

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR-EL OUED
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire

**Présenté par :Guemaz chaouki , Benamara karim , Saida
Aboubaker et Guitoubi chaima**

**Pour l'obtention du Diplôme de Master en Systèmes des
Télécommunications**

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Mémoire

**Etude et Simulation d'une Photodiode a bas de
GaN**

Devant le jury composé de :

- Mr. ABDELLATIF KHELIL	Université d'ElOued	Président
- Mr. CHEMSA ALI	Université d'ElOued	Encadreur
- Mr. SADOON ALI	Université d'ElOued	Co-Encadreur
- Mr. TOUHAMI RIDHA	Université d'ElOued	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à mes très chères parents qui m'ont soutenu pendant mes études et qui m'ont donné la force et le courage de les accomplir.

A mon frère
à mes soeurs
ainsi qu'à tous mes amis.

REMERCIEMENTS

▷ Louange à Allah, Maître des Mondes ; et paix et salut sur celui qu'Allah a envoyé comme miséricorde pour le monde entier, ainsi que sur sa Famille, ses Compagnons et ses Frères jusqu'au Jour de la Résurrection.

▷ Louanges à Allah qui, par sa bienfaisance, a permis et facilité la réalisation et l'achèvement de ce travail dans les meilleures conditions. Aussi, je souhaite faire ces remerciements en suivant les recommandations du prophète, que la paix et le salut soient sur lui, qui a dit : "Celui qui ne remercie pas les hommes ne remercie pas Allah".

▷ Mes vifs remerciements vont également à mon encadreur Dr. ALI SADOUN pour son aide et ses nombreux services.

▷ Enfin je remercie infiniment tous mes amis, mes collègues et surtout ma famille qui m'a toujours aidée et encouragée pour poursuivre mes travaux.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
1 Généralité sur GaN	3
1.1 Introduction	4
1.2 Les semi-conducteurs III-V :	4
1.3 Les composés binaires, ternaires et quaternaires des semi-conducteurs III-V :	4
1.3.1 Alliages ternaires	5
1.3.2 Alliages quaternaires	6
1.3.3 Alliages quinaires :	6
1.4 Propriétés structurales	7
1.5 Intérêt des semi-conducteurs III-V	7
1.6 Effets des perturbations extérieures sur les matériaux III-V	9
1.6.1 Effet de la température sur les III-V	9
1.6.2 Effet de la pression sur les matériaux III-V	9
1.7 Nitrure de gallium :	10
1.8 Propriétés optiques des semi-conducteurs III-V :	10
1.8.1 Phénomènes d'absorption dans les semi-conducteurs :	11
1.9 CROISSANCE DU GaN	11
1.9.1 Croissance EPVOM (Epitaxie Par Vapeur au Organométallique) [1]	12
1.10 Conclusion	13
2 Généralité sur les photodiodes	15
2.1 Introduction	15
2.1.1 Composants de réception	15
2.2 PHOTODETECTEURS A SEMI-CONDUCTEURS	16
2.2.1 Photodétection	16
2.3 Génération ou création de porteurs en excès	17
2.4 Photo-excitation	17
2.5 Caractéristiques optiques des photodiodes	19
2.5.1 Efficacité quantique ou Rendement quantique Q.E	19

2.5.2	Coefficient d'absorption :	19
2.5.3	Flux de photon Φ :	19
2.6	Caractéristiques électriques des photodiodes	20
2.6.1	Caractéristique courant - tension de photodiode	20
2.6.2	Résistance de série	20
2.6.3	Réponse temporelle et bande passante BP :	20
2.6.4	Photodiodes avec Gain :	21
2.7	Différents types des photodiodes	21
2.8	les Structures Photodiodes PIN et APD	21
2.9	Applications photodiodes	23
2.10	Conclusion	24
3	La photodétection	27
3.1	Introduction	28
3.2	Rayonnement	28
3.3	Emission et absorption de lumière	29
3.4	La photodétection	29
3.5	Photodétection avec les semiconducteurs :	30
3.5.1	Les grandes catégories de photo-détecteurs	30
3.5.2	Principes de base de la photodétection	31
3.6	Description de l'absorption.	32
3.6.1	Seuil d'absorption fondamental	32
3.6.2	La filière InP	34
3.6.3	La filière GaAs	35
3.7	Conclusion	36
4	Résultats et Interprétations	38
4.1	Introduction	39
4.2	Paramètres de simulation	39
4.3	Résultats et Interprétations	40
4.3.1	les caractéristiques courant-tension I(V) de la structure	40
4.3.2	Influence des propriétés physiques du matériau sur les caractéristiques électriques du composant Au/Ni/AlGaN/-GaN	40
4.3.3	Réponse spectrale	43
4.4	Conclusion	44
	Conclusion générale	47
	Annexe1	49

TABLE DES FIGURES

1.1	<i>Tableau périodique partiel [1].</i>	4
1.2	<i>Les différentes structures de GaN : de type (a) wurtzite, (b) Zinc blende [4].</i>	7
1.3	<i>Phénomène d'absorption.</i>	11
2.1	<i>Principe de photodétection.</i>	16
2.2	<i>Les photons sont absorbés au cours de leur propagation dans le matériau.</i>	18
2.3	<i>La caractéristique courant - tension de la photodiode .</i>	20
2.4	<i>Structure de la photodiode PIN..</i>	22
2.5	<i>La photodiode à avalanche APD est un raffinement de la photodiode PIN.</i>	23
3.1	<i>Spectre optique</i>	28
3.2	<i>domaine Spectre optique</i>	29
3.3	<i>Phénomène d'absorption.</i>	32
3.4	<i>La courbe d'atténuation typique d'une fibre de silice.</i>	33
3.5	<i>Energie de bande interdite de différents matériaux en accord de maille sur InP.</i>	35
3.6	<i>Energie de bande interdite de différents matériaux en accord de maille sur GaAs.</i>	36
4.1	<i>la variation de (I) en fonction de la tension de polarisation des structure Au/Ni/AlGaIn/-GaIn [1].</i>	40
4.2	<i>L'effet du dopage sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/AlGaIn/-GaIn [1].</i>	41
4.3	<i>L'effet du épaisseur sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/Al-GaIn/GaIn [1].</i>	41
4.4	<i>L'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/Al-GaIn/GaIn .</i>	42
4.5	<i>L'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/Al-GaIn/GaIn entre .</i>	43
4.6	<i>la réponse spectrale..</i>	44

LISTE DES TABLEAUX

1.1	<i>paramètres caractéristiques pour quelque binaires III-V.</i>	5
1.2	<i>Propriétés importantes des six III-V : GaAs, InAs, AlAs, GaN, AlN, et InN.</i>	8
1.3	<i>Paramètres $E_g(0)$, α, et β pour quelques matériaux III-V.</i>	9
2.1	<i>comparaison entre Différents types des photodiodes .</i>	21
3.1	<i>le seuil d'absorption fondamental pour quelques matériaux semiconducteurs.</i>	33
4.1	<i>les paramètres physiques, électriques et technologiques de simulation</i>	39

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le nitrure de gallium (GaN) est reconnu comme l'un des composés semiconducteurs les plus intéressants, bien adapté pour fonctionner dans toute application dans laquelle les températures environnementales ou le niveau de rayonnement pourraient endommager l'électronique traditionnelle en silicium (Si) ou en arséniure de gallium (GaAs) [1]. Par rapport aux matériaux plus conventionnels, les propriétés les plus intéressantes du GaN sont son énergie à large bande interdite, sa vitesse de saturation élevée des porteurs, sa conductivité thermique et sa stabilité élevées, son champ électrique de claquage élevé. et capacité à former des hétérostructures de haute qualité avec de bonnes propriétés de transport [2]. Ces dernières années, un grand nombre de dispositifs à base de GaN, tels que des diodes électroluminescentes, des diodes laser, des photodétecteurs et des détecteurs de rayonnement ont été proposés [3-5].

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

De cette façon, les jonctions PN et PIN sont largement utilisées comme dispositifs optiques, puisque le champ électrique présent dans la couche d'appauvrissement formée entre les deux régions (P et N) agissent pour séparer les paires électron-trou et pour augmenter le courant inverse de la diode. En outre, plus la

Notre objectif à d'optimiser les meilleures performances de la photodiode PIN en AlGaN/GaN pour l'utilisation dans une chaîne de transmission par fibre optique. Les résultats actuels confirment globalement que l' $Al_xGa_{1-x}N$ représente le meilleur choix dans le domaine de la photo détection.

La réalisation du présent travail est répartie en quatre chapitres, dans le premier chapitre nous passerons de quelque notion de base sur les caractéristiques et les propriétés du GaN sur le plan structurel, électrique, et optique.

Dans Le deuxième et le troisième chapitre, sera consacré à l'étude théorique des phénomènes physiques et nous avons les généralités sur les photodiodes et leurs principes de fonctionnement.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la structure du PIN en AlGaN/-GaN et ensuite nous avons changé les paramètres physiques et technologiques donnant les meilleurs performances de la structure PIN à base d'hétérostructure AlGaN/GaN.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos principaux résultats et présentées quelques perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR GAN

1.1 Introduction

Durant ces dernières années, le développement des composées III-V a été spectaculaire. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures à celles des semiconducteurs plus classiques comme le silicium. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications micro-électroniques et optoélectroniques. Afin de pouvoir réaliser des composants électroniques ou optoélectroniques à base de nitrure de gallium (GaN), nous sommes censés connaître les différentes propriétés de ce matériau et les problèmes rencontrés au cours de son élaboration. nous présentons dans ce chapitre, les propriétés générales des nitrures à savoir leurs structures cristallines ainsi que leurs propriétés électroniques.

1.2 Les semi-conducteurs III-V :

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à base d'un élément de la colonne V et d'un élément de la colonne III du tableau périodique de Mendeleïev (figure 1.1). Ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés.

5 B Bore 2.04	6 C Carbone 2.55	7 N Azote 3.04
13 Al Aluminium 1.61	14 Si Silicium 1.9	15 P Phosphore 2.19
31 Ga Gallium 1.81	32 Ge Germanium 2.01	33 As Arsenic 2.18
49 In Indium 1.78	50 Sn Étain 1.96	51 Sb Antimoine 2.05

FIGURE 1.1 – Tableau périodique partiel [1].

1.3 Les composés binaires, ternaires et quaternaires des semi-conducteurs III-V :

Les alliages semi-conducteurs sont classés en plusieurs groupes selon le nombre de constituants : $\triangleright$ Alliages binaires : Les alliages binaires sont de la forme $A^{III}B^V$. Le tableau I-1 [2] résume quelques composés binaires avec leurs paramètres principaux. Avec E_g : énergie de bande interdite.

Composé III-V	$E_g(\text{eV})$	$\lambda_g(\mu\text{m})$	m^*/m_0	$a_0(\text{\AA})$	Structure de la bande interdit
BN	≈ 7.5	0.17		3.615	indirect
AlP	2.45	0.51		5.463	indirect
AlAs	2.16	0.57		5.661	indirect
AlSb	1.58	0.75	0.12	6.138	indirect
GaP	2.26	0.55	0.82	5.449	indirect
GaAs	1.42	0.87	0.063	5.653	direct
GaSb	0.72	1.85		6.095	direct
InP	1.35	0.92	0.08	5.868	direct
InAs	0.36	3.44	0.023	6.058	direct
InSb	0.17	7.30	0.014	6.479	direct

TABLE 1.1 – paramètres caractéristiques pour quelque binaires III-V.

λ_g : longueur d'onde du seuil d'absorption.

m^* : masse effective des électrons.

a_0 : paramètre de réseau.

