

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم لعالي و البحث العلمي

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique

Université Saad DahlebBlida1



Faculté des sciences

Département de physique

Mémoire de fin d'études

pour l'obtention du diplôme de master en physique

Option : NANOPHYSIQUE

Thème :

Amélioration des nanostructures à bas des semi-conducteurs  
III-V pour la Détection.

Présenté par :

**LARBI YASMINA**

Soutenu le 18/07/2023 devant le jury composé de :

Mr. A.Hassein-bey	Dr MCB U Blida-1-	président
Mr. A. Aissat	Prof U Blida-1-	Encadreur
Mr.N. Blgurone	Dr MCB U Blida-1-	Examineur
Mr.R. Ammraoui	CRTI Chéraga	Co-Encadreur

Blida, juillet 2023

# REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage, et la patience d'accomplir ce modeste travail. J'adresse mes sincères remerciements à mon promoteur de mémoire, le professeur Abdelkader AISSAT pour m'avoir confié ce sujet de recherche, et de m'avoir encadré et dirigé tout au long de ce parcours, mais surtout pour ses conseils et son expérience qui ont été décisifs dans l'accomplissement de ce travail.

Je remercie vivement mon Co-promoteur de mémoire, le docteur Mr Amara Rachid, de m'avoir aidé à apprendre logiciel de simulation Matlab durant ma période de stage dans laboratoire d'Electronique de optoélectroniques au niveau de l'université de Blida.1, et je le remercie également pour ses conseils, son soutien et ses encouragements. Je tiens à remercier le docteur Abdelkader Hassein Bey pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence de mon jury de mémoire, Je remercie vivement le docteur Nadir Belgrone d'avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie du jury. Mes sentiments de reconnaissance et mes remerciements les plus respectueux vont aussi à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, à tous les enseignants, à tous mes collègues, et à tous mes amis.

*Dédicace*

Je dédie ce travail de fin d'études à mes  
chers parents, qui ont sacrifié leur vie pour  
moi

## ملخص

في هذا المشروع، نحن مهتمون بتحسين استجابة الثنائيات الضوئية بناءً على أشباه الموصلات III-V، من خلال دراسة الخصائص الهيكلية من أجل الحصول على ثنائيات ضوئية أسرع. يسمح تحسين تركيز الفوسفور في السبيكة الثنائية بتحسين امتصاص الثنائيات الضوئية (GaAs/InP). تم إجراء عمليات محاكاة لدراسة الفجوة كدالة لتر كيز الفوسفور ودرجة حرارته، ومعامل الامتصاص كدالة لتر كيز الفوسفور، وأخيرًا استجاباتنا لاندفاع لناقلات واستجابة تردد الثنائيات الضوئية. أخيرًا، تم اقتراح هيكل جديد لتحسين استجابة الثنائيات الضوئية.

**الكلمات الرئيسية:** تقاطع نايب، طول الموجة، الصمام الثنائي الضوئي، أشباه الموصلات III-V.

## Résumé

Dans le cadre de ce projet nous sommes intéressés sur l'amélioration de la réponse d'une photodiode basée sur les semi-conducteurs III-V en passant par l'étude des propriétés structurales afin d'obtenir une photodiode ultra rapide. L'optimisation des concentrations de phosphore dans l'alliage ternaire (GaAs/InP) permet d'améliorer l'absorption de la photodiode. Des simulations ont été réalisées pour étudier le gap en fonction de la concentration de phosphore et la température, le coefficient d'absorption en fonction de la concentration de phosphore, et finalement les réponses impulsionnelles des porteurs ainsi que la réponse en fréquence de la photodiode. Enfin, une nouvelle structure a été proposée pour améliorer la réponse de la photodiode.

**Mots-clés :** jonction PN, longueur d'onde, photodiode PIN, semi-conducteurs III-V

## Abstract

In this project, we are interested in improving the response of a photodiode based on III-V semiconductors, by studying the structural properties in order to obtain an ultra-fast photodiode. Optimizing phosphorus concentrations in the ternary alloy (GaAs/InP) allows to improve the absorption of the photodiode. Simulations were carried out to study the gap as a function of phosphorus concentration and temperature, the absorption coefficient as a function of phosphorus concentration, and finally the impulse responses of the carriers and the frequency response of the photodiode. Finally, a new structure was proposed to improve photodiode response.

