

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Télécommunication
Spécialité Réseaux & Télécoms

Présenté par

El mechri Naima

&

Longou Ghania Asma

Etude, Simulation et Optimisation d'une photodiode ultra rapide à base des nouveaux Matériaux InGaAs/InP

Proposé par : Pr. AISSAT Abdelkader

&

Co-promoteur: Mr. AMRAOUI Rachid

Année Universitaire 2020-2021

Tout d'abord, nous remercions ALLAH notre créateur de nos avoir donné les forces, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste.

Nous tenons à exprimer mes vifs remerciements à notre promoteur Mr A.Aïssat professeur à l'université de Blida 1, pour son entière disposition et ses judicieux conseils, sa patience et sa gentillesse, on tien nos remerciements à notre co-promoteur Mr R.Amraoui .

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce mémoire. Ainsi que l'ensemble des professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nous dédions ce travail pour tous et chacun :

Aux chère papa Longou Mahmoud et ma chère maman Fatiha

*Aux chère papa El mechri Abdelkrim et ma chère maman
Souhila*

*Nulle dédicace ne peut exprimer ce que nous vous devons pour
vos sacrifices et vos patiences durant nos années d'études. Ce
travail n'est qu'un humble témoignage de notre grand et éternel
amour et de nos infinies reconnaissances.*

*À mes sœurs et frère Fessa, Linda, Mouhamed qui ne sont pas
moins chers.*

Et à ma chère amie Imene.

En expression de notre grande affection et notre gratitude.

Merci d'être toujours là pour nous

ملخص: يتطلب الارسال الضوئي بسرعه عالية جدا تطوير اجهزة استقبال عالية الأداء. يتركز هذا العمل على دراسة ومحاكاة وتحسين الصمام الثنائي الضوئي من نوع بي إن أن فائق السرعة استنادًا على مركب ثلاثي من أنصاف النواقل V-III، InGaAs على الركيزة InP. لقد قمنا بتحسين تأثير تركيز الإنديوم على مختلف الإعدادات الكهربائية و الضوئية لـ InGaAs / InP ، باستخدام برنامج محاكاة وهو Matlab ، بالإضافة إلى السعة وتردد القطع لجهاز الكشف الضوئي.

كلمات المفاتيح: الصمام الثنائي الضوئي، الركيزة، أنصاف النواقل V-III، السعة، التردد، كاشف ضوئي.

Résumé : La transmission optique à très haut débit, nécessite le développement de récepteurs de très hautes performances. Ce travail porte sur l'étude, la simulation et l'optimisation d'une photodiode ultra-rapide à base d'un composé ternaire de semiconducteurs III-V de l'épithaxie InGaAs sur le substrat InP. Nous avons optimisé l'impact de la concentration d'indium sur les différentes paramètres électriques et optiques de l'alliage InGaAs/InP, à l'aide d'un logiciel de simulation qui est Matlab, ainsi que la capacité et la fréquence de coupure d'un photodétecteur.

Mots clés : Photodiode, substrat, épithaxie, Semi-conducteur III-V, Capacité, Fréquence de coupure, photodétecteur.

Abstract: Very high-speed optical transmission requires the development of very high-performance receivers. This work deals with the study, simulation and optimization of an ultrafast photodiode based on a ternary compound of III-V semiconductors epitaxial InGaAs on InP substrate. We optimized the impact of indium concentration on the different electrical and optical parameters of the InGaAs/InP alloy, using a simulation software which is Matlab, as well as the capacitance and cut-off frequency of a photodetector.

Keywords: Photodiode, substrate, epitaxy, III-V semiconductor, capacitance, cut-off frequency, photodetector.

Listes des acronymes et abréviations

In : Indium.
Ga: Gallium.
As: Arsenic.
P: phosphore.
x : Concentration d'indium.
Eg: Énergie de gap.
lh: Trous légers (Light hole).
hh: Trous lourds (Heavy holes).
Ev: Énergie de la bande conduction.
Ec : Énergie de la bande valence.
BC : Bande de conduction.
BV : Bande de valence.
 $\vec{k}$: Vecteur d'onde.
a: Paramètre de maille.
c: Vitesse de la lumière dans le vide.
 ϵ_0 : Le constant diélectrique relatif du vide.
S: La surface de la zone active.
 ϵ_r : Le constant diélectrique relatif du matériau utilisé.
b: Coefficient de courbure (Bowing).
E i : Niveaux d'énergies.
E : Énergie de photon.
hv : Énergie de photon.
 ΔE_{hh} : Décalage d'énergie de la bande de trous lourds.
 ΔE_{lh} : Décalage d'énergie de la bande de trous légers.
 λ :Longueur d'onde.
 λ_g : La longueur d'onde de l'énergie de gap.
 λ_{lh} : La longueur d'onde de trous lourds.
 λ_{hh} : La longueur d'onde de trous légers.
A : Paramètre empirique de Varshni.
B : Paramètre empirique de Varshni.
 $\epsilon_{||}$ (ϵ_{yy} ou ϵ_{zz}): Déformation biaxiale.
 $\epsilon_{\perp}$ (ϵ_{xx}) : Déformation uni-axiale.
 E_{hh} : Énergie de la bande de trous lourds.
 E_{lh} : Énergie de la bande de trous légers.
h :Constante de Planck.
ZCE : La Zone de Charge d'Espace.
T : Température.

Q_v : Décalage relatif de bande de valence.
 Q_c : Décalage relatif de bande de conduction.
 n : L'indices de réfractions.
 θ : L'angles de rayon lumineux par rapport à la normale.
 R : Coefficient de réflexion.
 T : Coefficient de transmission.
 α : Coefficient d'absorption.
 λ : Longueur d'onde.
 λ_s : Longueur d'onde de seuil.
 EQE : L'efficacité quantique externe.
 EQI : L'efficacité quantique interne.
 τ_{tr} : Temps de transit.
 τ_{RC} : Temps de réponse du circuit.
 d : Largeur de la zone d'absorption.
 d_{abs} : Épaisseur de la zone absorbante.
 d_{tr}^p : Épaisseur de zone transparente côté p.
 d_{tr}^n : Épaisseur de zone transparente côté n.
 v_p : La vitesse de saturation des trous.
 v_n : La vitesse de saturation des électrons.
 a_c : Potentiel hydrostatique de déformation pour la bande de conduction.
 a_v : Potentiel hydrostatique de déformation pour la bande de valence.
 $\frac{d\Omega}{\Omega}$: Changement de volume fractionnaire.
 b : Potentiel de déformation.
 C : Paramètre de matériau de modèle Adachi.
 D : Paramètre de matériau de modèle Adachi.
 i_{ph} : Source de courant.
 R_s : Résistance interne de la photodiode.
 R_{sh} : Résistance de shunt de la photodiode.
 C_j : Capacité de jonction.
 w : Pulsation.

Table des matières

Listes des acronymes et abréviations	5
Introduction générale	1
Chapitre 1 Etat de l'art	3
1 Introduction	3
1.1 La jonction PN	3
1.1.1 Jonction non polarisée	3
1.1.2 La Zone de Charge d'Espace (ZCE)	4
1.1.3 Jonction PN polarisée en direct	5
1.1.4 Jonction P-N polarisée en inverse	5
1.2 Les semi-conducteur III-V	5
1.2.1 Caractéristiques physiques	6
1.2.2 Caractéristiques optiques des semiconducteurs	10
1.3 La photodiode	12
1.3.1 Principe de fonctionnement	12
1.3.2 Photodiode PIN	13
1.3.3 Modèle équivalent d'une photodiode	13
1.3.4 Paramètres d'une photodiode	14
1.3.5 Caractéristique d'une photodétecteur	14
1.4 Conclusion	16
Chapitre 2 Résultats et Discussions	17
2 Introduction	17
2.1 Paramètre de maille	17
2.2 Effet de contrainte	18
2.3 Energie de la bande interdite (sans contrainte)	18
2.4 Effet de la Température sur l'énergie de bande interdite	19
2.5 La longueur d'onde λ_g	20
2.6 Décalages de bandes	20
2.7 Energie de la bande interdite des trous lourds et trous légers	22
2.8 La longueur d'onde de la bande interdite des trous lourds et légers	23
2.9 Le coefficient d'absorption de la bande interdite des trous lourds et trous légers	24
2.10 Taux de confinement des électrons	26
2.11 Indice de réfraction	27
2.12 Coefficient de réflexion et de transmission :	28
2.13 Capacité	28

2.14	Fréquence de coupure f_c	29
2.15	Bande Passante	33
2.16	Conclusion.....	33
Conclusion Général.....		34
Annexe		35
Liste des Références		36

Liste des figures

Figure 1.1. Une jonction PN.	3
Figure 1.2. Le fonctionnement de Jonction PN	4
Figure 1.3. Jonction PN polarisée en direct	5
Figure 1.4. Jonction PN polarisée en inverse.	5
Figure 1.5. Tableau périodique des éléments chimiques de Mendeleïev.	6
Figure 1.6. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct.....	8
Figure 1.7. Schéma de principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux.	10
Figure 1.8. Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semiconducteurs intrinsèque et extrinsèque.....	12
Figure 1.9. Principe de fonctionnement d'une photodiode PIN.	13
Figure 1.10. Schéma équivalent d'une photodiode.....	14
Figure 2.1. Paramètre de maille de $In_xGa_{1-x}As$ en fonction de la concentration d'indium.	17
Figure 2.2. Désaccord de maille en fonction de la concentration d'indium.	18
Figure 2.3. L'énergie gap de la structure InGaAs/InP en fonction de la concentration d'indium.....	19
Figure 2.4. L'énergie de la bande interdite en fonction d'indium et la température.....	19
Figure 2.5. La longueur d'onde en fonction d'indium et de la température.	20
Figure 2.6. Puits quantique.	20
Figure 2.7.a. Représente la variation des décalages de bandes ΔEc et ΔEv à T=300K.	21
Figure 2.7.b. Représente la variation des décalages de bandes ΔEc et ΔEv à T=0K.....	21
Figure 2.8.a. l'énergie de la bande interdite des trous lourds et légers en fonction de la concentration d'indium à T=300K.	22
Figure 2.8.b. l'énergie de la bande interdite des trous lourds et légers en fonction de la concentration d'indium à T=0K.	22
Figure 2.9.a. Longueur d'onde λ_{lh} en fonction de la concentration d'indium et de la température....	23
Figure 2.9.b. Longueur d'onde λ_{hh} en fonction de la concentration d'indium et de la température...23	23
Figure 2.10. Variation des longueurs d'ondes en fonction de la concentration d'indium à T=0K et T=300K.	24
Figure 2.11.a. la variation de coefficient d'absorption α_{hh} en fonction de la concentration d'indium et l'énergie de photon.	25
Figure 2.11.b. la variation de coefficient d'absorption α_{lh} en fonction de la concentration d'indium et l'énergie de photon.	25
Figure 2.12.a. Variation de taux de confinement dans le puits quantique $In_xGa_{1-x}As / InP$ en fonction des concentrations d'indium à T=300K.	26
Figure 2.12.b. Variation de taux de confinement dans le puits quantique $In_xGa_{1-x}As / InP$ en fonction des concentrations d'indium à T=0K.....	26
Figure 2.13. L'indice de réfraction en fonction des concentrations de la concentration d'indium et de la longueur d'onde.....	27
Figure 2.14. Coefficient de réflexion et de transmission en fonction de la longueur d'onde.	28
Figure 2.15. Montre le schéma de la structure à puits quantique $In_xGa_{1-x}As / InP$	28
Figure 2.16. Capacité C en fonction de la largeur de la zone d'absorption d pour des différentes surfaces de la zone active S.....	29
Figure 2.17.a. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour d=0.5µm.	29

Figure 2.17.b. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=1\mu\text{m}$	29
Figure 2.18.a. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=0.5\mu\text{m}$	31
Figure 2.18.b. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=1\mu\text{m}$	31
Figure 2.19.a. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=0.5\mu\text{m}$	32
Figure 2.19.b. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=1\mu\text{m}$	32
Figure 2.20. la bande passante en fonction de la largeur de la zone d'absorption pour des différentes surfaces de la zone active	33

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Représente les valeurs optimales pour l'indice de réfraction.	27
Tableau A.1 Paramètres physiques fondamentaux des principaux binaires III-V.....	35

Introduction générale

Un récepteur d'un système de télécommunication optique doit comporter un détecteur optique qui est un dispositif qui fait transformer l'énergie optique en énergie électrique ou autrement dit-il converti un signal optique en signal électrique, leur tension à la sortie est proportionnelle à la puissance optique incidente. Le détecteur doit avoir : une grande sensibilité à la longueur d'onde du signal incident, une grande bande passante (ou grande vitesse de réponse) et réponse en fréquence linéaire pour conserver la forme du signal d'entrée, faible bruit additionnel donc haute-fidélité de conversion, stabilité de caractéristique flux-courant, haute efficacité quantique. La photodiode PIN est le dispositif à semi-conducteur qui répond à ces conditions [1].

En électronique rapide et en optoélectronique, les propriétés des composés semiconducteurs III-V sont préférables, on citera par exemple quelques composés binaires et ternaire GaAs, InAs, InP, InGaAs. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs. Dans ces derniers, l'incidence de la lumière provoque la génération des porteurs, qui, si elles ne sont pas recombinées, peuvent contribuer au courant de composant. De cette façon, les jonctions PN et PIN sont largement utilisées comme dispositifs optiques, puisque le champ électrique présent dans la couche d'appauvrissement formée entre les deux régions (P et N) agit pour séparer les paires électron-trou et pour augmenter le courant inverse de la diode. En outre, plus la taille de la couche d'appauvrissement est grande, plus la quantité d'absorption de lumière est élevée. D'autre part, pour avoir un champ électrique plus élevé, une couche d'appauvrissement plus petite est nécessaire [2].

Le premier chapitre présente l'état de l'art de la jonction PN, et du matériau III-V, ses caractéristiques électrique et optique, les effets de contrainte, Ainsi que la photodiode, son principe de fonctionnement, et les caractéristiques de détection. Et les modèles mathématiques utilisés dans les simulations Matlab.

Le deuxième chapitre sera un enchainement de simulations avec leurs interprétations appliquées sur notre matériau en utilisent le logiciel Matlab.

Les objectives de ce travail sont l'étude et l'optimisation d'une photodiode ultra rapide à base de nouveau matériau InGaAs/InP.

Chapitre 1 Etat de l'art

1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le principe de base d'une jonction PN et ces différentes polarisations. Ainsi que, les semi-conducteurs III-V et ces caractéristiques électriques et optiques que nous avons utilisé dans notre structure. Ce chapitre présente aussi le principe de fonctionnement d'une photodiode, les caractéristiques de la photodiode PIN, et finalement les performances du photodétecteur la capacité et la fréquence de coupure.

