

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

Télécommunication

Option :

Systems des Télécommunications

Thème :

**Modélisation d'un photo-détecteur PIN à base
d'hétérojonction dans un système de
télécommunication optique**

Réaliser par :

BOUHINI Youssouf Abderrahmane
BOUDERBALA Abderahmane

Encadré par :

Dr. KADDECHE Mourad

Année Universitaire 2022/2023

Dédicaces

*Je tiens à exprimer mes remerciements les plus
sincères tous d'abord au « bon DIEU » pour la patience
et la santé qui m'ont été utiles tout au long de mon
parcours,*

A la mémoire de mon père

Ma mère pour son soutien

Ma femme, et pour mon petit Ahmed Rassim

Mes frères, mes sœurs.

*Mes proches ET mes Amis et tous ceux qui ont partagé
avec moi les longues années d'études*

Abderahmane

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mon père dont ce jour a toujours été son rêve.*
- Ma mère pour son soutien aveugle et inconditionné.*
- Mes frères, mes tantes & mes oncles.*
- Mes proches et mes Amie(s).*

Yousseuf

Remerciements

Tout d'abord je remercie dieu de m'avoir donné courage et volonté de réaliser ce travail, l'universitaire de KHEMIS MILIANA en particulier la faculté des sciences et technologie.

Je tiens aussi à remercier mes professeurs qui m'ont été d'un grand secours et soutient pédagogique et scientifique, les membres jury.

J'adresse également mes remerciements à mon professeur Mr KADDECHE qui m'a beaucoup aidé et soutenu sans faille

A tous les étudiants de ma promotion Télécommunication.

A tous ceux qui ont participés de près ou de loin à l'élaboration de ce thème et leur dire qu'ils ont leur place dans mon cœur.

Résumé :

Les photodétecteurs III-V à semi-conducteur sont largement utilisés dans les transmissions en raison de leurs propriétés optiques et électriques fiables. Ce projet se concentre sur les photodétecteurs PIN InGaN et GaN à base d'hétérojonction dans un système de Télécommunication optique.

Cette recherche vise à améliorer la fiabilité et les performances des photodétecteurs, grâce à des simulations numériques. Les résultats aideront à optimiser les performances des dispositifs pour les télécommunications optiques.

Mots clés : Semi-conducteurs III-V, Photodétecteurs, Caractéristiques courant-tension, PIN, InGaN/GaN, SILVACO

Abstract:

III-V semiconductor photodetectors are widely used in transmission chains because the optical and electrical properties of their material provide optimum reliability of information transfer. This project focuses on nitride-based photodetectors, namely PIN InGaN and GaN photodetectors.

This study based on a digital simulation carried out with the SILVACO-Atlas software to help create a photodiode that can be used in an optical fiber transmission chain.

Keywords: III-V semiconductors, Photodetectors, Current-voltage characteristics, PIN, InGaN / GaN, SILVACO

المخلص:

تستخدم أجهزة الكشف الضوئية الحالة الصلبة III-V على نطاق واسع في الاتصالات نظراً لخصائصها البصرية والكهربائية الموثوقة. يركز هذا المشروع على أجهزة الكشف الضوئي InGaN و GaN PIN غير المتجانسة في نظام الشبكات الضوئية. تستخدم الدراسة المحاكاة العددية مع أطلس سيفاكو لتحسين اكتشاف الفوتون من خلال النظر في المتغيرات المادية والتكنولوجية لبنية InGaN / GaN PIN ، مثل المنشطات وسمك الطبقة. كما تمت دراسة تأثير درجة الحرارة على الخصائص الكهربائية. الهدف هو تحقيق الأداء الأمثل لتطبيقات الشبكات الضوئية.

باختصار، يهدف هذا البحث إلى تحسين موثوقية وأداء أجهزة الكشف الضوئية القائمة على التداخل المتغير ، ولا سيما أجهزة الكشف الضوئي InGaN و GaN PIN ، من خلال عمليات المحاكاة العددية. ستساعد النتائج على تحسين أداء الأجهزة للاتصالات الضوئية.

الكلمات المفتاحية: أشباه الموصلات III-V ، أجهزة الكشف الضوئية ، خصائص الجهد الحالي ، PIN ، InGaN / GaN ، سيفاكو

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre 1: Propriétés Générales du nitrure de gallium	
I.1 Introduction :	2
I.2 Semi-conducteurs binaires :	2
I.3 Généralités sur le GaN:	3
I.3.1 Propriété physiques du GaN	4
I.3.1.1 Propriété structurale:	4
I.3.1.2 Zone de Brillouin:	4
I.3.2 Propriété électrique et électronique:	5
I.3.2.1 Polarisation spontanée :	5
I.3.2.2 Polarisation piézoélectrique:	6
I.3.2.3 Polarisation totale dans le GaN:	6
I.3.3 Propriété optique:	6
I.3.4 Propriété thermique:	7
I.3.5 Intérêt de GaN:	8
I.4 Semi-conducteur extrinsèque:	8
I.4.1 Notion de dopage:	8
I.4.1.1 Dopage type N:	8
I.4.1.2 Dopage type P:	9
I.5 Jonction PN :	10
5.1 Zone de Charge d'Espace (ZCE):	11
5.2 Polarisation continue inverse	11
5.3 Polarisation continue directe:	11
I.5.4 Jonction non polarisée:	12
I.6 Conclusion :	12
Chapitre 2: Les photodiodes à base de nitrure de gallium	
II.1 Introduction	13
II.2 Principe de transmission des données :	13
II.3 Composants de chaîne télécommunication optique :	13

Sommaire

II.3.1 Bloc émission :	14
II.3.1.1 Sources optique :	14
II.3.1.2 Diodes électroluminescentes LED :	14
II.3.1.3 Diode LASER :	15
II.3.2 Bloc réception:	16
II.4 Le photo détecteur :	16
II .4 .1 : Principe de la photo- détection	16
II .4.2 : Caractéristiques des photo-détecteurs	17
II .4 .2.1 Photo-réponse	17
II .4 .2.2 Courant d'obscurité:	18
II.4 .2.3 Rendement Quantique :	18
II.4 .2.4 Facteur D'ombrage:	18
II.4 .2.5 Coefficient d'absorption :	19
II.4 .2.6 Photo-courant :	19
II.4 .2.7 Bruit du photodétecteur :	20
II.5 Montage du photodétecteur :	20
II.6 Différents types de photodétecteurs:	21
II.6.1 Photodiode PN:	21
Photodiode PIN:	22
II.6.2.1 Avantages de la photodiode PIN :	23
II.6.3 Photodiodes PN et PIN à base de GaN:	23
II.6.3.1 Dopage N:	23
II.6.3.2 Dopage P:	23
II.7 Photodiodes à avalanche PDA:	23
II.8 Applications photodiodes:	25
II.9 Conclusion	25
Chapitre 3:Simulation numérique de la photodiode a base de GaN par logiciel Atlas- SILVACO	
3.1. Introduction	27
Partie I : Présentation du Logiciel	27
III.1.1. Présentation de TCAD-SILVACO :	28
III.1.2. Outils de simulation ATLAS (Silvaco) :	30
III.1.3. Caractéristiques et capacités d'ATLAS :	30
A- Ensemble complet de modèles :	30
B- Capacités entièrement intégrées :	31
C- Mise en œuvre numérique sophistiqué :	31
III.1.4. Ordres de commandes d'Atlas SILVACO :	31
III.1.4.1. Commandes fondamentales :	32

Sommaire

III.1.5. Spécification de la structure :	33
III.1.6 Simulation du dispositif :	34
III.1.6.1 Spécification de maillage :	34
III.1.6.2. Spécification des régions :	36
III.1.6.3. Spécification des électrodes :	36
III.1.6.4 Spécification du dopage :	38
III.1.7. Spécification des modèles des matériaux :	38
III.1.7.1. Spécification du matériel :	39
III.1.7.2. Spécification du modèle :	39
III.1.7.3. Spécification du contact :	39
III.1.8. Sélection de la méthode numérique :	40
III.1.9. Spécification des solutions :	40
Partie 2 : Résultats de la simulation numérique :	41
III.2.1. Etude des caractéristiques des photodiodes à base d'hétérostructure InGaN/GaN :	41
III.2.1.1 Etude des caractéristiques courant-tension I(V) :	41
III.2.2. Etude comparative entre PN et PIN basée sur InGaN/GaN en fonction des caractéristiques électriques :	42
III.2.3. Etude comparative entre photodiodes PIN à base de InGaN/GaN, AlGaAs/GaAs et InGaAs/GaAs selon les caractéristiques électriques :	43
III.2.4. Influence des paramètres technologiques :	44
III.2.4.1. Effet du dopage de la couche InGaN :	44
III.2.4.2. Effet de la fraction molaire :	45
III.2.5. Influence des paramètres technologiques de la structure sur les caractéristiques électriques :	46
III.2.5.1. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche InGaN :	46
III.2.5.2. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche GaN :	47
III.2.6. Effet de la température sur les caractéristiques électriques :	48
III.7. Conclusion :	49
Conclusion générale.....	
Bibliographie	

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure I. 1: Différentes structures de GaN:(a) Würtzite, (b)Blende de Zincet (c) NaCl.....	4
Figure I. 2: polarisation Ga et N le GaN	5
Figure I. 3 : Silicium dopé au Phosphore (dopage n).....	9
Figure I. 4: Silicium dopé au Bore (dopage p).....	9
Figure I. 5: Jonction non polarisée	12

CHAPITRE 2

Figure II. 1: Synoptique général d'un système de communications par fibre optique.....	14
Figure II. 2: Structure de base d'une diode électroluminescente	15
Figure II. 3: Schéma de principe d'une diode laser.....	15
Figure II. 4: Coefficient et longueur d'absorption des matériaux semi- conducteurs	19
Figure II. 5: Schéma du circuit électronique du photodétecteur construit.	21
Figure II. 6: structure d'une photodiode PN	22
Figure II. 7: Structure d'une photodiode PIN	22
Figure II. 8: Structure d'une photodiode à avalanche PDA.....	24

CHAPITRE 3

Figure III. 1: Entrées et sorties d'Atlas	29
Figure III. 2: Structure proposé d'une photodiode InGaN/GaN dans Les photodétecteurs.	34
Figure III. 3: Structure de maillage	35
Figure III. 4: La structure de maillage dans la photodiode PIN InGaN/GaN	35
Figure III. 5: Code pour définir les régions.....	36
Figure III. 6: la représentation de différentes régions PIN InGaN /GaN.....	36
Figure III. 7: Code pour définir les électrodes	37
Figure III. 8: d'électrodes dans la photodiode PIN InGaN /GaN	37
Figure III. 9: Code pour définir les dopages.	38
Figure III. 10: La structure du dopage InGaN/GaN de photodiode PIN.....	38
Figure III. 11: Les caractéristiques courant d' cathode-tension	41
Figure III. 12: Les caractéristiques courant-tension I(V) Pour les tensions de deux photodiodes PN et PIN.....	42
Figure III. 13: Les caractéristiques courant-tension I(V).....	43
Figure III. 14: L'effet du dopage de la couche InGaN sur les caractéristiques électriques I(V).....	44
Figure III. 15: Caractéristiques I(V) en fonction de la fraction molaire x de la couche InGaN.....	45
Figure III. 16: Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes Épaisseurs de la couche InGaN.....	46
Figure III. 17: Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes Épaisseurs de la couche GaN.....	47
Figure III. 18: Les caractéristiques courant d'une photodiode PIN (InGaN/GaN) pour la gamme de température [300-900] K.....	48

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau I. 1: Tableau périodique Semi-conducteurs..... 3

CHAPITRE 3

Tableau III. 1: Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes) 32

Abréviations

InGaN: Nitrure de gallium-indium.

AlGaAs: Aluminium gallium arsenide.

GaN : Le nitrure de galium.

GaAs: Arséniure galium.

InGaAs: Indium gallium arsenide

Si: Silicium.

Mg: Magnésium

ZCE : La Zone de Charge d 'Espace.

LED : Light-emitting diode.

DL : Diode laser.

APD: Photodiodes à avalanches.

SILVACO : Silicon Valley Corporation

CONMOB : Modèledela concentration dépendante.

FLDMOB : Modèledela dépendance du champ électrique.

SRH: Modelde Shockley-Read-Hall.

ND: La couche donneuse

NA: La couche accepteuse

Introduction Générale

Introduction générale

La fibre optique a révolutionné le domaine des télécommunications en permettant la conception de systèmes de transmission à très grande capacité. Cependant, cela a nécessité la conception de nouveaux composants optiques performants tels que des émetteurs à diodes laser, des canaux de transmission en fibre optique et des photorécepteurs pour la détection du signal optique. Les semi-conducteurs tels que le nitrure de gallium, d'aluminium, d'indium et leurs alliages ternaires AlGaN et InGaN offrent un potentiel énorme pour les dispositifs optoélectroniques en raison de leurs bandes interdites directes.

Ils sont utilisés dans la fabrication de diodes électroluminescentes et lasers. Ils sont également attractifs pour les applications haute fréquence, haute température et haute puissance en électronique.

L'objectif de ce travail est d'étudier, d'optimiser et de simuler les performances d'une photodiode PIN à base d'hétérojonction InGaN/GaN dans un système de télécommunication optique. Le travail est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre Propriétés Générales du nitrure de gallium. Le deuxième chapitre Les photodiodes à base de nitrure de gallium. Le dernier chapitre présente le logiciel de simulation Atlas-Silvaco utilisé pour modéliser et optimiser la structure de la photodiode proposée. Les paramètres physiques et technologiques ont été modifiés pour donner les meilleures performances à la structure PIN à base de GaN. En conclusion, les résultats obtenus à partir de la simulation sont présentés, ainsi que les perspectives pour l'avenir.

Chapitre I

Propriétés Générales du nitruire de gallium

I.1 Introduction :

Les matériaux semi-conducteurs sont une catégorie de matériaux avec des propriétés physiques distinctes qui suscitent un grand intérêt pour leur compréhension fondamentale et leurs applications pratiques.

Malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs, ils présentent des caractéristiques intrinsèques uniques, notamment les nitrures de gallium (GaN), qui ont des champs de rupture élevés, une large bande interdite et une densité électronique élevée.

Dans le premier chapitre, nous examinerons de près les matériaux à base de nitrure de gallium et passerons en revue leurs propriétés physiques, thermiques et mécaniques.

Nous examinerons également les principes du dopage et des jonctions PN, qui jouent un rôle crucial dans la création des photodétecteurs en tant qu'élément de base. [5]

I.2 Les semi-conducteurs binaires :

Les semi-conducteurs binaires sont une catégorie de matériaux semi-conducteurs composés de deux éléments. Ces matériaux présentent des propriétés physiques uniques qui en font des candidats prometteurs pour des applications dans divers domaines.

Les semi-conducteurs binaires peuvent être produits sous différentes formes telles que des films minces, des nanoparticules ou des structures en couches.

Les semi-conducteurs binaires les plus courants sont les semi-conducteurs composés d'éléments des colonnes III-V du tableau périodique. Ces matériaux sont connus sous le nom de semi-conducteurs III-V et sont très utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs en raison de leurs propriétés physiques exceptionnelles.

Les exemples courants de semi-conducteurs III-V incluent le nitrure de gallium (GaN), l'arséniure de gallium (GaAs) et le phosphure d'indium (InP). Ces matériaux ont une large bande interdite et une forte mobilité électronique, ce qui les rend idéaux pour une utilisation dans les transistors à haute fréquence, les diodes électroluminescentes (LED), les cellules solaires et autres dispositifs électroniques. [5]

Tableau I. 1: Tableau périodique Semi-conducteurs

I.2.1 Les avantages des semi-conducteurs III-V:

- 1- Haute mobilité électronique : permet des vitesses plus élevées en communication.
- 2- Large bande interdite : permet des températures plus élevées et une efficacité améliorée (Haute résistance à la température jusqu'à 250°C).
- 3- Propriétés optiques uniques : idéales pour les LED et les cellules solaires.
- 4- Faible consommation d'énergie : idéal pour les appareils portables.
- 5- Grande résistance à la radiation : idéal pour les applications spatiales et militaires.
- 6- Facilité de production : facile à produire en grande quantité à des coûts raisonnables.

I.3 Généralité sur le GaN:

Le nitrure de gallium (GaN) est un matériau semi-conducteur qui appartient à la famille des semi-conducteurs III-V. Le GaN a une structure cristalline hexagonale, avec une constante de maille de $3,19 \text{ \AA}$ et une densité de $6,1 \text{ g/cm}^3$.

Il présente une bande interdite directe de $3,4 \text{ eV}$ à température ambiante, qui permet une émission lumineuse dans la plage de longueurs d'onde allant du violet au vert. Le GaN a également une grande stabilité chimique, une conductivité thermique élevée, une bonne résistance aux radiations et une grande résistance mécanique. En raison de ces propriétés uniques, le GaN est devenu un matériau attractif pour les dispositifs optoélectroniques, tels que les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes laser, ainsi que pour les applications de haute puissance, haute fréquence et haute température en électronique de puissance et en microélectronique. Cependant, le coût de fabrication du GaN reste encore relativement élevé, limitant sa commercialisation à certains domaines d'application spécifiques. [5]

I.3.1 Propriétés physiques du GaN

I.3.1.1 Propriété structurale:

Le nitrure de gallium (GaN) possède deux structures cristallines distinctes à température ambiante: la structure hexagonale ou würtzite et la structure cubique ou blende de zinc (ZnS). En outre, à haute pression, le GaN peut également cristalliser sous une structure de type NaCl.

1- La structure de type würtzite du GaN est constituée de deux sous-réseaux hexagonaux compacts qui contiennent les atomes de gallium (Ga) et d'azote (N), c'est une structure thermodynamiquement très stable.

2- La structure de type blende de zinc est composée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées d'atomes de gallium et d'azote, décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille.