1.3.1 Alliages ternaires

Alliages ternaires : nous avons deux types : Alliage ternaire anionique : $A^{III}B^V_xC^V_{1-x}$
Alliage ternaire cationique : $A^{III}B^V_{1-x}C^V$ Ces alliages sont caractérisés par la présence du coefficient stoechiométrique x . Cidessous, on citera les alliages ternaires les plus importants et les plus étudiés :

1- la gamme des Arséniures (Arsenides) : nous avons le AlGaAs qui est son rôle clé dans une variété de dispositifs optoélectroniques et transistors, GaInAs est un élément clé dans les régions actives de périphériques électroniques à haut débit et AlInAs servant d'une couche barrière dans les systèmes hétéro-structures.

2- La gamme des phosphures (phosphides) : nous avons le GaInP qui présente une large bande interdite parmi les semi-conducteurs III-V non nitrures, AlInP a un gap direct lorsque $x = 0.44$ pour $E_g = 2.4 \text{ eV}$ et AlGaP a un gap direct pour toute concentration.

3- La gamme des antimoniures (antimonides) : nous avons le GaInSb, AlInSb et AlGaSb.

4- La gamme antimoniures arséniures (arsenides antimonides) : nous avons le GaAsSb, InAsSb et AlAsSb.

5- La gamme des phosphures arséniures (Arsenides phosphides) : nous avons le GaAsP, InAsP et AlAsP.

6- La gamme des antimoniures phosphures (Phosphides antimonides) : nous avons

le GaPSb, InPSb et AlPSb.

7- La gamme des nitrures (Nitrides) : nous avons le GaInN, AlGaN, AlInN . GaAsN, GaPN, InPN, InAsN, BGaN et BaIN.

1.3.2 Alliages quaternaires

Alliages quaternaires : il existe deux types de solutions : Les solutions quadratiques : $A^{III}_{1-x}B^{III}_xC^V_yD^V_{1-y}$ Les solutions triangulaires : on distingue : Des solutions purement anioniques $A^{III}B^V_xC^V_yD^V_{1-x-y}$. Des solutions purement cationiques $A^{III}_xB^{III}_yC^{III}_{1-x-y}D^V$. Ces alliages sont caractérisés par la présence de deux coefficients stoechiométriques x et y.

On peut classer les quaternaires en fonction des substrats qui correspondent [3].

▷ **Les quaternaires en accord de maille avec GaAs :**

1. AlGaInP
2. GaInAsP

▷ **Les quaternaires en accord de maille avec InP :**

1. GaInAsP
2. AlGaInAs

▷ **Les quaternaires en accord de maille avec InAs :**

1. GaInAsSb
2. AlGaAsSb

▷ **Les quaternaires en accord de maille avec GaSb :**

1. GaInAsSb
2. AlGaAsSb

1.3.3 Alliages quinaires :

à titre d'exemple : l'Arséniure-antimoniure-nitrure de galliumindium (GaIn-NAsSb) et l'Arséniure-antimoniure-phosphure de galliumindium (GaInAsSbP).

La plupart des matériaux structure, qui s'apparente à celle du diamant «centrées. Le nitrure de gallium se présente sous type wurtzite, blende et NaCl. Celle de type wurtzite est la plus stable thermodynamiquement. Celle de type NaCl est la variété haute pression de GaN

structure wurtzite La structure wurtzite est consti de gallium, l'autre avec les atomes d'azote

structure blende de zinc La structure zinc blende présentée sur la fig. 1.2, qui s'apparente à celle du diamant, est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un étant constitué des atomes de l'élément III, l'autre des atomes de l'élément N (nitrure). Ces deux sous-réseaux sont décalés l'un par rapport à l'autre le long de la diagonale du cube d'une quantité $(a/4, a/4, a/4)$. a étant le paramètre cristallin (paramètre de réseau) c'est-à-dire la longueur de l'arête du cube élémentaire.[5]

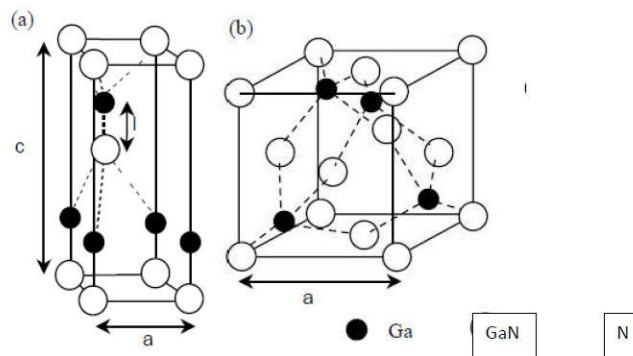


FIGURE 1.2 – Les différentes structures de GaN : de type (a) wurtzite, (b) Zinc blende [4].

1.4 Propriétés structurales

1.5 Intérêt des semi-conducteurs III-V

Auparavant, la technologie des composants actifs est basée essentiellement sur le silicium à cause de ses propriétés intrinsèques, sa structure cristallographique et la maîtrise de la fabrication pour obtenir un dispositif avec un peu de défaut. Cependant, les propriétés de silicium limitent sa performance, notamment en matière de rapidité des circuits et de fonctionnalité optoélectronique. Donc des recherches se sont élargies sur les composés III-V en particulier le GaAs et InP. Ces matériaux présentent de nombreux avantages [3,5] :

▷ Mobilité des électrons 4 à 6 fois plus élevée que le silicium.

- ▷ Mobilité des électrons 4 à 6 fois plus élevée que le silicium.
- ▷ Vitesse de saturation des électrons plus grande.
- ▷ Possibilité d'obtenir facilement un substrat semi-isolant qui permet l'isolation naturelle des circuits, donc diminue les effets capacitifs parasites et les courants de fuite.
- ▷ Structures de bandes à transition directe, permettent de réaliser à la fois des fonctions optiques et électroniques.
- ▷ Effet de survitesse présent aux champs fort, utilisable dans des composants submicronique extrêmement rapides.

Fonctionnellement, on observe généralement les effets de charge importants dans des pièges à l'interface isolant-semiconducteur et dans le volume de l'isolant, ce qui crée une dispersion en fréquence des caractéristiques, une dérive du point de fonctionnement et limite les variations possibles du potentiel de surface. Les oxydes natifs ont de faibles bandes interdites et ne présentent pas a priori une stoechiométrie bien définie.[6]

Paramètre	Ge	Si	InP	GaAs	GaP
Mobilité des électrons (non dopé) en $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	3900	1350	4600	8500	110
Mobilité des trous (non dopé) en $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	1900	475	150	400	75
Bande interdite en eV à 300°K.....	0.67	1.12	1.35	1.43	2.24
à 4°K.....	0.76	1.14	1.42	1.52	2.33
Structure des bandes	Indirecte	Indirecte	Directe	Directe	Indirecte
Structure de cristal	Diamant	Diamant	----- Zinc Blende -----		
Température de fonctionnement maximal (°C)	100	100	250	400	Haute
Longueur d'onde associée (μm)	1.85	1.13	0.97	0.87	
Conductivité thermique À 300°K ($\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0.7	1.45	0.68	0.54	
Barrière Schottky (eV) (type n)		$0.27\phi_{\text{m}}-0.55$	≈ 0.5	≈ 0.85	
Constante diélectrique (Fm^{-1})	16.0	11.9	12.35	13.13	
Affinité électronique (eV)	4.0	4.05	4.38	4.0	

TABLE 1.2 – Propriétés importantes des six III-V : GaAs, InAs, AlAs, GaN, AlN, et InN.

1.6 Effets des perturbations extérieures sur les matériaux III-V

En raison de l'importance des III-V pour la conception des dispositifs optoélectroniques, on s'est intéressé aux effets des perturbations extérieures (température, pression) sur leurs paramètres caractéristiques (constante de réseau, gap d'énergie,...). Plusieurs modèles ont été proposés tels celui de VARSHNI, pour étudier l'effet de température, et l'éq. de MURNAGHAN pour mettre en évidence l'effet de pression sur le gap de ces matériaux [8].

1.6.1 Effet de la température sur les III-V

Le gap d'énergie, quant à lui, il dépend de la température selon le modèle de VARSHNI[8] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha.T^2}{\beta + T} \quad (1.1)$$

α et β sont des constantes, elles sont de l'ordre de 1 meV/K et de 1000 K respectivement pour GaN massif de type würtzite [41].

Matériaux	$E_g(0)$ (eV)	α ($\times 10^{-4}$ eV)	β
AlN	6.25	-1.799	1462
AlAs	2.249	-6.00	408
GaN	3.510	-0.909	830
GaAs	1.519	-5.405	204
InN	0.78	-0.245	624
InAs	0.36		

TABLE 1.3 – Paramètres $E_g(0)$, α , et β pour quelques matériaux III-V.

1.6.2 Effet de la pression sur les matériaux III-V

Il est aussi nécessaire d'étudier le comportement des matériaux III-V (puisque'ils sont destinés à des applications technologiques(sous l'effet de la pression, comme perturbation extérieure, sur le paramètre de réseau qu'on déduit du volume décrit par l'éq. de MURNAGHAN [8] :

$$E_g(P) = E_g(0) - \alpha P \quad (1.2)$$

Les paramètres de réseau de quelques matériaux III-V liés aux valeurs expérimentales du module de compression et sa dérivée par rapport à la pression sont illustrés à la table I.5.

Matériaux	$E_g(0)$ (eV)	α ($\times 10^{-4}$ eV)	β
AlN	6.25	-1.799	1462
AlAs	2.249	-6.00	408
GaN	3.510	-0.909	830
GaAs	1.519	-5.405	204
InN	0.78	-0.245	624
InAs	0.36		

1.7 Nitrure de gallium :

Le nitrure de gallium (GaN) est un semi-conducteur à large bande interdite (3,4 eV) utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de grande puissance ou de haute fréquence. C'est un composé binaire (groupe III/groupe V) qui possède une semi-conductivité intrinsèque. Il est peu sensible aux rayonnements ionisants (comme tous les autres nitrures du groupe III), ce qui fait de lui un matériau approprié pour les panneaux solaires des satellites. Le nitrure de gallium fut étudié dans les années 1970 avant d'être abandonné en raison de difficultés de synthèse. Dans les années 90, sous l'impulsion de groupes japonais, notamment S. Nakamura de la société Nichia, des progrès énormes furent réalisés sur la synthèse des nitrures de gallium, d'aluminium et d'indium. Des progrès rapides ont stimulé un effort extraordinaire dans le monde entier sur ce thème et ont porté ce matériau à un degré de maturité suffisant pour une industrialisation de masse, surtout dans le domaine des diodes électroluminescentes bleues ou vertes. Les applications sont nombreuses et s'étendent aujourd'hui aux lasers bleus-UV pour l'enregistrement à très haute densité et demain aux communications hyperfréquences. Le nitrure de gallium est très dur, mécaniquement stable et possède une capacité thermique élevée. Sous forme pure, il résiste à la fissuration.[9]

1.8 Propriétés optiques des semi-conducteurs III-V :

Une attention toute particulière est donnée à la fonction diélectrique complexe qui est le cœur de l'analyse de la réponse optique des semi-conducteurs. La connaissance des propriétés optiques est d'une importance majeure dans la conception des dispositifs optoélectroniques.