1.1 La jonction PN

La jonction PN est physiquement la juxtaposition de deux régions dopées différemment dans le même cristal semi-conducteur, la zone entre la région de type N et la région de type P est appelée région métallurgique. Lorsque les matériaux semi-conducteurs des deux zones dopées différemment sont les mêmes, la jonction est appelée homojonction. Lorsque les matériaux sont différents, c'est le cas des composants à base de composés semi-conducteurs III-V. On parle d'hétérojonctions, donc ce dernier cas nécessite une compatibilité des réseaux cristallins [3]. La figure 1.1 représente le schéma d'une jonction PN.

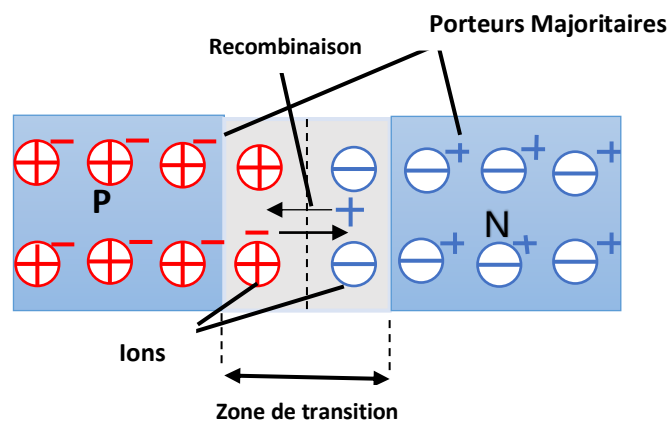


Figure 1.1. Une jonction PN [4].

1.1.1 Jonction non polarisée

Une jonction est formée en combinant deux semi-conducteurs dopés P et N. La connexion avec le milieu extérieur est réalisée par des contacts métalliques. Par construction, la jonction entre le métal et le semi-conducteur est purement ohmique [2]. La figure 1.2 représente le fonctionnement d'une jonction PN.

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

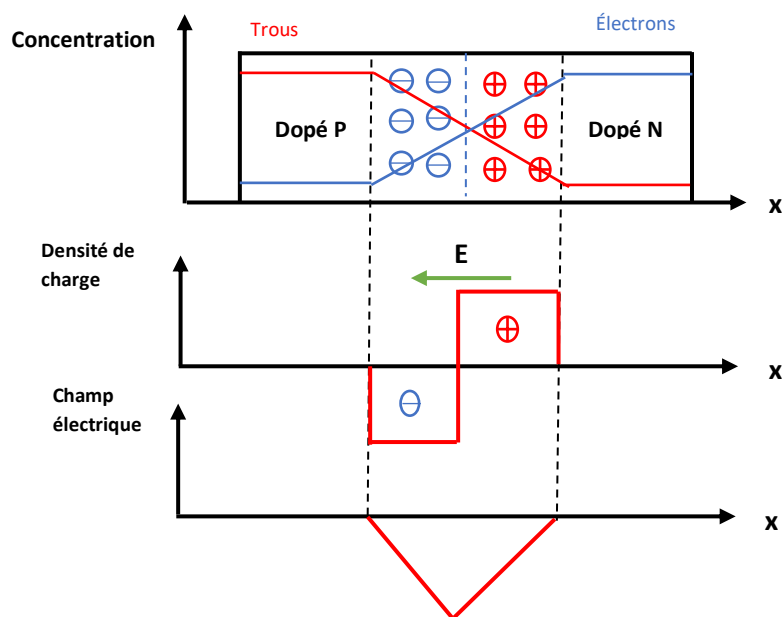


Figure 1.2. Le fonctionnement de Jonction PN [5].

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

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

1.1.2 La Zone de Charge d'Espace (ZCE)

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

disparaissant, il laisse du côté "P" un atome accepteur ionisé négativement non compensé électriquement [2].

1.1.3 Jonction PN polarisée en direct

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction. La figure 1.3 représente la polarisation directe d'une jonction PN.

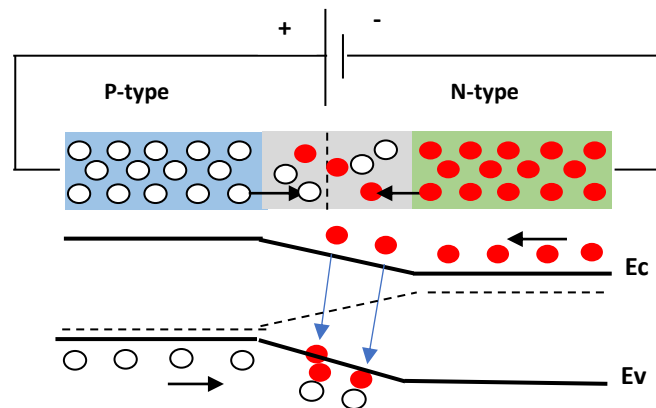


Figure 1.3. Jonction PN polarisée en direct [6].

1.1.4 Jonction P-N polarisée en inverse

La partie "P" de la jonction à un potentiel négatif par rapport à la partie "N". La différence de potentiel créée par la source extérieure au niveau de la jonction est négative. La figure 1.4 représente la polarisation inverse d'une jonction PN.

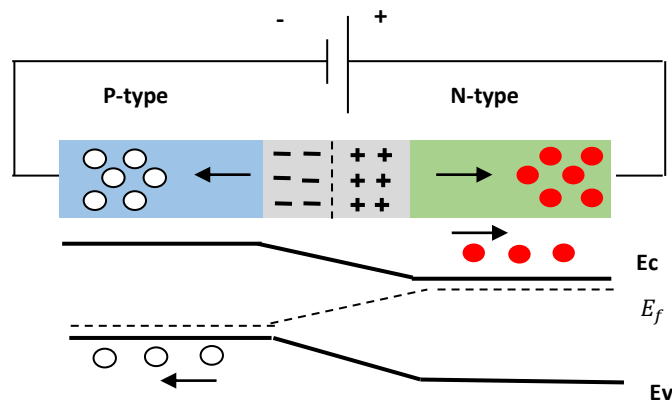


Figure 1.4. Jonction PN polarisée en inverse [6].

1.2 Les semi-conducteur III-V

Les semi-conducteur III-V sont des matériaux formés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique associé avec un ou plusieurs éléments de la colonne V de

la classification périodique de Mendeleïev. Les matériaux III-V ont des propriétés remarquables (gap direct, forte mobilité de porteur, ...etc.). La figure 1.5 représente le tableau périodique des éléments chimiques de Mendeleïev. Les chiffres en haut et en bas représente respectivement le nombre atomique et la masse atomique, voici le tableau périodique de Mendeleïev.

					18 VIII A 8A	
13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	2 He Helium 4.00260	
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.00574	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998403	10 Ne Neon 20.1797	
13 Al Aluminum 26.981539	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948	
31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80	
49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29	
81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98037	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine 209	86 Rn Radon 222.0176	
113 Uut Ununtrium [288]	114 Uuq Ununquadium [289]	115 Uup Ununpentium [290]	116 Uuh Ununhexium [291]	117 Uus Ununseptium [292]	118 Uuo Ununoctium [293]	

Figure 1.5. Tableau périodique des éléments chimiques de Mendeleïev [8].

Les semi-conducteurs sont caractérisés par leur bande interdite ou gap, qui sépare les derniers états occupés de la bande de valence et les états libres suivants dans la bande de conduction. L'énergie des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence dépend de leur vecteur d'onde. Selon le vecteur d'onde, les matériaux semi-conducteurs sont divisés en deux types : à gap direct et à gap indirect [9]. Lorsque le minimum de la bande de conduction possède le même vecteur d'onde $\vec{k}$ que le maximum de la bande de valence, le gap est dit direct. Le gap indirect c'est le contraire de gap direct, si le minimum de la bande de conduction ne possède pas le même vecteur d'onde $\vec{k}$ que le maximum de la bande de valence. Les processus d'absorption ou d'émission sont considérablement plus importants dans les semi-conducteurs à gap direct sont donc, d'une manière générale, plus adaptés que les autres pour les applications optoélectronique [9].

1.2.1 Caractéristiques physiques

1.2.1.1 Paramètre de maille

Le paramètre de maille se définit comme étant la distance entre deux atomes dans un cristal. Lorsqu'un atome étranger est introduit dans le réseau cristallin, il provoque en général une variation du paramètre cristallin qui se traduit par une expansion ou une contraction du réseau, en fonction de la taille des atomes. Nous avons utilisé la loi de Végard pour le calcul du paramètre de maille [10].

$$a_{In_xGa_{1-x}As} = (1 - x) \cdot a_{GaAs} + x \cdot a_{InAs} \quad (1.1)$$

a_{GaAs} : est le paramètre de maille du composé GaAs.

a_{InAs} : est le paramètre de maille du composé InAs.

1.2.1.2 Effet de contrainte

L'épitaxie de matériau InGaAs sur InP a un paramètre de maille initialement différent provoque une contrainte. Le substrat de paramètre de maille a_s différent de celui de la couche épitaxie a_e , impose sa maille à cette dernière, cette différence de maille provoque une déformation de la couche épitaxie, soit en tension ou en compression par des déformations biaxiales (ϵ_{yy} et ϵ_{zz}) et uniaxiale (ϵ_{xx}) [11].

$$\text{- Biaxiale dans le plan de croissance : } \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_{InP} - a_{InGaAs}}{a_{InGaAs}} \quad (1.2)$$

$$\text{- Uniaxiale dans la direction de croissance : } \epsilon_{zz} = -2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \epsilon_{xx} \quad (1.3)$$

1.2.1.3 Energie de bande interdite

L'énergie de bande interdite E_g est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation. Le gap énergétique pour l'alliage $In_xGa_{1-x}As$ est donné par la loi de Végard [12] :

$$E_{g_{In_xGa_{1-x}As}} = (1-x) \cdot E_{g_{GaAs}} + x \cdot E_{g_{InAs}} - b \cdot x \cdot (1-x) \quad (1.4)$$

Où :

- $E_{g_{GaAs}}$: est le gap du composé GaAs.
- $E_{g_{InAs}}$: est le gap du composé InAs.
- b : étant le paramètre de courbure (bowing) qui est souvent prouvé par l'expérience (par exemple pour $In_xGa_{1-x}As$, b est égale à 0.43eV) L'origine du bowing est dû à l'aspect structural et au désordre compositionnel qui sont très dominant dans les fluctuations de l'alliage ternaire.

1.2.1.4 Effet de la température sur l'énergie de gap

Les mesures expérimentales montrent que l'énergie de gap varie avec la température, ceci est expliqué par changement de paramètre de maille. Pour déterminer cette variation l'approximation de Varshni est souvent utilisée [13,14].

$$E_g(t) = E_g(t=0) - \frac{A(x) \cdot T^2}{B(x) + T} \quad (1.5)$$

Avec A, B paramètres empiriques de Varshni.

1.2.1.5 Effet de la contrainte sur le Gap d'énergie

Le schéma dans la figure suivante (figure 1.6) montre l'effet de la contrainte sur la structure de bande de la couche épitaxie, il représente la structure de bande semiconducteur à gap direct en l'absence de contrainte (figure 1.6.a), et soumis à une compression biaxiale (figure 1.6.c) et le cas d'une contrainte biaxiale de tension (figure 1.6.b).

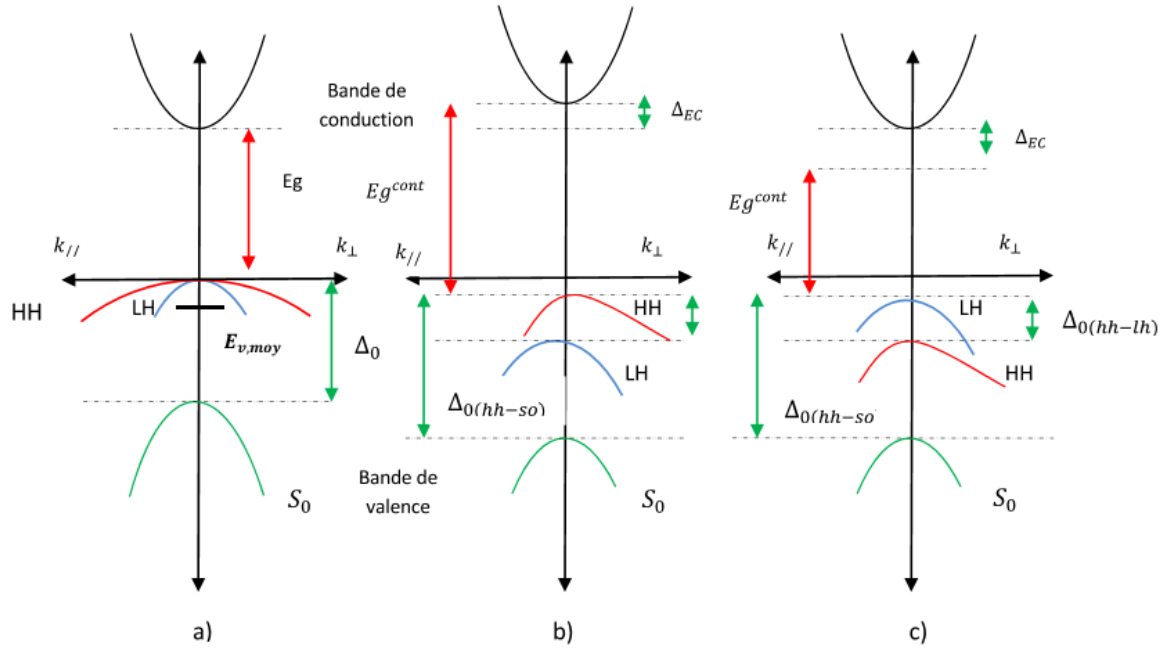


Figure 1.6. Structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct [15].

Comme on peut le voir, pour les couches non contraintes les bandes de trous lourds et de trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin, et la bande de trous spin-splittée est située à une énergie Δ_0 en dessous de ces deux bandes (figure 1.6.a), le centre de gravité de la bande de valence, se trouve par conséquent à Δ_0 au-dessous du haut de la bande de valence en $k=0$.

$$E_{v,moy} = \frac{E_{HH} + E_{LH} + \Delta_0}{3} \quad (1.6)$$

L'effet de la contrainte sur les bandes de valence et de conduction peut être décomposé en deux composantes

- Une composante hydrostatique, qui diminue l'énergie de bande interdite dans le cas d'une augmentation de volume ou qui l'augmente dans le cas contraire.
- Une composante de cisaillement qui a pour effet de lever la dégénérescence trous lourds, trous légers du haut de la bande de valence.

Dans le cas d'une couche soumise à une contrainte biaxiale de compression (figure 1.6.b) la composante hydrostatique augmente le gap moyen entre les bandes de conduction et de valence. Alors que la composante de cisaillement rend les bandes de valence fortement anisotropes : la bande de plus haute énergie HH devient "lourde" selon $k_{\perp}$ et "légère" selon $k_{\parallel}$, la bande d'énergie inférieure LH devient légère selon $k_{\perp}$ et lourde selon $k_{\parallel}$ [16].