3- La structure de type NaCl est une forme haute pression de la structure würtzite, où les atomes de gallium et d'azote sont disposés en couches de forme cubique à faces centrées.

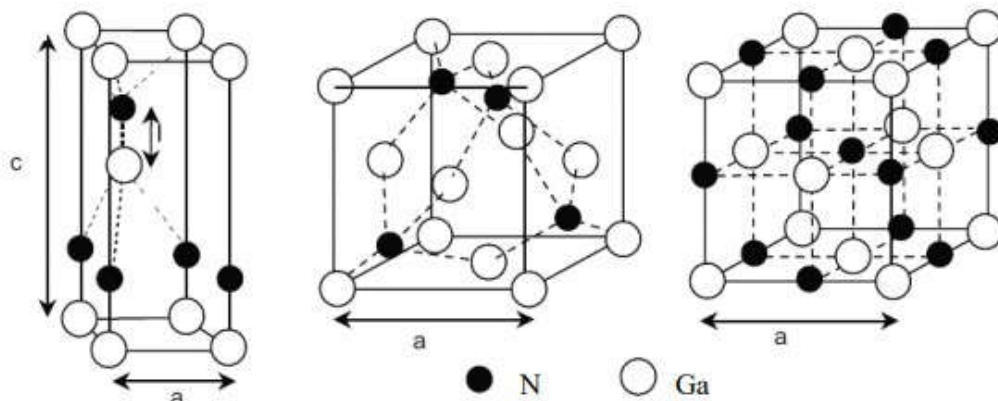


Figure I. 1: Différentes structures de GaN : (a) Würtzite, (b) Blende de Zinc et (c) NaCl

I.3.1.2 Zone de Brillouin:

La zone de Brillouin est une région déterminée par le réseau réciproque du matériau. Elle peut être vue comme la sphère d'influence d'un atome sur ses voisins, où l'impact de ces derniers diminue avec leur distance à l'atome en question. Cette notion est basée sur les énergies et les fonctions d'ondes des atomes, qui sont principalement influencées par leurs voisins immédiats.

L'étude de la zone de Brillouin est étroitement liée à la description de la fonction d'onde et du mouvement des électrons dans le matériau. En pratique, l'espace des phases, représenté par les vecteurs d'onde k , correspond à l'espace du réseau réciproque, dont l'origine est située au centre de la zone de Brillouin. La compréhension de la zone de Brillouin est donc

cruciale pour l'étude des propriétés électroniques et des comportements physiques du matériau. [6]

I.3.2 Propriété électrique et électronique :

I.3.2.1 Polarisation spontanée :

Le nitrure de gallium (GaN) possède des propriétés électriques et électroniques remarquables. En raison de sa grande bande interdite (~ 3.4 eV), il présente une forte résistance aux impuretés et à la diffusion des porteurs de charge. En outre, cette grande bande interdite permet à GaN d'absorber efficacement les photons dans la plage des ultraviolets et des bleus, ce qui le rend particulièrement intéressant pour les applications optoélectroniques.

Le nitrure de gallium a également une grande mobilité électronique, qui se réfère à la capacité des électrons à se déplacer à travers le matériau. En effet, GaN présente une mobilité électronique plus élevée que d'autres matériaux couramment utilisés dans l'industrie électronique, tels que le silicium (Si) et le gallium arsenide (GaAs). Cela est dû en partie à la structure cristalline hexagonale du GaN, qui facilite le transport des électrons dans la direction du plan du cristal.

Le nitrure de gallium est également un semi-conducteur à large bande interdite, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour la fabrication de dispositifs à haute tension et haute puissance tels que les diodes électroluminescentes (LED), les transistors de puissance et les cellules solaires. En outre, sa haute conductivité thermique le rend particulièrement adapté aux applications à haute température, telles que les circuits électroniques de puissance pour les véhicules électriques et les avions.

En somme, les propriétés électriques et électroniques exceptionnelles du nitrure de gallium font de ce matériau un choix prometteur pour un large éventail d'applications optoélectroniques et électroniques à haute performance. [7]

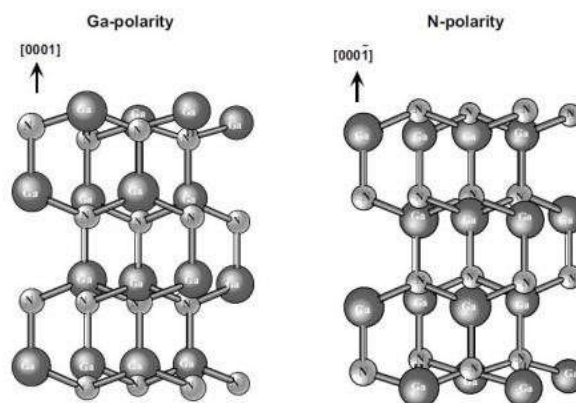


Figure I. 2: polarisation Ga et N le GaN

I.3.2.2 Polarisation piézoélectrique:

La polarisation piézoélectrique est un phénomène observé dans les matériaux cristallins lorsqu'ils sont soumis à une contrainte électrique. Cette polarisation peut être utilisée pour générer une tension électrique ou un mouvement mécanique, ce qui est utile dans de nombreux domaines, tels que les transducteurs piézoélectriques, les capteurs de pression et les dispositifs d'imagerie médicale. La polarisation piézoélectrique est également utilisée dans les dispositifs électroniques avancés tels que les filtres et les oscillateurs à quartz. [7]

I.3.2.3 La polarisation totale dans le GaN:

La polarisation totale dans le GaN est due à la polarisation spontanée et piézoélectrique, et peut être modifiée par des techniques d'épitaxie et d'ingénierie de la composition pour améliorer les performances des dispositifs électroniques.

l'effet de deux polarisations générées dans le cristal est défini comme la polarisation totale du GaN et est égale à :

$$P(\text{GaN}) = P(\text{GaN}) + P_{pz}(\text{GaN})$$

I.3.3 Propriétés optiques:

Le nitrure de gallium (GaN) est un matériau semi-conducteur avec des propriétés optiques importantes qui le rendent utile pour les applications optoélectroniques. Voici quelques-unes de ses propriétés optiques notables:

- Bande interdite large: Le GaN a une bande interdite directe large d'environ 3,4 eV, ce qui signifie qu'il a une énergie de bande interdite élevée. Cela permet à ce matériau d'absorber efficacement la lumière dans le spectre visible et ultraviolet, ce qui le rend utile pour les applications d'émission de lumière.
- Transparence élevée: Le GaN est transparent à la lumière dans la région du spectre allant de l'ultraviolet jusqu'au visible, ce qui permet son utilisation dans les applications de photodétection, comme les photodiodes.
- Faible coefficient d'absorption: Le GaN a un faible coefficient d'absorption optique, ce qui signifie qu'il peut être utilisé pour les applications optiques à haute intensité, comme les lasers.
- Haute mobilité électronique: Le GaN présente une mobilité électronique élevée, ce qui lui confère une excellente réponse rapide pour les applications optiques.

- Large spectre d'émission: Le GaN peut émettre de la lumière dans une large plage de longueurs d'onde, de l'ultraviolet jusqu'au rouge. Cette propriété le rend utile pour les applications d'éclairage LED.

En résumé, le nitrure de gallium présente des propriétés optiques importantes telles qu'une bande interdite large, une transparence élevée, un faible coefficient d'absorption optique, une haute mobilité électronique et un large spectre d'émission. Ces propriétés en font un matériau important pour les applications optoélectroniques telles que les LED, les photodiodes et les lasers. [8]

I.3.4 Propriété thermique:

Le nitrure de gallium (GaN) est un matériau semi-conducteur avec des propriétés thermiques importantes qui jouent un rôle crucial dans son utilisation dans les dispositifs électroniques de puissance à haute température. Voici quelques-unes de ses propriétés thermiques notables:

- Conductivité thermique élevée: Le GaN a une conductivité thermique élevée d'environ 1,3 à 1,6 (W/mK), ce qui permet une dissipation rapide de la chaleur générée dans les dispositifs électroniques.
- Coefficient de dilatation thermique faible: Le GaN a un faible coefficient de dilatation thermique, ce qui signifie qu'il est moins susceptible de se dilater ou de se contracter en réponse à des variations de température. Cela réduit le risque de fractures dans les dispositifs électroniques qui sont soumis à des cycles de température répétitifs.

Stabilité thermique élevée: Le GaN est stable thermiquement jusqu'à des températures élevées, supérieures à 1000°C. Cela permet son utilisation dans des applications de puissance à haute température, telles que les dispositifs de conversion d'énergie.

Résistance à l'oxydation élevée: Le GaN est résistant à l'oxydation à haute température, ce qui lui confère une longue durée de vie dans les applications à haute température.

En résumé, le nitrure de gallium présente des propriétés thermiques importantes telles qu'une conductivité thermique élevée, un faible coefficient de dilatation thermique, une stabilité thermique élevée et une résistance à l'oxydation élevée. Ces propriétés le rendent utile pour les applications de dispositifs électroniques de puissance à haute température, tels que les dispositifs de conversion d'énergie. [10]

I.3.5 Intérêt de GaN:

Le nitrure de gallium (GaN) présente un intérêt particulier en raison de ses propriétés physiques avantageuses, notamment une bande interdite directe, une grande stabilité chimique et de bonnes propriétés mécaniques. En plus d'être utilisé dans la production de DEL bleues, le GaN est également attrayant pour des applications en électronique haute température, haute puissance et haute fréquence. Sa large bande interdite le rend également adapté pour les photodétecteurs UV insensibles au rayonnement visible du soleil. Les progrès récents dans la fabrication des alliages InGaN ont permis de produire des DEL vertes et des diodes ambres rivalisant avec celles basées sur l'AlInGaP. [11]

I.4 Semi-conducteur extrinsèque:

Les semi-conducteurs sont des matériaux techniques très intéressants car leur conductivité électrique peut être grandement modifiée en ajoutant des impuretés spécifiques à leur structure cristalline. Ces impuretés déterminent les propriétés électriques du matériau, ce qui est connu sous le nom de conductivité extrinsèque. L'ajout intentionnel d'impuretés dans un semi-conducteur intrinsèque est appelé dopage. En dopant un semi-conducteur, il est possible de contrôler la conductivité du matériau pour qu'il soit utilisé dans divers dispositifs électroniques tels que les diodes, les transistors et les circuits intégrés. [12,13]

1.4.1 Notion de dopage:

Lorsque la structure cristalline d'un semi-conducteur est régulière, les bandes interdites se forment et sont responsables de sa conductivité électrique. Cependant, toute perturbation de cette régularité peut créer des états accessibles à l'intérieur de ces bandes interdites, rendant le gap plus « perméable ». Le dopage consiste à introduire des impuretés sélectionnées dans un semi-conducteur intrinsèque pour en contrôler les propriétés électriques.

Cette technique permet d'augmenter la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semi-conducteur. Lorsqu'elle augmente la densité d'électrons, on parle de dopage de type N. En revanche, si elle augmente la densité de trous, on parle de dopage de type P. Les semi-conducteurs ainsi dopés sont appelés semi-conducteurs extrinsèques. [14]

I.4.1.1 Dopage type N:

Le dopage de type N est une technique qui consiste à implanter des impuretés de type donneur dans un matériau semi-conducteur intrinsèque afin d'augmenter la densité d'électrons et la conductivité du matériau. Les impuretés de type donneur ont un niveau d'énergie électronique inférieur à celui du matériau semi-conducteur intrinsèque, créant ainsi un état

électronique proche de la bande de conduction et permettant la libération des électrons pour contribuer à la conductivité du matériau.

Le dopage de type N est utilisé dans de nombreuses applications, telles que la production de diodes électroluminescentes, de cellules solaires et de transistors à effet de champ. Cependant, il peut également présenter des effets indésirables, tels que l'augmentation de la densité de défauts dans le matériau et la diminution de la durée de vie des porteurs de charge. Pour optimiser son utilisation dans les dispositifs électroniques, il est important de bien maîtriser la technique de dopage de type N et de combiner le dopage de type N avec le dopage de type P pour créer des jonctions PN pour contrôler la diffusion des porteurs de charge. [15]

I.4.1.2 Dopage type P:

L'introduction d'un atome d'impureté possédant trois électrons de valence, comme le bore, l'aluminium ou le gallium, entraîne une insuffisance de liaisons covalentes. Cela signifie qu'un électron manque dans la structure cristalline, ce qui peut être interprété comme la présence d'un "trou" chargé positivement, qui se déplace librement. Les trous libres sont plus nombreux que les électrons libres dans la région P, ce qui fait des électrons les porteurs de charge minoritaires. En conséquence, le semi-conducteur est qualifié de type P. [15]

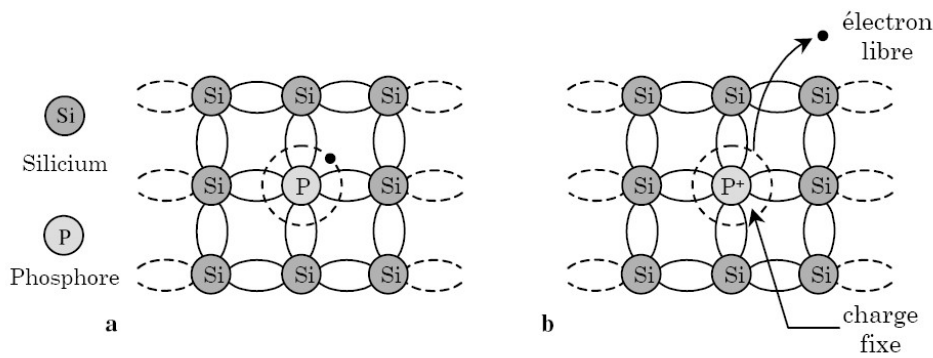


Figure I. 3 : Silicium dopé au Phosphore (dopage n)

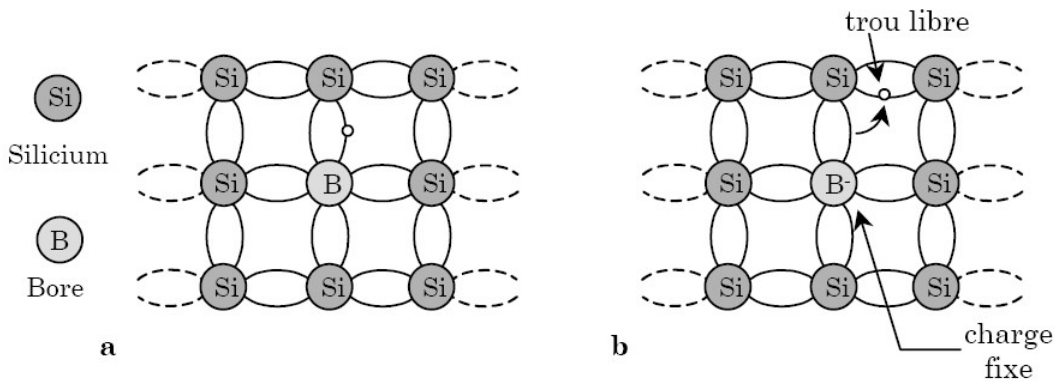


Figure I. 4: Silicium dopé au Bore (dopage p) [13]

1.5 La jonction PN :

La jonction PN est un élément clé des dispositifs à semi-conducteur, non seulement en raison de ses applications directes, mais aussi de sa capacité à faciliter la compréhension de nombreux autres composants. Elle se compose d'un cristal semi-conducteur avec une variation de concentration d'impuretés profondes, créant une zone de type P et une zone de type N, où les électrons du matériau N se diffusent vers le matériau P.

Ce phénomène crée une zone de charge d'espace (ZCE) entre les deux zones, avec une charge positive dans la zone N et une charge négative dans la zone P, générant un champ électrique qui repousse les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. En connectant des contacts métalliques aux zones N et P, une diode peut être créée.

Les diodes à jonction PN sont le type le plus simple de dispositif électronique basé sur la jonction PN. Elles permettent le passage du courant électrique dans un seul sens, selon la polarité de la tension appliquée, et sont utilisées dans diverses applications, telles que la rectification de courant alternatif, la protection contre les surtensions et la régulation de tension.

Les transistors, qui sont composés de trois régions semi-conductrices (une région P, une région N et une région P supplémentaire), permettent l'amplification ou la commutation de signaux électriques en fonction de la polarisation de la jonction PN, qui peut être contrôlée par une tension appliquée à la troisième région. Les transistors sont largement utilisés dans les circuits électroniques tels que les amplificateurs, les oscillateurs et les régulateurs de tension.

Les cellules solaires sont un autre exemple de dispositif électronique utilisant la jonction PN, qui convertit la lumière en électricité. Lorsque la lumière frappe la jonction PN, elle génère des électrons et des trous qui se déplacent vers la région opposée de leur polarité, créant ainsi une différence de potentiel utilisable pour alimenter un circuit électrique.

La jonction PN est un élément crucial en électronique, permettant le contrôle du courant électrique en fonction de la polarité de la tension appliquée. Elle est utilisée dans divers dispositifs électroniques tels que les diodes, les transistors et les cellules solaires, et sa compréhension est indispensable pour comprendre de nombreux autres composants électroniques. [9]

I.5.1 Zone de Charge d'Espace (ZCE):

Les électrons majoritaires présents dans la zone de type N ont tendance à se diffuser vers la zone de type P, où ils sont minoritaires. Lorsqu'un électron atteint la zone de type P, il se combine avec un trou, ce qui entraîne sa disparition et laisse un atome donneur ionisé positivement non compensé électriquement du côté N

De même, les trous majoritaires présents dans la zone de type P ont tendance à se diffuser vers la zone de type N, où ils sont minoritaires. Lorsqu'un trou atteint la zone de type N, il se combine avec un électron libre, ce qui entraîne sa disparition et laisse un atome accepteur ionisé négativement non compensé électriquement du côté P. Cette diffusion des électrons et des trous crée une zone de charge d'espace entre les deux zones, qui forme la jonction PN et génère un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous dans la zone P.