**Keywords:** PN junction, wavelength, PIN photodiode, III-V semiconductors.

## Table of Contents

Liste des Figures .....	1
Liste des Tableaux .....	2
Liste des abréviations.....	2
Liste des symboles .....	3
Introduction générale.....	5
Chapitre 01: Généralité sur les Semi-conducteurs III-V.....	6
1.1. Introduction.....	6
1. 2. Les matériaux semi-conducteurs III-V .....	6
1. 3. L'histoire de la photo-détection.....	7
1.4. Caractéristiques du photo-détecteur .....	8
1.4.1. Indice de réfraction.....	9
1 .4.2. Coefficient de réflexion.....	10
1 .4.3. Coefficient de transmission .....	10
1.4.4. Coefficient d'absorption.....	11
1.4. 5 Taux de photo-génération .....	11
1.4.6. Rendement quantique.....	12
1.5. Les caractéristiques dynamiques .....	12
1.5.1 Temps de transit des porteurs dans la Zone de Charge d'Espace.....	12
1.5.2 Temps de diffusion des minoritaires.....	13
1.5.3. Capacité de jonction.....	13
1.6. Les types des photo-détecteurs .....	14
1.6.1. Le photoconducteur .....	14
1.6.2. La photodiode PN .....	16
1.6.2.1. Principe de fonctionnement de la photodiode PN .....	16
1.6.2.2. La jonction PN polarisée en directe .....	17
1.6.2.2. La jonction PN polarisée en inverse.....	17
1.6.3. La photodiode PIN .....	18

1.6.3.1. Principe de fonctionnement de la photodiode PIN .....	19
1.6.3.2. Schéma électrique équivalent de la photodiode PIN .....	20
1.6.3.3. Caractéristiques de la photodiode PIN.....	20
1.6.4. La photodiode avalanche .....	21
1.7. Exigences et qualités principales des photo-détecteurs.....	21
1.8. Bruit des photo-détecteurs .....	22
1.8.1. Le Bruit de grenaille .....	22
1.8.2. Le Bruit thermique.....	23
1.9. Conclusion.....	23
Chapitre 2: Résultats de simulation et discussions.....	24
2.1. Matériaux semi-conducteurs III-V .....	24
2.1.1. Paramètre de maille .....	24
2.1.2. Structure de bande.....	24
2.1.3. Les alliages .....	25
2.1.3.1. Cas d'un alliage ternaire .....	25
2.1.4. Résultats et discussion .....	26
2.3 Conclusion.....	34
Conclusion général .....	35
References .....	36

## Liste des Figures

Figure 1. 1 : Tableaux périodique partiel [1].	6
Figure 1. 2: Principes d'absorption de la lumière dans les semi-conducteurs extrinsèques et intrinsèques.	8
Figure 1. 3: Schéma de principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux	10
Figure 1. 4: Fréquence de coupure d'un photo-détecteur et sa bande passante à -3dB	14
Figure 1. 5: Schéma de principe d'un photoconducteur et sa structure du circuit de charge.	15
Figure 1. 6: Le symbole d'une diode associé à la représentation d'une jonction	17
Figure 1. 7: la représentation d'une jonction PN polarisée en inverse	18
Figure 1. 8: Schéma d'une photodiode PIN avec une polarisation inverse suffisante	19
Figure 1. 9: Schéma équivalent de la photodiode.	20
Figure 2. 1: Structure cristalline de: a) Maille élémentaire b) Vue de dessus	24
Figure 2. 2: Structure de bande électronique de GaAs [17]	25
Figure 2. 3: La variation de paramètre de maille en fonction de la concentration de phosphore à T=300K.	27
Figure 2. 4: La variation de la déformation parallèle en fonction de la concentration de phosphore à T=300K.	27
Figure 2. 5: La variation de la bande interdite en fonction de la concentration de phosphore a T = 300K.	28
Figure 2. 6: La variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température.	28
Figure 2. 7: Impact de la concentration de phosphore et la température sur l'énergie de la bande interdite.	29
Figure 2. 8: la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'énergie de la bande interdite pour plusieurs modèles à T=300K.	30
Figure 2. 9: La variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.	30
Figure 2. 10: (a,b).la Variation de coefficient d'absorption en fonction de la concentration de phosphore et l'énergie de photon à T=300K.	31
Figure 2. 11: Variation de la réponse impulsionnelle des trous pour x=30%, T=300K.	32
Figure 2. 12: Variation de la réponse impulsionnelle des électrons pour x=30.	32
Figure 2. 13: Réponse en fonction de la fréquence x=30.	32