Les décalages en énergie des centres de gravité de la bande de valence et de la bande de conduction en $k=0$ varient proportionnellement à la contrainte [17] :

$$dE_c = a_c \left(\frac{d\Omega}{\Omega} \right) \quad (1.7)$$

$$dE_v = a_v \left(\frac{d\Omega}{\Omega} \right) \quad (1.8)$$

avec

- a_c Et a_v les potentiels hydrostatiques de déformation, respectivement, pour la bande de conduction et la bande de valence.
- $\left(\frac{d\Omega}{\Omega} \right)$ Est le changement de volume fractionnaire qui, pour de petites déformations sur des substrats (001), peut être approximé par :

$$\left(\frac{d\Omega}{\Omega} \right) = (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) = (2\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}) \quad (1.9)$$

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement dans chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants, dans le cas d'une croissance sur substrat (001).

$$\Delta E_{hh} = \frac{\Delta_0}{3} - \frac{\delta E_{001}}{2} \quad (1.10)$$

$$\Delta E_{lh} = -\frac{\Delta_0}{6} + \frac{\delta E_{001}}{4} + \frac{1}{2} \left[\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E_{001} + \frac{9}{4} (\delta E_{001})^2 \right]^{1/2} \quad (1.11)$$

$$\Delta E_{so} = -\frac{\Delta_0}{6} + \frac{\delta E_{001}}{4} - \frac{1}{2} \left[\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E_{001} + \frac{9}{4} (\delta E_{001})^2 \right]^{1/2} \quad (1.12)$$

Et δE_{001} est donnée par : $\delta E_{001} = 2b(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \quad (1.13)$

où :

- b est le potentiel de déformation par cisaillement pour une déformation de symétrie tétragonale.

E_v : l'énergie du haut de la bande de valence est :

- Pour InP : $E_{v_{InP}} = E_{v, moy} + \frac{\Delta_0}{3} \quad (1.14)$

- Pour InGaAs : $E_{v,i} = E_{v, moy} + a_v \left(\frac{d\Omega}{\Omega} \right) + dE_{v,i} \quad \text{pour } i=1-3 \quad (1.15)$

E_c : l'énergie du bas de la bande de conduction est :

- Pour InP : $E_{c_{InP}} = E_v + E_g \quad (1.16)$

- Pour InGaAs : $E_c = E_{v, moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_{g,0} + a_c \left(\frac{d\Omega}{\Omega} \right) \quad (1.17)$

On peut déterminer l'équation du Gap contraint :

$$E_{g,i} = E_c + E_{v,i} \quad \text{Pour } i=1-3 \quad (1.18)$$

Les décalages de bande peuvent alors être définis comme suit :

$$\Delta E_{v,i} = E_{v,i} - E_{v,InP} \quad \text{Pour } i=1-3 \quad (1.19)$$

$$\Delta E_c = E_{c,InP} - E_c \quad (1.20)$$

Et le décalage relatif des bandes peut être exprimé comme suit :

$$Q_{v,i} = \frac{\Delta E_{v,i}}{\Delta E_{v,i} + \Delta E_c} = \frac{\Delta E_{v,i}}{\Delta E_{g,i}} \quad (1.21)$$

$$Q_{c,i} = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_{v,i} + \Delta E_c} = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_{g,i}} \quad (1.22)$$

1.2.2 Caractéristiques optiques des semiconducteurs

1.2.2.1 Indice de réfraction

L'indice de réfraction provient du phénomène de réfraction qui désigne le changement de direction de la lumière au passage d'un milieu à un autre. La notion d'indice de réfraction a d'abord été introduite empiriquement comme coefficient dans les lois de snell-descarts.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (1.23)$$

avec :

- n_1 Et n_2 : est les indices de réfractions de deux milieux.
- θ_i Et θ_r : est les angles des rayons lumineux par rapport à la normale.

La figure 1.7 représente le principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux.

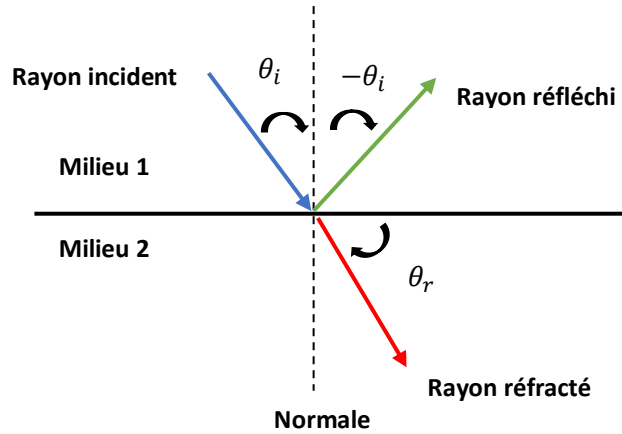


Figure 1.7. Schéma de principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux [18].

L'une des raisons pour laquelle nous étudions l'indice de réfraction est de réduire la réflectivité des matériaux et par conséquent, augmenter l'intensité du faisceau incident, et ce par l'introduction de couches additionnelles [19]. La variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde a été évaluée selon la formule de Adachi [20,21] :

$$n(E) = \sqrt{C(x) \left(\frac{E}{E_g} \right)^{-2} \left\{ 2 - \sqrt{1 + \frac{E}{E_g}} - \sqrt{1 - \frac{E}{E_g}} \right\} + D(x)} \quad (1.24)$$

Avec

- E : Energie de photon. $E = \frac{hc}{\lambda}$ (1.25)
- $C(x)$ Et $D(x)$: sont des paramètres dépendant de la composition du matériau donnés par les expressions :

$$C(x) = C_{GaAs} \cdot (1 - x) + C_{InAs} \cdot x \quad (1.26)$$

$$D(x) = D_{GaAs} \cdot (1 - x) + D_{InAs} \cdot x \quad (1.27)$$

1.2.2.2 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion d'une interface est défini pour une incidence normale comme le rapport de la puissance du faisceau réfléchi sur la puissance du faisceau incident [22].

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1.28)$$

La réduction de la réflexion de la lumière se fait en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés. Plus la différence des indices de réfraction est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante [19].

1.2.2.3 Le coefficient de transmission

Le coefficient de transmission est régi par la conservation de puissance et s'exprime par le rapport de la puissance du faisceau transmis à celle du faisceau incident [22] :

$$T = 1 - R \quad (1.29)$$

En introduisant l'équation (1.28) dans (1.29) on obtient :

$$T = \frac{4 \cdot n_1 \cdot n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1.30)$$

1.2.2.4 Absorption

Le coefficient d'absorption (α), est le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de sa longueur d'onde. Ainsi, lorsque l'énergie du photon est inférieure au gap du matériau, la transition des électrons vers la bande de conduction n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$, pour une énergie de photon supérieure à l'énergie E du gap est donné par l'équation suivante [23] :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E - E_g}}{E} \quad (1.31)$$

Où :

- E : est l'énergie du photon.
- α_0 : est la valeur primaire est égale à $2 \cdot 10^5 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
- E_g : est l'énergie de gap du matériau semi-conducteur

1.3 La photodiode

Un détecteur optique est un dispositif qui fait transformer l'énergie optique en énergie électrique ou autrement dit-il convertit un signal optique en signal électrique. La tension à la sortie est proportionnelle à la puissance optique incidente ; c'est donc un détecteur d'enveloppe ou détecteur quadratique [1].

1.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de base de la réception d'un flux lumineux par un système électronique est la conversion des photons en électrons. L'énergie du photon, absorbée par un semi-conducteur, fait créer une paire de porteurs libres : un électron dans la bande de conduction et un trou dans la bande de valence, cette paire génère un courant électrique dit photocourant. Le photocourant est, donc, proportionnel au nombre des photons incidents.

Le semiconducteur peut passer vers l'état excité si l'énergie du photon est suffisante pour permettre le passage de la bande de valence vers la bande de conduction. Seuls les photons d'énergie supérieure à la largeur de bande interdite du semiconducteur sont absorbés de manière utile c'est à dire en créant des paires électron-trou dans la bande de conduction et la bande de valence d'où la condition :

$$E \geq E_c - E_v = E_g \quad (1.32)$$

Ce qui correspond à la longueur d'onde λ_g , telle que :

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g} \quad (1.33)$$

Ou bien sous la forme :

$$\lambda_g = \frac{1.24}{E_g} \quad (1.34)$$

Si $\lambda > \lambda_g$, le photon travers le semiconducteur sans être absorbé et on dit que le matériau est transparent pour telle longueur d'onde. La figure 1.8 représente le Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semiconducteurs intrinsèque et extrinsèque [1].

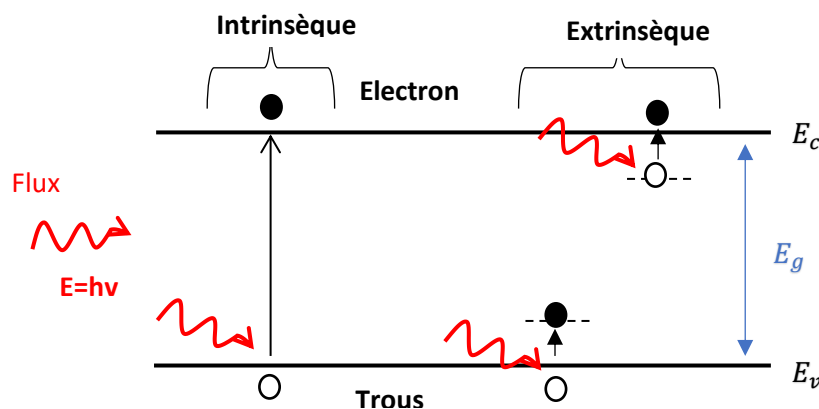


Figure 1.8. Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semiconducteurs intrinsèque et extrinsèque [22].

1.3.2 Photodiode PIN

Une photodiode PIN est basée sur une simple jonction PN au milieu de laquelle a été insérée une couche intrinsèque, absorbante de la longueur d'onde, afin d'augmenter l'épaisseur de la zone déserte et donc la zone d'absorption principale de la photodiode [18].

Le principe de fonctionnement est le même que celui de la photodiode PN. Polarisée en inverse, la couche intrinsèque est totalement déplétée et convertit en signal électrique la majorité du signal optique incident. La valeur du champ électrique est quasi-uniforme dans la zone intrinsèque. L'éclairement de la photodiode peut se faire côté épitaxie comme il peut se faire côté substrat. La couche P^+ peut-être absorbante comme elle peut être transparente [24]. La figure 1.9 représente le principe de fonctionnement d'une photodiode PIN.

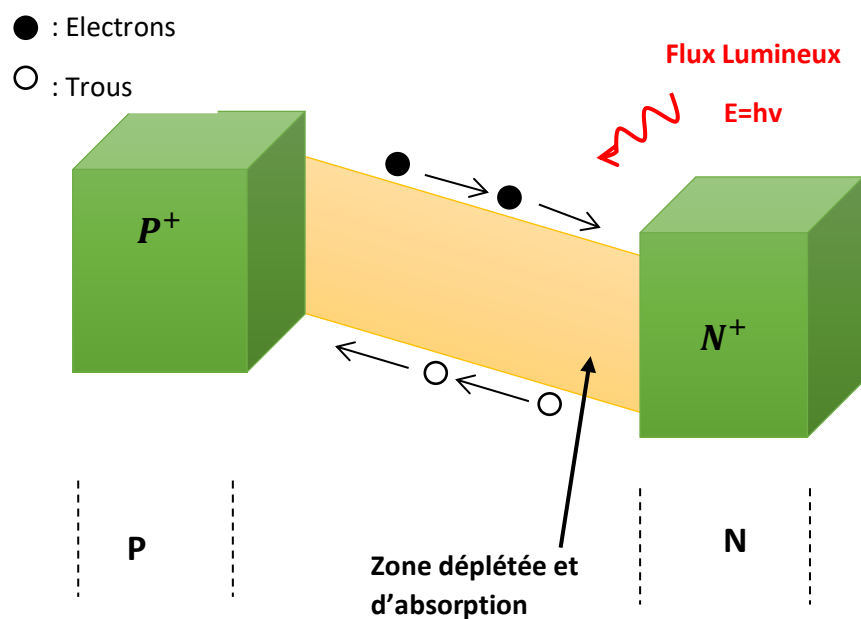


Figure 1.9. Principe de fonctionnement d'une photodiode PIN [18].

1.3.3 Modèle équivalent d'une photodiode

Une photodiode peut être représentée par une source de courant I_{ph} (dépendant de l'éclairement), cette source est due à la génération des électrons trous que constitue le courant. En parallèle avec la source, on trouve la capacité de jonction C_j qui est due à la zone de charge et une résistance de shunt R_{sh} d'une valeur élevée et qui décrit la fuite de courant (ou bruit). Ensuite il existe une résistance en série interne de la photodiode appelé R_s qui est due à la résistance du substrat et aux résistances de contact. La figure 1.10 décrit le schéma équivalent d'une photodiode [18].

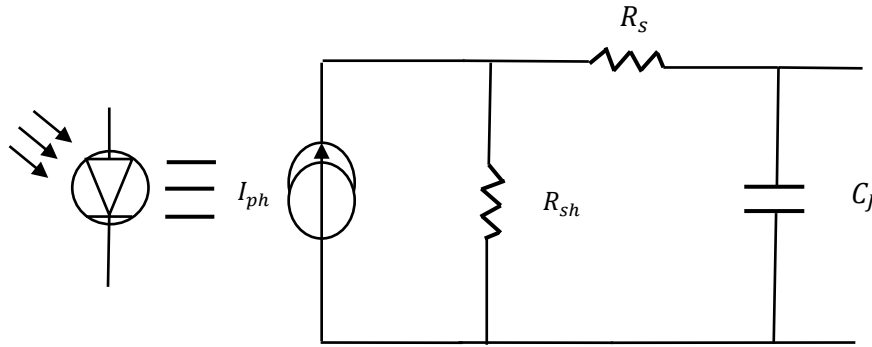


Figure 1.10. Schéma équivalent d'une photodiode [25].

1.3.4 Paramètres d'une photodiode

- Efficacité quantique : L'efficacité quantique externe (EQE) est définie par le rapport du nombre d'électrons collectés aux contacts et du nombre de photons incidents. L'efficacité quantique interne (EQI) est calculée par rapport au nombre de photons absorbés.

L'efficacité quantique est une grandeur qui permet de savoir dans quelle gamme de longueurs d'onde la cellule solaire répond le mieux. On peut ainsi en déduire des informations liées à la qualité des matériaux et des contacts.

$$EQE = \frac{\text{Nombre des paires électron-trou collectées}}{\text{Nombre de photons incidents}} \quad (1.35)$$

$$IQE = \frac{\text{Nombre des paires électron-trou collectées}}{\text{Nombre de photons absorbés}} \quad (1.36)$$

La différence entre EQE et EQI est due principalement à la réflexion d'une partie de la lumière en face avant. Cette réflexion est due à la différence de l'indice de réfraction entre l'air et le matériau. Cette différence peut être atténuée par le rajout d'une ou plusieurs couches antireflet (ARC) qui accorderont l'indice de réfraction entre l'air et le matériau. En outre, une surface rugueuse (texturée) permet de diminuer la réflexion [26].