I.5.2 Polarisation continue inverse

La jonction PN créée par le cristal semi-conducteur forme un dipôle qui est une diode, où l'anode correspond à la zone de type P et la cathode à la zone de type N. Si la zone P est connectée à la borne négative d'une source de tension continue et la zone N à la borne positive, les porteurs de charges vont s'éloigner de la jonction, ce qui la rend quasiment isolante. Cette configuration est appelée polarisation en sens inverse, et le courant qui traverse la diode est très faible, car il est dû aux porteurs minoritaires. En d'autres termes, la diode est bloquée et ne permet pas le passage du courant dans cette configuration. [14]

I.5.3 Polarisation continue directe:

Lorsque l'anode de la diode (zone P) est reliée au pôle positif de la pile et la cathode (zone N) au pôle négatif, les porteurs de charges vont traverser la jonction, et un courant élevé va circuler dans le circuit. Pour que cela se produise, la différence de potentiel entre les zones P et N doit être suffisamment élevée pour compenser la différence de potentiel présente dans la jonction à l'état d'équilibre, qui est généralement de quelques dixièmes de volts. C'est ce que l'on appelle la tension de seuil, qui doit être dépassée pour que la diode commence à conduire le courant. Une fois la tension de seuil dépassée, la diode devient conductrice, et sa résistance interne diminue considérablement, ce qui permet un courant important de circuler dans le circuit.

I.5.4 Jonction non polarisée:

La jonction PN résulte de la jonction entre une zone de semiconducteur dopé P et une zone de semiconducteur dopé N. Dans cette zone de transition, une diffusion et une recombinaison se produisent, où les électrons libres de la zone N se recombinent avec les trous de la zone P, ce qui entraîne la disparition des charges mobiles.

Au sein de cette zone, également appelée zone de déplétion ou zone de charges d'espace, il ne reste que les ions fixes, positifs dans la zone N et négatifs dans la zone P. La présence de ces charges dans la zone de déplétion engendre un champ électrique qui ralentit la diffusion en raison des forces de répulsion $F=(q \cdot E)$. La largeur de la zone de déplétion est inversement proportionnelle au taux de dopage, car une concentration d'ions plus élevée engendre un champ électrique plus important.

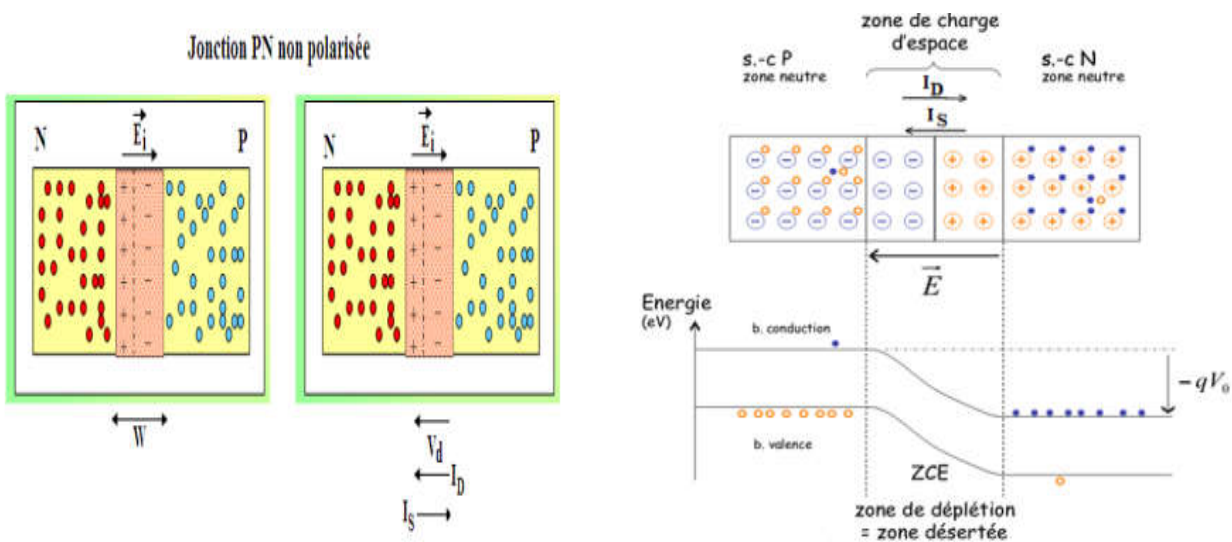


Figure I. 5: Jonction non polarisée

1.6 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous avons exploré les propriétés fascinantes des semi-conducteurs III-V, ainsi que leurs propriétés optiques très prometteuses pour les applications photodiodes. En particulier, nous avons mis en avant l'importance du GaN dans la communication optique grâce à son efficacité accrue d'absorption de la lumière principale. Nous avons également discuté de l'hétérojonction PN, une technologie couramment utilisée dans les photodétecteurs basés sur des semi-conducteurs III-V.

Dans l'ensemble, ces développements offrent des perspectives intéressantes pour les applications futures dans les domaines de la communication optique et de la photonique en général.

Chapitre II

Les photodiodes à base de nitrure de gallium

II.1 Introduction

Les caractéristiques physico-chimiques exceptionnelles du nitrure de gallium (GaN) en font un matériau remarquable utilisé dans les domaines de l'optique et de la microélectronique. En tant que semi-conducteur à large bande interdite directe (3,42 eV), le GaN favorise les transitions optiques. Lorsqu'il est combiné avec d'autres nitrures tels que l'AlGaN et l'InGaN, le GaN offre de nombreuses applications à fort potentiel de développement, dont certaines sont déjà présentes sur le marché. Dans le précédent chapitre, nous avons exploré les propriétés et les caractéristiques optiques des nitrures de gallium. Dans ce chapitre, nous examinerons les différents types de photo-détecteurs, ainsi que leurs principes de fonctionnement et leurs caractéristiques.

II.2 Principe de transmission des données :

Le principe de transfert de données implique l'envoi et la réception d'une série de messages qui seront encodés en binaire afin de former une trame. Une fois qu'un message est reçu, l'utilisateur extrait les données pertinentes et les décode.

La structure d'une trame est composée de différents champs, chacun ayant une fonction spécifique. Chaque champ de la trame peut être codé sur plusieurs octets, en utilisant des formats tels que l'hexadécimal, le décimal ou le binaire.

II.3 Composants de chaîne télécommunication optique :

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.

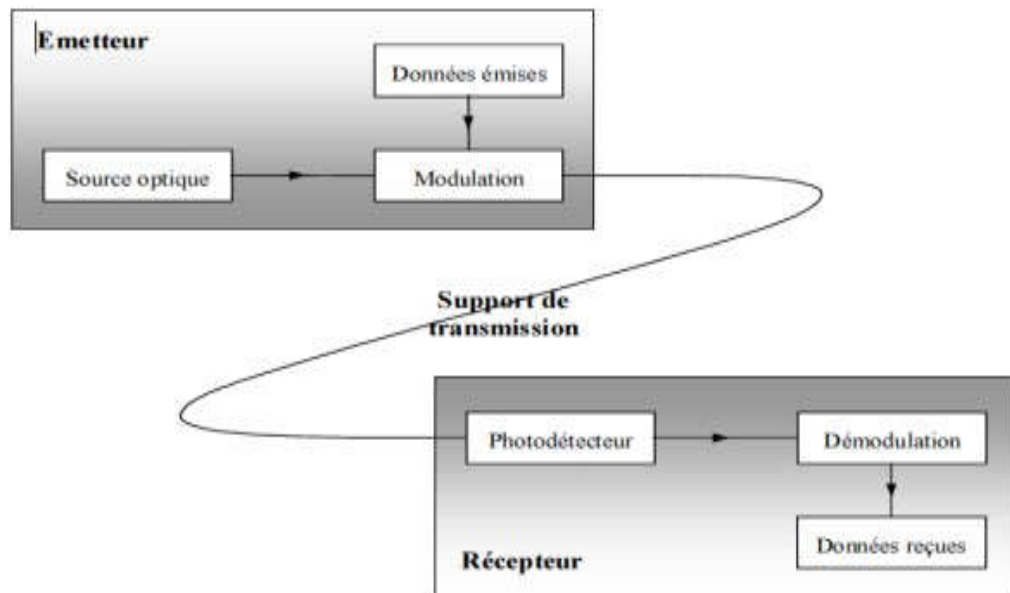


Figure II. 1: Synoptique général d'un système de communications par fibre optique

II.3.1 Bloc émission :

Les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL) se distinguent traditionnellement par le mécanisme d'émission de lumière qu'elles utilisent (émission spontanée pour les DEL et émission stimulée pour les DL).

Dans le contexte des liaisons à haut débit, seules les diodes laser, qui offrent des performances nettement supérieures, sont utilisées. Lorsqu'on décrit un système de transmission par fibre optique, les diodes laser sont principalement considérées pour leurs caractéristiques statiques et dynamiques. [19]

II.3.1.1 Sources optique :

Les sources optiques jouent un rôle essentiel en matière de communication par fibre optique. Leur principal objectif est de convertir efficacement l'énergie électrique en énergie optique (conversion électro-optique) tout en assurant un couplage optimal avec la fibre. Haut du formulaire. [19]

II.3.1.2 Diodes électroluminescentes LED :

Une diode électroluminescente (LED), également connue sous le nom de diode émettrice de lumière (DEL), est une diode à jonction PN fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur fortement dopé, favorisant les recombinaisons radiatives.

La LED produit un rayonnement incohérent résultant d'émissions spontanées de photons. Le diagramme de rayonnement de la LED est généralement contrôlé en ajoutant une optique à la diode. [19]

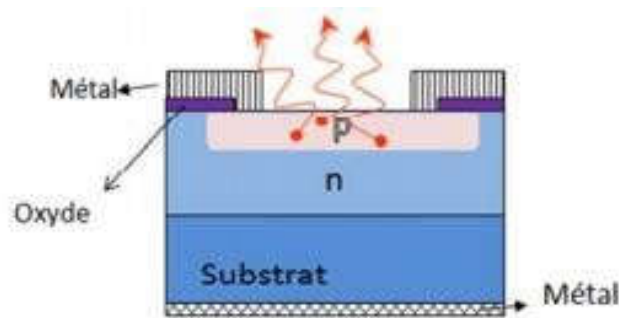


Figure II. 2: Structure de base d'une diode électroluminescente

II.3.1.3 La diode LASER :

En raison de leur petite taille, qui correspond bien à celle du cœur des fibres optiques, de la facilité relative de modulation directe de la lumière en agissant sur le courant de polarisation, de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique, les émetteurs à semi-conducteurs ont été choisis comme sources optiques privilégiées.

Les lasers à semi-conducteurs, également appelés lasers à jonction ou diodes laser (DL), reposent sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs qui exploitent la propriété d'émission stimulée de photons au sein d'une jonction PN. Dans cette jonction, l'inversion de population entre les bandes de valence et de conduction est obtenue par injection de porteurs de charge (pompage). Il convient de noter que la cavité résonante (par exemple, une cavité de type Fabry-Pérot) est utilisée pour sélectionner les modes d'oscillation. [11]

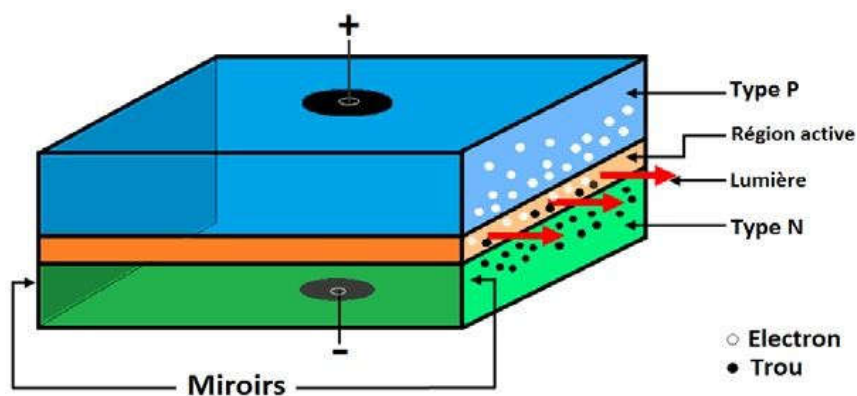


Figure II. 3: Schéma de principe d'une diode laser.

II.3.2 Bloc réception :

La détection joue un rôle essentiel dans les systèmes de transmission par fibre optique. En général, les signaux reçus sont très faibles (typiquement de l'ordre du (nW)) et rapides (les débits binaires peuvent atteindre 40 Gbits/s). Il est donc essentiel que le système de détection soit à la fois sensible et rapide. Lorsque le rayonnement incident rencontre le matériau, il génère des paires électron-trou grâce à la génération bande à bande, et ces paires sont ensuite séparées par un champ électrostatique et collectées par des contacts électriques.

Ce flux de charges génère un courant photoélectrique, noté I^{ph} . Le système de détection comprend, en plus de l'élément photodétecteur lui-même (comme une photodiode PIN), un ensemble de circuits électroniques, notamment un préamplificateur à faible bruit. [19]

II.4 Le photo détecteur :

En tant que transducteur opto-électrique, le photodétecteur a pour rôle de convertir le signal lumineux en un signal électrique tout en minimisant les distorsions et les altérations induites par le bruit. Il agit comme un compteur de photons et un générateur de courant.

Les performances requises pour un photodétecteur sont les suivantes :

- i) Une sensibilité élevée à la longueur d'onde utilisée,
- ii) Une rapidité remarquable, car il est utilisé dans des systèmes à haut débit (10 Gb/s ou même 40 Gb/s),
- iii) Une contribution au bruit faible, voire nulle.

Pour remplir efficacement ces fonctions, le photodétecteur doit être basé sur des semi-conducteurs, et la jonction PN est l'élément le plus simple qui présente les avantages d'être très rapide et facile à utiliser, bien que d'autres dispositifs puissent être plus sensibles. [27]

II .4 .1 : Principe de la photo- détection

Lorsque les photons sont transmis à travers la fibre optique, ils entrent dans le détecteur composé d'un matériau semi-conducteur. Lors de leur absorption, ils peuvent provoquer le déplacement des électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction.

Au sein de la bande de conduction, les électrons deviennent libres car ils sont moins liés. Ainsi, le photon se transforme en une paire électron-trou. Pour empêcher les électrons de retomber dans leur état le plus stable, une différence de potentiel est appliquée. Sous l'effet du champ électrique, les deux types de porteurs sont séparés et dirigés vers les régions où ils sont majoritaires (appelées P ou N). Les porteurs générés de cette manière sont collectés sous forme de photocourant. Le nombre de paires électron-trou est équivalent au nombre de photons absorbés. [19]

II .4.2 : Caractéristiques des photo-détecteurs

Un photodétecteur possède les caractéristiques suivantes :

Le rendement quantique (η) représente le rapport entre le nombre de paires de porteurs générées et collectées et le nombre de photons incidents.

La sensibilité (S) est définie comme le rapport entre le photocourant généré et le flux énergétique minimal reçu (ou puissance optique). Elle est exprimée en (A/W) (ampères par watt).

La bande passante indique la capacité du photodétecteur à suivre les variations rapides du flux de photons et à déterminer le facteur de proportionnalité entre le temps de montée (ou de descente) du photocourant et celui du flux lumineux.

Le bruit du photodétecteur fait référence aux électrons du courant utile qui peuvent être générés sans qu'un photon soit absorbé, par exemple par absorption d'énergie thermique. Ces électrons indésirables s'ajoutent aux photoélectrons et perturbent le courant.

Le coefficient d'absorption (α), dépendant du matériau utilisé et de la longueur d'onde, caractérise l'efficacité du photodétecteur. [29]

II .4 .2.1 La photo-réponse

La réponse spectrale (appelée aussi sensibilité ou photo réponse R) est définie en tant que courant photoélectrique (ou photo courant) par unité de puissance lumineuse incidente à la longueur d'onde d'où : [20]

$$R(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \dots\dots\dots \text{eq:2.1}$$

Avec P_{opt} , la puissance d'excitation exprimée comme :

$$P_{opt} = \Phi_{opt}ES \dots\dots\dots \text{eq:2.2}$$

Dans cette configuration, le flux de photons incidents est exprimé en photons $m^2.s^{-1}$, l'énergie des porteurs en électronvolts (eV) et la surface active du composant en m^2 . Toutes les équations mentionnées dans ce paragraphe sont valables pour un faisceau incident perpendiculaire à la surface de l'échantillon.

Cette grandeur représente la plage de longueurs d'onde à laquelle le composant répond. Il est également important de souligner que la réponse photoélectrique est indépendante de la surface optique active du photodétecteur. En effet, dans un cas idéal, le photocourant et la puissance optique incidente sont tous deux proportionnels à la surface optique active. À une longueur d'onde donnée, le flux de photons atteignant la surface du composant semi-conducteur est défini comme le nombre de photons atteignant la surface active par unité de temps.

II .4 .2.2 Courant d'obscurité :

Par définition, le courant d'obscurité I_0 , également appelé courant sombre ou darkcurrent, représente la valeur du courant photoélectrique I_{ph} lorsqu'il n'y a aucun éclairage présent. Il peut être déterminé par simulation ou estimé analytiquement en prenant en compte la topologie des dispositifs interdigités (IDTs) avec leurs dimensions (s , w), le dopage ND et la permittivité du matériau utilisé.

En raison des propriétés intrinsèques du matériau, le dopage de type p du GaN est théoriquement difficile à réaliser. De plus, des difficultés supplémentaires peuvent survenir en raison de phénomènes de compensation ou de complexation dus à des contaminations pendant la croissance ou les recuits, par exemple.

