien évidemment que la courbe de la PDA éclairée a des meilleures caractéristiques  $I(V)$  que la PDA dans l'obscurité

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de module de simulation ATLAS-SILVACO en 2D, nous avons décrit les étapes de simulation du procédé technologique réalisé par le logiciel Atlas

En premier lieu nous avons comparés les deux structures d'une photodiode PN et PIN à base d'AlGa<sub>x</sub>N/GaN selon les caractéristiques  $I(V)$ . Puis faire la comparaison avec photodiode PIN à base d'AlGa<sub>x</sub>N/GaN et l'autre structure à base d'AlGaAs/GaAs

Par la suite nous avons étudié l'influence des paramètres physiques et technologiques des structures précédentes cela nous permis de voir nettement sur quel paramètre influe chaque étape de simulation, pour obtenir les meilleures performances.

Enfin nous avons étudié une nouvelle structure d'une photodiode PDA et comparé le fonctionnement de cette structure dans l'état « d'obscurité » et « lumineux »

Le but de cette étude est d'optimiser les meilleures Performances d'une photodiode pour l'utilisation dans une chaîne de transmission par fibre optique. Les résultats actuels confirment globalement que l'Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N représente le meilleur choix dans le domaine de la photo détection. Concernant notre travail les résultats obtenus ont montré que l'AlGa<sub>x</sub>N est un matériau très prometteur et un bon candidat dans l'utilisation des photodétecteurs optoélectroniques.

# *Conclusion générale*

Les composants de semi-conducteur III-V à base des hétérojonctions, telles que les photodiodes, connaissent une grande focalisation technique dans les dernières années surtout dans la transmission par fibre optique, car elles présentent un grand intérêt optique et électrique, le fonctionnement de ce composant est décrit généralement par la caractéristique courant/tension qui permet de donner des informations sur les mécanismes du transport électrique interne.

A travers cette étude, nous avons optimisé la structure d'une photodiode à base de l'AlGaIn/GaN en procédant à une simulation bidimensionnelle par le logiciel « Silvaco-Atlas ».

Nous avons proposé trois étapes pour la simulation de composant optique :

- Nous allons faire une comparaison entre deux photodiodes de différentes jonctions PN et PIN à base d'AlGaIn/GaN, et de choisir la meilleure structure : c'est la photodiode PIN selon les caractéristiques I (V).
- La deuxième comparaison avec même structure PIN et différents matériaux : AlGaIn/GaN et AlGaAs/GaAs. Puis nous allons utiliser principalement le résultat de comparaison précédente pour étudier les différents paramètres internes du Photodiode PIN à base d'AlGaIn/GaN proposée, tels que le dopage dans les différentes couches, l'épaisseur de la couche donneuse et accepteuse AlGaIn, le taux d'Aluminium, et l'effet de variation de la température sur les caractéristiques électriques afin d'optimiser les meilleures performances et obtenir un dispositif amélioré.
- Dans la dernière étape nous appuyant sur l'étude du fonctionnement de leurs caractéristiques internes sur une nouvelle structure photodiode PDA pour optimiser les meilleures performances.

Les résultats obtenus dans ce manuscrit confirment globalement que l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  représente le meilleur choix dans le domaine de la photo détection et qui a une forte influence sur les performances de la photodiode PIN à base d'AlGaIn/GaN, ce matériau très prometteur et un bon candidat dans l'utilisation des photodétecteurs optoélectroniques.

Ce travail ouvre la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine de télécommunication optique, ainsi les procédés de fabrication de ce composant diminuent ainsi les coûts tout en produisant un haut rendement dans une chaîne de transmission optique, afin de pouvoir augmenter au maximum les performances en fréquences et en puissances.



# *Bibliographie*

## **Bibliographie :**

[1] : Yacine MAROUF, "Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas Silvaco", mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

[2] : BAGHDADLI Nawel, "Évolution du paramètre exciton de BOHR en fonction des propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs III-V", thèse doctorat, université ABOU BAKR BELKAÏD – TLEMCEN, 2013.

[3] : Annaïg DENIS, "élaboration, cristallogenèse et caractérisations physico-chimiques des nitrures des éléments de la colonne IIIA et en particulier de GaN", thèse doctorat, université de BORDEAUX I, 2003.

[4] : Agnès PHILIPPE, "Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium Hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus", thèse doctorat, l'institut National des sciences appliquées de Lyon, 1999.

[5] : Olivier BONNAUD, "Composants à semiconducteurs de la physique du solide aux transistors", Ellipses, Paris 2006.

[6] : Taleb Ihsen Yasser, "Etude des propriétés de quelques nitrures : Application aux photodiodes", mémoire de magister, université ABOU BAKR BELKAÏD – TLEMCEN, 2012.

[7] : EL GMILI Youssef, "Etude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque" thèse doctorat, l'Université de Lorraine & l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah–Fes, 2013.

[8] : Samira BOUZID-DRIAD, "Réalisation et caractérisation de transistor HEMTS GaN pour des applications dans le domaine Millimétrique", thèse doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 2013.

[9] : Olivier MENARD, "Développement de briques technologiques pour la réalisation de diodes Schottky sur nitrure de gallium", thèse doctorat, université FRANÇOIS - RABELAIS DE TOURS, 2010.

[10] : André MOLITON, "Electronique et photo-électronique des matériaux et composants 2", Lavoisier, Paris 2009.

[11] [http://ressources.univlemans.fr/AcceLibre/UM/pedago/physique/02/cours\\_elec/semic0n.pdf](http://ressources.univlemans.fr/AcceLibre/UM/pedago/physique/02/cours_elec/semic0n.pdf)

[12] :<http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/bip/bip121.htm>

[13] :<http://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/bip/bip140.htm>

[14] :Moussaoui Islam,Rahmoune Abderrahmene,Etude par simulation des propriétés électriques des composants HEMTs à base d'hétérostructure ALGaAs/GaAs,Mémoire du master,Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana,2015.

[15] : MEDJDOUB-Fadila " , optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit", mémoire de magister, université ABOU BAKR BELKAID – TLEMSEN ,2010

[16] :Sidi Aboujja," Électroluminescence en avalanche des jonctions p-n Bbase de silicium et d'arséniure de gallium,et effet d'irradiation",these de doctorat, université de METZ (France),2000.

[17] : ROUZI Khaled, HOUHECHE Abderrehmane,"analyse par simulation des propriétés électriques des composants HEMT a base d'heterostructureALGaN/GaN" thèse du master .université de Djilali Bounaama,- khemismiliana ,2014

[18] : <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>

[19] :Benzeghdasabah.

“Etuded'unphotodetecteurPINenGermaniumetenalliageSiGepourobttenirlediplôme demagisterenélectronique, universitédeConstantine.

[20] :Houda BRAHIMI. "Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence" thèse Doctorat Université Paul Sabatier – Toulouse III.

[21] :cours,"Les techniques del'ingénieur",Paris,1999.

[22] :<http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.html>

[23] :[https://fr.wikipedia.org/wiki/Photodiode\\_pin#/media/File:Pin-Diode.svg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Photodiode_pin#/media/File:Pin-Diode.svg)

[24] :<http://www.j3ea.org/articles/j3ea/pdf/2003/01/j3ea2003007.pdf>

[25] :cours, ‘‘telecomsoptiques’’,Paris,2005.

[26] :E. Cassan\* ∞ (IEF, Université Paris-SudOrsay).pdf

[27] :Kamal ZEGHDAR, ‘‘Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP’’,Mémoire de Magister en Electronique,Université Mohamed Khider – Biskra,2014.