- La sensibilité : est le rapport entre le photo-courant généré et la puissance lumineuse incidente.
- Temps de réponse : Le temps de réponse d'une photodiode est défini comme le temps qu'il faut pour que les porteurs de charge générés par la lumière franchissent la jonction p-n [1].

1.3.5 Caractéristique d'un photodétecteur

1.3.5.1 Fréquence de coupure

La bande passante de photodétecteur ou sa fréquence de coupure, elle représente la fréquence à laquelle le courant utile de sortie est divisé de moitié par rapport à la réponse maximale de sortie. La formule suivante donne directement la fréquence de coupure en fonction de temps de transit et du temps de coupure capacitive [27] :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{\tau_{tr}^2 + \tau_{RC}^2}} \quad (1.37)$$

La fréquence de coupure f_c est dominée par le transit lorsque le temps de réponse du circuit est court devant le temps de transit :

$$f_c = \frac{1}{\tau_{tr}} \quad (1.38)$$

La fréquence de coupure f_c est dominée par la capacité lorsque le temps de réponse du circuit est long devant le temps de transit :

$$f_c = \frac{1}{\tau_{RC}} \quad (1.39)$$

La réponse fréquentielle limitée par le seul temps de transit $H_{tr}(\omega)$ est obtenue par [28] :

$$H_{tr}^p(\omega) = \frac{v_p}{jd\omega} (1 - Ae^{(-j\omega\beta_p)} \text{sinc}(\theta_p)) \quad (1.40)$$

$$H_{tr}^n(\omega) = \frac{v_n}{jd\omega} (1 - Ae^{(-j\omega\beta_n)} \text{sinc}(\theta_n)) \quad (1.41)$$

$$A = \frac{\frac{\alpha d_{abs}}{2}}{sh\left(\frac{\alpha d_{abs}}{2}\right)} \quad (1.42)$$

$$\beta_p = \frac{1}{v_p} \left(\frac{d_{abs}}{2} + d_{tr}^p \right) \quad (1.43)$$

$$\beta_n = \frac{1}{v_n} \left(\frac{d_{abs}}{2} + d_{tr}^n \right) \quad (1.44)$$

$$\theta_p = \frac{d_{abs}}{2} \left(\frac{\omega}{v_p} - j\alpha \right) \quad (1.45)$$

$$\theta_n = \frac{d_{abs}}{2} \left(\frac{\omega}{v_n} - j\alpha \right) \quad (1.46)$$

où

- $\alpha > 0$ pour un éclairage coté p.
- $\alpha < 0$ pour éclairage coté n.
- d : est la largeur de la zone d'absorption.
- d_{abs} : est l'épaisseur de la zone absorbante.
- d_{tr}^p, d_{tr}^n : est épaisseur des deux zones transparente côté p et n respectivement.
- v_p : est la vitesse de saturation des trous.
- v_n : est la vitesse de saturation des électrons.

1.3.5.2 La capacité

Une fois que les porteurs quittent ZCE, le signal ne rejoindra pas immédiatement la charge. Ils sont encore retenus au voisinage de la jonction par une attraction coulombienne. La jonction se comporte comme un condensateur de capacité C donnée par [28] :

$$C_J = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (1.47)$$

avec

- S : La surface de la zone active.
- ϵ_r : La constante diélectrique relative du matériau utilisé.
- ϵ_0 : La constante diélectrique relative du vide.

1.4 Conclusion

Dans cette première partie nous avons évoqué des notions de base de la jonction PN, ainsi que les différentes caractéristiques électriques comme la contrainte, le gap, ...etc. et optique comme l'absorption, la réfraction, ...etc. Nous avons regroupé aussi le principe de fonctionnement d'une photodiode, la condition pour qu'il y ait une génération d'une paire électron-trou, et que les photons incidents doivent véhiculer une énergie qui soit supérieure à l'énergie de gap. A la fin nous sommes définis les différentes caractéristiques permettant d'exprimer les performances des photodétecteurs.

Chapitre 2 Résultats et Discussions

2 Introduction

Le besoin accru de la rapidité de détection et transmission et faible consommation d'énergie avec des cout réduit dans le domaine des télécommunications et des nouvelles technologies, a révolutionné le monde des semi-conducteurs en motivent les recherches et les développements des combinaisons des matériaux III.V. Dans l'ensemble de cette partie est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus par simulation sur la structure ternaire InGaAs/InP, à base du logiciel Matlab, pour déterminer les différents paramètres électriques et optiques, pour cela des simulations ont été nécessaires pour observer l'effet de l'indium sur ces paramètres.

2.1 Paramètre de maille

La figure 2.1 représente la variation du paramètre de maille de l'alliage $In_xGa_{1-x}As$, en fonction des concentrations l'Indium. Nous observons qu'il y a une croit linéaire entre la concentration d'indium et le paramètre de maille de la couche épitaxie $In_xGa_{1-x}As$. Lorsque la concentration d'indium augmente 0 jusqu'à 100% le paramètre de maille varie entre 5.65 et la valeur 6.058 Å. Cette étude nous permet de calculer la stabilité du ce composant.

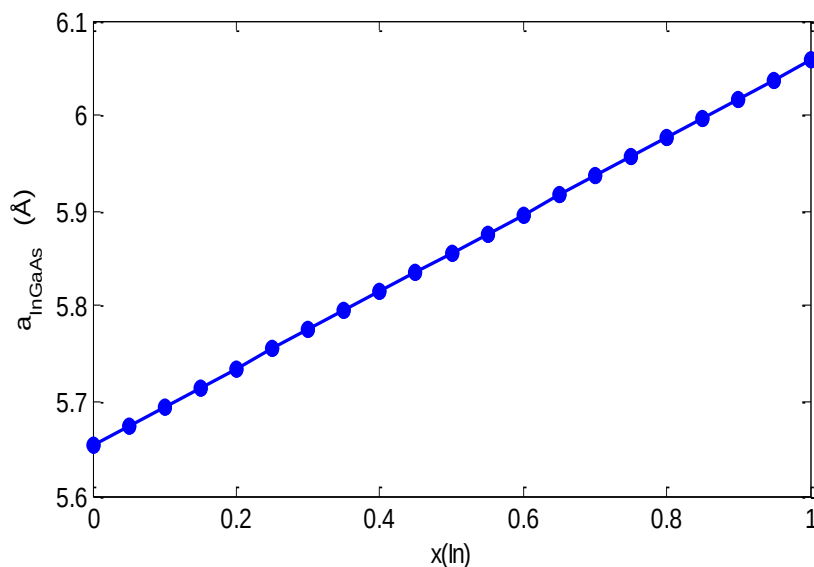


Figure 2.1. Paramètre de maille de $In_xGa_{1-x}As$ en fonction de la concentration d'indium.

2.2 Effet de contrainte

La figure 2.2 représente les différentes contraintes induites par le désaccord de maille. Nous observons que nous avons deux déformations, sur l'interface parallèle ϵ_{xx} qui diminue et sur l'interface perpendiculaire ϵ_{zz} qui augmente, avec l'augmentation d'indium.

- Lorsque x est inférieure à 0,53 nous avons une couche en Tension car $a_s > a_e$.
- Lorsque x est supérieure à 0.53 nous avons une couche en compression car $a_s < a_e$.
- Et à $x=0,53$ la déformation est égale à zéro, nous avons un accord de maille.

Cette étape nous permet d'étudier la stabilité, la performance de la structure $In_xGa_{1-x}As$ et aussi d'étudier l'impact de la contrainte sur l'énergie de la bande interdite (Gap).

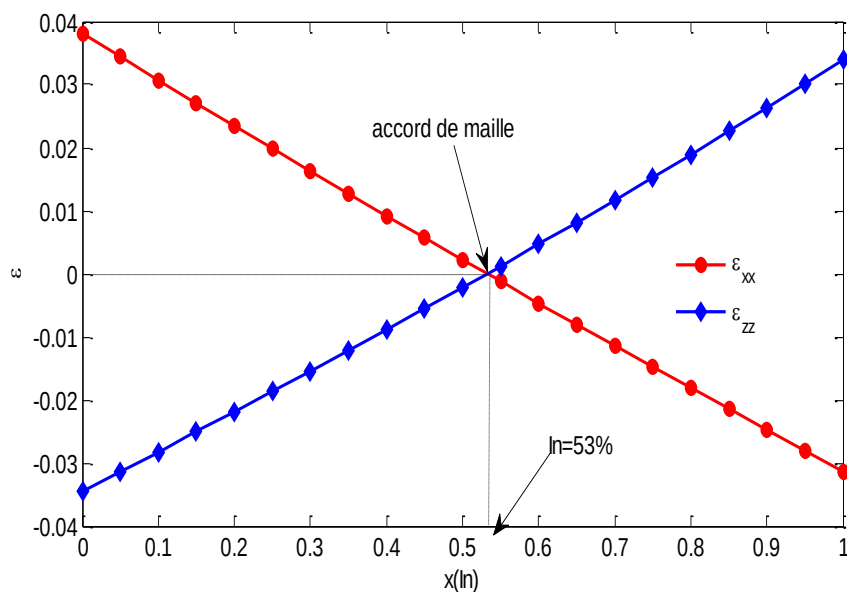


Figure 2.2. Désaccord de maille en fonction de la concentration d'indium.

2.3 Energie de la bande interdite sans contrainte

La figure 2.3 décrit la variation de l'énergie de la bande interdite en accord de maille de la structure $In_xGa_{1-x}As/InP$ en fonction de la concentration d'indium à $T = 300K$. Nous observons qu'il y a une diminution de l'énergie de la bande interdite de la structure $InGaAs$ en fonction de la concentration d'indium. A $x=0$ La valeur maximale de l'énergie de gap est égale à 1.42eV, la valeur correspond au composé $GaAs$. Et pour une concentration d'indium est égale à 1 la valeur de l'énergie de gap représente la valeur 0.35eV qui correspond au composé $InAs$.

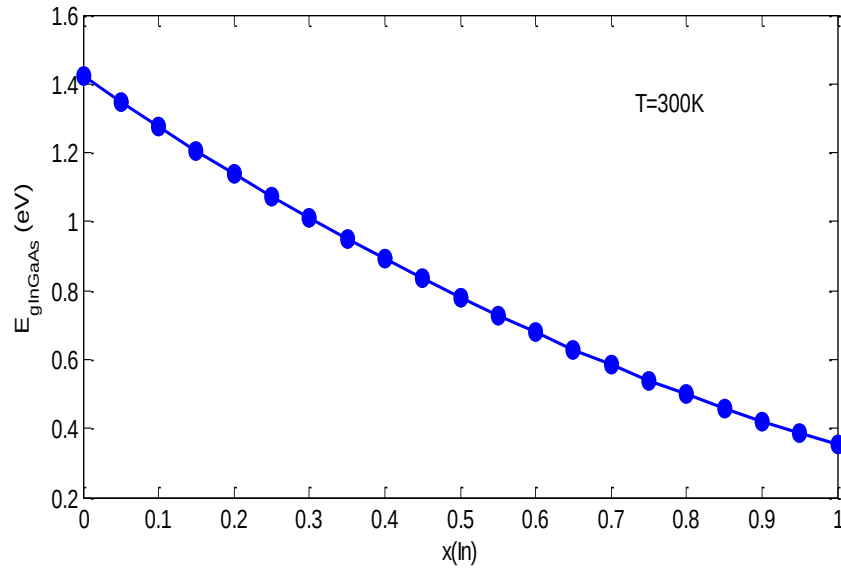


Figure 2.3. L'énergie gap de la structure InGaAs/InP en fonction de la concentration d'indium.

2.4 Effet de la Température sur l'énergie de bande interdite

La figure 2.4 montre l'effet de la concentration de l'Indium et de la température sur l'énergie de la bande interdite, ce phénomène est traduit par le model de Varshni. Nous remarquons qu'il y a diminution légère sur l'énergie de gap avec la température et rapide avec la concentration d'indium. Donc la température à un effet faible sur la variation de l'énergie de gap par rapport à la concentration d'indium.

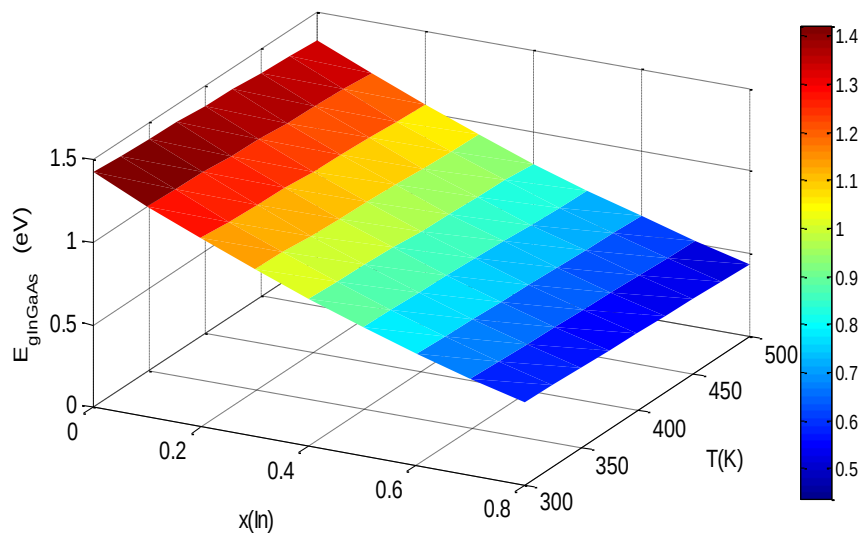


Figure 2.4. L'énergie de la bande interdite en fonction d'indium et la température.

2.5 La longueur d'onde λ_g

La figure 2.5 montre la variation de la longueur d'onde en fonction de l'indium et de la Température. Nous remarquons que l'augmentation de la concentration d'indium provoque une augmentation vers les grandes longueurs d'onde. Pour une concentration en indium variant entre 0 et 1% et une température égale à 300K la variation de la longueur d'onde touche une large gamme allant de 0.8717 à 2.48 μm , ce qui donne l'avantage à cette structure d'être un candidat fort pour répondre aux besoins de photodétection, en particulier les télécommunications par fibre optique qui fait appel à des fenêtres comme 1,33 et 1,55 μm .

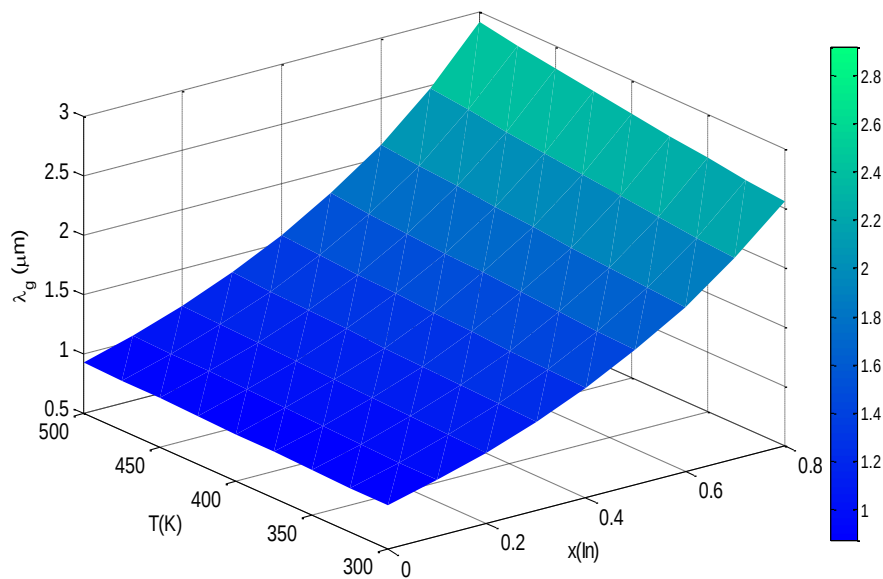


Figure 2.5. La longueur d'onde en fonction d'indium et de la température.