Depuis le début des années 90, de nombreux efforts ont été déployés pour obtenir une couche de dopage p active dans le GaN. Plusieurs dopants ont été étudiés pour le dopage de type p du GaN, tels que le lithium (Li), le sodium (Na), le potassium (K), le zinc (Zn), le calcium (Ca) et le cadmium (Cd) [52]. Cependant, la plupart de ces dopants se sont révélés moins performants que le magnésium (Mg) pour le dopage de type p du GaN. Le seul élément qui a été considéré comme un concurrent sérieux du magnésium est le béryllium (Be).

II.4 .2.3 Rendement Quantique :

Le courant d'obscurité I_0 est le résultat de la génération d'électrons-trous par l'absorption de photons. Il représente le rapport entre le nombre de charges élémentaires traversant la jonction (densité de photo-courant I_0) et le nombre de photons incidents (où q est la charge élémentaire et ϕ_0 est le flux de photons incident par unité de surface).

Ce rendement dépend de la longueur d'onde du rayonnement ainsi que des paramètres de construction du composant. Il définit la plage spectrale dans laquelle le détecteur peut être utilisé efficacement.

II.4 .2.4 Facteur D'ombrage :

Un facteur est utilisé pour prendre en compte la présence des électrodes non transparentes à la surface du composant, où il n'est pas possible de générer des porteurs photoélectriques. Ce facteur, désigné par K , représente le rapport des surfaces entre la zone active du composant (surface non métallisée) et la surface totale du composant.

Mathématiquement, le facteur K peut être calculé comme suit :

$$k = \frac{\text{Surface non métallisée}}{\text{Surface totale du composant}}$$

Cela permet de quantifier la proportion de la surface du composant qui est réellement active pour la génération de porteurs photoélectriques par rapport à la surface totale comprenant les zones non métallisées. [20]

II.4 .2.5 Le coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption du semi-conducteur joue un rôle crucial dans la détermination de l'efficacité du photodétecteur. Il est influencé par le matériau utilisé ainsi que la longueur d'onde du rayonnement.

Le coefficient d'absorption est un paramètre qui indique la capacité du matériau à absorber le rayonnement lumineux. Il représente la fraction de l'énergie du photon absorbée par le matériau. La valeur du coefficient d'absorption peut varier en fonction du matériau semi-conducteur utilisé et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Le coefficient d'absorption du semi-conducteur est un élément clé qui détermine l'efficacité du photodétecteur et il dépend à la fois du matériau choisi et de la longueur d'onde du rayonnement considéré.

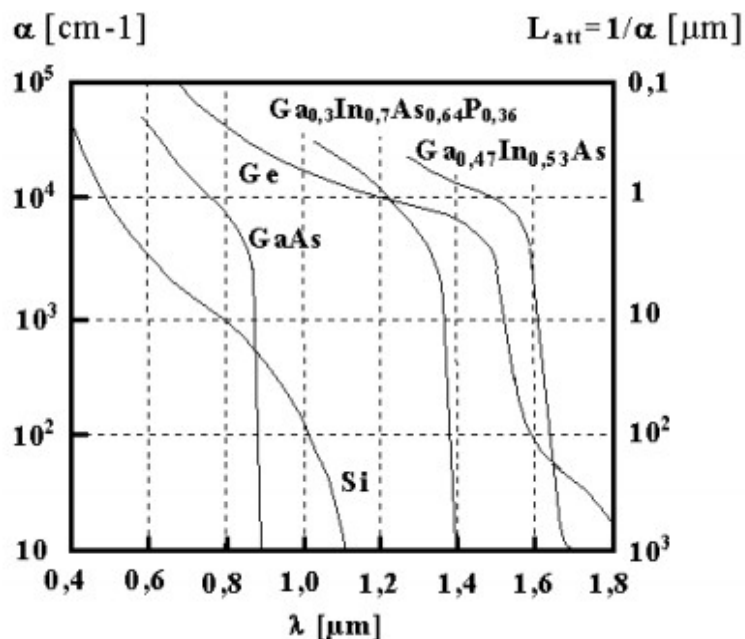


Figure II. 4: Coefficient et longueur d'absorption des matériaux semi-conducteurs [18]

II.4 .2.6 Le photo-courant :

Le photo-courant se réfère au courant électrique produit par un dispositif photosensible, tel qu'une cellule photovoltaïque, une cellule photoélectrique ou une photodiode, lorsqu'il est exposé à la lumière en raison d'un effet photovoltaïque, photoconducteur ou photoémissif.

Le mécanisme général de détection de la lumière peut être décrit comme suit : les photons excitent certaines molécules dans l'élément de détection, ce qui génère une réaction de second ordre ou supérieur, créant ainsi des charges électriques. Le mouvement de ces charges électriques générées par les photons sous l'effet d'un champ électrique appliqué constitue le photo-courant.

Le photo-courant est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement lorsque celui-ci est approprié, et il peut être amplifié davantage par le gain interne résultant de l'interaction des photons avec les ions présents dans le matériau. Le photo-courant augmente avec l'augmentation du potentiel d'accélération jusqu'à ce qu'il atteigne un courant de saturation, où le photo-courant généré atteint sa valeur maximale et ne continue plus à augmenter avec l'augmentation du potentiel d'accélération. [29]

II.4 .2.7Le bruit du photodétecteur :

Il est possible que certains électrons du courant utile soient générés sans qu'un photon ne soit absorbé. Ces électrons supplémentaires s'ajoutent aux photoélectrons et perturbent le courant. Dans le contexte du rapport signal sur bruit (S/B) d'une liaison à fibre optique, ces électrons jouent un rôle important en déterminant le dénominateur de ce rapport. La qualité du signal dépend de la source émettrice ainsi que de la qualité des fibres optiques utilisées [19]

II.5 Montage du photodétecteur :

La photodiode utilisée dans cette étude est la photodiode Fermionique FD150S2, comme illustré dans la Figure II.6. Il s'agit d'une photodiode de type PIN en InGaAs, avec une zone active ayant un diamètre de 150 μm . Ce type de photodiode est spécifiquement conçu pour fonctionner efficacement dans la plage infrarouge, ce qui correspond au domaine des lasers utilisés dans cette configuration.

Le montage mis en place permet de générer deux types de signaux : un signal en courant continu (DC). La séparation entre ces signaux est réalisée grâce aux bobines L1 et L2, ainsi qu'au condensateur C2. Certaines modifications ont été apportées par rapport au photodétecteur précédent, notamment l'ajout d'une bobine supplémentaire L2 en série avec L1. [21]

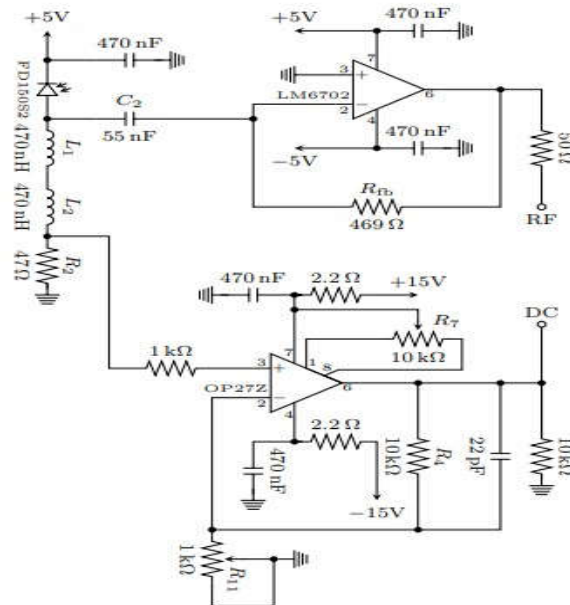


Figure II. 5: Schéma du circuit électronique du photodétecteur construit. [21]

II.6 Les différents types de photodétecteurs :

Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : Celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne AVALANCHE(APD).

II.6.1 La photodiode PN :

La photodiode à jonction PN est la forme originale de photodiode qui a été développée. C'est un composant composé de deux semi-conducteurs juxtaposés et dopés différemment : l'un est dopé de type N (donneurs) et l'autre de type P (accepteurs). Lorsque les deux matériaux sont identiques, on parle d'une jonction PN homojonction. Dans le cas contraire, on parle d'une jonction PN hétérojonction.

Autour de la jonction PN, les électrons, qui sont présents en grande concentration dans la région N, diffusent vers la région P afin de se combiner avec les trous présents. Cela crée une zone dépourvue de porteurs de charges mobiles, appelée zone de charge d'espace ou zone de déplétion, qui contient uniquement les ions fixes de chaque région.

Ces ions créent un champ électrique, connu sous le nom de champ de diffusion, qui est dirigé de la région N vers la région P. Cela induit l'existence d'un potentiel électrique, appelé potentiel de diffusion, même en l'absence d'une source de courant externe.

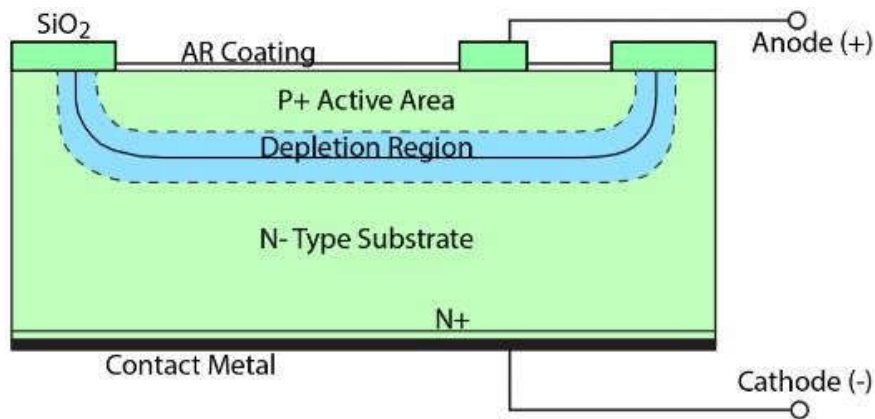


Figure II. 6: structure d'une photodiode PN [22]

La photodiode PIN :

Pour améliorer l'efficacité de la zone de déplétion, une méthode naturelle consiste à ajouter une couche intrinsèque entre les régions P et N lors de la fabrication de la jonction PN. C'est ainsi que l'appellation de photodiode PIN est utilisée.

Dans le but de réaliser une détection de la lumière en réduisant les phénomènes de recombinaison des paires électron-trou, il est essentiel que les photons soient absorbés dans une région dépourvue de porteurs mobiles, similaire à la zone de déplétion d'une jonction PN. Cette zone doit être suffisamment large pour assurer un bon rendement quantique, ce qui explique l'intérêt de la photodiode PIN.

Il convient de rappeler que la majorité des photons sont absorbés dans la zone intrinsèque, où un champ électrique est présent lorsqu'une photodiode est polarisée, permettant ainsi la séparation des porteurs. La région traversée par la lumière (P ou N) doit avoir une faible épaisseur et être recouverte d'une couche antireflet qui sert à la fois de protection pour le matériau et à améliorer le rendement quantique externe. [9]

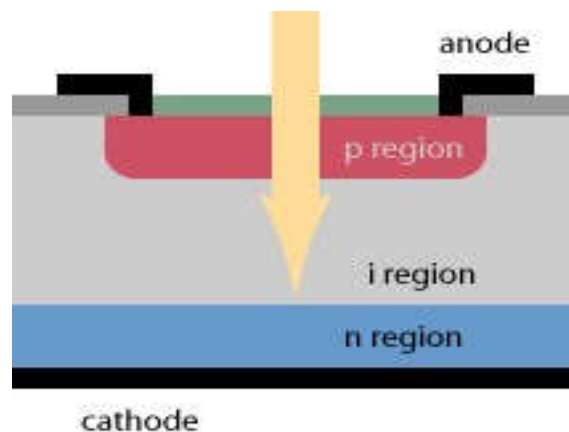


Figure II. 7: Structure d'une photodiode PIN [9]

II.6.2.1 Avantages de la photodiode PIN :

La structure PIN est la plus couramment utilisée pour les photodiodes. Elle présente l'avantage de permettre le maintien de niveaux élevés de dopage dans les régions N et P sans réduire de manière significative l'étendue de la zone de charge d'espace, dont la largeur est principalement déterminée par l'épaisseur de la couche intrinsèque.

En augmentant la largeur de la zone de charge d'espace, on réduit également la capacité du composant, ce qui rend les structures PIN particulièrement adaptées à un fonctionnement rapide. Ces types de composants sont réputés pour leur stabilité, leur linéarité et leur faible bruit, ce qui les rend très avantageux. [20]

II.6.3 Les photodiodes PN et PIN à base de GaN:

II.6.3.1 Dopage N:

Dans le domaine du GaN, le dopage de type n (n^+) est théoriquement plus facile à réaliser. Le silicium (Si) et le germanium (Ge) sont les principales espèces en compétition pour obtenir une couche de GaN fortement dopée de type n (n^+). Le dopant le plus couramment utilisé pour le dopage de type n du GaN, que ce soit par implantation ou par épitaxie, est le silicium. Cette méthode est largement répandue pour obtenir une forte concentration de dopants de type n dans le GaN. [29]

II.6.3.2 Dopage P:

En raison des propriétés intrinsèques du matériau, le dopage de type p du GaN est théoriquement difficile à réaliser. De plus, des difficultés supplémentaires peuvent survenir en raison de phénomènes de compensation ou de complexation dus à des contaminations pendant la croissance ou les recuits, par exemple.

Depuis le début des années 90, de nombreux efforts ont été déployés pour obtenir une couche de dopage p active dans le GaN. Plusieurs dopants ont été étudiés pour le dopage de type p du GaN, tels que le lithium (Li), le sodium (Na), le potassium (K), le zinc (Zn), le calcium (Ca) et le cadmium (Cd) [52]. Cependant, la plupart de ces dopants se sont révélés moins performants que le magnésium (Mg) pour le dopage de type p du GaN. Le seul élément qui a été considéré comme un concurrent sérieux du magnésium est le béryllium (Be). [29]

II.7 Les photodiodes à avalanche PDA:

Dans le but d'améliorer le rapport signal sur bruit, l'idée est d'exploiter le phénomène d'ionisation par impact des porteurs. L'objectif est d'accroître la puissance du signal électrique,

correspondant à une puissance optique incidente donnée, en multipliant le nombre de porteurs internement.

En augmentant le champ électrique au sein de la jonction PN, l'énergie des porteurs augmente, atteignant un point où ils peuvent ioniser un atome lors d'une collision. Des processus d'ionisation en cascade se produisent alors, amplifiant ainsi le nombre de porteurs. Ce phénomène est connu sous le nom d'avalanche. Cependant, s'il n'est pas contrôlé, il peut entraîner une décharge de la jonction et la destruction du matériau. [12]

Tout comme les photodiodes PIN, il existe différentes structures possibles, principalement à base de silicium ou de germanium. Elles résultent d'un compromis entre une large zone d'absorption et une jonction très abrupte, afin d'obtenir un champ électrique très intense.

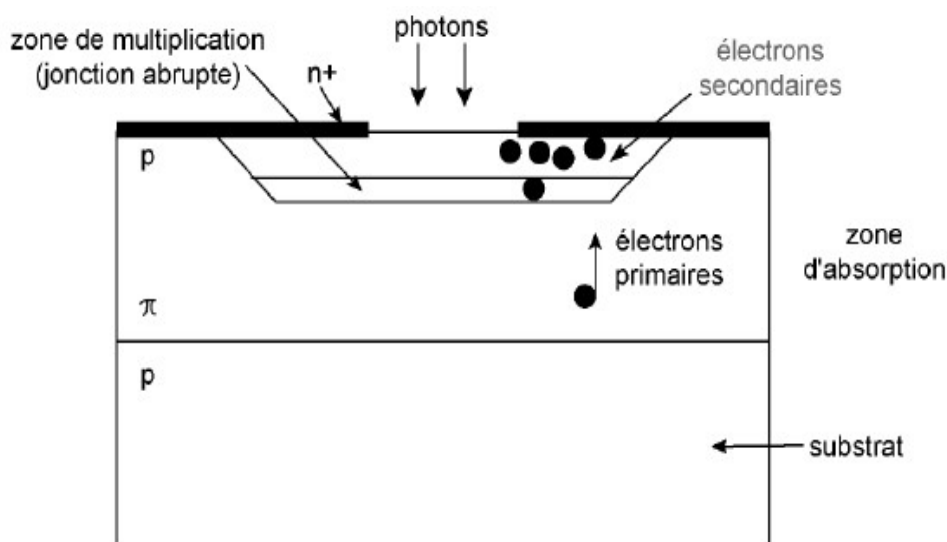


Figure II. 8: Structure d'une photodiode à avalanche PDA

Dans une photodiode à avalanche, l'absorption se produit dans une zone large et faiblement dopée appelée (π), tandis que la multiplication se produit dans la jonction abrupte (PN^+). De plus, à une tension inverse élevée, la zone de charge d'espace s'étend dans la zone (π), ce qui entraîne une augmentation de sa résistivité avec la tension. Ce principe introduit un effet stabilisateur : le champ électrique et le gain augmentent de manière progressive, permettant ainsi d'atteindre des valeurs élevées de gain tout en les contrôlant avec précision, ce qui facilite la prévention du claquage. [27]

En ce qui concerne le courant d'obscurité, il est plus élevé dans une photodiode à avalanche, mais il n'est pas multiplié autant que le signal, car toutes les composantes de ce courant ne subissent pas le phénomène d'avalanche.

Le temps de réponse des photodiodes à avalanche est affecté par le phénomène d'avalanche, ce qui signifie que ces photodiodes sont généralement moins rapides que les photodiodes PIN.