Figure 2. 14: variation de la réponse impulsionnelle des électrons pour  $x=40\%$ . .....33  
 Figure 2. 15: Réponse en fonction de la fréquence  $x=40\%$ . .....33

### Liste des Tableaux

Tableau 2. 1: Paramètre de maille à 300 K [16] .....24  
 Tableau 2. 2: Energie de la bande interdite en fonction de la concentration  $x$  de quelques alliages ternaires [18]. .....26  
 Tableau 2. 3: Résultats de simulations de la photodiode PIN pour différentes compositions de phosphore. ....34

### Liste des abréviations

ZCE : Zone de Charge d'espace.

PIN :P-I-N Photodiode.

PN :Junction pn

EQE : Efficacité quantique



## Liste des symboles

$C_{\text{jonction}}$	Capacité
$D_{\text{abs}}$	Epaisseur de la couche absorbante
eV	Electron volt
$E_{\phi}$	Energie du photon
$E_c$	Bande de conduction
$E_v$	Bande de valence
$E_g$	Bande interdite
$f$	Fréquence
$f_{-3dB}$	Fréquence de coupure à -3db
$v_{tr}$	Vitesse de dérive des porteurs.
$\tau_{tr}$	Temps de transit.
J	Densité de courant
h	Constante de Planck
lobs	Courant d'obscurité
J	Densité de courant
$k$	Coefficient d'extinction
$k_B$	Constante de Boltzmann
q	Charge élémentaire
R	Coefficient de réflexion
S	Surface de la zone active.
T	Coefficient de transmission
q	Charge élémentaire
z	La distance de pénétration.
$\gamma$	Constante de propagation
$\lambda$	La longueur d'onde
c	Vitesse de la lumière dans le vide
h	La constante de Planck, avec $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$ Js
$\lambda$	La longueur de l'onde dans le diélectrique.
$N_c^e$	Le Nombre électron collecté
$N^{ph}$	Le Nombre d'électron absorbé.
$n_r$	L'indice de réfraction complexe.
n	L'indice de réfraction réel.

$k$	Le coefficient d'extinction matérielle.
$n$	L'indice de réfraction
$\epsilon_r$	La permittivité relative
$\epsilon$	La permittivité
$\mu_r$	La perméabilité relative
$\varphi_0$	Le flux de photons.
$\alpha$	Le coefficient d'absorption de semi-conducteur.
$n_e$	Le nombre d'électrons créés.
$n_{ph}$	Le nombre de photons incidents.
$\tau_{RC}$	Le temps de réponse
$\tau_{dif}$	Temps de diffusion.
$v_{tr}$	La vitesse de dérive des porteurs.
$w$	La largeur de ZGE
$v_{dif}$	La vitesse de diffusion.

## Introduction générale

La connexion optique est la meilleure solution pour la transmission du signal fort à un électriques et numériques. Les systèmes de transmission numérique à longue distance transportent des millions de communications simultanées sur une seule fibre optique [4]. Le multiplexage en longueur d'onde augmente le nombre de canaux disponibles par fibre à des dizaines, tandis que la bande passante par canal continue d'augmenter grâce à des composants optoélectroniques plus rapides, notamment des photo-détecteurs jouent un rôle important non seulement dans les systèmes de transmission optique, mais également dans les systèmes de mesure. Son rôle est d'absorber l'énergie lumineuse et de la convertir en énergie électrique, qui se reflète dans le photocourant. Ils sont sensibles à la longueur d'onde utilisée et doivent avoir une bande passante relativement élevée par rapport au débit de données. A cela s'ajoute le besoin de photo-détecteurs fiables et compacts pouvant être fabriqués en grand volume et à faible coût. Au cours des deux dernières décennies, des améliorations significatives ont été apportées dans le domaine de l'électronique haute fréquence.