2.6 Décalages de bandes

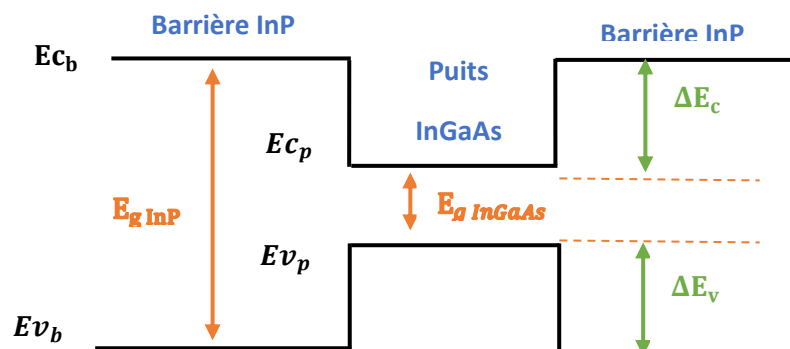


Figure 2.6. Puits quantique.

La figure 2.6 montre la schématisation d'un puits quantique qui est formé par une fine couche (quelques nm) d'un matériau semi-conducteur de faible gap (Puits) entouré de matériaux de plus grand gap(barrière). On réalise ainsi un puits de potentiel artificiel de taille quantique

dans lequel les porteurs libres du semi-conducteur (électrons et trous) vont se retrouver confinés sur des niveaux d'énergie discrets.

Les figures qui suivent 2.7.a et 2.7.b montrent les décalages de bandes ΔE_c et ΔE_v , en fonction de la concentration d'indium à $T=300K$ et $T=0K$ respectivement. Nous observons que le décalage de bande de conduction ΔE_c et de la bande de valence de trous lourd $\Delta E_{v_{hh}}$ croît avec l'augmentation de la concentration d'indium. Tandis que la bande de valence de trous léger diminue légèrement avec l'augmentation de la concentration d'indium.

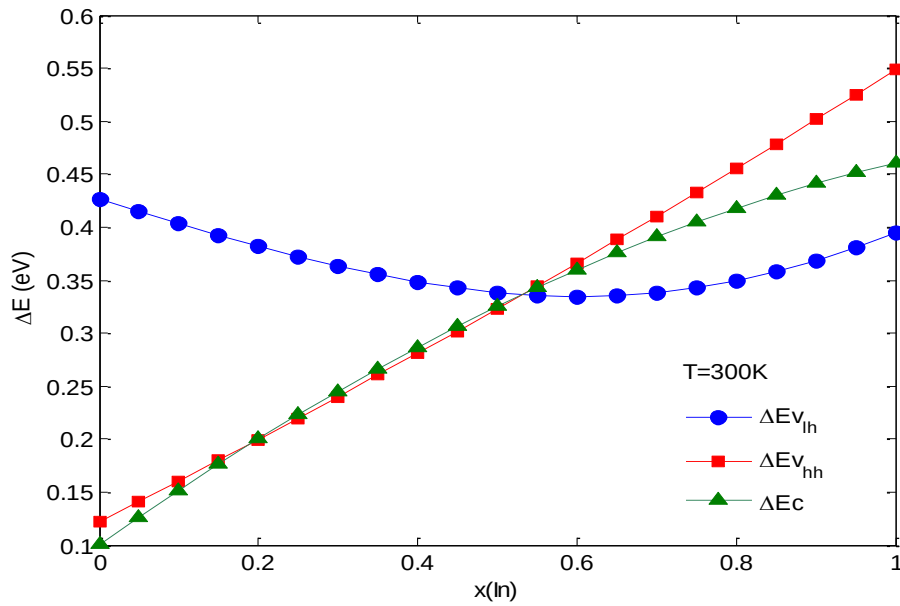


Figure 2.7.a. la variation des décalages de bandes ΔE_c et ΔE_v en fonction de la concentration d'indium à $T=300K$.

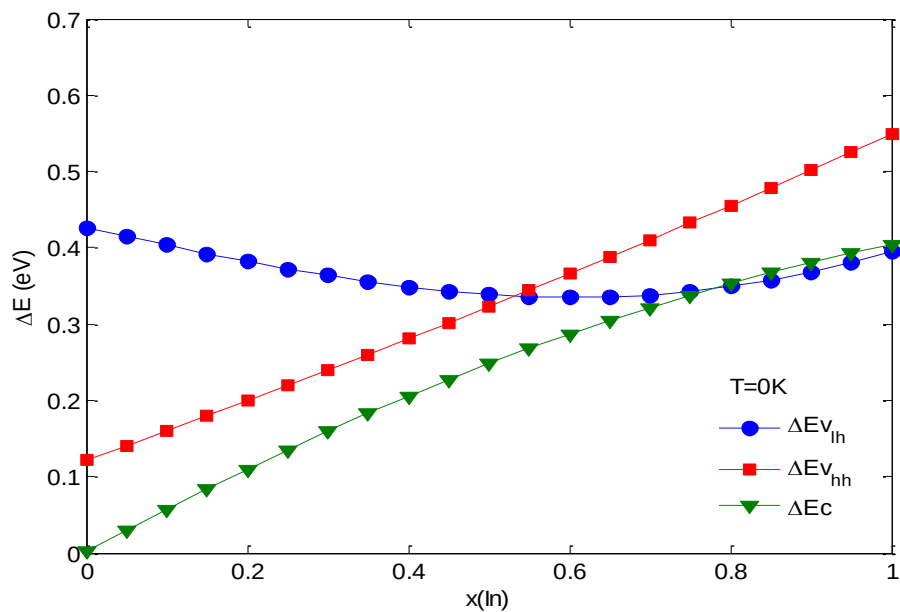


Figure 2.7.b. la variation des décalages de bandes ΔE_c et ΔE_v en fonction de la concentration d'indium à $T=0K$.

2.7 Energie de la bande interdite des trous lourds et trous légers

La figure 2.8 exprime l'effet de la concentration d'indium sur les énergies de la bande interdite des trous lourds et légers à $T=300K$ et $T=0K$. nous observons que le gap pour les trous lourds $E_{g_{hh}}$ et les trous légers $E_{g_{lh}}$ diminuent avec l'augmentation de la concentration d'indium. Pour une contrainte en tension ($x < 0.53$) la bande interdite de trous légers $E_{g_{lh}}$ est faible par rapport à la bande interdite de trous lourds $E_{g_{hh}}$. Lorsque $x=0.53$ ce pont représente l'accord de maille, alors que dans le cas d'une contrainte compressive ($x > 0.53$) $E_{g_{hh}} < E_{g_{lh}}$.

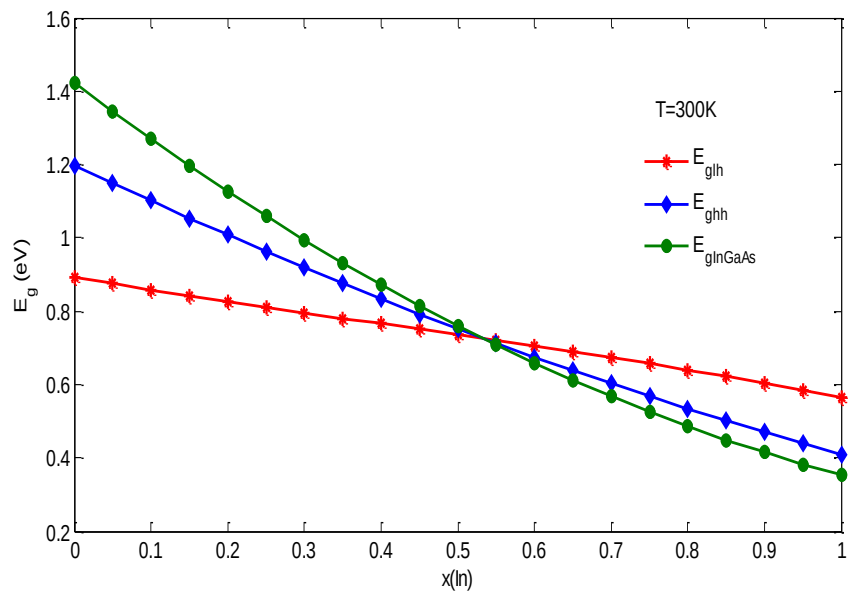


Figure 2.8.a. l'énergie de la bande interdite des trous lourds et légers en fonction de la concentration d'indium à $T=300K$.

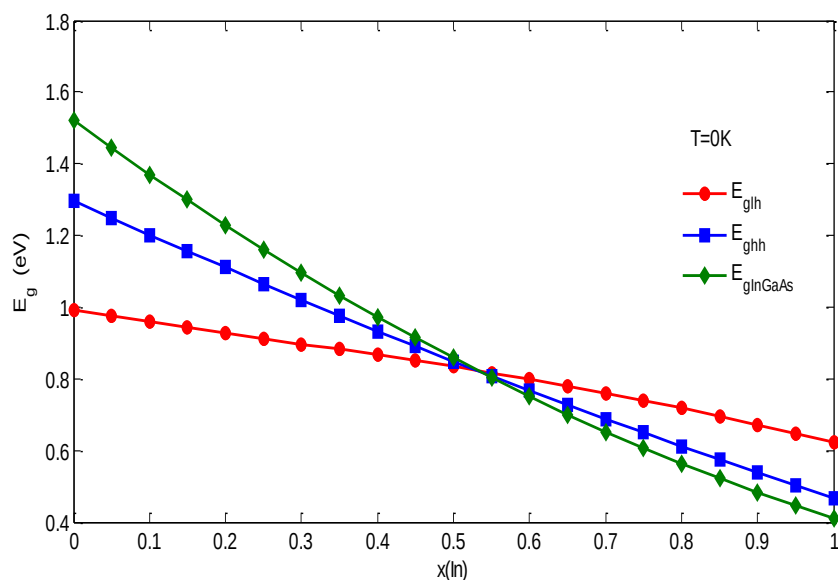


Figure 2.8.b. l'énergie de la bande interdite des trous lourds et légers en fonction de la concentration d'indium à $T=0K$.

2.8 La longueur d'onde de la bande interdite des trous lourds et légers

La figure 2.9 montre l'impact de la concentration d'indium et de la Température sur la longueur d'onde λ_e (e --> lh ; hh). La figure (2.9.a) montre que lorsqu'on fixe la température à T=300K et on fait varier la concentration d'indium de 0% à 80% on constate qu'il y a une augmentation importante dans la longueur d'onde avec $\Delta\lambda_{lh} = 1.7\mu m$. Et lorsqu'on fixe la concentration d'indium à 80% et la température variée de T=300K à T=500K, on remarque qu'il y a une faible augmentation dans la longueur d'onde avec $\Delta\lambda_{lh} = 0.1\mu m$.

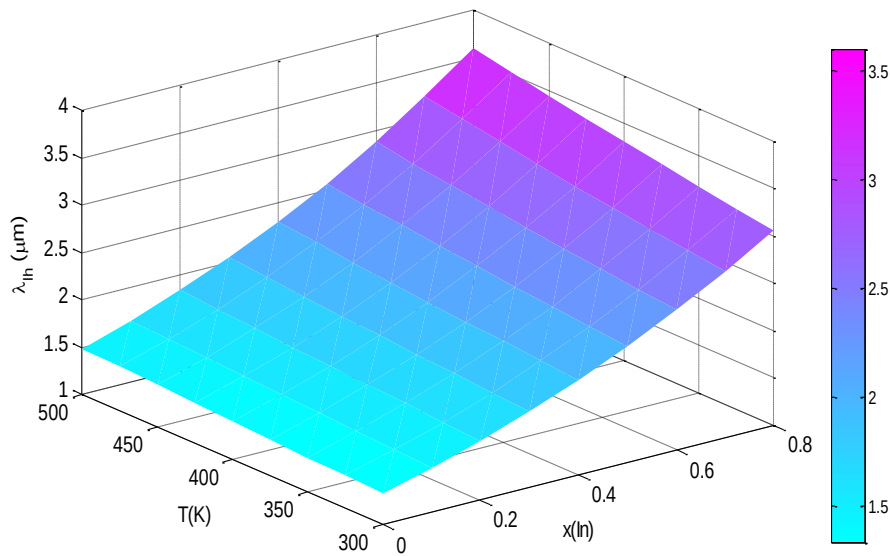


Figure 2.9.a. Longueur d'onde λ_{lh} en fonction de la concentration d'indium et de la température.

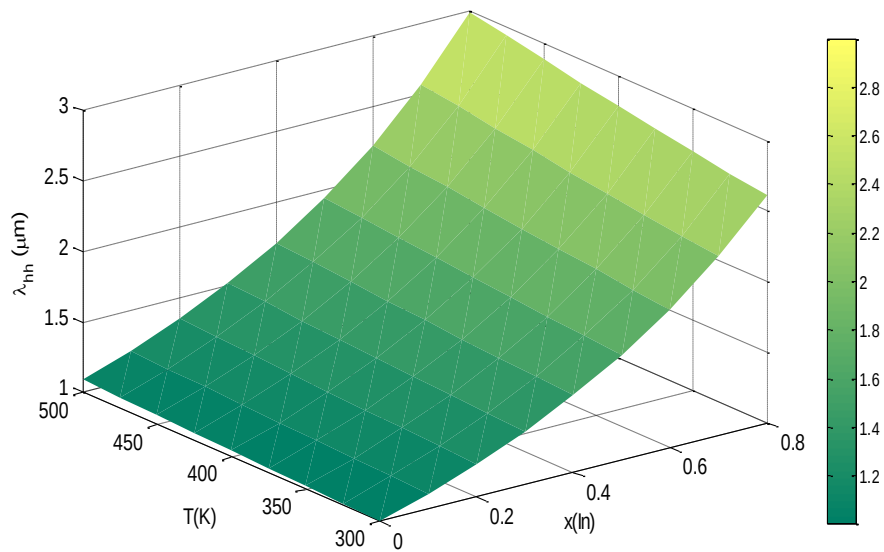


Figure 2.9.b. Longueur d'onde λ_{hh} en fonction de la concentration d'indium et de la température.

La figure (2.9.b) illustre que lorsqu'on fixe la température à $T=300K$ et la concentration d'indium variée de 0% à 80% on constate qu'il y a une augmentation importante dans la longueur d'onde avec $\Delta\lambda_{hh} = 1.6\mu m$. Et lorsqu'on fixe la concentration d'indium à 80% et la température variée de $T=300K$ à $T=500K$, on remarque qu'il y a une faible augmentation dans la longueur d'onde avec $\Delta\lambda_{hh} = 0.4\mu m$.