1.8.1 Phénomènes d'absorption dans les semi-conducteurs :

Le phénomène d'absorption peut se produire soit selon un processus intra-bande, soit selon un processus inter-bande. L'absorption inter-bande se produit lors d'une transition électronique d'un état initial (E_v, k_v) de la bande de valence vers un état (E_c, k_c) de la bande de conduction (fig. 1.4). On dit que cette transition est directe si les conditions de conservation de l'énergie et du vecteur d'onde imposent que : $k_v = k_c$. Une transition indirecte ne peut, cependant, exister que si l'absorption s'accompagne de l'émission ou de l'absorption d'un phonon et dans ce cas la relation devient :[7]

$$\vec{\rho} = \vec{k}_c - \vec{k}_v \quad (1.3)$$

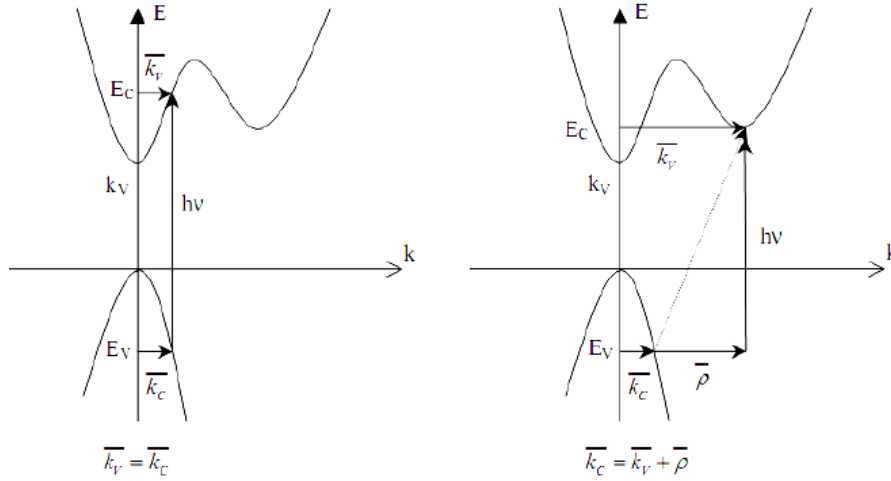


FIGURE 1.3 – Phénomène d'absorption.

1.9 CROISSANCE DU GaN

Plusieurs techniques sont utilisées aujourd'hui pour la réalisation du GaN : l'épitaxie en phase vapeur par la méthode aux hydrures (HVPE), l'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (MOVPE) et l'épitaxie par jet moléculaire (MBE). C'est essentiellement par épitaxie en phase vapeur par pyrolyse d'organométalliques (EPVOM) que la plus part des composants à base de nitrure sont élaborés.

1.9.1 Croissance EPVOM (Epitaxie Par Vapeur au Organométallique) [1]

Principe et précurseur de la croissance

Cette méthode consiste à réaliser une pyrolyse de l'ammoniac et d'un composé organométallique (triméthylgallium (TMGa) ou triéthylgallium (TEGa)) à la surface du substrat chauffé. Il a été montré lors de la croissance de GaAs que l'utilisation du TEGa comme précurseur limitait la contamination des couches par le carbone. En effet, la majorité de la pollution au carbone proviendrait des radicaux méthyle très réactifs. Dans le cas de la croissance de GaN, ce phénomène semble confirmé par les mesures DLTS de Lee et al. [9] et Chen et al. [10]. Il apparaîtrait que certains défauts électriquement actifs sont décelables uniquement dans les couches de GaN déposées à partir de TMGa.

Couches tampons pour la croissance EPVOM

La qualité du GaN épitaxial est conditionnée par les premiers stades de la croissance. Dans ce contexte, en EJM, Yoshida et al. [3], ont montré que le dépôt à basse température (entre 500 et 800 C) d'une couche tampon d'AlN sur le substrat saphir avant la croissance apportait une amélioration significative de la qualité du GaN. Cette technique a alors été adaptée à l'EPVOM par Amano et al. [12]. Par la suite, Nakamura et al. [3] ont mis en évidence que le même type d'amélioration pouvait être obtenu avec une couche tampon de GaN. Ces faibles températures de croissance permettent de limiter la diffusion des espèces en surface, et par conséquent d'obtenir une distribution homogène des atomes sur toute la surface du saphir ou du GaAs. La couche obtenue est amorphe, se cristallise lorsqu'elle est portée à la température de croissance du GaN. Les conditions de croissance des couches tampons sont primordiales pour obtenir une bonne cristallisation avant la reprise d'épitaxie. Par exemple, une couche tampon trop épaisse ne se cristallisera pas entièrement lors de la montée en température; si la température de dépôt est trop élevée, la mobilité de surface accrue permettra aux atomes de se regrouper par îlots et la couche ne sera pas homogène.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base relatives aux alliages semi-conducteurs III-V, telles que la structure cristalline, la liaison atomique, la structure de bande d'énergie et les propriétés optiques. Nous avons, également, vu quelques généralités sur les matériaux nitrures d'éléments III (III-N). Nous avons, enfin, donné les propriétés des binaires GaN

Références

- [1] L.L.Y. Voon, M. Willatzen, M. Cardona, N. Christensen, Physical review B 53 (1996) 10703.
- [2] S. Adachi, Properties of semiconductor alloys : group-IV, III-V and II-VI semiconductors, John Wiley Sons, 2009.
- [3] H. Grimmeiss, H. Koelmans, Zeitschrift für Naturforschung A 14 (1959) 264-271.
- [4] T.Mouet, " Etude et caractérisation des structures MIS sur InP et des nano-structures à base de ZnO", thèse de doctorat, Université de Constantine, 2011.
- [5] A. Chakroun, R. ARES, V. AIMEZ, S. CHARLEBOIS, REALISATION DE STRUCTURES METAL-ISOLANT-SEMICONDUCTEUR SUR GaN PAR DÉPOSITION PECVD DE SixN_V, 2012.
- M. Soylu, B. Abay," Barrier characteristics of gold Schottky contacts on moderately doped n- InP based on temperature dependent I-V and C-V", measurements Microelectronic Engineering, Vol.86,p.88-95,2009. [7] A. Souguir-Aouani, Conception d'une nouvelle génération de redresseur Schottky de puissance en Nitrure de Gallium (GaN), étude, simulation et réalisation d'un démonstrateur, in : Lyon, 2016.
- [8] M. Benchehima, H. Abid, A. Sadoun, A.C. Chaouche, Computational Materials Science 155 (2018) 224-234.
- [9] F.E. Cimilli et al," Temperature-dependent current voltage characteristics of the Au/n-InP diodes with inhomogeneous Schottky barrier height ",Physica B 404 ,p.1558-1562,2009.
- V. Janardhanam, A. Ashok kumar,V.R. Reddy,"studies of Schottky contacts on indium phosphide", Lambert academic publishing, 2011.

CHAPITRE 2

GÉNÉRALITÉ SUR LES PHOTODIODES

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, des éléments importants liés à la photodiode seront présentés. En premier partie, nous allons présenter la structure et la physique des photodiodes et ensuite, nous allons évoquer leurs principes de fonctionnement et leurs paramètres caractéristiques tels que : Caractéristiques optiques des photodiodes et Caractéristiques électriques des photodiodes comme Caractéristique courant-tension de photodiode et Réponse temporelle d'une photodiode. Finalement, ce chapitre se termine par la présentation des différents types de photodiodes.

2.1.1 Composants de réception

Le système de détection comprend, en plus de l'élément photodétecteur proprement dit (par exemple une photodiode PN, PIN, PDA), un ensemble de circuits électroniques, à commencer par un pré-amplificateur faible bruit. Du point de vue des liaisons par fibre, les principaux paramètres qui interviennent pour caractériser la détection sont : la longueur d'onde de coupure, la sensibilité du détecteur $S (A/W)$ qui chiffre le rapport entre le photocourant recueilli et la puissance optique incidente, le rendement quantique, et le courant d'obscurité du détecteur (les caractéristiques des photodétecteurs)[1][2].

2.2 PHOTODETECTEURS A SEMI-CONDUCTEURS

2.2.1 Photodétection

La photodétection dans les semi-conducteurs [4, 5] fonctionne sur le principe général de la création des paires électron-trou sous l'action de la lumière. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est illuminé par des photons d'énergie supérieure ou égale à son gap $h\nu \geq E_g$, les photons absorbés portent les électrons de la bande de valence vers les états excités situés dans la bande de conduction, où ils se comportent comme des électrons libres capables de se déplacer sur de longues distances à travers le réseaux cristallin sous l'influence d'un champs électrique, où les deux catégories de porteurs (P et N) générés sont alors recueillis sous forme de photocourant I_{ph} . Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés. Les photodétecteurs à semi-conducteurs convertissent directement les photons incidents en électrons, ces électrons peuvent alors être soit éjectés soit libérés au sein des matériaux semi-conducteurs grâce aux propriétés photosensibles très importantes qu'ils offrent. En effet, les photodétecteurs à base de semi-conducteurs représentent l'avantage d'être très rapides à la conversion, faciles à exploiter et résistants contre les bruits. Ceci a permis pratiquement de développer les transmissions optiques à très longues distances, dans cet effet, les systèmes de communications optiques utilisent à leur extrémité réceptrice d'une façon particulière les photodiodes PIN et APD. Fig. 2.1

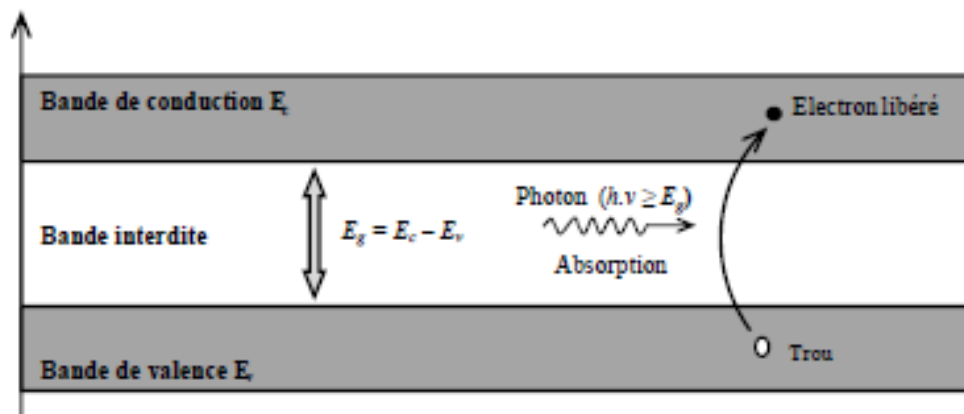


FIGURE 2.1 – Principe de photodétection.

2.3 Génération ou création de porteurs en excès

Si on soumet un matériau SC à une perturbation très intense on introduit des transitions électroniques :

- ▷ soit entre BV et BC : création de paires électron-trou.
- ▷ soit entre ED et BC : création d'électron en excès et de charges positives fixes.
- ▷ soit entre EV et EA : création des trous en excès et de charges négatives fixes.

Nous considérons ici le cas de la création des paires électron-trous. L'énergie nécessaire à la création d'une paire peut-être apportée : ▷ par un photon.

- ▷ par une particule de forte énergie : radiation ionisante ou porteur chaud. Le mécanisme de création de porteurs en excès est caractérisé par une vitesse de génération représentant le nombre de porteurs (électron ou trou) créés par cm^3 et par seconde. G_n ou G_p ($\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$) $G_n=G_p$ (cas de création par paire).[3-6]

g ($\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$) : paramètre qui caractérise la génération des porteurs. Il mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et par unité de temps.

$$g = g_{th} + g \quad (2.1)$$

avec : g_{th} : taux de génération thermique, Paramètre qui caractérise les générations spontanées dues à l'agitation thermique.

g : paramètre qui caractérise les générations résultant d'une excitation optique, d'un champ électrique intense, d'une injection électrique.