II.8 Applications photodiodes :

Les photodiodes et les phototransistors sont des dispositifs étroitement liés qui servent de transducteurs électro-optiques. Leur fonction principale consiste à convertir la lumière incidente en courant électrique. Ces composants sont utilisés dans diverses applications, notamment la détection de présence ou de position, la mesure de l'intensité lumineuse et la détection des impulsions optiques à haute vitesse. De plus, ils trouvent également des applications dans les domaines spatial et médical. Ces dispositifs sont utilisés pour diverses applications sans violer les droits de propriété intellectuelle et ont une importance significative dans de nombreux domaines technologiques.

- Photométrie.
- L'asservissement.
- Détecteur defumée.
- Mesures de forme d'impulsion.
- Mesures de durée d'impulsion.
- Synchronisation précise.
- Mode de surveillance des battements.
- Mesures hétérodynes.

II.9 Conclusion:

Dans cette section, nous avons examiné la signification générale du photodétecteur, en mettant l'accent sur la photodiode. Nous avons également exploré les divers types de photodiodes disponibles, en analysant leurs avantages et les distinctions entre eux. Ces composants jouent un rôle essentiel dans la détection de l'énergie lumineuse et sa conversion en signal électrique, ce qui les rend très prisés dans le domaine des télécommunications optiques. Ainsi, la présente section offre une vue d'ensemble sans copier de source existantes.

Chapitre III

Simulation numérique de la photodiode

3.1. Introduction

Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation TCAD-SILVACO (ATLAS), son principe de fonctionnement et son module de simulation pour le comportement électrique des composants. Ensuite, nous présentons une description des différentes étapes de simulation.

Partie I : Présentation du Logiciel

SILVACO (Silicon Valley Corporation) est une société Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs. Historiquement la compagnie a été fondée en 1984 par Dr. Ivan Pesic pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés (IC, integrated circuits) analogiques pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précises et linéaires. L'entrée de SILVACO dans la technologie **TCAD** a eu lieu en 1989, et elle a été basée sur une recherche du Département des Dispositifs Physiques de l'Université de Stanford, ainsi apparaissent dans SILVACO « Athena » comme simulateur des processus et « Atlas » comme simulateur des dispositifs (2D et 3D). SILVACO n'a pas été conçu pour répondre à un seul composant semi-conducteur. En incluant des modèles plus généraux de la physique des semi-conducteurs, il permet des simulations plus étendues en balayant toute une gamme de composants électroniques. [1]

III.1.1. Présentation de TCAD-SILVACO :

Le logiciel TCAD (Technology Computer Aided Design), en commençant au niveau atomique et moléculaire, simule le comportement des dispositifs semi-conducteurs sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des expériences coûteuses et chronophages dans la fabrication. L'interface utilisateur graphique avancée avec capacité d'appareil 3D animée et simulations de processus simplifie la visualisation des résultats.

Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants semi-conducteurs. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel [1].

En plus du comportement électrique, exemple $I(V)$, il fournit des informations sur la distribution interne des variables électrique telles que le courant ou la tension (lignes du champ) [26]. Ceci est réalisé en résolvant numériquement les équations de Poisson et de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme [1].

Ce simulateur contient deux parties :

- une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...),
- une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus courants: Modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par impact (Pearson et Monte Carlo), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi -Dirac et Boltzmann.

ATLAS permet de simuler le comportement électrique d'un composant semi - conducteur créé et modélisé comme par exemple une diode ou un transistor. Le composant étudié est représenté comme une structure maillée où chaque nœud a des propriétés qui lui sont associées telles que le type de matériau, le type de dopage, la concentration du dopant, etc. Ainsi, pour chaque nœud, la concentration des porteurs, le champ électrique, etc. peuvent être calculés. Les électrodes sont représentées par des surfaces sur lesquelles les conditions aux limites sont imposées, comme par exemple, les tensions appliquées [1].

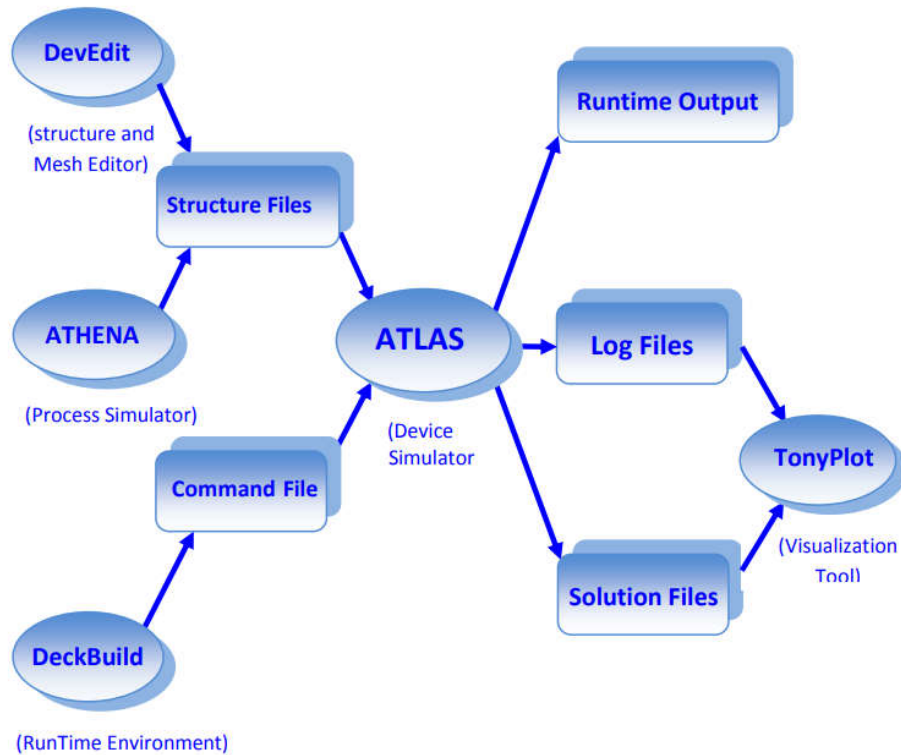


Figure III. 1: Entrées et sorties d'Atlas [1].

Le schéma de la Figure 3.2 représente les différents types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas ». La plupart des simulations réalisées sous « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier texte contenant les commandes pour que Atlas s'exécute (représenté par « Fichier de commande »). Le second fichier est un « Fichier de structure » contenant la structure du dispositif qui va être simulée définie dans « Athena » ou « DevEdit ». 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 en un point donné du dispositif (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation (TonyPlot). [2]

III.1.2. Les outils de simulation ATLAS (Silvaco) :

Le simulateur ATLAS est composé de deux parties, une partie pour le traitement numérique et une partie formée des modèles physiques des composants semiconducteurs les plus récents : Modèles de recombinaisons, d'ionisation par impact, de mobilités, en température et statistiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann notamment.

ATLAS a été conçu de manière à pouvoir être combiné avec d'autres outils pour en faciliter l'utilisation. Les outils sont :

- **DEVEDIT** : est l'environnement où est dessinée la structure (dimension, dopage, ...) et son maillage.
- **DECKBUILD** : est l'environnement où est défini le programme de simulation. La structure et son Maillage peuvent également être définis dans Deckbuild.
- **TONYPLOT** : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du Composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...).
- **MASKVIEW** : éditeur de Layout.
- **OPTIMIZER** : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons défini au préalable.

III.1.3. Caractéristiques et capacités d'ATLAS : [1]

A- Ensemble complet de modèles :

ATLAS propose une gamme complète de modèles physiques, tels que :

- DC, CA à faible signal et dépendance à temps plein
- Modèles de transport par dérive-diffusion.
- Bilan énergétique et modèles de transport hydrodynamique.
- Chauffage en treillis et dissipateurs thermiques
- Hétérojonctions graduées et abruptes.
- Interactions optoélectroniques avec le traçage général des rayons.
- Matériaux amorphes et polycristallins.
- Environnements de circuit généraux.
- Émissions stimulées et rayonnement
- Statistiques Fermi-Dirac et Boltzmann.
- Modèles de mobilité avancés.
- Dopage lourd.
- Dynamique de l'accepteur complet et du piège donneur

- Ohmique, Schottky et contacts isolants.
- SRH, radiative, Auger et recombinaison de surface
- L'ionisation par impact (locale et non locale).
- Portes flottantes.
- Tunnelisation bande-à-bande et Fowler-Nordheim.
- Injection de porteurs chauds.
- Modèles de transport quantique
- Les courants d'émission thermoïoniques

B- Capacités entièrement intégrées :

ATLAS est compatible avec les autres logiciels de SILVACO. Dans l'environnement d'exécution interactif DECKBUILD, par exemple, ATLAS s'exécute. TONYPLOT, le programme interactif de graphisme et d'analyse, est intégré.

Les simulateurs de processus ATHENA et SSUPREM3 peuvent être utilisés pour la saisie des données. Est connecté au programme de modélisation et d'extraction de paramètres de l'appareil UTMOST. Peut être utilisé en conjonction avec les outils d'automatisation VWF dans les études.

[1]

C- Mise en œuvre numérique sophistiqué :

ATLAS utilise une variété de techniques numériques avancées, notamment :

- Des algorithmes de discrétisation précis et fiables.
- Stratégies d'itération non linéaire telles que Gummel, Newton et block-Newton.
- Solveurs de sous-problèmes linéaires efficaces, à la fois directs et itératifs.
- Tactiques efficaces de première estimation
- Techniques de calcul de petits signaux qui convergent à toutes les fréquences.
- Intégration temporelle précise et stable. [1]

III.1.4. Ordres de commandes d'Atlas SILVACO :

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement « d'Atlas » 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 2.2).

Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte [4]

Group		Statements
1. Structure specification	—	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models specification	—	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical method selection	—	METHOD
4. Solution specification	—	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results analysis	—	EXTRACT TONYPLOT

Tableau III. 1: *Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes)*

III.1.4.1. Les commandes fondamentales :

Les commandes fondamentales sont : [2]

- **MESH** : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.
- **REGION** : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- **ELECTRODE** : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- **DOPING** : indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.
- **MATERIAL** : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard)

- **MODELS** : indique les carreaux constitutifs du modèle, ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.
- **CONTACT** : indique les attributs physiques d'une électrode.
- **INTERFACE** : indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés là où ils sont déjà indiqués.
- **METHOD** : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.
- **LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvegardées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme).
- **SOLVE** : ordonne à l'Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- **LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.
- **SAVE** : sauvegarde toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des donnés.

III.1.5. La spécification de la structure :

La structure de référence que nous allons étudier (par simulation) est représenté dans La figure III.4, c'est un photodétecteur PIN.

Dans cette étude, nous utilisons l'hétéro structure des photodiode PIN à base de InGaN/GaN avec une épaisseur $11 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ dopée uniformément à une concentration en donneurs et accepteurs de 10^{18}cm^{-3} et 10^{19}cm^{-3} successivement.

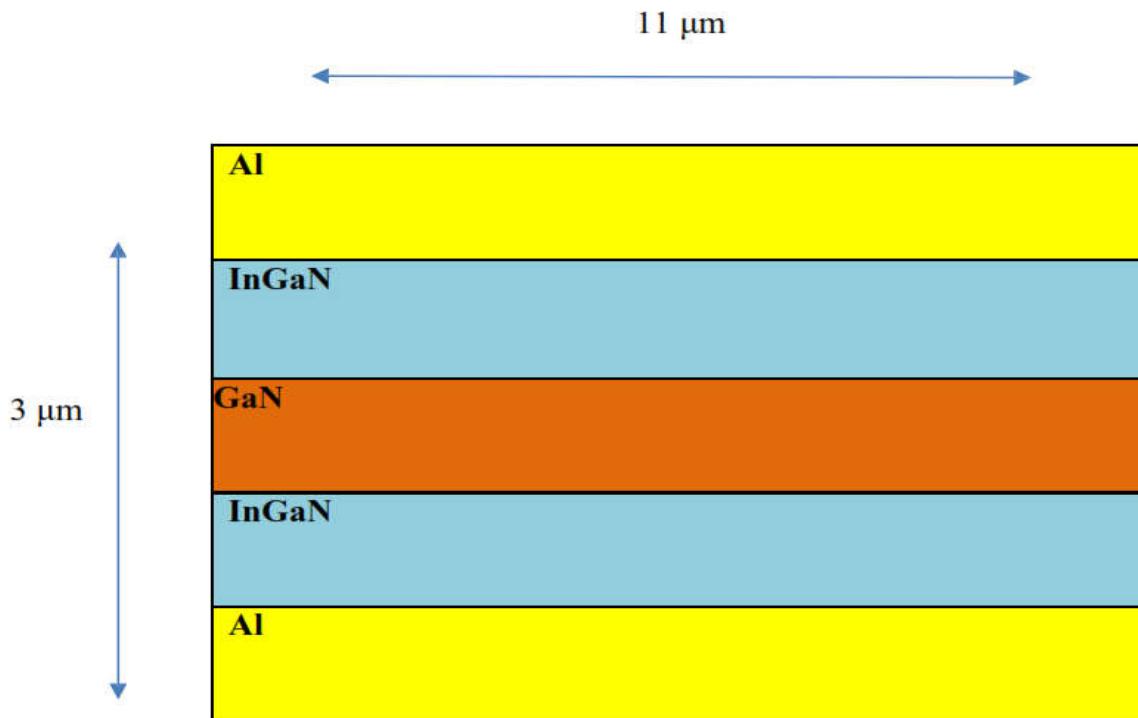


Figure III. 2: Structure proposé d'une photodiode InGaN/GaN dans Les photodétecteurs.

III.1.6 Simulation du dispositif :

Il est nécessaire de caractériser explicitement la structure employée dans cette simulation à l'aide de SILVACO-Atlas. Le domaine physique de la simulation doit être défini en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.

III.1.6.1 La spécification de maillage :

Pour poursuivre la simulation numérique et assurer la précision des résultats, le maillage de la structure doit être défini. Il est crucial pour obtenir des simulations de haute qualité.

Le maillage doit être choisi de manière à trouver un équilibre entre rapidité d'exécution et précision des résultats. La simulation est plus rapide avec un maillage épais, mais les résultats sont moins précis. Un maillage fin produit une simulation plus lente mais plus précise.

Le format général pour définir le maillage est :

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

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

- X.mesh : définit le maillage dans la direction x.
- Y.mesh : définit le maillage dans la Direction.
- Loc : définit l'intervalle de maillage.
- Spac : définit la résolution du maillage.

```
x.mesh loc=0.0 spacing=0.5
x.mesh loc=10.0 spacing=0.5
#
y.mesh loc=0.0 spacing=0.5
y.mesh loc=0.1 spacing=2
y.mesh loc=0.7 spacing=0.05
y.mesh loc=1.4 spacing=0.05
y.mesh loc=2.9 spacing=0.05
y.mesh loc=3 spacing=1
#
```

Figure III. 3: Structure de maillage

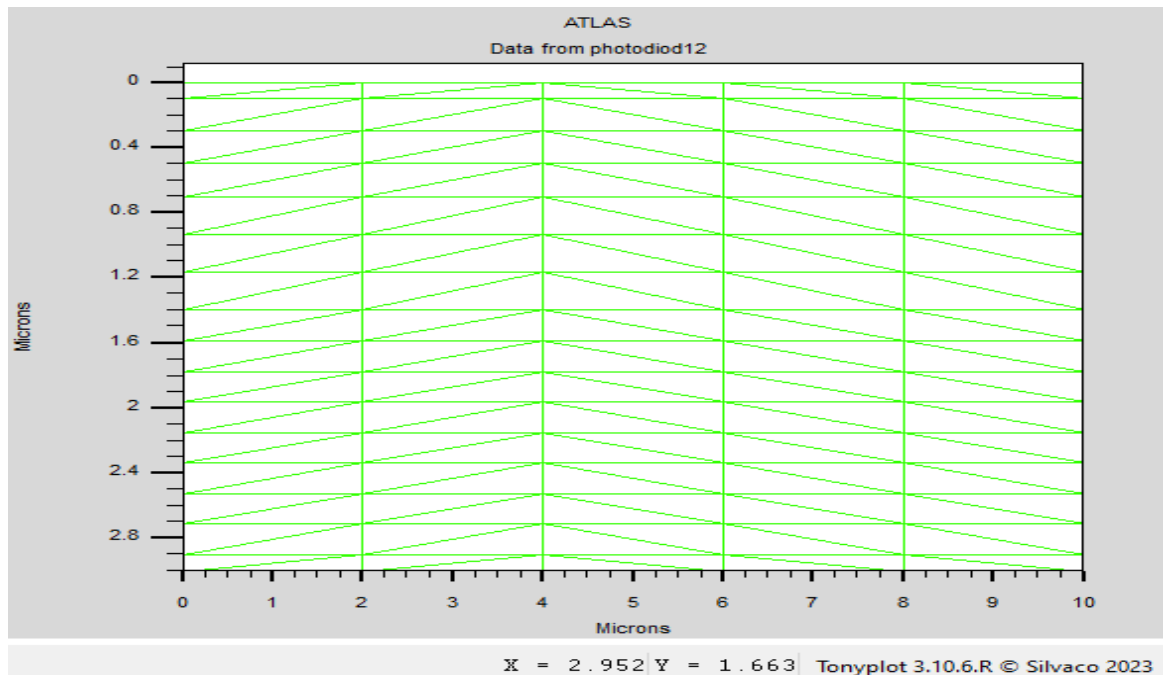


Figure III. 4: La structure de maillage dans la photodiode PIN InGaN/GaN

Voilà le programme quand a fait, x.mesh à entre 0µm et 10µm a un espacement de 0.5µm, pour y.mesh est défini d'une façon suivant : de 0µm à 0.1µm a un espacement de 0.5 µm et 2 µm respectivement, puis pour y.mesh entre 0.1µm à 0.7 µm l'espacement change à 2µm à 0.05µm. et de 0.7µm à 1.4µm a un espacement de 0.05 et 0.05 respectivement, y.mesh entre 1.4 µm à 2.9 µm l'espacement de 0.05µm à 0.05µm respectivement, puis pour y.mesh entre 2.9 µm à 3µm l'espacement change à 0.05µm à 1µm