L'objectif principal du travail présenté dans ce mémoire est la simulation et l'optimisation de la structure de photodiode très utilisées dans les chaînes de transmission optiques, qui sont les photodiodes PN photodiodesPIN[11], et ceci afin de répondre aux exigences en termes des applications essentielles, qui sont la photo-détection. Ce mémoire est divisé en deux chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art concernant les photo-détecteurs. Nous commençons d'abord par présenter le principe de base de la photo-détection[12].

Dans le deuxième chapitre la simulation et l'optimisation de la réponse des photodiodes pin ont été exposées[13]. Pour cela, nous présentons d'abord les calculs des différents paramètres physiques, optiques qui influent sur les performances du composant. Enfin, on termine par la conclusion générale et les perspectives.

# Chapitre 01: Généralité sur les Semi-conducteurs III-V

## 1.1. Introduction

En raison des temps de relaxation extrêmement courts de divers phénomènes optiques dans les matériaux, l'utilisation de techniques optoélectroniques permet de repousser la limite de temps pour la génération d'impulsions électriques. Dans ce chapitre, nous présentons des notions générales sur les matériaux semiconducteurs, les composés binaires (III-V) et ternaires. Le matériau étant principalement utilisé pour réaliser la photodiode et les techniques optoélectroniques, nous détaillerons tout d'abord les principaux éléments de physique des semi-conducteurs pertinents pour la photodiode.

## 1. 2.Les matériaux semi-conducteurs III-V

Les semiconducteurs III-V, tels que le GaAs (arséniure de gallium), sont des matériaux largement utilisés dans le domaine de l'optoélectronique en raison de leurs excellentes propriétés électriques et optiques. Le GaAs est particulièrement apprécié pour sa large bande interdite et sa mobilité électronique élevée, ce qui en fait un matériau idéal pour la fabrication de dispositifs tels que les diodes laser, les photodiodes et les transistors à haute fréquence. Sa structure cristalline bien définie et sa compatibilité avec d'autres matériaux en font un choix privilégié pour l'intégration de différents composants dans un seul substrat. Grâce aux avancées dans la croissance épitaxiale et la fabrication de structures en couches minces, les semi-onducteurs III-V, tels que le GaAs, continuent de jouer un rôle essentiel dans le développement de technologies innovantes dans les domaines des télécommunications, de l'énergie solaire, de l'électronique de puissance et de la photonique intégrée.

	3A	13	4A	14	5A	15	6A	16
5	<b>B</b>	6	<b>C</b>	7	<b>N</b>	8	<b>O</b>	
	10.811 Boron		12.0107 Carbon		14.0067 Nitrogen		15.9994 Oxygen	
		13	<b>Al</b>	14	<b>Si</b>	15	<b>P</b>	16
		26.9815 Aluminium		28.0855 Silicon		30.9738 Phosphorus		32.065 Sulfur
<b>2B</b>	<b>12</b>							
30	<b>Zn</b>	31	<b>Ga</b>	32	<b>Ge</b>	33	<b>As</b>	34
	65.409 Zinc		69.723 Gallium		72.64 Germanium		74.9216 Arsenic	
		48	<b>Cd</b>	49	<b>In</b>	50	<b>Sn</b>	51
		112.411 Cadmium		114.818 Indium		118.710 Tin		121.760 Antimony
				52	<b>Te</b>			
				127.60 Tellurium				
80	<b>Hg</b>	81	<b>Tl</b>	82	<b>Pb</b>	83	<b>Bi</b>	84
	200.59 Mercury		204.383 Thallium		207.2 Lead		208.9804 Bismuth	
								84
								[209] Polonium

Figure 1. 1 : Tableaux périodique partiel [1] .

### 1. 3. L'histoire de la photo-détection

Au début du XXe siècle, les travaux pionniers de Max Planck et Albert Einstein ont révolutionné notre compréhension de la nature de la lumière. En 1900, Planck a introduit le concept de quantification de l'énergie pour expliquer le rayonnement du corps noir. Selon sa théorie, l'énergie était émise et absorbée par les atomes en paquets discrets, qu'il a appelés "quanta". Cependant, à l'époque, ces quanta étaient considérés comme des entités mathématiques plutôt que des particules physiques réelles.