2.4 Photo-excitation

A l'aide d'un rayonnement on crée un excès de porteurs par rapport à l'équilibre. Le flux de photons incidents $\varphi_0(E)$ est caractérisé par une longueur d'onde .

$$\lambda(\mu) = \frac{1.24}{E(\text{eV})} \quad (2.2)$$

Il représente le nombre de photons d'énergie E qui frappent l'unité de surface du semiconducteur par seconde, il s'exprime en ph/s/cm^2 .

Le semiconducteur est caractérisé par un coefficient appelé coefficient de réflexion $R(E)$. Le flux transmis à la surface est donné par :

$$\Phi_t(E) = (1 - R(E))\Phi_0.E \quad (2.3)$$

Les photons sont absorbés au cours de leur propagation dans le matériau. On

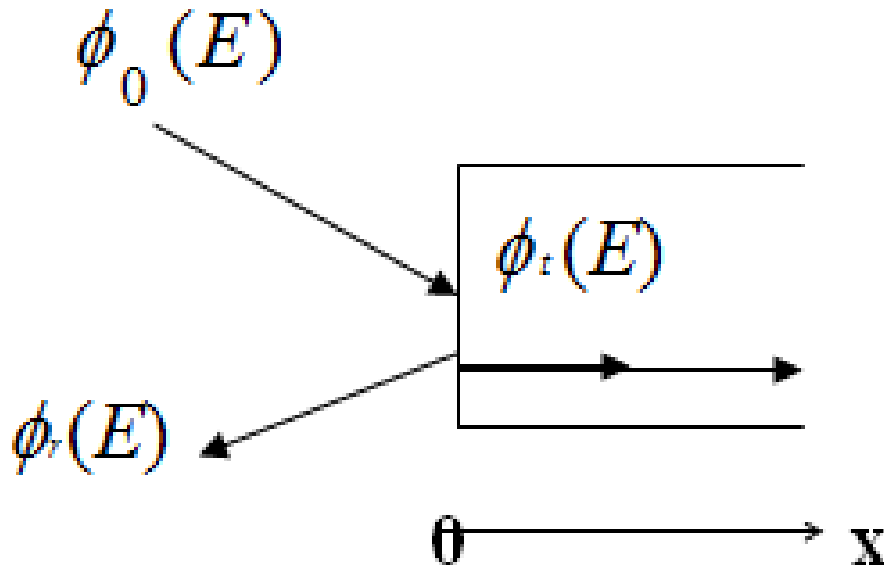


FIGURE 2.2 – Les photons sont absorbés au cours de leur propagation dans le matériau.

définit le coefficient d'absorption du matériau comme la variation relative de la densité de rayonnement par unité de longueur.

$$\alpha(E, x) = -\frac{1}{\varphi(E, x)} \frac{d\varphi(E, x)}{dx} \quad (2.4)$$

▷ Si le α est positif la variation de la densité de rayonnement $d\varphi$ est négative, c'est à dire qu'il y a absorption

$$\alpha(E, x) = \alpha(E) \quad (2.5)$$

▷ Si α est constant dans tout le matériau . L'intégration de l'expression précédente donne :

$$\frac{d\varphi(E, x)}{\varphi(E, x)} = -\alpha(E) dx \quad (2.6)$$

$$\ln(\varphi(E, x)) = \ln(\varphi_t(E)) - \alpha(E)x \quad (2.7)$$

soit :

$$\varphi(E, x) = \varphi_t(E) e^{-\alpha(E)x} \quad (2.8)$$

Le flux de photons d'énergie E au point d'abscisse x à l'intérieur du semiconducteur s'écrit :

$$\varphi(E, x) = \varphi_0(E)(1 - R(E)e^{-\alpha(E)x}) \quad (2.9)$$

Le taux de génération optique g_{op}

$$g_{op} = -\frac{d\varphi}{dx} = \alpha(E) \cdot \varphi_0(E) \cdot (1 - R(E)) \cdot e^{-\alpha(E)x} \quad (2.10)$$

On admet que chaque photon absorbé donne naissance à une paire électron-trou.

2.5 Caractéristiques optiques des photodiodes

2.5.1 Efficacité quantique ou Rendement quantique Q.E

Efficacité quantique ou Rendement quantique Q.E c'est un paramètre très important donné par la probabilité de création d'une paire électron-trou par photon absorbé.

$$\eta_q = \frac{\eta_e}{\eta_p} = \frac{I_{ph}/e}{P_{opt}/h\nu} \quad (2.11)$$

2.5.2 Coefficient d'absorption :

Le phénomène important qui détermine le rendement du photodétecteur et l'absorption du matériau semi-conducteur qui est caractérisée par le coefficient d'absorption α qui dépend de la longueur d'onde et de l'énergie de gap E_g . Alors, si l'énergie du photon $h\nu$ est supérieure au gap du semi-conducteur E_g il y a donc absorption, il faut alors que la longueur d'onde λ soit inférieure à la longueur d'onde de coupure λ_c [9, 10].

$$dP_{abs}(Z) = P_{opt} \cdot e^{-\alpha(\lambda)z} dz \quad (2.12)$$

2.5.3 Flux de photon Φ :

qui est défini par le nombre de photons atteignant la surface active par unité de temps à une longueur d'onde λ .

$$\Phi = P_{opt} \cdot \frac{\lambda}{h\nu} \quad (2.13)$$

2.6 Caractéristiques électriques des photodiodes

2.6.1 Caractéristique courant - tension de photodiode

La caractéristique de la photodiode est représentée sur la figure (2.3). Le photocourant est pratiquement indépendant de la tension de polarisation.[5,7,13] Dans

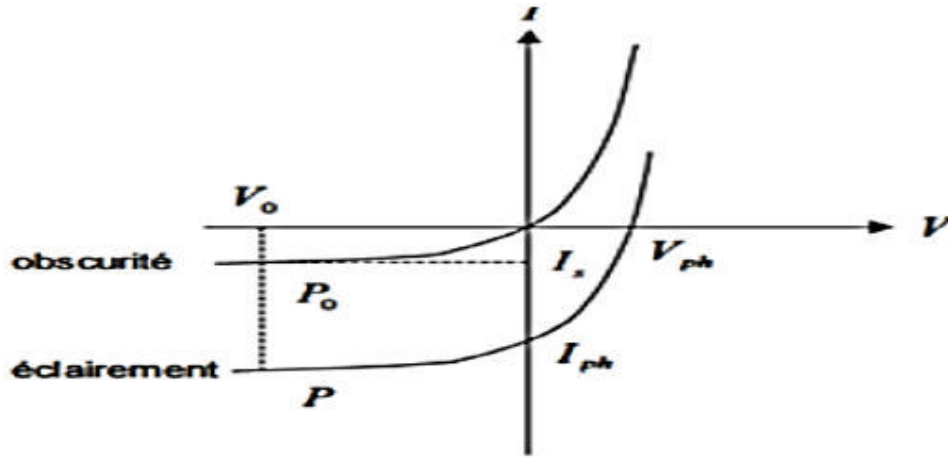


FIGURE 2.3 – La caractéristique courant - tension de la photodiode .

le premier cas, la diode est polarisée en inverse par une tension négative V . Dans la mesure où $-V \gg kT/e$, l'expression du courant I s'écrit [5] :

$$I = I_S(e^{\frac{eV}{kT}} - 1) - I_{ph} \quad (2.14)$$

2.6.2 Résistance de série

La résistance série d'une photodiode survient de la résistance des contacts et la résistance interne de la photodiode (figure 2.3). Il est donné par :

$$R_s = \frac{(w_s - w_d)\rho}{A} + R_c \quad (2.15)$$

Où w_s, w_d, A, ρ et R_c est l'épaisseur du substrat, la largeur de la région de déplétion (ZCE), la région diffusée de la jonction (surface active de la jonction), la résistivité du substrat et la résistance du contact .

2.6.3 Réponse temporelle et bande passante BP :

La réponse temporelle d'un photodétecteur τ est caractérisée par le temps nécessaire au photocourant pour montrer de $10BP = 1/2\pi\tau$ (2.16)

2.6.4 Photodiodes avec Gain :

correspond au nombre de porteurs détectés par rapport au nombre de paires électron-trou photogénérées.

$$G = \frac{q}{e} \quad (2.17)$$

Par conséquent, les expressions du photo-courant et de la responsivité sont respectivement données par :

$$I_P = \eta q \Phi = \eta e G \Phi = G \frac{\eta e p_{in}}{h\nu} \quad (2.18)$$

$$Ri = G \frac{\eta e}{h\nu} G \eta \frac{\lambda}{1.24} \quad (2.19)$$

2.7 Différents types des photodiodes

Principalement, considéré comme composant fondamental dans le module de réception pour la chaîne de communication optique, la photodiode joue un rôle très important à convertir les rayonnements optiques en signaux électriques plus facile à exploiter, dans cet effet, plusieurs études sont développées visent l'évaluation des photodiodes en termes de performance en comparant entre leurs différents types, spécialement entre la photodiode PIN « Photodiode Intrinsic Negative » et la photodiode à avalanche APD « Avalanche Photodiode » disposées dans les différents systèmes optiques ce qui constitue un sujet récent très important.[6-9]

Le tableau.1 montre les paramètres physiques, électriques et technologiques et la comparaison entre Différents types des photodiodes :

	PIN	PDA
Longueur d'onde	1300et1550	1300et1550
Bande passante	Large	Faible
Rendement quantique	Faible	Elevé
Tension de commande	Faible	Elevé
Fréquence de coupure	>60	Quelques

TABLE 2.1 – comparaison entre Différents types des photodiodes .

2.8 les Structures Photodiodes PIN et APD

Les photodiodes sont des photodétecteurs à semiconducteurs ayant deux électrodes et une caractéristique électrique en symétrique [6]. Les photodiodes sont utilisées dans les transmissions optiques fibrées pour leur rapidité et leur grande sensibilité; les structures les plus disposées pour convertir les flux optiques en

courants électriques sont les photodiodes PIN et les photodiodes à avalanche APD :

▷ La photodiode PIN est constituée par trois zones :

première dopée P, une deuxième zone intrinsèque i (zone d'absorption) et une troisième dopée N, d'où le nom du composant. La largeur de la zone intrinsèque i est optimisée afin de maximiser le rendement η , en effet, il est préférable que cette zone soit large d'où l'intérêt de la photodiode PIN. Pour augmenter encore la sensibilité, une couche diélectrique antireflet est placée sur la fenêtre du dispositif photodétecteur. Le rayonnement est presque entièrement absorbé dans la zone intrinsèque i, car, la majorité des photons est absorbée. Le temps de réponse de la photodiode PIN doit être très bref, il est limité par deux facteurs : la capacité de jonction et le temps de transit, le temps de réponse est amélioré en augmentant la tension de polarisation inverse, ce qui réduit la capacité et le temps de transit [12]. Fig. 2.4

▷ Dans la photodiode à avalanche APD les électrons créés dans la zone intrinsèque i sont multipliés par l'effet d'avalanche afin que le rapport signal sur bruit soit suffisamment important, l'idée d'utiliser ce phénomène de multiplication interne a été soulevée pour qu'un photon incident n'engendre plus un seul photoélectron mais plusieurs, ceci pour augmenter la puissance du signal électrique correspondant à la puissance optique incidente donnée. En effet, la photodiode à avalanche APD est une photodiode PIN conçue à partir de la physique de l'ionisation par impact pour obtenir la multiplication avec un gain moyen. Le temps de réponse de la photodiode APD est plus long par rapport à celui de photodiodes PIN, car, un délai supplémentaire est dû au phénomène d'ionisation [13]. Fig. 2.5.