III.1.6.2. 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 cinq régions, les limites de chaque région sont explicitement identifiées dans les axes x et y. Il reste à attribuer pour chaque région un matériau.

```
#
region num=1 x.min=0.0 x.max=10.0 y.min=0.0 y.max=0.1 material=al
region num=2 x.min=0.0 x.max=10.0 y.min=0.1 y.max=0.7 material=InGaN
region num=3 x.min=0.0 x.max=10.0 y.min=0.7 y.max=1.4 material=GaN
region num=4 x.min=0.0 x.max=10.0 y.min=1.4 y.max=2.9 material=InGaN
region num=5 x.min=0.0 x.max=10.0 y.min=2.9 y.max=3 material=al
#
```

Figure III. 5: Code pour définir les régions

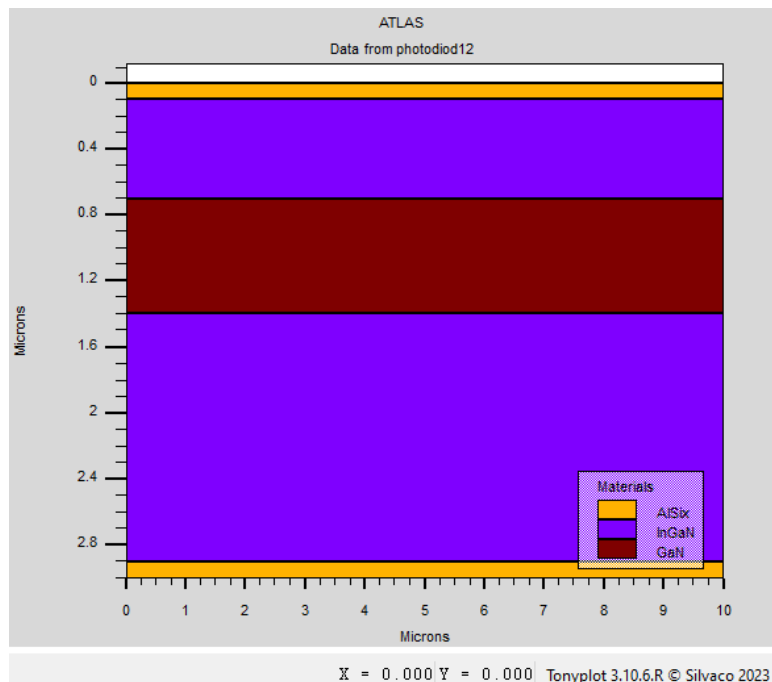


Figure III. 6: la représentation de différentes régions PIN InGaN /GaN

III.1.6.3. La spécification des électrodes :

Les électrodes sont la prochaine exigence de la structure. Dans notre simulation, il n'y a que deux électrodes : l'anode et la cathode.

Le format pour définir les régions est le suivant :

ELECTRODE NAME=<electrodename><position parameters>

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

```
#
elec num=1 name=anode    x.min=0.0  x.max=10.0  y.min=0.0  y.max=0.1  material=al
elec num=2 name=cathode  x.min=0.0  x.max=10.0  y.min=2.9  y.max=3    material=al
```

Figure III. 7: Code pour définir les électrodes

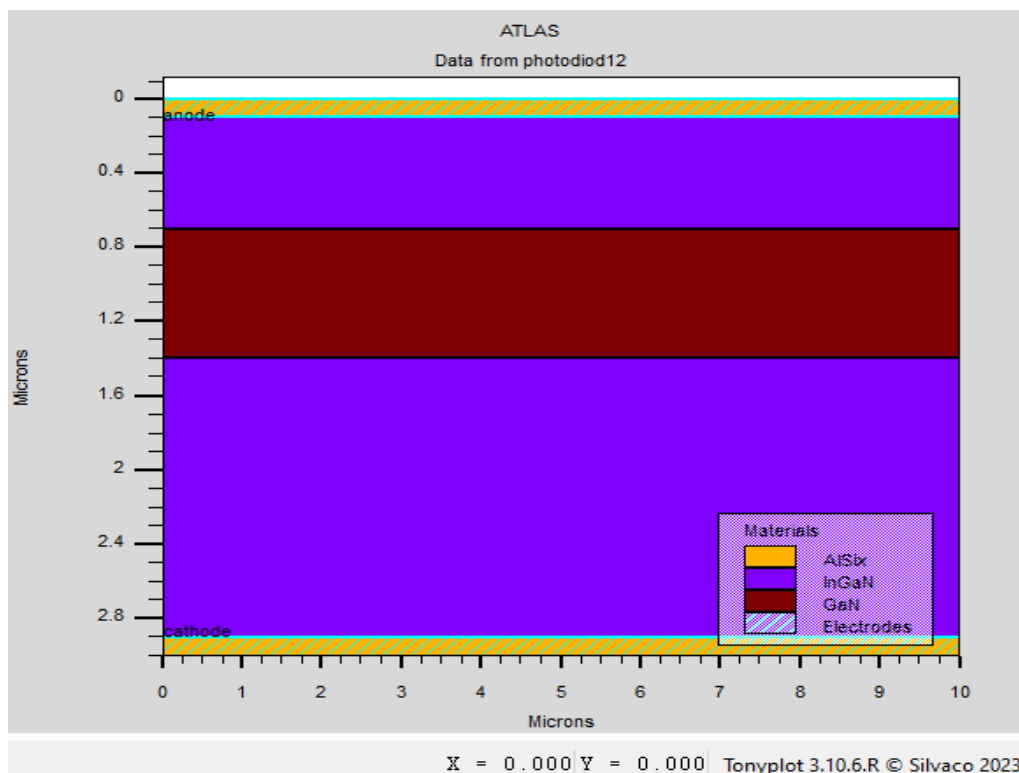


Figure III. 8: d'électrodes dans la photodiode PIN InGaN /GaN

III.1.6.4 La spécification du dopage :

Le dopage est une autre partie de la structure qui doit être définie.

L'instruction suivante est utilisée pour formater la déclaration de dopage dans ATLAS :

DOPING<distribution type><dopant_type><position parameters>

```
doping uniform region=2 p.type conc=3e18
doping uniform region=4 n.type conc=3e17
```

Figure III. 9: Code pour définir les dopages.

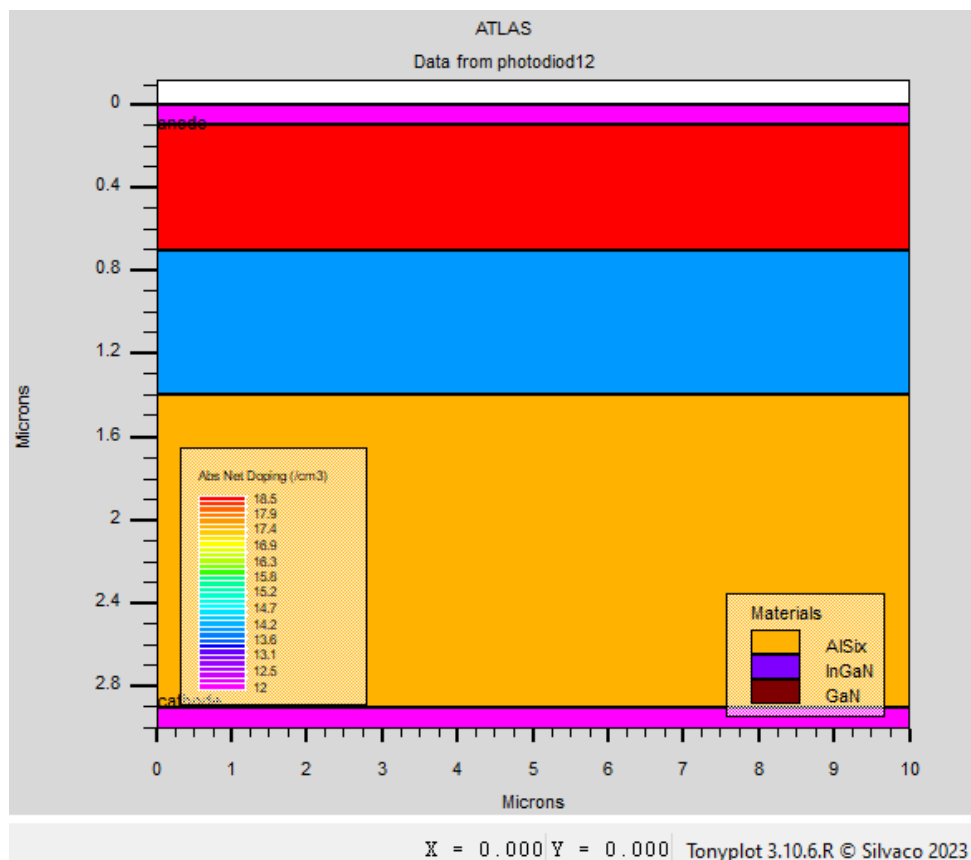


Figure III. 10: La structure du dopage InGaN/GaN de photodiode PIN.

III.1.7. Spécification des modèles des matériaux :

Après avoir choisi le maillage et le dopage, il suffit de modifier les propriétés des matériaux Utilisés (électrodes, substrat) et de modifier les paramètres qu'ATLAS utilise par défaut, ainsi Que de définir notre modèle physique préféré pour la simulation. Ces actions sont accomplies Par les instructions suivantes : CONTACT, MATERIAL et MODELS.

III.1.7.1. Spécification du matériel :

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

MATERIAL <localisation><material_définition>

Exemple :

material material=InGaN

material material=GaN

Dans notre exemple, lorsque MATERIAL apparaît le premier, il est considéré comme commande. Lorsque MATERIAL apparaît une seconde fois, il est considéré comme un paramètre de localisation.

III.1.7.2. Spécification du modèle :

La mobilité, la recombinaison, les statistiques des porteurs, l'ionisation par impact et les tunnels sont les cinq types de modèles physiques. Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT.

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 oprt print
models srh auger conmob fldmob

III.1.7.3. Spécification du 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=cathode current

III.1.8. Sélection de la méthode numérique :

Suite à la spécification du modèle de matériau, la méthode numérique doit être donnée. « Method » est la seule commande qui peut être utilisée pour sélectionner une méthode numérique.

Pour les solutions informatiques au problème des dispositifs semi-conducteurs, il existe de nombreuses méthodes numériques.

Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, on nomme deux types :

- Méthode de Gummel
- Méthode de Newton trap

III.1.9. Spécification des solutions :

Après avoir choisi une méthode numérique, l'étape suivante consiste à spécifier la solution.

La spécification de solution se décompose des commandes suivantes :

a. Log : Dans un fichier, LOG enregistre toutes les propriétés du terminal. Après une commande LOG, toutes les données de type DC, transitoires ou AC créées par la commande SOLVE sont enregistrées. 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.

c. Beam : Le numéro du faisceau optique lors de l'analyse de photo génération 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.

d. Load et save : La commande LOAD utilise des solutions de fichiers précédentes comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE enregistre toutes les données associées à un point de nœud dans un fichier de sortie.

Partie 2 : Résultats de la simulation numérique :

III.2.1. Etude des caractéristiques des photodiodes à base d'hétérostructure InGaN/GaN :

III.2.1.1 Etude des caractéristiques courant-tension I(V) :

Les caractéristiques courant-tension I(V) de la photodiode à base d'hétérostructure InGaN/GaN pour les tensions inverse allant de 0 ; 16(V) avec un pas de 0.5 volt sont illustrées par la figure III.13

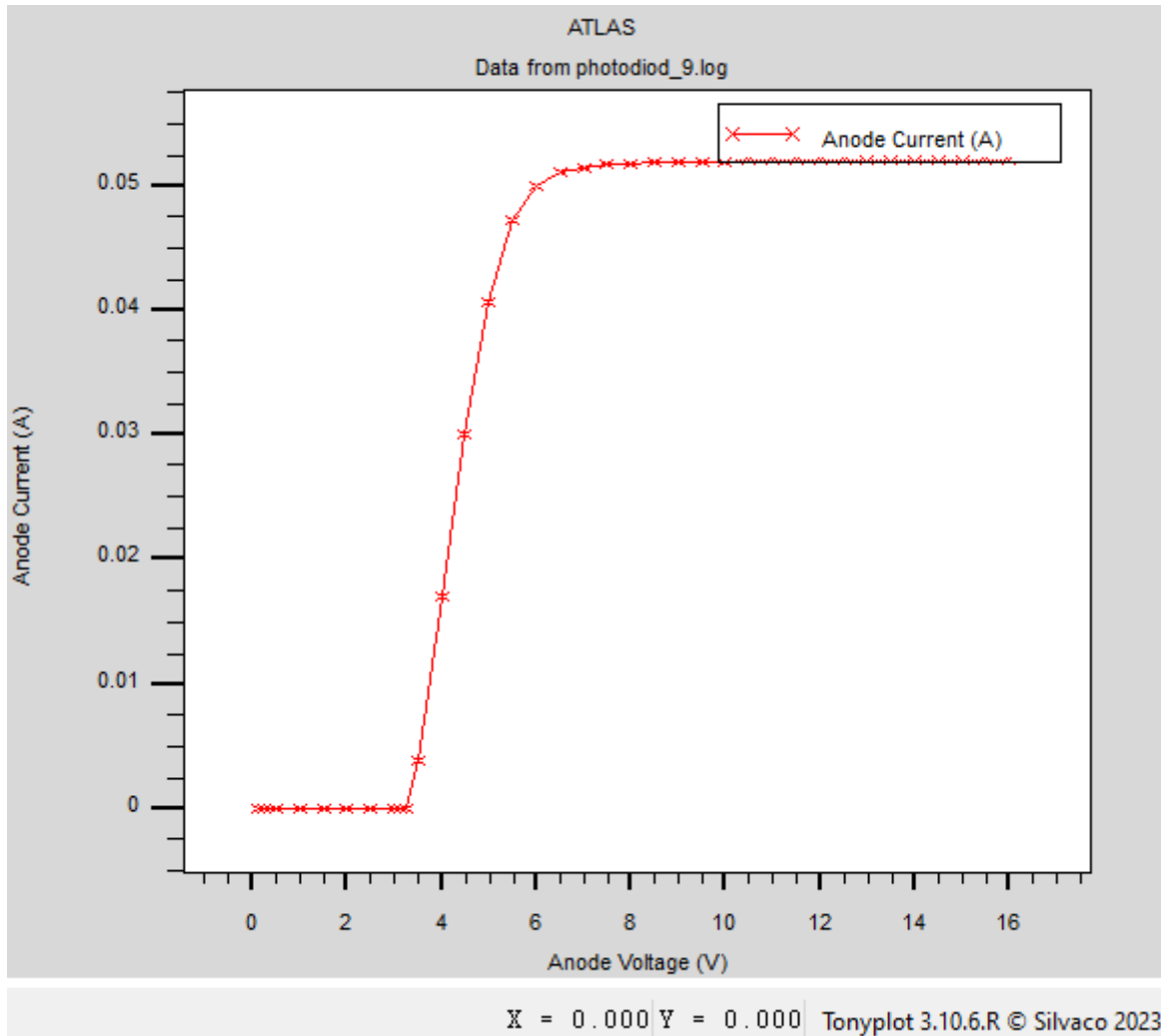


Figure III. 11: Les caractéristiques courant d' cathode–tension

Les propriétés courant-tension I(V) sont les propriétés principales de la photodiode. Le courant évolue linéairement en fonction de la tension appliquée ; plus la tension est élevée, plus le mouvement des électrons dans le canal est important ; ainsi, une augmentation du courant à partir de 8 volts provoque l'effet de saturation, le courant de la cathode est ainsi quasiment constant en fonction des tensions d'anode.