C'est en 1905 qu'Einstein a apporté une contribution décisive en proposant que la lumière elle-même fût composée de ces quanta d'énergie. Il a nommé ces quanta "photons", une notion qui allait révolutionner notre compréhension de la nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière. Einstein a expliqué que lors des phénomènes d'absorption et d'émission, la lumière se manifestait sous la forme de ces photons, agissant à la fois comme des particules et des ondes.

Cette idée révolutionnaire du photon a ouvert la voie à de nouvelles avancées dans le domaine de la physique quantique et a jeté les bases de la théorie quantique de la lumière. Elle a également permis de résoudre de nombreuses énigmes relatives aux propriétés de la lumière et a jeté les bases du développement de technologies telles que les lasers, les photodétecteurs et les dispositifs optiques.

Aujourd'hui, le concept du photon continue d'être essentiel pour notre compréhension de nombreux phénomènes optiques, allant de la propagation de la lumière dans les fibres optiques à l'interaction des photons avec la matière dans les capteurs et les dispositifs optoélectroniques. Les travaux de Planck et Einstein ont jeté les bases de la physique moderne et ont ouvert une nouvelle ère de recherche et de développement dans le domaine de la lumière et des semi-conducteurs [1]. L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

$E$  L'énergie du photon

$\lambda$  est la longueur d'onde

$\nu$  la fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon

$c$  est la vitesse de la lumière dans le vide

$h$  est la constante de Planck, avec  $h = 6.6262 \cdot 10^{-34}$  Js

## 1.4. Caractéristiques du photo-détecteur

Le principe de base de la détection photoélectrique est illustré à la figure 1.2, Un Semiconducteurs intrinsèques et extrinsèques. L'absorption de photons à une énergie au moins ou égale à la bande interdite  $E_g$ . Un semi-conducteur qui libère un électron de la bande de valence  $E_v$  Bande de conduction  $E_c$ . Il est possible de rencontrer des niveaux d'énergie intermédiaires lorsque Semiconducteurs extrinsèques : les niveaux d'énergie des accepteurs sont proches a la bandes de valence et niveaux de donneurs de semi-conducteurs dopés P pour Le principe de base de la détection photoélectrique est illustré à la figure 1.2. Un Semiconducteurs intrinsèques et extrinsèques. Absorption de photons avoir une énergie au moins de celles des bandes de conduction dopées.

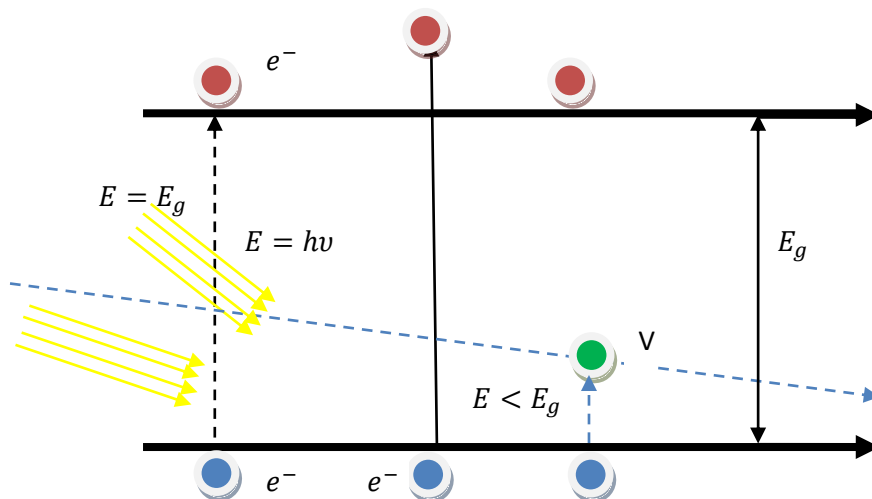


Figure 1. 2: Principes d'absorption de la lumière dans les semi-conducteurs extrinsèque et intrinsèques.

La photo-détection dans les semiconducteurs fonctionne sur le principe général de la création de paires électron-trou sous l'action de la lumière. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est illuminé par des photons d'une énergie supérieure ou égale à sa bande interdite, les photons absorbés favorisent les électrons de la bande de valence aux états excités de la bande de conduction, où ils se comportent comme des électrons libres capables de parcourir de longues distances à travers la structure cristalline sous l'influence d'un facteur intrinsèque ou champ électrique appliqué de l'extérieur. De plus, les charges positives les trous laissés dans la bande de valence contribuent à la conduction électrique en se déplaçant d'un site atomique à un autre sous l'effet du champ électrique [1].