La figure 2.10 représente l'influence de la concentration d'indium sur les longueurs d'onde des trous légers et trous lourds pour des températures $T=0K$ et $T=300K$. Lorsque la concentration d'indium augmente on remarque qu'il y a une augmentation importante dans les longueurs d'onde des trous légers λ_{lh} et les longueurs d'onde des trous lourds λ_{hh} , par exemple pour $T=300K$ et une concentration de In varie de 10% à 90% les longueurs d'ondes λ_{lh} et λ_{hh} varient respectivement comme : 1.43 à $2.032\mu m$ et 1.12 à $2.6\mu m$. Si on base sur l'impact de la température on constate qu'il y a une augmentation légère sur les longueurs d'onde par rapport à l'influence de In. Par exemple pour $x=0.1$ on a $\lambda_{lh}=1.26\mu m$ et $\lambda_{hh}=1\mu m$ à $T=0K$ et lorsque on augmente la température à $T=300K$ les longueurs d'onde augmentent $\lambda_{lh}=1.43\mu m$ et $\lambda_{hh}=1.12\mu m$.

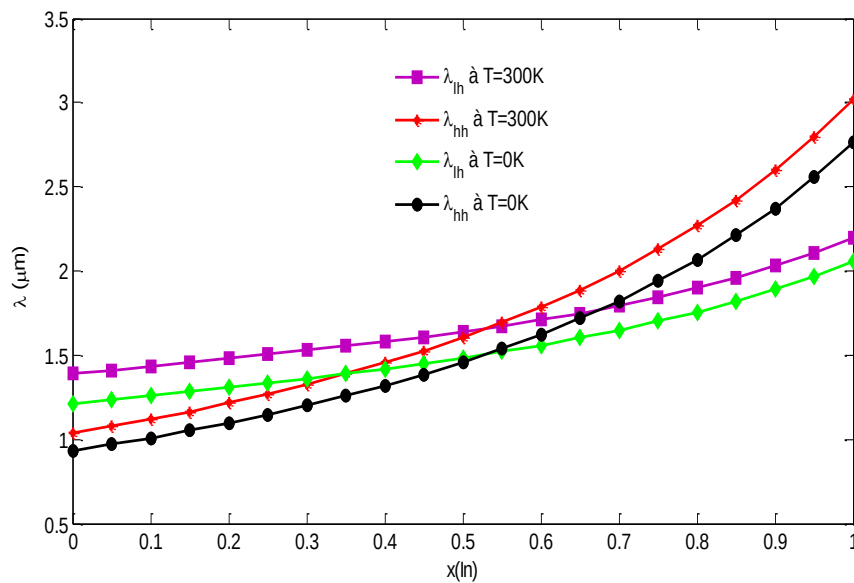


Figure 2.10. Variation des longueurs d'ondes en fonction de la concentration d'indium à $T=0K$ et $T=300K$.

2.9 Le coefficient d'absorption de la bande interdite des trous lourds et trous légers

Les figures 2.11.a et 2.11.b montrent l'évolution de coefficient d'absorption de trous lourds α_{hh} et de trous légers α_{lh} en fonction de la concentration d'indium et l'énergie des photons incidents (E). Nous remarquons que pour $E=0.1eV$ et dans les zones où la concentration d'indium varie entre 0 à 0.35 pour α_{lh} , et entre 0 à 0.5 pour α_{hh} , le matériau n'absorbe aucun photon. A partir de $x=0.35$ et $x=0.5$ pour α_{lh} et α_{hh} respectivement, l'énergie de photon va être

égale ou supérieure à l'énergie de gap. Donc c'est le point où le matériau commence à absorber.

- Pour une meilleure absorption α_{lh} où la concentration d'indium est égale à 50%
- Pour une meilleure absorption α_{hh} où la concentration d'indium est égale à 35%.

On constate que l'absorption de la bande interdite des trous lourds α_{hh} est la meilleure car $E_{g_{lh}} < E_{g_{hh}}$.

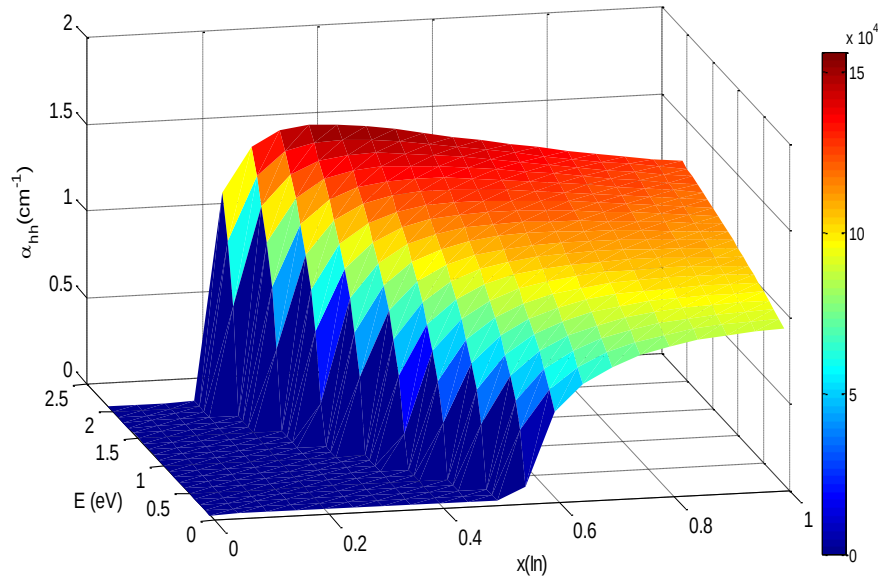


Figure 2.11.a. la variation de coefficient d'absorption α_{hh} en fonction de la concentration d'indium et l'énergie de photon.

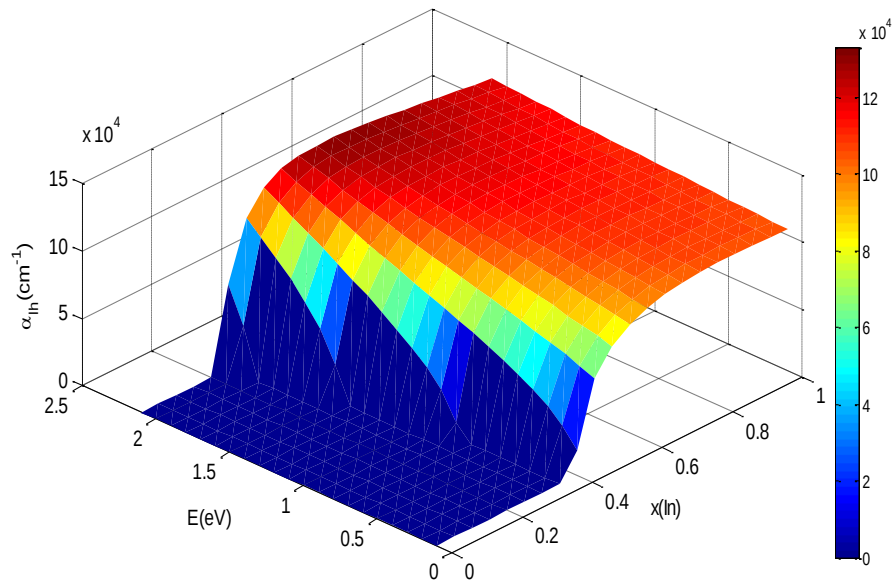


Figure 2.11.b. La variation de coefficient d'absorption α_{lh} en fonction de la concentration d'indium et l'énergie de photon.

2.10 Taux de confinement des électrons

La figure 2.12 représente l'influence de la concentration d'indium sur le taux de confinement des porteurs électrons et trous dans le puits quantique $In_xGa_{1-x}As / InP$ à $T=300K$ et $T=0K$. À $T= 300k$ nous remarquons que le taux de confinement de trous légers de la bande de conduction croît rapidement avec l'incorporation de l'indium. Et pour le taux de confinement de trous lourds augmente d'un faible pourcentage de 0,55 à 0,5, puis revient à sa valeur initiale de 0,55. vice versa pour le taux de confinement de la bande de valence.

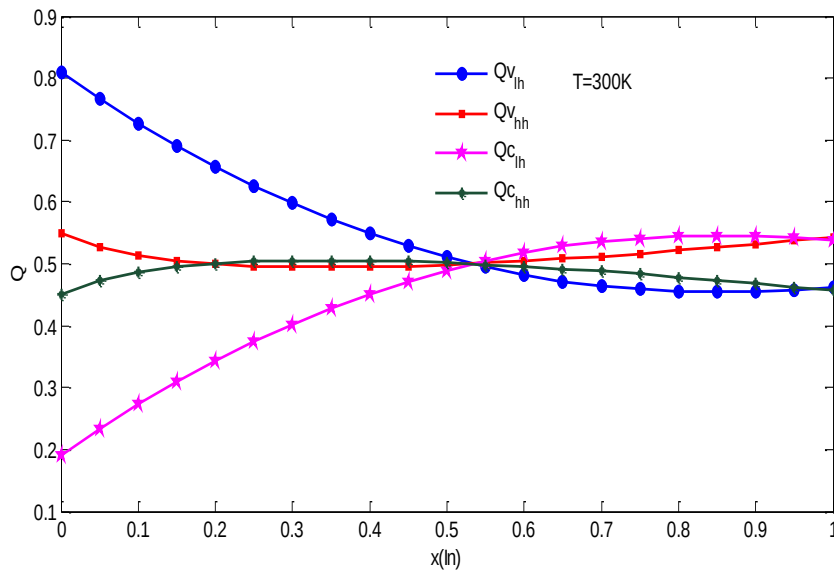


Figure 2.12.a. Variation de taux de confinement dans le puits quantique $In_xGa_{1-x}As / InP$ en fonction des concentrations d'indium à $T=300K$.

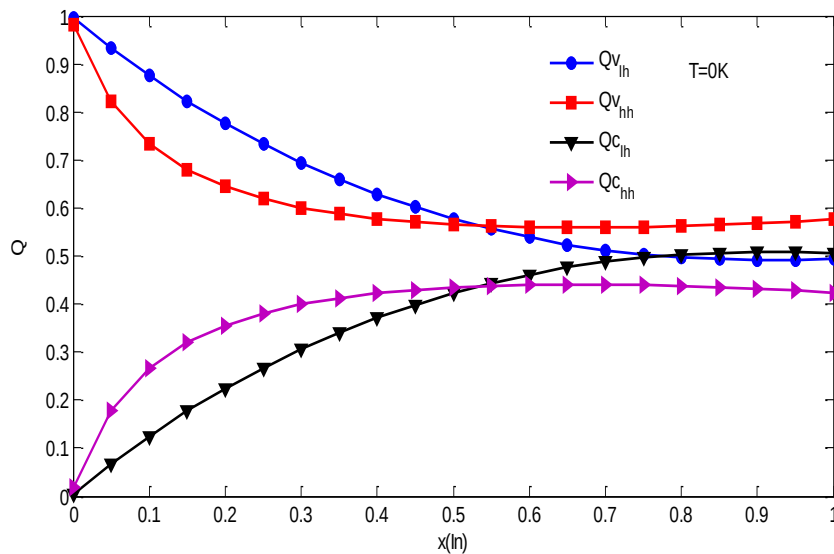


Figure 2.12.b. Variation de taux de confinement dans le puits quantique $InGaAs/InP$ en fonction de la concentration d'indium à $T=0K$.

Et à $T=0K$ nous observons lorsque l'incorporation de l'indium augmente il y a une augmentation importante dans le taux de confinement de trous légers, et pour le taux de confinement de trous lourds de la bande de conduction augmente de 0 à 0,44 lorsque la concentration d'indium est entre 0 et 0.55. Après il devient quasi-constant jusqu'à $x=1$. Vice versa pour le taux de confinement de la bande de valence.

2.11 Indice de réfraction

La figure 2.13 illustre l'évolution de la concentration d'indium et la longueur d'onde sur l'indice de réfraction à $T=300K$. nous observons lorsque la concentration d'indium et la longueur d'onde augmente l'indice de réfraction diminuer, et aussi on remarque qu'on a des valeurs optimales qui sont présenter dans le tableau 2.1. A la concentration d'indium égale à 0.53 dans l'accord de maille l'indice de réfraction est important est égale à 3.35. L'étude de l'indice de réfraction nous permet d'optimiser la réflexion du matériau ainsi que la transmission.

Concentration d'indium	20%	25%	35%	45%	70%
Longueur d'onde (μm)	0.75	1.75	3	3.75	5
L'indice de réfraction	3.594	3.578	3.575	3.61	3.646

Tableau 2.1 Représente les valeurs optimales pour l'indice de réfraction.

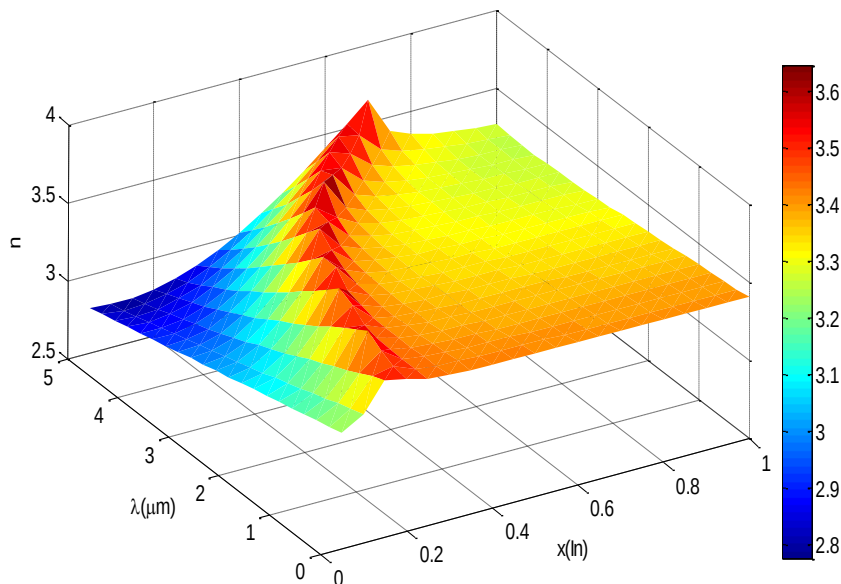


Figure 2.13. L'indice de réfraction en fonction des concentrations de la concentration d'indium et de la longueur d'onde.

2.12 Coefficient de réflexion et de transmission :

La figure 2.14 représente l'évolution de coefficient de réflexion et de transmission en fonction de longueur d'onde. On remarque lorsque la longueur d'onde augmente on a une augmentation importante de coefficient de réflexion de 0.21 jusqu'à 0.58, et le coefficient de transmission diminue de 0.8 jusqu'à 0.42, à la longueur d'onde égale 1 μm on observe que le coefficient de réflexion et transmission intersecté dans le point où les deux coefficients sont égaux.