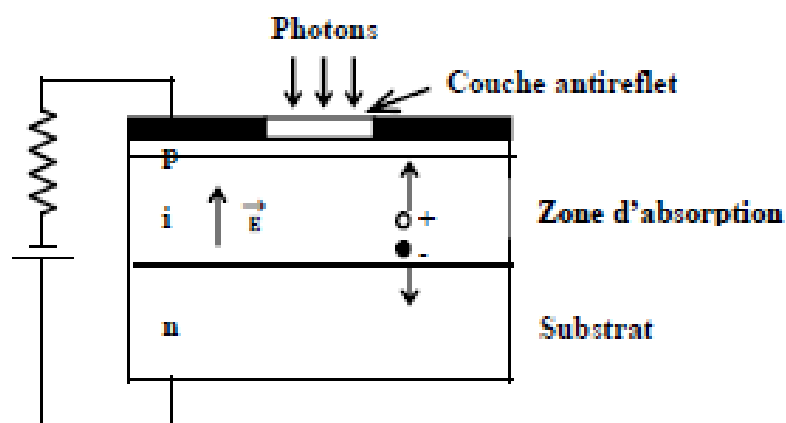


FIGURE 2.4 – Structure de la photodiode PIN..

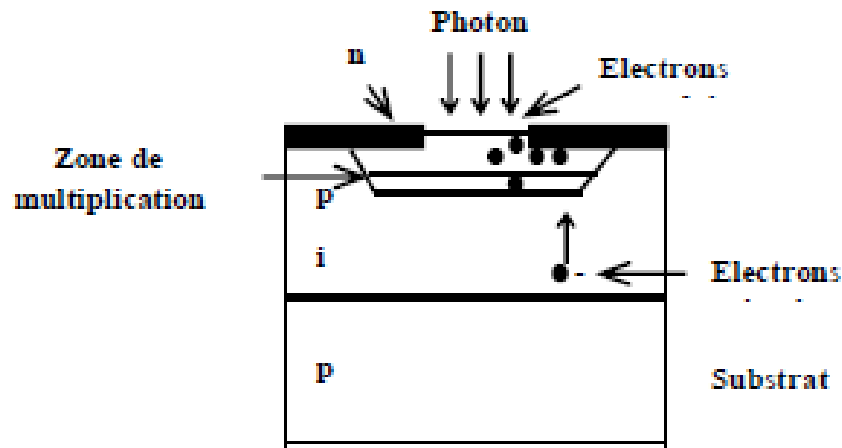


FIGURE 2.5 – La photodiode à avalanche APD est un raffinement de la photodiode PIN.

2.9 Applications photodiodes

- a. La mesure des intensités lumineuses extrêmement faibles.
- b. L'imagerie médicale Lecteurs de disques compacts.
- c. La télécommunication par fibre optique .
- d. La détection rapide des signaux faibles.
- e. Les instruments de mesure.
- f. Détecteur de fumée .
- g. Les communications optiques .

2.10 Conclusion

Dans cet chapitre, nous abordons les généralités sur les photodiodes en présentant les notions de base sur ces dispositifs et définissant les paramètres déterminant les performances de ces photo-détecteurs.

Références

- [1] D. Courjon, "Photodiode characteristics and applications," OSI Optoelectronics, 2009.
- [2]. Mathieu, H. and H. Fanet, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques. Vol. 189 : Dunod Paris. 2001
- [3]. Courcier, T., Développement d'un dispositif intégré de photodétection de grande sensibilité avec discrimination spectrale pour les laboratoires sur puce, Université Claude Bernard-Lyon I2014.
- [4]. Hanane, C.I.B., L'étude de l'influence des paramètres technologiques sur la caractéristique (IV) d'une photodiode PIN en Si. 2016.
- [5] M. Voos, H. J. Drouhin, B. Dré villon, "Semi-conducteurs et composants", Programme d'approfondissement physique, Inovation technologique, Electrical engineering, Ecole polytechnique, Palaiseau, pp. 7-44, Paris, 2001.
- [6]. Aib, S., Modélisation d'un photodétecteur dans une chaine de transmission par fibre optique. 2017.
- [7]. Refka, E. and B. Souad, Etude et Optimisation d'une Photodiode dans une-Chaine de Transmission par Fibre Optique. 2016/2017.
- [8]. Menard, O., Développement de briques technologiques pour la réalisation de diodes schottky sur nitrure de gallium, Tours, 2010.
- [9] U. Ibrahim, H. Abbas, R. Faizan and S. F. Shaukat, "Performance evaluation of photoreceivers in WDM passive optical networks," 6th IEEE International Conference on Engineering Technologies, Islamabad, October 2010.

[10] H. Brahimi, "Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences. Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence," Thèse de doctorat, Spécialité Micro-ondes, Electromagnétisme et Optoélectronique, Université de Paul Sabatier, Toulouse III, 2010.

[11] P. Gopal , V. K. Jain and S. Kar, "Performance comparison of PIN and APD based FSO satellite systems for various pulse modulation schemes in atmospheric turbulence," Communications and Network Journal, Scientific Research, September 2013.

[12] D. Decoster, J. Harari, "Détecteurs optoélectroniques," Hermès-science, pp. 17-20 pp. 26-28, Paris, 2002.

[13]A. Boudkhil Evaluation des Performances des Photodiodes PIN et APD
Revue Méditerranéenne des Télécommunication Vol. 5, N 1, March 2015

CHAPITRE 3

LA PHOTODÉTECTION

3.1 Introduction

Sous l'appellation dispositif optoélectronique, on regroupe tous les éléments qui convertissent l'énergie électrique en un rayonnement optique (émetteurs) ainsi que ceux qui permettent de détecter un rayonnement optique pour le traduire en un signal ou une puissance électrique (photodétecteurs).

les principaux paramètres qui conditionnent le choix d'un matériau pour la réalisation d'un composant optoélectronique sont en premier lieu le gap, qui doit d'une part souvent être direct et d'autre part être adapté au rayonnement à émettre ou à absorber ; la durée de vie des porteurs, les transitions qui doivent essentiellement être radiatives ; la vitesse de recombinaison, qui doit être la plus faible possible, et enfin la possibilité de doper le matériau n et p pour la réalisation de jonctions PN.

3.2 Rayonnement

On appelle rayonnement optique tout rayonnement dont la longueur d'onde est approximativement comprise entre 10^{-2} et $10^2 \mu m$. A la figure ci-dessous, nous avons reporté le spectre optique en termes de longueur d'onde λ , de fréquence et d'énergie E des photons.

Ces différentes grandeurs sont liées par les relations fondamentales de la physique quantique :

$$E = h\vartheta \quad (3.1)$$

$$\vartheta = \frac{c}{\lambda} \quad (3.2)$$

h est la constante de Planck ($h = 6,626.10^{-34} J.s = 4,14.10^{-15} eV.s$) et c la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 0,2998.10^9 m.s^{-1}$).

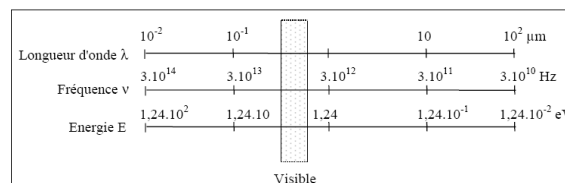


FIGURE 3.1 – Spectre optique

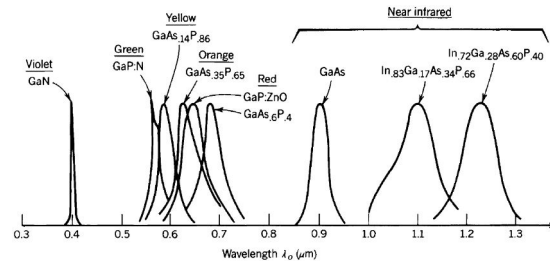


FIGURE 3.2 – *domaine Spectre optique*

3.3 Emission et absorption de lumière

L'énergie libérée lors d'une transition électronique qui assure le passage d'un électron d'un niveau d'énergie E_c à un niveau d'énergie E_v inférieur au premier peut être émise sous forme d'un photon ; On parle alors d'une transition radiative. L'énergie h du photon émis est égale à la différence des énergies entre les états initial et final (conservation d'énergie) :

$$h\nu = E_c - E_v = E_g \quad (3.3)$$

Dans un semiconducteur, les recombinaisons, qui sont précisément des transitions électroniques peuvent donc être radiatives et le semiconducteur est alors source d'un rayonnement optique.

Réciproquement, un photon incident peut être absorbé par le semiconducteur si son énergie est suffisante. Cette absorption peut donner lieu à la génération d'une paire électron-trou et les porteurs créés sont susceptibles de prendre part à un courant électrique.

3.4 La photodétection

La photodétection représente une fonction qui trouve sa place dans un grand nombre de systèmes professionnels ou grand public.

Les applications sont nombreuses :

- télécommunications optiques fibrées ou en espace libre,
- isolation galvanique,
- capteur solaire,
- détecteur de présence,

et sont toutes fondées sur le même processus.

▷ La photodétection est un mécanisme qui se produit dans certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à un flux lumineux.

▷ La photodétection se manifeste par la génération d'un courant-électrique.

Il s'agit de transformer une puissance lumineuse en signal électrique, ce signal devant être le plus élevé possible, pour un flux optique aussi faible que possible.

Lorsqu'il s'agit de transmettre des informations rapides, voire très rapides, il faut que ce photodétecteur réagisse très vite.

3.5 Photodétection avec les semiconducteurs :

La photodétection dans les semiconducteurs fonctionne sur le principe général de la création de paires électron-trou sous l'action de la lumière.

Lorsqu'un matériau semiconducteur est illuminé par des photons d'énergie supérieure ou égale à son gap, les photons absorbés portent les électrons de la bande de valence vers les états excités situés dans la bande de conduction, où ils se comportent comme des électrons libres susceptibles de se déplacer sur de longues distances à travers le réseau cristallin sous l'influence d'un champ électrique intrinsèquement présent ou extérieurement appliqué.

De même, les trous de charge positive laissés dans la bande de valence participent à la conduction électrique en se déplaçant d'un site atomique à l'autre sous l'effet du champ électrique.

La séparation des paires électron-trou générées par l'absorption lumineuse donne ainsi naissance au photocourant, qui correspond par définition à la fraction des porteurs libres photogénérés collectés aux extrémités par les électrodes du composant photodétecteur, et dont l'intensité à une longueur d'onde donnée est une fonction croissante de l'intensité lumineuse incidente.

3.5.1 Les grandes catégories de photo-détecteurs

On distingue à ce niveau deux grandes catégories de photo-détecteurs suivant la nature du champ électrique qui assure la séparation de charge des paires électron-trou photogénérées : ▷ les photoconducteurs qui sont constitués d'un simple barreau de semiconducteur sur lequel sont simplement disposés deux contacts ohmiques, où le champ électrique permettant la collecte des photopor-

teurs est fourni par l'application d'une tension de polarisation entre les contacts d'extrémité.

▷ les photodétecteurs dits photovoltaïques qui utilisent le champ électrique interne d'une jonction p-n ou Schottky (du type métal-semiconducteur) pour assurer cette séparation des charges.

▷ On regroupe sous cette dernière appellation

- les photodétecteurs à jonction p-n (composants photovoltaïques à simple jonction p-n, et les photodétecteurs p-i-n comportant une fine couche de matériau semiconducteur non intentionnellement dopé entre la zone p et la zone n), ainsi que

- l'ensemble des photodétecteurs à jonction Schottky (photodiodes à contact Schottky et photodiodes Métal-Semiconducteur-Métal (MSM)).