III.2.2. Etude comparative entre PN et PIN basée sur InGaN/GaN en fonction des caractéristiques électriques :

Nous avons introduit la structure de la photodiode PIN en appliquant les mêmes paramètres que la photodiode PN et nous obtenons ce résultat :

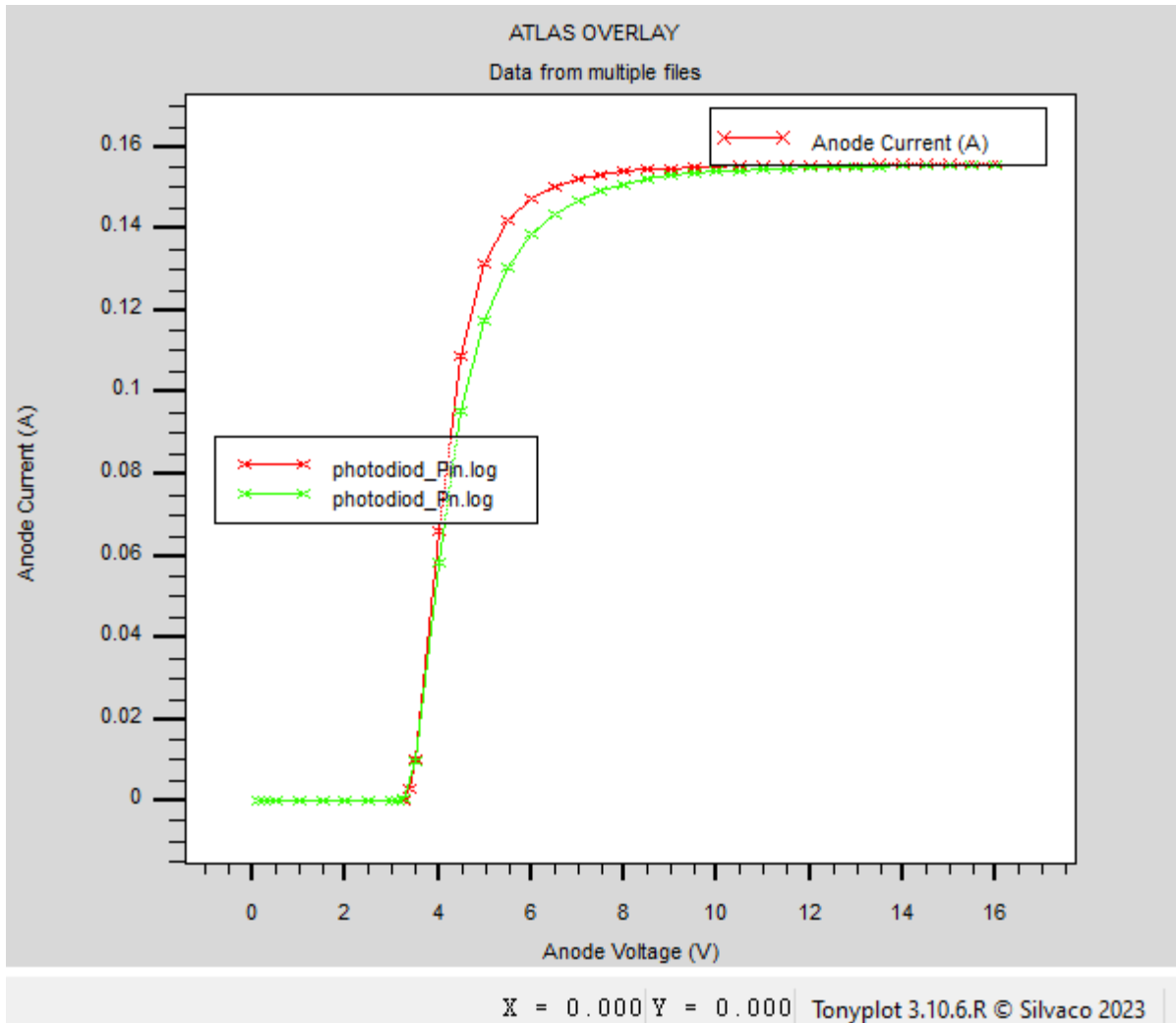


Figure III. 12: Les caractéristiques courant-tension $I(V)$ Pour les tensions de deux photodiodes PN et PIN

Cette figure montre que le courant de la photodiode PIN a augmenté par un petit pourcentage en comparant avec le courant de la photodiode PN, ceci est principalement dû à l'introduction du diélectrique dans la l'hétérojonction PN, qui a une plus grande zone de charge d'espace ZCE. Lorsqu'on applique l'énergie lumineuse à la photodiode PIN, les paires de trous et d'électrons sont générées dans la ZCE, ceci implique une augmentation du courant.

III.2.3. Etude comparative entre photodiodes PIN à base de InGaN/GaN, AlGaAs/GaAs et InGaAs/GaAs selon les caractéristiques électriques :

Nous avons obtenu le résultat suivant en comparant trois photodiodes PIN, l'une à base d'hétérojonction InGaN/GaN et l'autre à base d'AlGaAs/GaAs et la dernière à base d'InGaAs/GaAs.

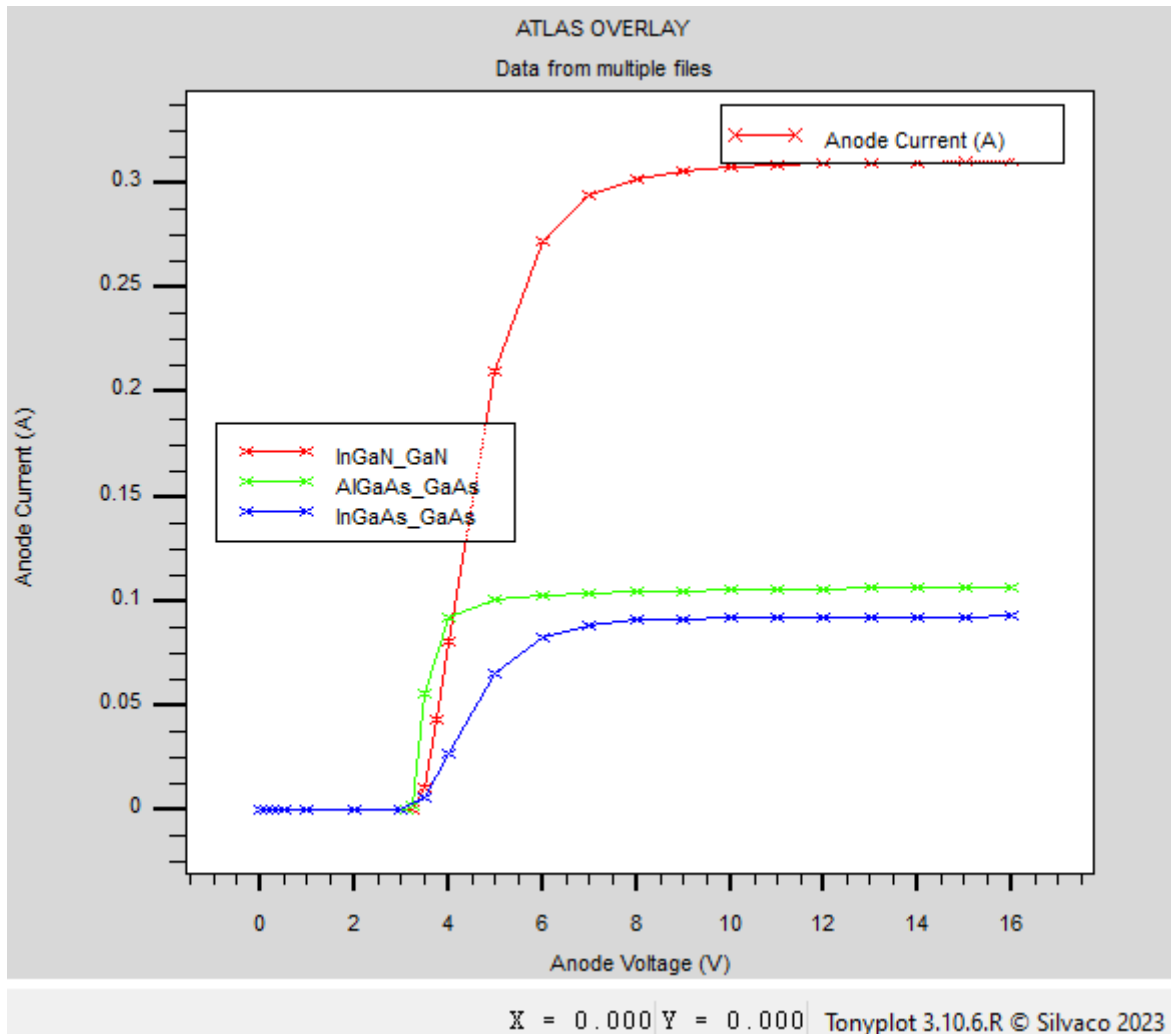


Figure III. 13: Les caractéristiques courant-tension $I(V)$

L'insertion de GaN dans la structure PIN étudiée, cela a entraîné une augmentation de la densité de porteurs libres et par conséquent, une augmentation du courant I. Par rapport à d'autres photodiodes à base d'AlGaAs/GaAs et InGaAs/GaAs, la structure PIN à base d'InGaN/GaN a les meilleures propriétés électriques.

III.2.4. Influence des paramètres technologiques :

III.2.4.1. L'effet du dopage de la couche InGaN :

Nous allons étudier l'influence du dopage de la couche InGaN sur les caractéristiques électriques I(V) de la photodiode proposée ; les paramètres donnés suivants : le dopage de InGaN est de 5×10^{20} , 5×10^{19} et 5×10^{17} , l'épaisseur de la couche InGaN est de $1.6 \mu\text{m}$.

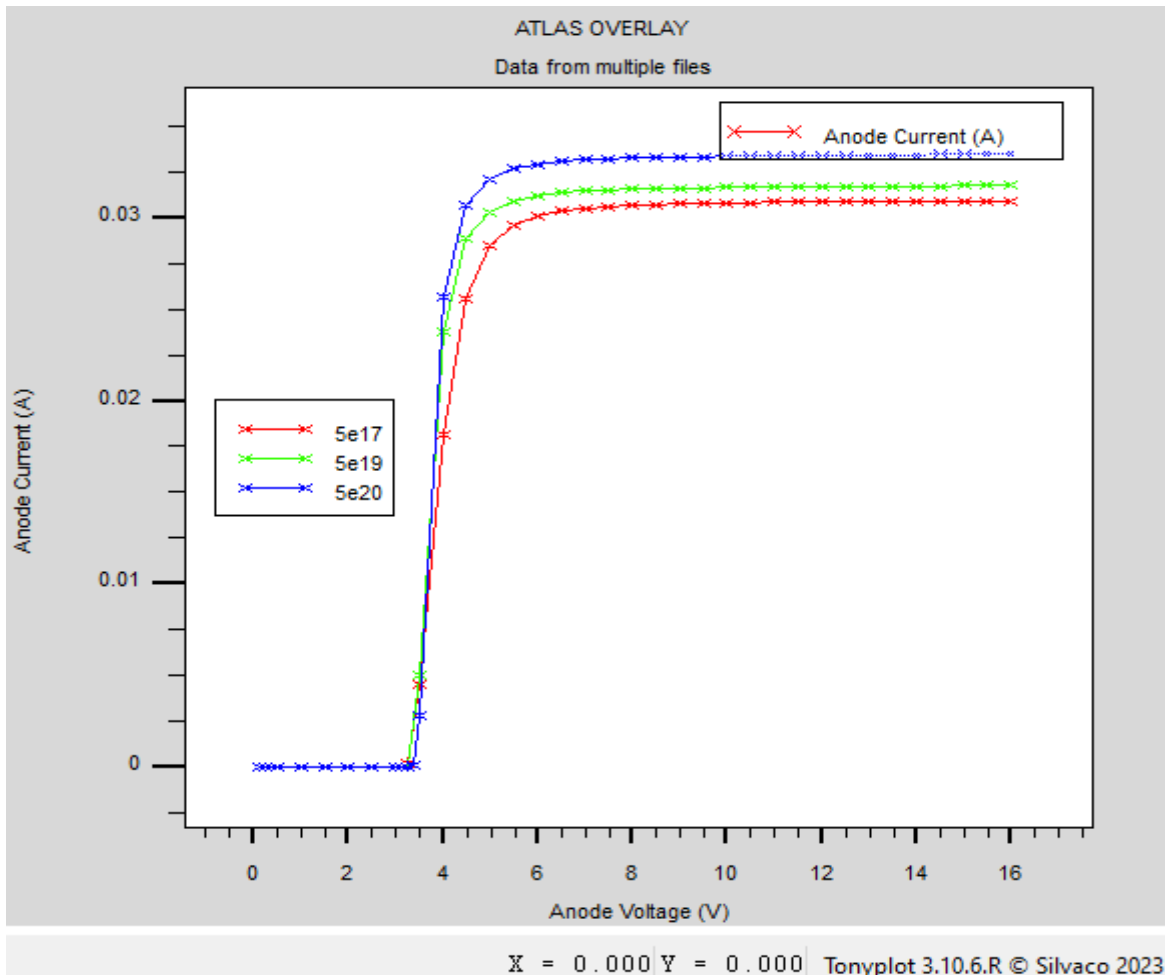


Figure III. 14: L'effet du dopage de la couche InGaN sur les caractéristiques électriques I(V).

Nous avons noté que le courant maximum fluctue avec la quantité de dopage dans la couche d'InGaN, à mesure que le niveau de dopage augmente, la densité électronique augmente en raison de la disponibilité accrue d'électrons libres.

III.2.4.2. L'effet de la fraction molaire :

Nous varions la fraction molaire de la couche InGaN, et on obtient les résultats affichés dans la figure III.17 :

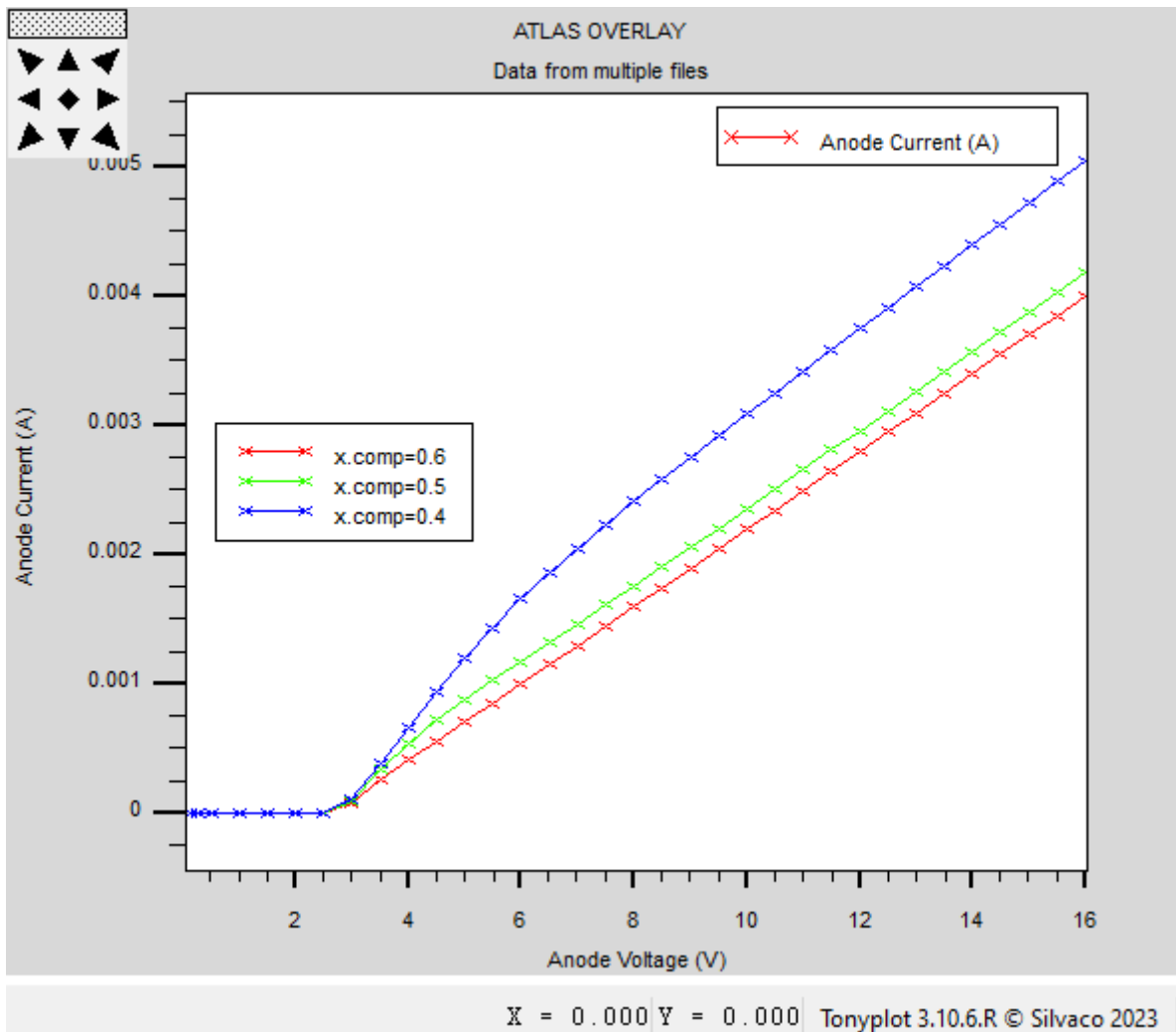


Figure III. 15: Caractéristiques $I(V)$ en fonction de la fraction molaire x de la couche InGaN.

L'influence de la fraction molaire d'aluminium dans l'alliage InGaN sur les caractéristiques courant-tension de la structure InGaN/GaN a été simulée. Nous remarquons par la suite que l'augmentation de la fraction molaire x de la couche d'InGaN a pour effet principal d'augmenter le courant.

III.2.5. Influence des paramètres technologiques de la structure sur les caractéristiques électriques :

III.2.5.1. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche InGaN :

Nous allons varier l'épaisseur de la couche InGaN non dopée de notre modèle dans un intervalle allant de 0.3 μm à 3 μm , le résultat obtenu est le suivant :

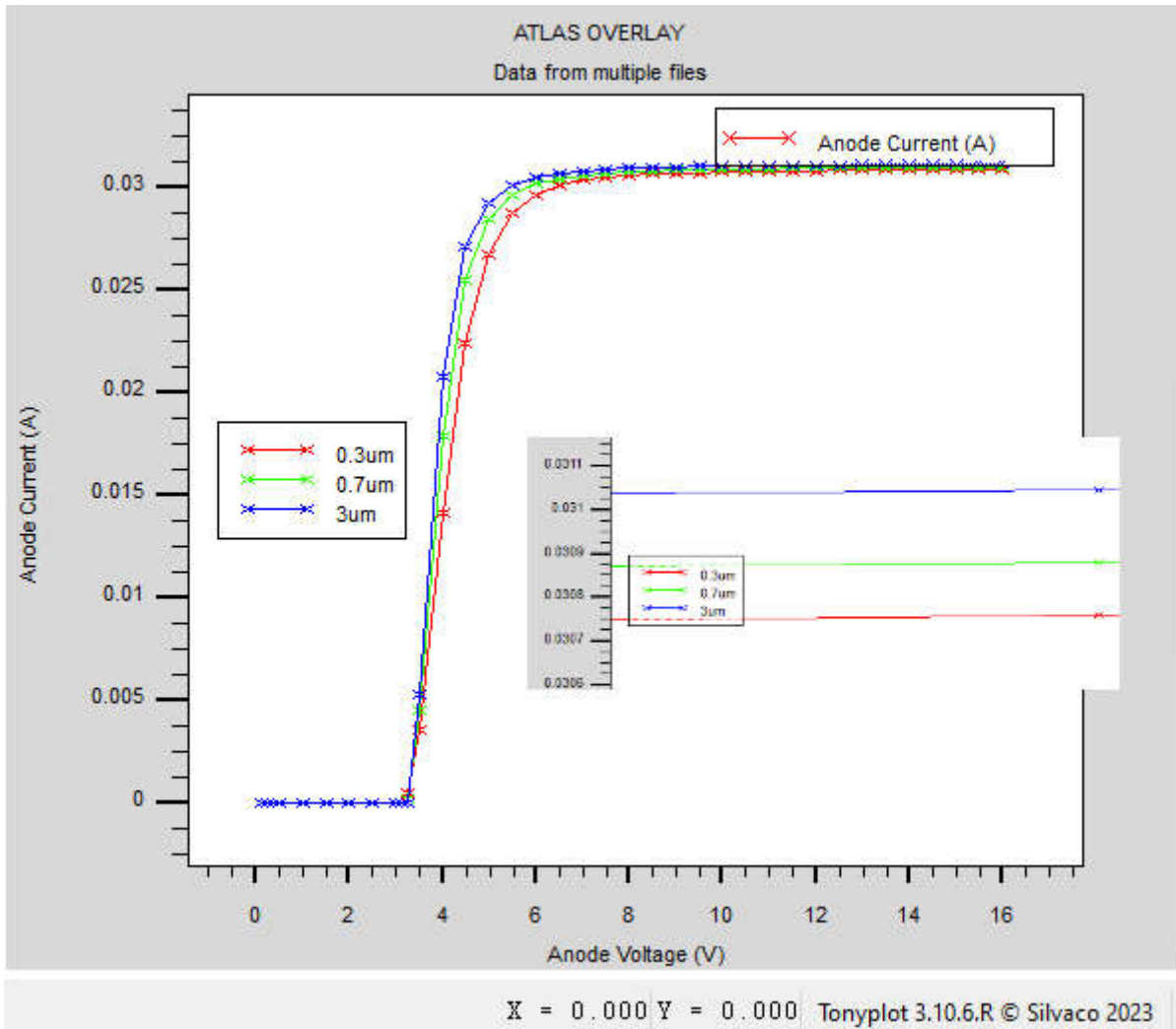


Figure III. 16: Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes Épaisseurs de la couche InGaN.