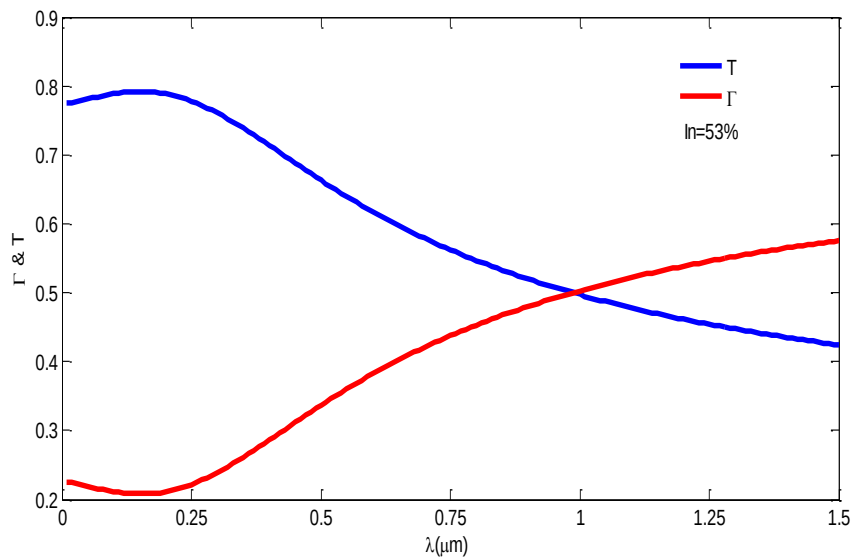


Figure 2.14. Coefficient de réflexion et de transmission en fonction de la longueur d'onde.

2.13 Capacité

La figure 2.15 montre le schéma de la structure à puits quantique $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$.

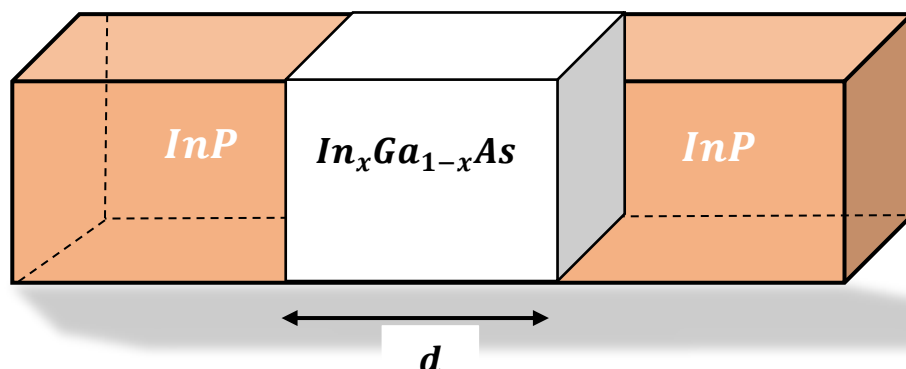


Figure 2.15. Montre le schéma de la structure à puits quantique $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$.

La figure 2.16 montre La variation de la capacité C en fonction de la largeur de la zone d'absorption d pour des différentes surfaces de la zone active S . Nous observons que la

capacité diminuer avec l'augmentation de de la zone d'absorption. D'autre part la capacité augmente avec l'augmentation de la surface de la zone active.

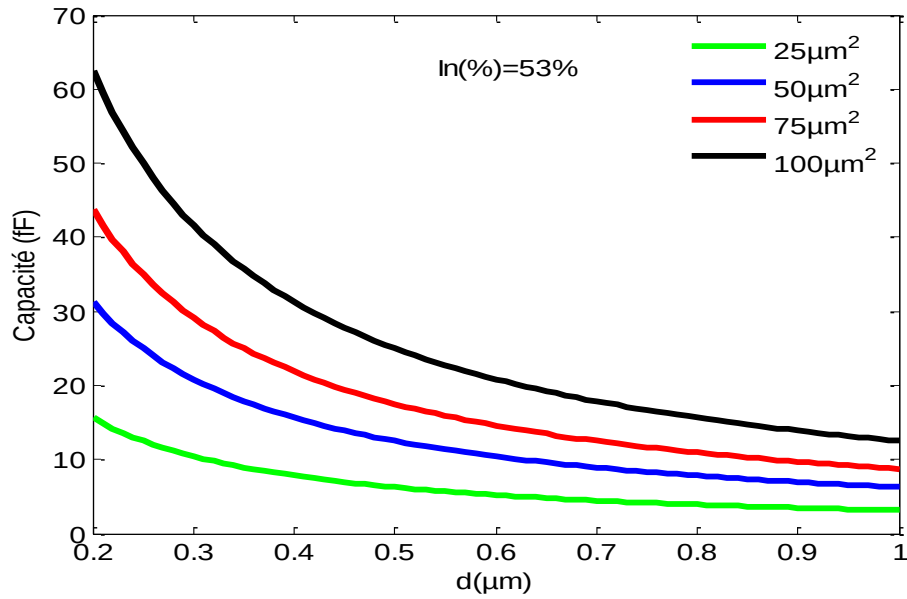


Figure 2.16. Capacité C en fonction de la largeur de la zone d'absorption d pour des différentes surfaces de la zone active S .

2.14 Fréquence de coupure

La figure 2.17 représente la réponse en fréquence pour une concentration d'indium fixe égale à 0.45 qui correspond à un désaccord de maille extensive égale à 0.56%, avec un coefficient d'absorption égale à 5.10^4cm^{-1} .

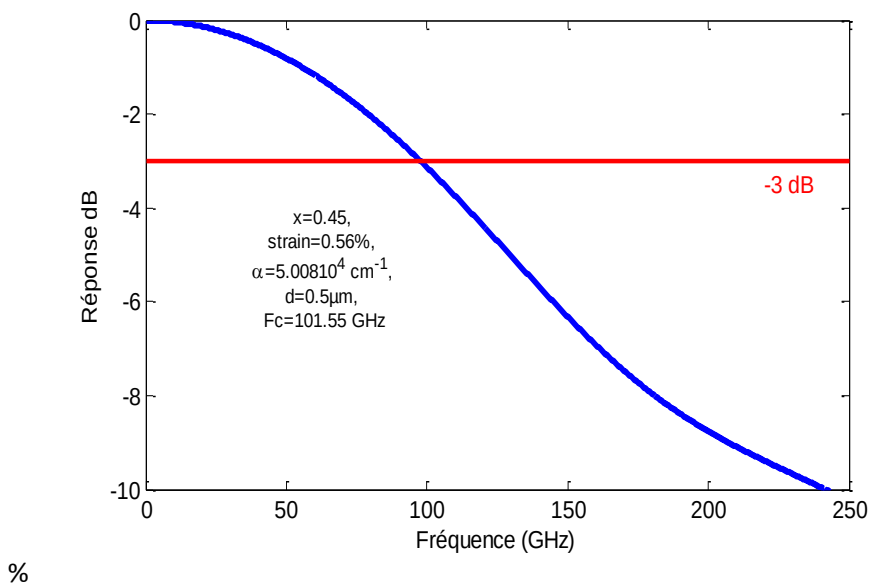


Figure 2.17.a. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=0.5\mu\text{m}$.

La figure 2.17.a illustre la réponse en fonction de la fréquence à une largeur de zone d'absorption égale à $0.5\mu\text{m}$ et la figure 2.17.b montre la réponse en fréquence à une largeur de zone d'absorption égale à $1\mu\text{m}$, nous remarquons quand la largeur de la zone d'absorption est plus grande, il y a une variation rapide de la réponse et ça introduit une faible fréquence par contre lorsque la largeur de la zone d'absorption est plus petite la fréquence de coupure sera plus grande égale à 101.55GHz . On constate que la largeur de la zone d'absorption a un effet sur la fréquence de coupure. Donc pour atteindre les hyperfréquences il est nécessaire de diminuer la largeur de la zone d'absorption.

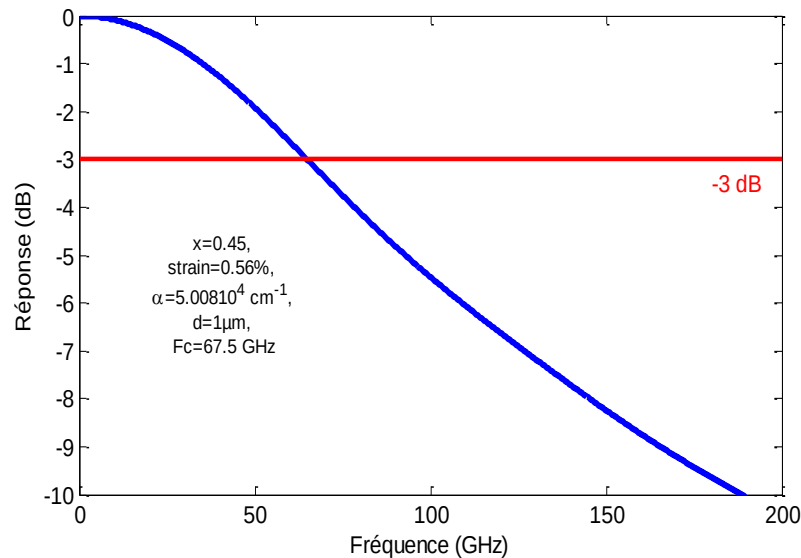


Figure 2.17.b. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=1\mu\text{m}$.

Les figures 2.18 montrent la réponse en fonction de la fréquence pour une concentration d'indium fixe égale à 0.53 qui correspond à un accord de maille où la contrainte est nulle, avec un coefficient d'absorption égale à $8.66.10^4 \text{ cm}^{-1}$. La figure 2.18.a illustre la réponse en fonction de la fréquence à une largeur de zone d'absorption égale à $0.5\mu\text{m}$ et la figure 2.18.b montre la réponse en fonction de la fréquence à une largeur de zone d'absorption égale à $1\mu\text{m}$, nous remarquons lorsque le matériau est dans une stabilité totale et on varie la largeur de la zone d'absorption, on constate qu'il y a pas une grande différence de la fréquence de coupure mais quand on varie la largeur de la zone d'absorption vers les petites zones la fréquence de coupure sera plus grande égale à 123.65GHz .

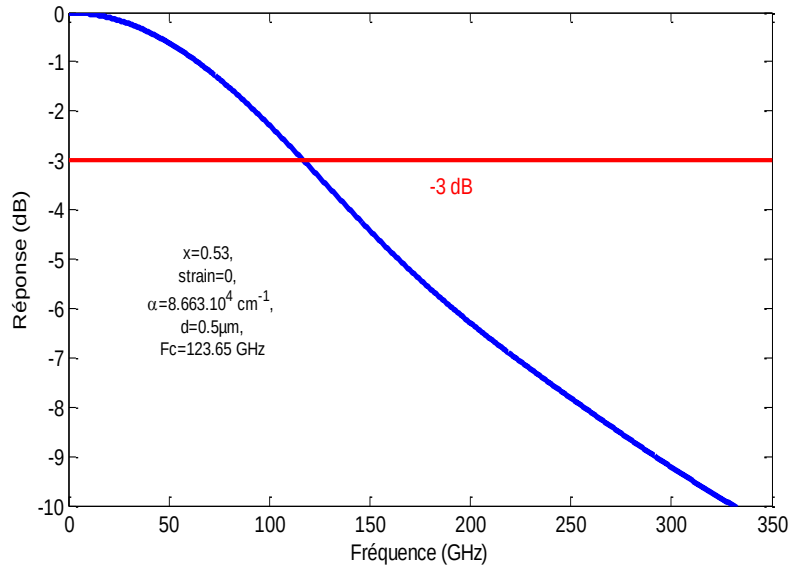


Figure 2.18.a. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=0.5\mu\text{m}$.

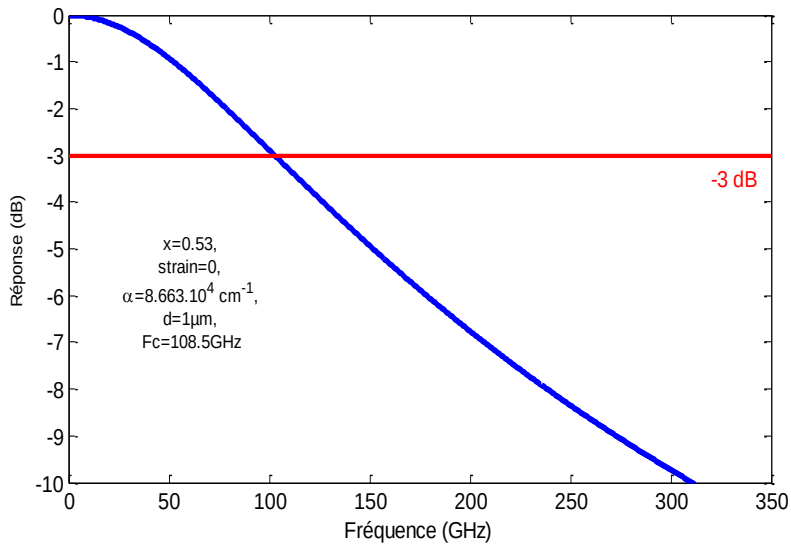


Figure 2.18.b. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=1\mu\text{m}$.

La figure 2.19 représente la réponse en fonction de la fréquence pour une concentration d'indium fixe égale à 0.6 qui correspond à un désaccord de maille compressive égale à 0.047, avec un coefficient d'absorption égale à $9.871.10^4 \text{ cm}^{-1}$. La figure 2.19.a illustre la réponse en fonction de la fréquence à une largeur de zone d'absorption égale à $0.5\mu\text{m}$ et la figure 2.19.b montre la réponse en fonction de la fréquence à une largeur de zone d'absorption égale à $1\mu\text{m}$, nous remarquons que pour obtenir une fréquence de coupure importante il faut diminuer la largeur de zone d'absorption. Lorsqu'on fait la comparaison entre les figures 2.17, 2.18, 2.19 on constate qu'avec l'augmentation de la concentration d'indium la fréquence augmente.

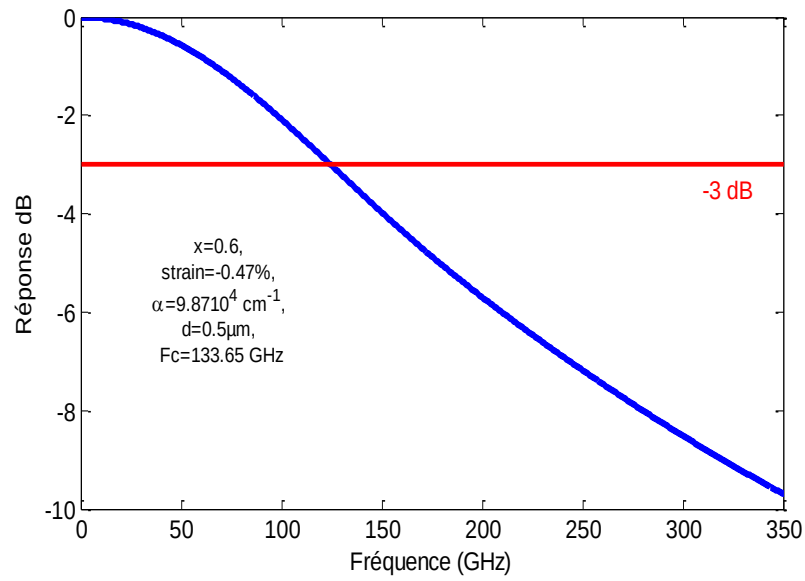


Figure 2.19.a. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=0.5\mu\text{m}$.