3.5.2 Principes de base de la photodétection

Un photodétecteur est un dispositif permettant de convertir une énergie lumineuse en énergie électrique, par absorption des photons incidents. Si l'énergie apportée par ces photons est suffisamment importante, elle peut alors arracher un électron et le faire passer ainsi de sa bande de valence à sa bande de conduction. D'un point de vue mathématique, cette condition d'absorption se traduit par :

$$h\nu > E_g \quad (3.4)$$

$h\nu$ étant l'énergie du photon, et E_g l'énergie du matériau semi-conducteur constituant le photodétecteur.

- Si cette relation n'est pas vérifiée, il n'y a pas d'interaction et le milieu est dit "transparent".

- Si cette relation est vérifiée, le photon est dit alors "absorbé" et il y a création d'une paire électron-trou au cœur du matériau. De plus, si l'on applique un champ électrique aux bornes de la zone absorbante, la paire électron-trou est alors dissociée et les porteurs peuvent être récupérés dans un circuit extérieur. C'est le principe de base de la photodétection.

3.6 Description de l'absorption.

Comme la bande de valence d'un semiconducteur contient beaucoup d'électrons et la bande de conduction beaucoup d'états susceptibles de les accueillir, il existe une forte probabilité pour que les photons d'énergie $h\nu > E_g$ (E_g : largeur de bande interdite) soient absorbés par le semiconducteur.

L'électron de la bande de valence qui absorbe un photon d'énergie supérieure à E_g retourne dans les états énergétiques proches de E_c en transmettant son énergie excédentaire au réseau cristallin jusqu'à ce qu'il soit en équilibre thermique avec la population électronique de la bande de conduction. Les trous et les électrons générés par absorption de photons sont des porteurs excédentaires hors équilibre.

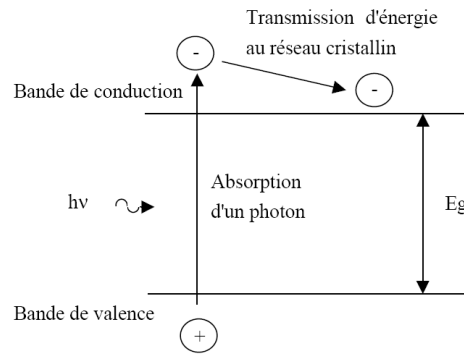


FIGURE 3.3 – Phénomène d'absorption.

3.6.1 Seuil d'absorption fondamental

On appelle seuil d'absorption fondamental la longueur d'onde λ_c du photon qui possède une énergie juste suffisante pour faire passer un électron de E_v à E_c ; $h\nu = \Delta E = E_g$:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (3.5)$$

Les photons de longueur d'onde $\lambda > \lambda_c$ sont pratiquement tous transmis et leur coefficient d'absorption est très petit, alors que les photons de longueur d'onde $\lambda < \lambda_c$ sont très rapidement absorbés et leur coefficient d'absorption devient très grand.

On peut ainsi définir, pour chaque matériau semi-conducteur, une longueur d'onde de coupure au-delà de laquelle le phénomène de photocréation de porteurs ne pourra plus avoir lieu.

A titre indicatif, le tableau ci-dessous donne le seuil d'absorption fondamental pour quelques matériaux semiconducteurs :

TABLE 3.1 – le seuil d'absorption fondamental pour quelques matériaux semiconducteurs.

matériaux	Si	Ge	GaAs	InAs	InP	GaP
E_g	1.12	0.66	1.42	0.36	1.35	0.75
λ_c	1.11	1.88	0.87	3.44	0.92	0.55

Choix du matériau par rapport au mode d'acheminement de la lumière

En plus du seuil d'absorption fondamental, un autre paramètre influe sur le choix du matériau et de la longueur d'onde de travail : le mode d'acheminement de la lumière.

Deux phénomènes conditionnent la transmission d'un signal lumineux à travers une fibre optique : l'atténuation et la dispersion. L'atténuation a deux causes principales, la diffusion et l'absorption du rayonnement. Les fibres sont réalisées à partir de verres, qui sont des structures désordonnées; la diffusion résulte des défauts de structure et de composition.

Si P_1 est la puissance de rayonnement à l'entrée de la fibre, et P_2 sa puissance après un parcours de L kilomètres, l'atténuation est mesurée par la quantité :

$$\left(\frac{1}{L}\right) \times \left(10 \log \left(\frac{P_1}{P_2}\right)\right) \quad (3.6)$$

La courbe d'atténuation typique d'une fibre de silice est représentée sur la figure ci-dessous. Les premières recherches ont eu pour objet les transmissions à

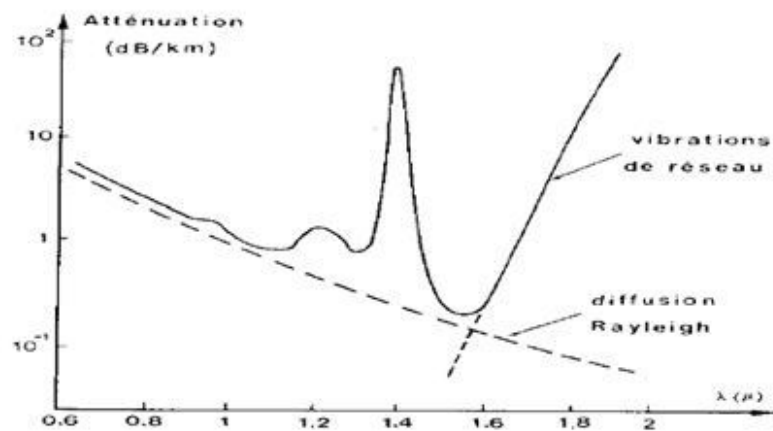


FIGURE 3.4 – La courbe d'atténuation typique d'une fibre de silice.

$\lambda = 0,8\mu\text{m}$ m correspondant à une atténuation d'environ 2 dB/km, comme le montre la figure ci-dessus.

Puis on s'est tourné vers les nouvelles fenêtres spectrales qui sont $\lambda = 1,3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ m, qui correspondent respectivement à des atténuations de 0,6 dB/km et 0,2 dB/km.

Les plus faibles atténuations sont obtenues à l'heure actuelle avec les fibres SiO₂ dopées GeO₂, qui présentent un minimum d'atténuation de 0,2 dB/km à $\lambda = 1,55\mu\text{m}$.

La structure de bande directe de la plupart des matériaux III-V et la possibilité d'obtenir des composés dont l'énergie de bande interdite correspond aux longueurs d'ondes citées précédemment, les ont rendu indispensables pour les composants optoélectroniques.

De plus, leurs propriétés de transport extrêmement intéressantes ont élargi leur champ d'utilisation au domaine de la microélectronique.

C'est ainsi que se sont développées les familles de matériaux III-V : la filière GaAs ($\lambda = 0,8\mu\text{m}$), et plus récemment la filière InP ($\lambda = 1,3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$).

3.6.2 La filière InP

La filière InP est adaptée à la photodétection aux grandes longueurs d'ondes ($\lambda = 1,3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$).

En effet, même si l'InP n'est pas absorbant dans cette gamme de longueur d'onde, il existe d'autres matériaux en accord de maille avec l'InP (voir Figure) capables d'absorber la lumière à ($\lambda = 1,3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$) et ayant des caractéristiques de transport très attrayantes :

- L'alliage ternaire $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ a le même paramètre de maille que l'InP pour la composition $x=0,47$. De sa structure de bande découle une énergie de bande interdite de 0,75eV, compatible avec la photodétection à ($\lambda = 1,3\mu\text{m}$ et $\lambda = 1,55\mu\text{m}$). De plus, son coefficient d'absorption est relativement élevé dans cette gamme d'utilisation ($6,8 \cdot 10^3 \text{cm}^{-1}$ à $1,55\mu\text{m}$ et $1,6 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$ à $1,3\mu\text{m}$). Enfin, il possède une mobilité électronique très élevée ($n12000 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ à 300K).
- le quaternaire $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, combinaison du ternaire $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ avec l'InP dont la condition d'accord de maille est $x=0,47y$.
- L'alliage ternaire $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$ présente lui une largeur de bande interdite de 1,47eV. Il ne permet donc pas la photodétection dans cette gamme de longueur d'onde, mais la valeur élevée de la hauteur de barrière de ce matériau est très intéressante, notamment pour améliorer la qualité des contacts Schottky sur les matériaux de la filière InP.

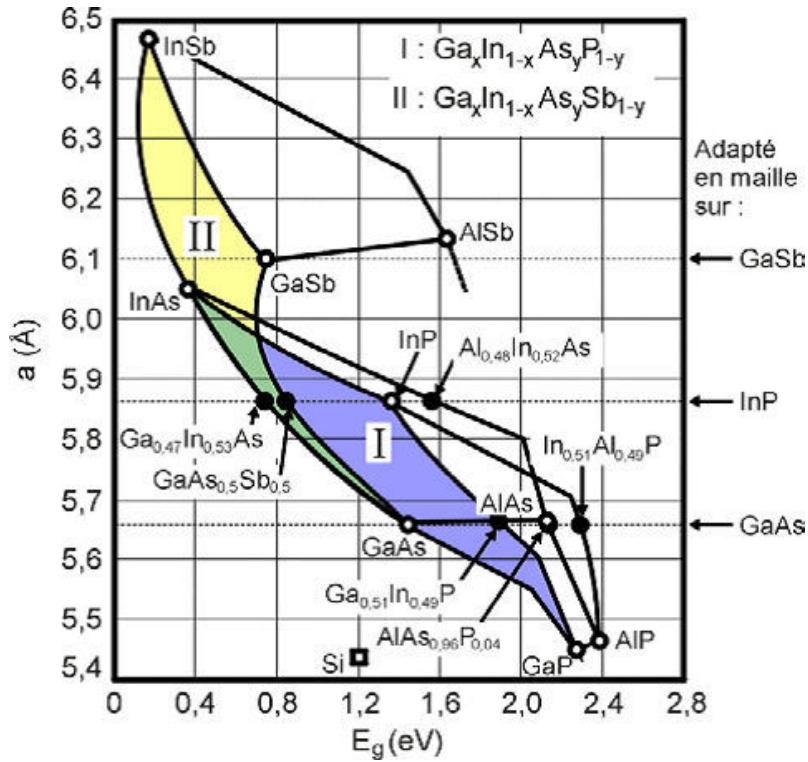


FIGURE 3.5 – Energie de bande interdite de différents matériaux en accord de maille sur InP.

3.6.3 La filière GaAs

La structure de bande du GaAs présente des propriétés physiques et électroniques très intéressantes pour la photodétection dans la gamme $0.85\mu m$:

- La transition de bande interdite est directe et son énergie de band-gap de 1.45eV est compatible avec la fenêtre spectrale précédente.
- Le coefficient d'absorption est relativement élevé dans la gamme d'utilisation ($[10^4 cm^{-1}]$).
- La courbure de la bande de conduction conduit à une masse effective faible des électrons ($[m_e^* = 0.067m_0]$), ce qui implique une mobilité électronique relativement élevée ($\mu_n = 8500 cm^2 V^{-1} s^{-1}$ à 300K).