La densité de courant est proportionnelle à l'épaisseur de la couche d'InGaN, comme le montre ce diagramme. En raison de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres, le courant de la photodiode augmente à mesure que l'épaisseur de la couche d'InGaN augmente, améliorant les performances du dispositif.

III.2.5.2. Effet de la variation de l'épaisseur de la couche GaN :

Nous allons faire varier l'épaisseur de la couche GaN de notre modèle dans un intervalle allant de 0.4 μm à 2 μm , on obtient alors le résultat suivant

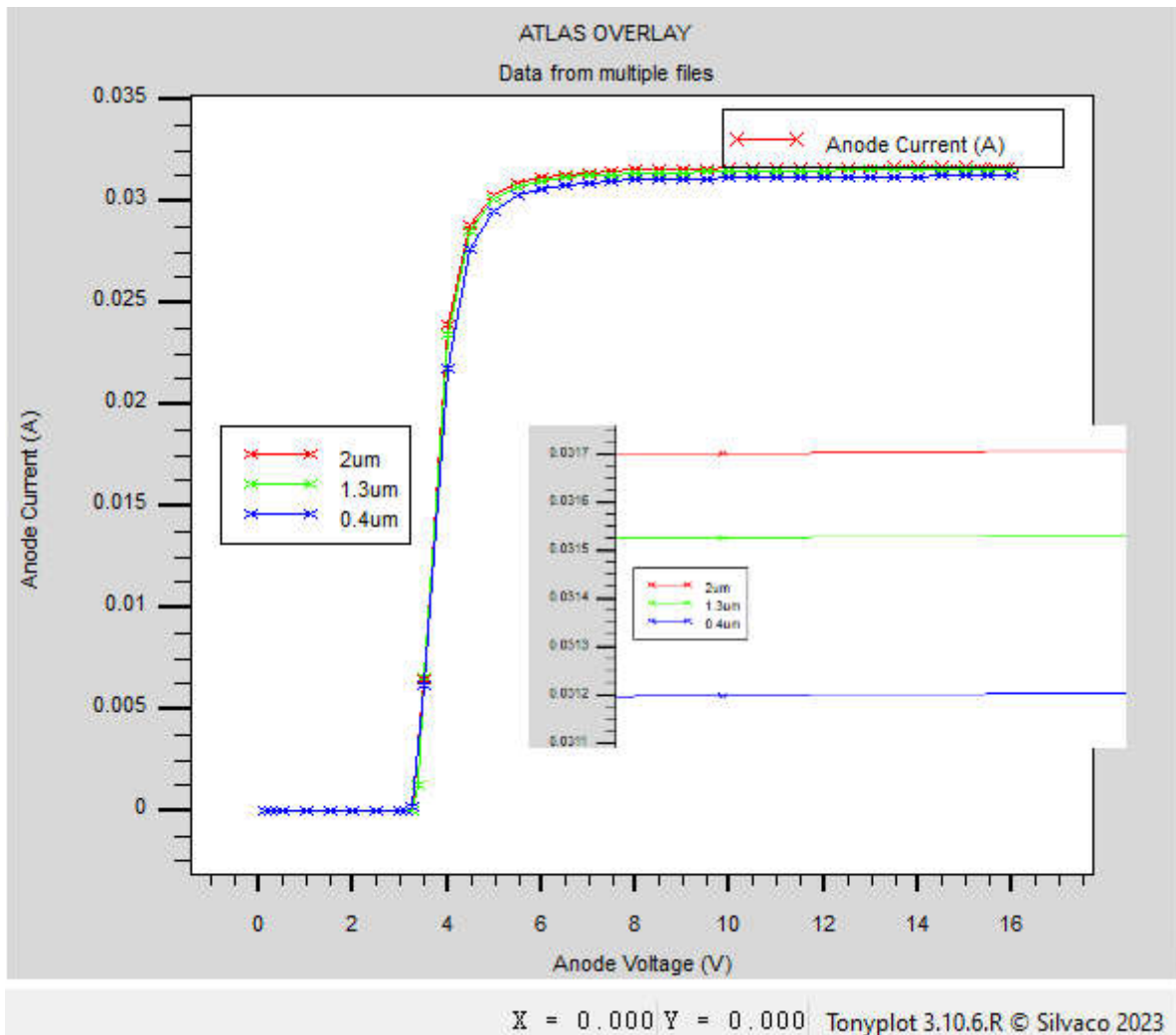


Figure III. 17: Caractéristiques courant-tension de la structure pour différentes Épaisseurs de la couche GaN.

Nous remarquons que la densité du courant est proportionnelle à l'épaisseur de la couche GaN, le courant de la photodiode augmente alors légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche réceptrice.

III.2.6. L'effet de la température sur les caractéristiques électriques :

Nous varions la température d'une photodiode PIN à base de InGaN/GaN on obtient les résultats Suivants :

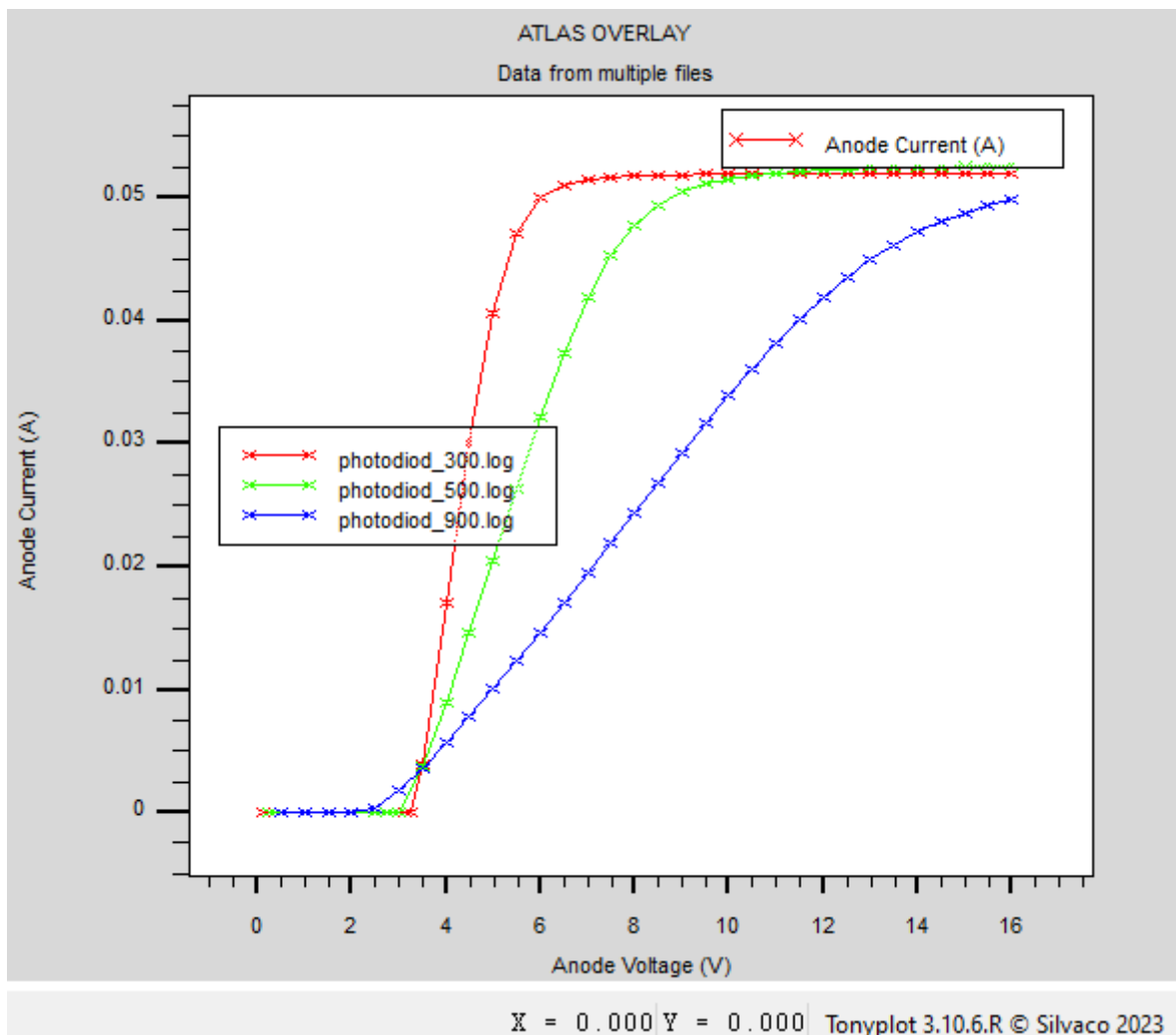


Figure III. 18: Les caractéristiques courant d'une photodiode PIN (InGaN/GaN) pour la gamme de température [300-900] K.

Nous remarquons que le courant diminue à mesure que la température augmente dans ce diagramme.

III.7. Conclusion :

Le module de simulation Silvaco TCAD a été vu dans ce chapitre.

La structure PIN de la photodiode que nous avons étudiée a été présentée, puis nous avons comparé les structures des photodiodes PIN à base d'InGaN/GaN et AlGaAs/GaAs.

Nous avons finalement étudié les effets des paramètres physiques et technologiques sur les caractéristiques électriques $I(V)$ avec InGaAs/GaAs et avons obtenu les résultats les plus efficaces.

L'objectif de cette recherche est de déterminer les performances optimales de la photodiode suggérée pour l'utilisation dans une chaîne de transmission par fibre optique. Les résultats actuels soutiennent l'idée que l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ est le meilleur choix pour la photodétection, et les résultats ont montré que l'InGaN est un matériau très prometteur et un bon candidat pour une application dans les photodétecteurs

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans le domaine de l'optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V offrent des avantages indéniables. On peut citer quelques exemples de composés binaires et tertiaires tels que le GaAs, le GaN, l'In^P, l'InGaN et l'AlGaAs. Ces matériaux présentent des propriétés extrêmement intéressantes pour améliorer les performances des dispositifs optiques. En effet, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, ils génèrent des porteurs qui, s'ils ne se recombinent pas, peuvent contribuer au courant du composant. C'est pourquoi les jonctions PN et PIN sont largement utilisées dans ces dispositifs.

Les résultats obtenus dans cette étude confirment globalement que l'utilisation de l'InGaN est le choix optimal pour les applications de photo-détection, ayant une influence significative sur les performances des photodiodes PIN à base d'InGaN/GaN. Notre travail s'est articulé autour de trois chapitres passionnants:

Le premier chapitre s'est concentré sur une exploration approfondie des caractéristiques électriques, électroniques, structurelles, optiques et thermiques des semi-conducteurs à base de nitrure de gallium (GaN).

Nous sommes ensuite passés au deuxième chapitre, où nous avons approfondi l'étude des photodétecteurs à base de nitrure de gallium, en examinant les différentes variantes (PN, PIN, etc.) ainsi que leurs caractéristiques, leur montage et les avantages des photodiodes PIN par rapport aux autres variantes.

Au cours de cette étude, nous avons optimisé la structure d'une photodiode PIN basée sur l'InGaN/GaN et étudié l'incidence de différents paramètres physiques et technologiques. Nous avons également comparé les caractéristiques électriques d'une photodiode PN et d'une photodiode PIN. De plus, nous avons réalisé une deuxième comparaison en utilisant la même structure PIN, mais en variant les matériaux, tels que l'InGaN/GaN, l'AlGaAs/GaAs et l'InGaAs/GaAs.

Nous avons étudié l'impact de divers facteurs physiques et technologiques sur la structure PIN basée sur l'hétérojonction InGaN/GaN, tels que le dopage dans différentes couches, l'épaisseur de la couche donneuse et accepteuse d'InGaN, le taux d'aluminium, ainsi que l'effet de la variation de la température sur les caractéristiques électriques. Notre objectif était d'optimiser les performances afin d'obtenir un dispositif amélioré, adapté aux applications de télécommunication optique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Yacine Marouf, « Modélisation des cellules solaires en InGaN utilisant Atlas Silvaco » these Magister en Electronique l'Université de Biskra
- [2] BELAABAS Lamia et BELLABAS Ounaisa, « Simulation d'une diode électroluminescente organique sous ATLAS-SILVACO » these master en electronique, l'université de Tiziouzou
- [3] Houasni Youcef et Serier Abdellah « Etude d'un photo détecteur à base de GaN sous environnement SILVACO pour des applications en communication optique », université de Khemismiliana
- [4] [Software Installation and Registration - Silvaco](#)
- [5] M. Labidi, Thèse Doctorat, Univ Badji Mokhtar Annaba (2011).
- [6] Agnès Philippe, Formation doctorale: « Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium hexagonal cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus », Edition Eyrolles, 2009.
- [7] Olivier Bonnaud, « Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs », 2003.
- [8] 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.
- [9] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6 Ed. DUNOD (2009).
- 10] https://www.acedim.com/Cours/Modules2A/Module1/cha_1/cha_1_2_1.html
- [11] MEYER, B.K., HOFFMANN, A., THURIAN, P. Defect spectroscopy in the nitrides in Group III nitride semiconductor compound: physics and applications. Edited by B. GIL. Oxford: Clarendon press, 1998, pp. 243-306
- [12] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 4 Ed. Masson (1998).
- [13] E. Mooser, « Introduction à la Physique du solide », 1 Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes (1993).
- [14] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Semi-conducteur.html>
- [15] BRAHMIBadr-Eddine Nabil. « Etude ab-initio des propriétés structurales et électroniques des alliages ternaires des semi-conducteurs II-VI à base de zinc ». Thèse de Doctorat. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen. (2013).
- [16] A. Chovet, P. Masson « Physique des semi-conducteurs », Département Micro-électronique et télécommunications, 2005
- [17] <https://bu.umc.edu.dz/theses/electronique/BAO6578/G.Chapitre%201.pdf>

Bibliographie

- [18]E. Cassan « Une introduction aux télécommunications optiques par la simulation des systèmes simples » (IEF, Université Paris-Sud Orsay), 2003.
- [19]Aib Samia « modélisation d'un photodétecteur dans une chaîne de transmission par fibre optique » université Mentouri Constantine.
- [20]Hassan Ali Barkad « conception et réalisation de photodétecteurs x-uv à base de matériaux à large bande interdite destinés à des applications spatiales » Université de Lille, 2009.
- [21]: Thomas Chalopin. « Montage et caractérisation d'un photodétecteur pour une détection hétérodyne optique. Formation Interuniversitaire de Physique - ENS. Pierre-François Cohadon et Leonhard Neuhaus » Stage de L3. Juillet 2014.
- [22] <https://www.teamwavelength.com/photodiode-basics/>
- [23] QUADRI Gianandrea, Contribution à l'étude de liaisons optiques analogiques pour la distribution de signaux de référence en gammes RF et micro-ondes. Micro et nanotechnologie/Microélectronique. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2004
- [24]VERNEUIL Jean-Louis, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits », Université de Limoges, 2003.
- [25]BOUDRIOUA Nassima, « Etude et optimisation d'une chaîne de transmission numérique sur fibre optique: vers une compensation électronique de la PMD », Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, Metz, 2007.
- [26]ZOUINE Younes, Contribution à la simulation d'un système à l'étude des contraintes des composants opto-électroniques sur la transmission optique utilisant la technique CDMA, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2005.
- [27]MEDJDOUB Fadila, Optimisation par la simulation d'un système de chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit, Diplôme de Magister en télécommunication, Université Abou-Bekr Belkaid, Tlemcen, 2010.
- [28]CHEE CHIANG Derrick Tiew, « Frequency Domain Photocurrent Measurement », Thèse de doctorat, Université Monash, 2018.
- [29]Aurelien Lardeau-Falcy, « Dopage de couches de GaN sur substrat silicium par implantation ionique », 30 Oct 2018.
- [30]K. Zeghdar « Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Juin 2014.