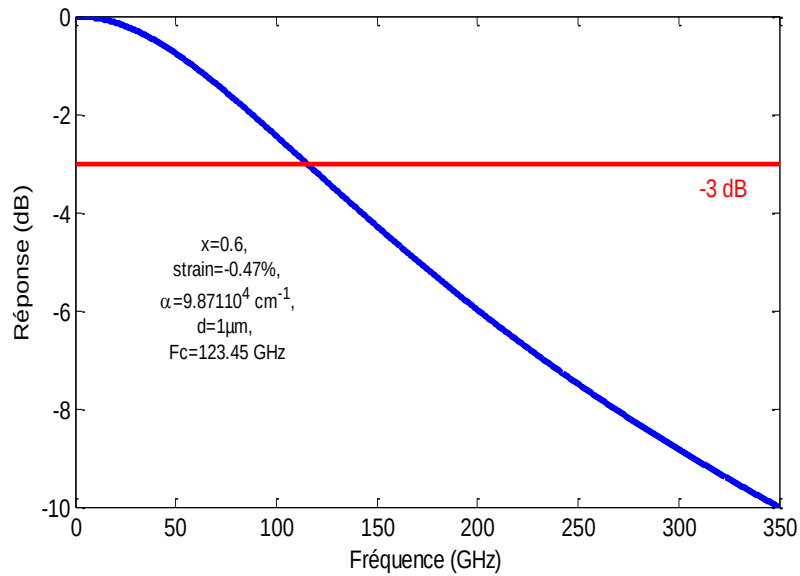


Figure 2.19.b. Variation de la réponse en fonction de la fréquence pour $d=1\mu\text{m}$.

D'après les résultats obtenus et pour une meilleure rapidité, on constate que le cas préférable c'est celle où nous avons une fréquence de coupure grande. Dans le but de trouver une fréquence de coupure dans le domaine des hyperfréquences il faut trouver un compromis entre l'augmentation de la largeur de la zone de déserte d'un côté et la diminution de la capacité du composant d'un autre côté. Pour cela il faudrait mieux faire une optimisation.

2.15 Bande Passante

La figure 2.20 représente la variation de la bande passante en fonction de la largeur de la zone d'absorption pour des différentes surfaces de la zone active, et à 53% de concentration d'indium et à $T=300K$. nous observons que lorsque l'épaisseur de la zone active varie entre 0.1 et 0.5 μm il y a une diminution rapide de la bande passante. Et elle est maximale avec $S=10\mu m^2$. Et lorsque l'épaisseur de la zone active varie entre 0.5 et 1 μm on remarque que l'intervalle de la bande passante se rétrécit et se stabilise approximativement à 100GHz.

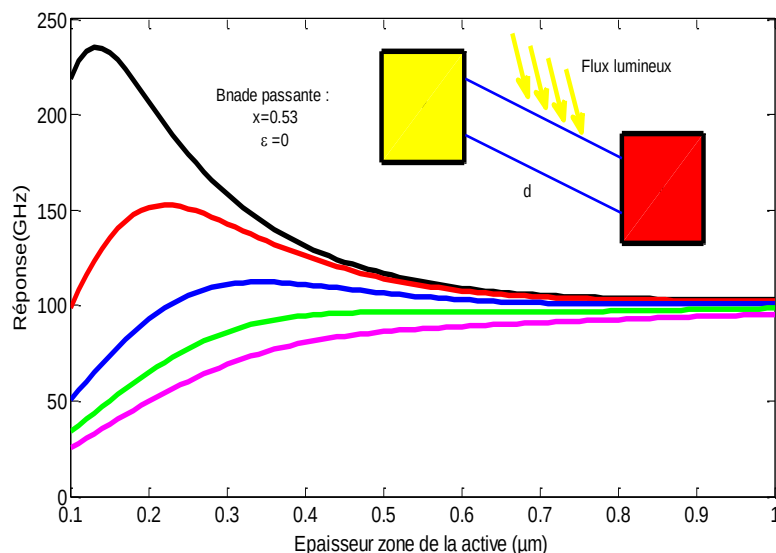


Figure 2.20. Variation de la bande passante en fonction de la largeur de la zone d'absorption d pour des différentes surfaces de la zone active S.

2.16 Conclusion

Cette partie nous avons étudié l'effet d'indium sur des différentes propriétés électriques de la structure InGaAs/InP. Au début de cette partie nous avons vérifié l'effet de l'indium sur : paramètre de maille, les contrainte parallèle et perpendiculaire, l'énergie de la bande interdite gap à une températures $T=300K$ et une température varie par la méthode de Varshni, etc.

Ensuite nous avons étudié l'effet de contrainte créé entre le substrat et la couche active sur l'énergie de la bande interdite Gap donc l'énergie de la bande interdite des trous lourds et trous légers et ces longueurs d'onde et l'absorption en fonction de la concentration d'indium. Ainsi que les décalages des bandes des trous lourds et des trous légers et le Taux de confinement des électrons à des température égale à 0K et 300K en fonction de la concentration d'indium. Nous avons étudié aussi l'indice de réfraction et les coefficients de réflexion et transmission en fonction de la concentration d'indium et la longueur d'onde ou l'énergie de photon. Finalement nous avons traité la capacité sur des différentes valeurs de la largeur de la zone d'absorption et différentes valeurs de surfaces de la zone active, la meilleure fréquence de coupure pour une rapidité de détection dans cette structure InGaAs/InP. Et nous avons conclu cette partie par la Bande passante de notre matériau.

Conclusion Général

Le travail présenté dans ce mémoire de Master s'est porté sur l'étude et simulation d'une photodiode ultra rapide à base de la structure InGaAs sur InP de substrat.

En premier lieu nous avons abordé des généralités sur la jonction PN, en définissant les différents types de polarisation. Nous avons mené aussi une étude globale concernant les semiconducteurs III-V, et les principales caractéristiques de ce dernier. Nous avons étudié l'effet de la contrainte entre un substrat et une couche épitaxie, ainsi que la photodiode et son principe de fonctionnement, les principales caractéristiques et le schéma équivalent de ce dernier, et les caractéristiques d'un photodétecteur.

Dans la deuxième partie nous avons effectué des simulations sur Matlab, afin d'étudier les paramètres de notre structure $In_xGa_{1-x}As/InP$, tels que l'incorporation de l'indium sur le paramètre de maille et l'énergie de la bande interdite ; nous avons étudié les désaccords de maille perpendiculaire et parallèle de l'alliage $In_xGa_{1-x}As$ et le substrat InP . L'étude cette déformation montre qu'on a deux types une est tension et autre une compression, Et au moment où nous avons une stabilité qui correspond à un accord de maille lorsque la concentration d'indium est égale à 0.53. Le modèle de Varshni nous a permet de connaitre que la température a une faible influence sur l'énergie de gap. Tout cela en fonction de la concentration d'indium. Des simulations ont été faites afin d'étudier l'effet de la contrainte crée entre le substrat et la couche active. Finalement nous avons étudié la capacité, la fréquence de coupure et la bande passante et nous avons constaté qu'il y a un compromis entre l'épaisseur de la zone absorbante et la capacité d'un côté et entre la capacité et la fréquence de coupure d'un autre côté.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses. Faire une optimisation pour trouver le compromis entre l'épaisseur de la zone absorbante et la capacité d'un côté et entre la capacité et la fréquence de coupure d'un autre côté.

Les matériaux III-V peuvent être remplacés par d'autres matériaux, ou bien par d'autres composés ternaires ou quaternaire de la famille III-V, pour réaliser des photodiodes PIN fonctionne à 1.55 μm .

Annexe

Caractéristique des matériaux InGaAs / InP

Paramètres	GaAs	InAs	InP	Références
Paramètre de maille (Å)	5.6533	6.0583	5.8686	[17]
C11 (10^{11} dyn/ cm^2)	11.88	8.329	10.22	[17]
C12(10^{11} dyn/ cm^2)	5.38	4.526	5.76	[17]
E_g T=300K (eV)	1.422	0.354		[10]
E_g T=0K (eV)	1.519	0.417	1.42	[17]
A (meV/K) E_g (T)	0.5405	0.276		[10]
B (meV/K) E_g (T)	204	93		[10]
C Adachi Model	9.29	4.36		[29]
D Adachi Model	7.86	10.52		[29]
E_v (eV)	-6.92	-6.67	-7.0033	[17]
a_v (eV)	1.00	1.16	1.27	[17]
Δ_0 (eV)	0.34	0.38	0.11	[17]
b(eV)	-1.7	-1.8	-2.0	[17]
a_c (eV)	-7.17	-5.08	-5.04	[17]
E_c (eV)			-5.5833	[17]

Tableau A.1. Paramètres physiques fondamentaux des principaux binaires III-V.

- Paramètre de Bowing de l'alliage InGaAs : 0.43 [30].
- Coefficient d'absorption : $\alpha_{0InGaAs} = 2.0 * 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [31].

Liste des Références

- [1] N. Assaad : 'cours de docteur de sciences physiques, Télécommunications optique ELE107', ISAE centre du liban associé au CNAM -Paris,2008.
- [2] R. Elotreuch, S. Boughar : 'Etude et Optimisation d'une Photodiode dans une Chaîne de Transmission par Fibre Optique', thèse de master Université de KHEMIS MILIANA, 2016.
- [3] A. Moliton : 'Electronique et photo-électronique des matériaux et composants 2', Lavoisier, Paris, 2009.
- [4] <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23D/RM23D06.html>
- [5] http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M15_G01/co/Module_NLP_C_M15_G01_3.html
- [6]<https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/effets-photoelectrique-et-electroluminescent/>
- [7] L. Esaki, R. Tsu : 'Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors', IBM Journal of Research and Development , 14, pp. 61-65, 1970.
- [8] <https://www.alamyimages.fr/photo-image-tableau-periodique-des-elements-chimiques-de-mendeleiev-tableau-137215966.html>.
- [9] O.I Elmi : 'Nouvelle structures de cellules solaires à base de silicium : texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion', université de Lille 1, 2017.
- [10] M.S. Seghilani, A. Messabih : 'Etude et simulation d'une structure a puits quantique contraint à base de GaInNAs/GaAs émettant à 1,55µm pour fibre optique ', Mémoire de Master BLIDA1 ,2008.
- [11] F. Kerkar : 'Calcul du gain optique d'un puits quantique à base de GaInNAs/GaAs pour son utilisation dans les télécommunications optiques émettant à une longueur d'onde de 1.3 µm', Université Blida1, 2006.
- [12] K. Köksal et al : 'Critical layer thickness of GaIn(N)As(Sb) QWs on GaAs and InP substrates for (001) and (111) orientations', Eur. Phys. J. B69 , pp. 211–218, 2009.
- [13] O. Piprek : 'Semi-conductors: optoelectronic Devices, introduction to physics and simulation', ACADEMIC PRESS, Elsevier, 2003.
- [14] W. Walukiewicz, W. Shan, J. Wu, K. M. Yu and J. W. Ager III : 'Band Anti-crossing and Related Electronic structure in III-N-V Alloys. Dilute Nitride semiconductors, M. Henini', Elsevier, pp 325-359, 2005.
- [15] C. Bencheikh, F. Nezelfar : 'Etude et simulation de la structurer InGaAsBi/GaAs a puits quantique pour l'émission proche et moyen infrarouge', Mémoire de Master BLIDA1,2015.
- [16] Y.V. CLUMINAL : 'Réalisation et étude de diodes lasers à base de GaSb émettant vers 2.3µm pur application à l'analyse des gaz', Université MONTPELLIERII, 1997.

- [17] T. Y. Wang, G. B. Stringfellow : 'Strain effects on Ga_xIn_{1-x}As/InP single quantum wells grown by organometallic vaporphase epitaxy with $0 \leq x \leq 1$ ', Journal of Applied Physics 67, 344, 1990.
- [18] M. Besseghi : 'nanophotodiodes pour interconnexions optique ultra-compactes et ultra-rapides', THESE de doctorat, université Blida1, 2015.
- [19] S. Kaci et al : 'Etude et simulation d'une structure a base de GaInNAs/GaAs pour le photovoltaïque', Mémoire d'ingénieur d'état, Université Blida1, 2011.
- [20] S. Adachi : 'Refractive indices of III-V compounds: Key properties of InGaAsP relevant to device design', J. Appl. Phys. 53, 5863 ,1982.
- [21] M. Elbar, B. Alshehri, S. Tobbeche, E. Dogheche : 'Design and Simulation of InGaN/GaN p-i-n Photodiodes', Phys. Status Solidi, 2018.
- [22] F. Moutier : 'Modélisation et Evaluation des Performances des Phototransistors Bipolaires à hétérojonction SiGe/Si pour les Applications Optique-microondes Courtes Distances', Thèse Doctorat, l'Université de Marne-la-Vallée, 2006.
- [23] A. Aissat, R. Bestam, H. Arbouz : 'Efficiency Improvement of the Structure InGaN/GaN for Solar Cells Applications', IEEE, 2015.
- [24] W. EL-HUNI : 'Paramètres de performance d'une photodiode Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments de III-V', l'Université Paris-Saclay, 30 Septembre 2016.
- [25] W.C.Kosienliak, M.A.Littlejohn, J.-L.Pelouard : 'Analysis of a GaAs Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodetector witch 0.1-um finger spacing', IEEE, Electron Device Letters, p.209-211, 1989.
- [26] W.El-huni : 'Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas cout et très haut rendement à base de nitrures des éléments de III-V', These de Doctorat, l'Université Paris-Saclay, 2016.
- [27] K. Kato, S.Hata, K. Kawano, A .Kozen : 'High sensitivity P-i-n photodectors. IEICE Trans. Electron', E76-C(2), p. 214-221.7, 1993.
- [28] N.Michel : 'Etude et réalisation de photodiodes-guides millimétriques de puissance a 1.5 micron', Thèse de Doctorat, Université des science et technologie de Lille, 2004.
- [29] M. S. Alam, M. S. Rahman, M. R. Islam, A. G. Bhuiyan, and M. Yamada : 'Refractive index, Absorption coefficient and Photoelastic constant: Key parameters of InGaAs material relevant to InGaAs-Based device performance', Conference Proceedings 19th IPRM 14 - 18, Matsue, Japan, May 2007.
- [30] https://www.batop.de/information/Eg_InGaAs.html?fbclid=IwAR0EUblsk8YwuiZ0b9BAnWq0FBB6LrRGpamz3RRGcksyJeIQ_UUKaDjNNzc.
- [31] F. Eddalia, M. Boubakeur : 'Modélisation et optimisation des structures à base de GaAsN et GaAsBi pour le photovoltaïque', Mémoire de Master, Blida1, 2015.