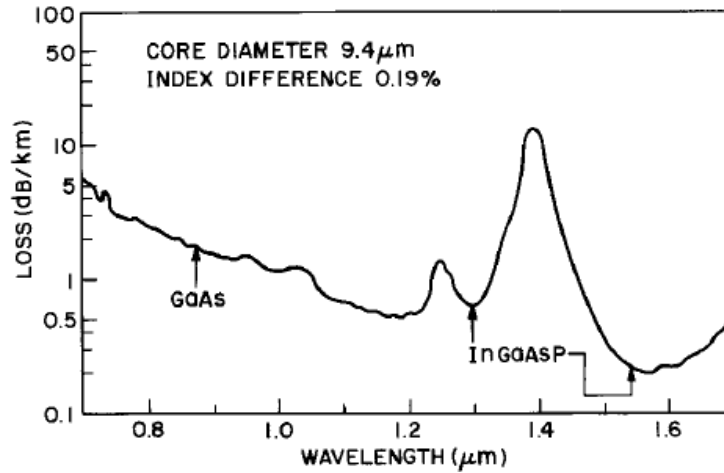


FIGURE 3.6 – Energie de bande interdite de différents matériaux en accord de maille sur GaAs.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'environnement de l'ATLAS tel que la spécification de structure, le maillage, Région et Spécification de modèles physiques. Cet outil permet donc l'optimisation, la calibration des simulateurs de procédés et de dispositifs, il permet de connaître l'influence de quelques paramètres sur l'évolution d'un grand nombre de composants semi-conducteurs en régime continu, en fonction de la température ou fréquence. . . .ect

Références

[1] F. Bourouba, Modelisation et simulation des contacts metal-semiconducteur à barrière inhomogène, Thèse de doctorat, in : univ setif 2010.

[2] A.U.s.M.SIMULATION DE LA DES PHOTODIODES SILVACO-TCAD, Silvaco International, California (2013).

[3]A. SADOUN, Etude, simulation et caractérisation de structures MIS et diodes Schottky à base de GaN massif, in : 2021.

[4] M. Tang, Etudes et modélisation compacte du transistor FinFET, Thèse de doctorat,in : Strasbourg, 2009.

A. Meftah, T. Tibermacine, R. Boumaraf "SIMULATION DE LA DES PHOTODIODES" MÉMOIRE DE MASTER univ biskra 2019.

[6] R. Negru, Conception et modélisation de pixels de photodétection : Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme détecteurs de particules, Thèse de doctorat,in : Palaiseau, Ecole polytechnique, 2008.

[7] M. MANCER, Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs), Thèse de doctorat, in : Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

4.1 Introduction

Dans cette partie du chapitre, on étudiera l'optimisation des paramètres physiques d'une structure AlGaIn sur le substrat modèle GaN pour déterminer les valeurs des paramètres fonctionnels, l'outil de Nous allons utiliser le programme informatique logiciel Atlas Silvaco que nous avons présenté dans cet chapitre, Cette étude est dédiée à la détermination des paramètres électriques et technologiques, que nous avons proposés.

4.2 Paramètres de simulation

La bande interdite, l'affinité électronique, la permittivité relative, la densité effective d'états dans la bande de conduction et la densité effective d'états dans la bande de valence paramètres utilisés dans la simulation sont résumées dans le tableau 1. Pour un SBD(Au/Ni/AlGaIn/GaN), afin de calculer les caractéristiques courant-tension du (Au/Ni/AlGaIn/GaN) et les effets du phénomène de température sur les performances des structures, La modélisation et la simulation ont été réalisées à l'aide du module ATLAS du logiciel SILVACO basé sur un modèle mathématique[1- 19]

- ▷ Modèle de bande interdite
- ▷ Modèle de mobilité
- ▷ Modèle Shockley–Read–Hall
- ▷ Recombinaison Auger
- ▷ Ionisation par impact
- ▷ Émission thermoionique
- ▷ Tunnellisation Schottky universelle
- ▷ Réduction de la force d'image

TABLE 4.1 – les paramètres physiques, électriques et technologiques de simulation

Paramètres	GaN	AlN	$Al_xGa_{1-x}N$	$Al_{0.09}Ga_{0.91}N$
Bande interdite (eV)	3.40	6.20	$6.2x + 3.4(1-x) - 0.69x(1-x)$ [19]	3.59
Constante diélectrique	9.50	8.50	$8.5x + 9.5(1-x)$ [20]	9.41
Affinité électronique (eV)	4.10	2.10	$2.1x + 4.1(1-x)$ [21]	3.92
$N_c 10^{17} cm^{-3}$	2.3	4.33	$43.3x + 23(1-x)$ [22]	24.82
$N_v 10^{17} cm^{-3}$	4.6	1.48	$14.8x + 46(1-x)$ [20]	43.19

4.3 Résultats et Interprétations

4.3.1 les caractéristiques courant-tension I(V) de la structure

La figure (4.1) montre les caractéristiques courant-tension I(V) de la structure Au/Ni/AlGaIn/GaN, à la température de 300 K, dans une échelle semi-logarithmique. En polarisation directe la courbe log I(V) présente deux parties, la première partie linéaire entre 3 et 4.5V et une deuxième au-delà de 4.5V qui présente une courbure due à l'influence de la résistance série.

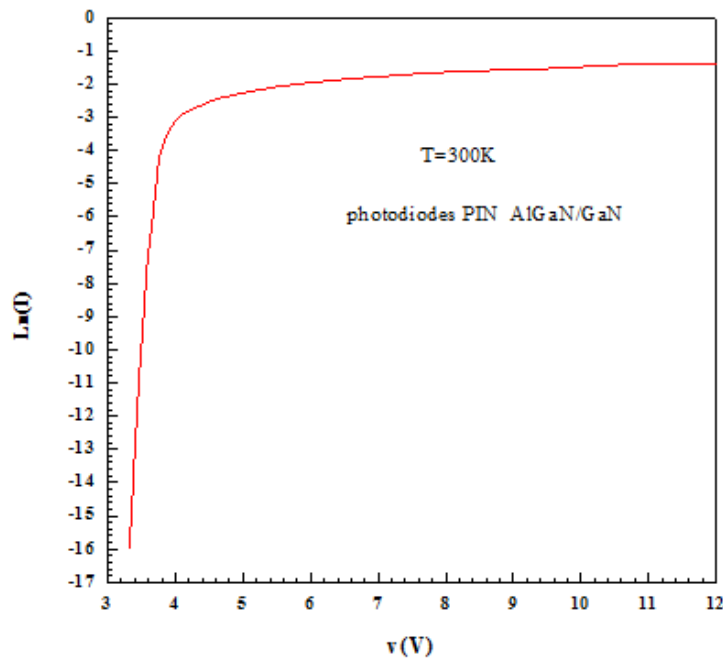


FIGURE 4.1 – la variation de I en fonction de la tension de polarisation des structure Au/Ni/AlGaIn/GaN [1].

4.3.2 Influence des propriétés physiques du matériau sur les caractéristiques électriques du composant Au/Ni/AlGaIn/GaN

L'effet du dopage

La figure (4.2) représente l'influence du dopage sur la caractéristique courant-tension (I-V) de la structure Au/Ni/AlGaIn/GaN. Nous faisons varier la température de $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Nous remarquons, que le courant de la photodiode augmente proportionnellement avec le dopage AlGaIn, si le dopage augmente le courant augmente à cause de la La densité d'électrons augmente à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres.

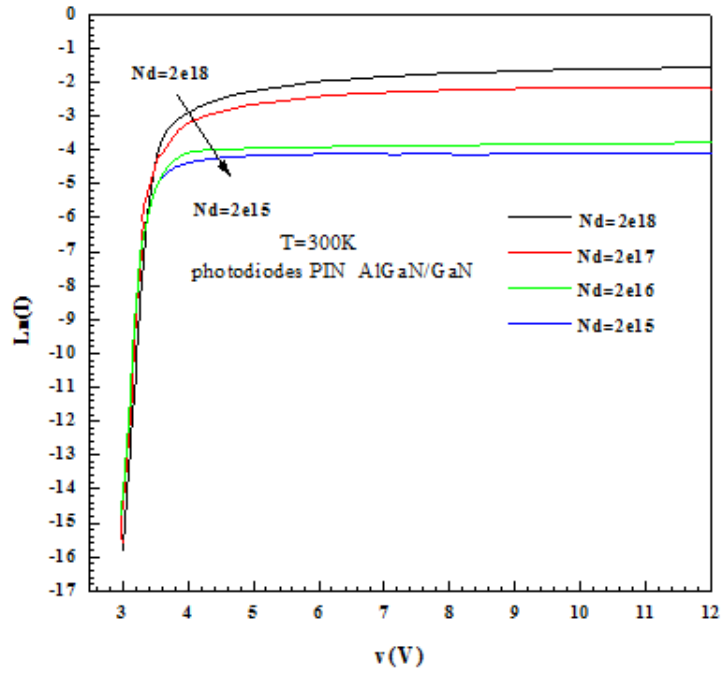


FIGURE 4.2 – L'effet du dopage sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/AlGaIn/GaN [1].

L'effet épaisseur

La Figure (4.3) montre les résultats de la simulation des effets de l'épaisseur sur la caractéristique I-V pour la structure Au/Ni/AlGaIn/GaN. Nous faisons varier l'épaisseur de AlGaIn entre $1\ \mu\text{m}$ et $4\ \mu\text{m}$ Nous remarquons, que le cou-

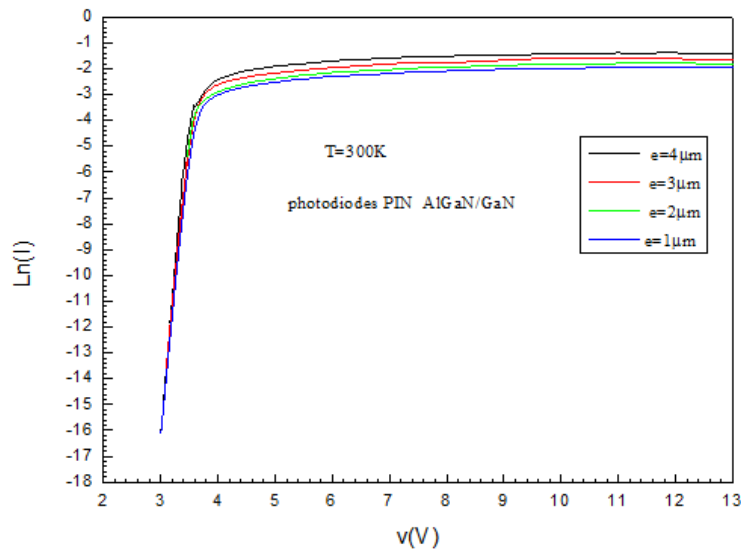


FIGURE 4.3 – L'effet du épaisseur sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/AlGaIn/GaN [1].

rant de la photodiode augmente proportionnellement avec l'épaisseur AlGaAN, à cause de la disponibilité d'un plus grand nombre d'électrons libres et par conséquent une amélioration des performances du dispositif. Les meilleurs résultats sont effectués avec une épaisseur de la couche $4\mu m$ donneuse.

L'effet de la température

La figure (4.4 et 4.5) représente l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension (I-V) de la structure Au/Ni/AlGaAN/GaN. Nous faisons varier la température de 300K à 420K avec un pas de 40K. nous n'avons pas suffisamment d'informations concernant les différents processus de la conduction dans ces structures et la nature de la formation de la barrière de potentiel à l'interface métal/semi-conducteur. La dépendance de la caractéristique courant-tension avec la température permet de bien comprendre les différents processus de la conduction.

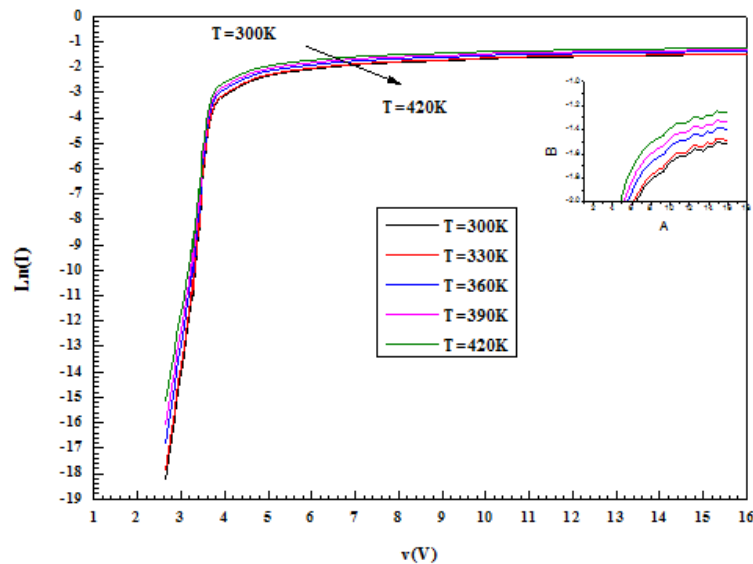


FIGURE 4.4 – L'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/AlGaAN/GaN.

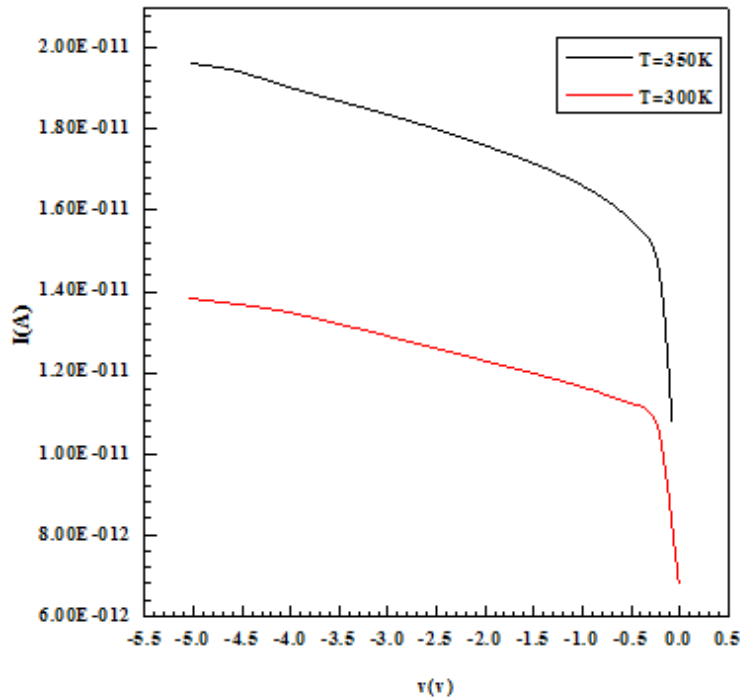


FIGURE 4.5 – L'effet de la température sur les caractéristiques courant-tension de structure Au/Ni/Al-GaN/GaN entre .

4.3.3 Réponse spectrale

L'effet de la température sur la réponse spectrale de la photodiode est représenté sur la figure (4.6). L'augmentation de température, donnez diminution de la réponse spectrale. Parce que AlGaIn a une bande d'énergie indirecte (relation de Varshni sur Le gap direct et indirect [19]), la génération des paires coïncide avec les phonons thermiques qui provoquent une augmentation de sa température interne, supérieure à celle de la température externe ce qui entraîne la diminution de l'absorption

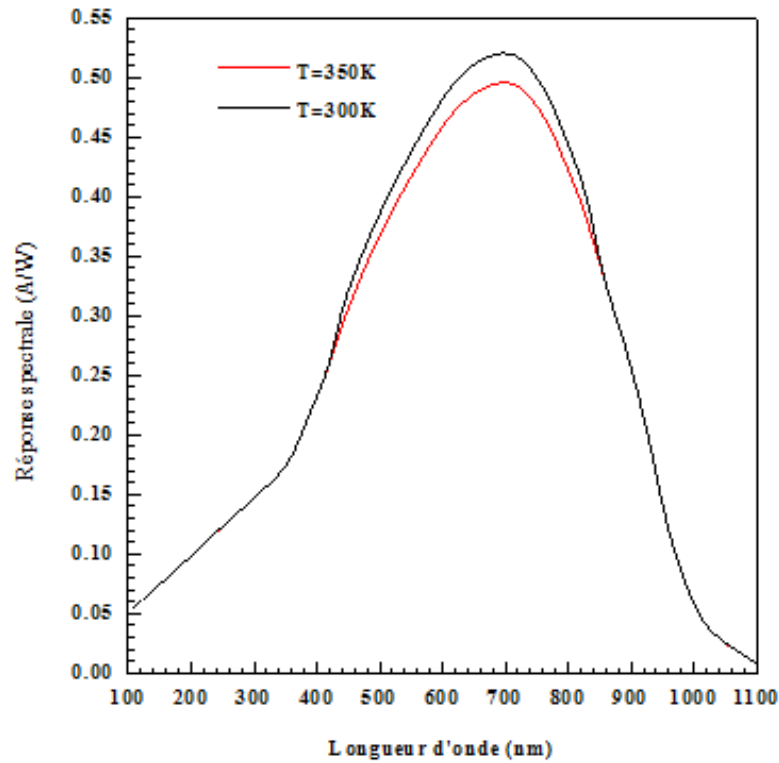


FIGURE 4.6 – la réponse spectrale. .

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les propriétés électriques des structure Au/Ni/AlGa_N/Ga_N, simulée des caractéristiques courant-tension . Nous avons utilisé le programme Atlas Silvaco. nous avons étudié l'influence des paramètres physiques et technologiques des structures précédentes cela nous permis de voir nettement sur quel paramètre influe chaque étape de simulation, pour obtenir les meilleures. performances.

Références

T. Dewolf, Nano-caractérisation des mécanismes de commutation dans les mémoires résistives à base d'HfO₂, in : Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2018.

[2] E. Bersch, S. Rangan, R.A. Bartynski, E. Garfunkel, E. Vescovo, Physical review B 78 (2008) 085114.

[3] F. Bourouba, Modelisation et simulation des contacts metal-semiconducteur à barrière inhomogène, Thèse de doctorat, in : univ setif 2010

[4] M. Saadi, Etude des mécanismes de commutation de résistance dans des dispositifs Métal (Ag)/Isolant (HfO₂)/Métal, application aux mémoires résistives à pont conducteur (CBRAMs), in : 2017.

[5] G.D. Wilk, R.M. Wallace, J. Anthony, Journal of applied physics 89 (2001) 5243-5275.

[6] A. Shetty, B. Roul, S. Mukundan, L. Mohan, G. Chandan, K. Vinoy, S. Krupandhi, AIP Advances 5 (2015) 097103.

[7] A.U.s.M. SILVACO-TCAD, Silvaco International, California (2004).

[8] G. He, L. Zhu, M. Liu, Q. Fang, L. Zhang, Applied Surface Science 253 (2007) 3413-3418.

[9] M. Mamor, Journal of Physics : Condensed Matter 21 (2009) 335802.

[10] S. Monaghan, P. Hurley, K. Cherkaoui, M. Negara, A. Schenk, Solid-State Electronics 53 (2009) 438-444.

[11] M. Tang, Etudes et modélisation compacte du transistor FinFET, Thèse de doctorat, in : Strasbourg, 2009.

[12] M. MANCER, Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs), Thèse de doctorat, in : Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.

[13] U. Ibrahim, H. Abbas, R. Faizan and S. F. Shaukat, "Performance evaluation of photoreceivers in WDM passive optical networks," 6th IEEE International Conference on Engineering Technologies, Islamabad, October 2010.

[14] R. Negru, Conception et modélisation de pixels de photodétection : Photodiodes PIN en silicium amorphe en vue de leurs utilisations comme détecteurs de particules, Thèse de doctorat, in : Palaiseau, Ecole polytechnique, 2008.

[15] H. Brahimi, "Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences. Modélisation, caractérisation et application à la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence," Thèse de doctorat, Spécialité Micro-ondes, Electromagnétisme et Optoélectronique, Université de Paul Sabatier, Toulouse III, 2010.

[16] P. Gopal , V. K. Jain and S. Kar, "Performance comparison of PIN and APD based FSO satellite systems for various pulse modulation schemes in atmospheric turbulence," Communications and Network Journal, Scientific Research, September 2013.

[17] D. Decoster, J. Harari, "Détecteurs optoélectroniques," Hermès-science, pp. 17-20 pp. 26-28, Paris, 2002.

[18]A. Boudkhil Evaluation des Performances des Photodiodes PIN et APD Revue Méditerranéenne des Télécommunication Vol. 5, N 1, March 2015 [19] Thèse de doctorat de H.Abid « contribution à l'étude des propriétés électroniques et optiques des alliages semi-conducteurs de type III-V.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Durant ces dernières années, le développement des composées III-V a été spectaculaire. En effet, ces composés présentent des performances bien supérieures à celles des semiconducteurs plus classiques comme le silicium. Ce sont des matériaux de choix pour toutes les applications micro-électroniques et optoélectroniques. Or les caractéristiques de ces matériaux et des composants sont sensibles à l'état de surface et à l'interface. L'étude du fonctionnement des différents types de composants électroniques passe par une maîtrise préalable des phénomènes physiques régissant les propriétés des électrons dans le semi-conducteur. Il est donc devenu essentiel de comprendre les mécanismes de formation des hétérostructures et des nanostructures pour maîtriser au mieux la technologie des composants réalisés, à l'heure où les nanotechnologies ouvrent de nouvelles voies.

La partie suivante de ce travail a donc consisté à étudier tous les modèles analytiques des mécanismes de conduction pour les deux types d'hétérojonctions métal/ semiconducteur et semiconducteur/ semiconducteur et étudier l'effet des différents paramètres électriques

nous avons montré que :

- ▷ l'influence de la température sur les caractéristiques courant- tension $I(V)$ des structures Au/Ni/AlGaN/GaN dans une gamme de températures (300 K - 400 K).
- ▷ l'influence de l'épaisseur sur la caractéristique I-V pour la structure Au/Ni/AlGaN/GaN. Nous faisons varier l'épaisseur de AlGaN entre $1\ \mu m$ et $4\ \mu m$.
- ▷ l'influence de la dopage sur la caractéristique courant-tension (I-V) de la struc-

ture Au/Ni/AlGaIn/GaN . Nous faisons varier la température de $2.10^{15}cm^{-3}$ à $2.10^{18}cm^{-3}$..

Nous allons Faire une comparaison entre deux photodiodes de différentes jonctions PN et PIN à base d'AlGaIn/GaN.

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

ANNEXE1

Résumé

Durant cette dernière décennie, Les nitrures d'éléments III tels que le GaN, l'InN, l'AlN et BN, sont entrain de connaitre un essor considérable. L'intérêt croissant pour la construction des dispositifs électroniques à Semi-conducteur pour les applications dans les domaines de la micro, de la nano et de l'optoélectronique. Ce travail se rapporte sur l'étude des structures les photodiodes PIN à base de nitrures de galium, le structure Au/Ni/AlGaN / GaN sCe travail est une simulation basée sur le logiciel SILVACO Atlas pour obtenir .les caractéristiques électriques et optiques de la photodiode jonction à savoir la caractéristique courant-tension (I-V) .

Mots clés : Semi-conducteurs ; GaN ; Photodiode PIN ; SILVACO ; AlGaN

Abstract

During the last decade, nitrides of III elements such as GaN, InN, AlN and BN, are experiencing a considerable boom. The growing interest in the construction of semiconductor electronic devices for applications in the fields of micro, nano and optoelectronics.

This work relates to the study of the structures of the PIN photodiodes based on gallium nitrides, the Au/Ni/AlGaN / GaN structure. This work is a simulation based on the SILVACO Atlas software to obtain the electrical and optical characteristics of the photodiode junction namely the current-voltage (I-V) characteristic .

Keywords : Semiconductors ; GaN ; PIN photodiode ; SILVACO ; AlGaN