Pour générer des paires électron-trou et les photons doivent transporter l'énergie du photon  $E$  supérieure à  $E_g$ , pour cela, chacun a des conditions et sa longueur d'onde d'absorption maximale qu'un semiconducteur peut absorber, notée  $\lambda_c$  et Ceci est gouverné par la relation [1]. On peut définir une longueur d'onde pour chaque matériau semi-conducteur troncatrice, au-delà de laquelle le phénomène de photo-génération des porteurs ne peut pas se reproduire.

Tableau 1. 1: Valeurs de bande interdite  $E_g$  et longueurs d'onde absorption maximale pour différents semi-conducteurs à  $T = 300K$ .

Matériau	GaAs	GaP	InP	GaAsP
Nature $E_g$	Direct	Direct	Direct	Direct
$E_g$ (eV)	1.42	2.26	1.35	2.09
$\lambda_c$ ( $\mu m$ )	0.87	0.55	0.92	0.587

soit :

$$E(eV) = \frac{1.24}{\lambda} (\mu m) \quad (1.2)$$

$$EQE = \frac{N^e}{N^{ph}} \quad (1.3)$$

$$IQE = \frac{N_c^e}{N_{absorbé}^{ph}} \quad (1.4)$$

$\lambda$  est la longueur de l'onde dans le diélectrique.

$N_c^e$  est le Nombre électron collecté

$N^{ph}$  est le Nombre d'électron absorbé.

#### 1.4.1. Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un matériau se présente généralement sous la forme réelle.

$$n = n_r + jk \quad (1.5)$$

où :

$n_r$  est l'indice de réfraction complexe.

$n$  est l'indice de réfraction réel.

$k$  est le coefficient d'extinction matérielle.

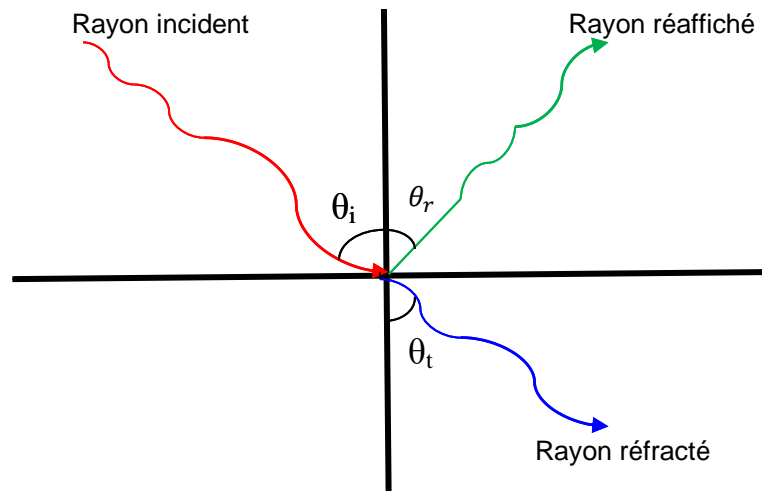


Figure 1. 3: Schéma de principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux .

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.6)$$

$$n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \quad (1.7)$$

avec :

$n$  est l'indice de réfraction

$\varepsilon_r$  est la permittivité relative

$\mu_r$  est la perméabilité relative

#### 1 .4.2.Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion de l'interface est défini pour une incidence normale, comme la puissance du faisceau réfléchi et le faisceau incident.

$$R(\lambda) = \left( \frac{n_1(\lambda) - n_2(\lambda)}{n_1(\lambda) + n_2(\lambda)} \right)^2 \quad (1.8)$$

Le coefficient de réflexion  $R$  dépend de la nature du semi-conducteur et sa valeur dépend de l'angle d'incidence du rayonnement.

#### 1 .4.3. Coefficient de transmission

La transmission ou le coefficient de transmission d'un système optique est le rapport de l'intensité du rayonnement transmis à l'intensité incidente. Cette définition par intensité transmise signifie flux spéculaire. Pour une onde incidente, on remplace (1.9) dans (1.8). On trouve :

$$T(\lambda) = \frac{4n^1(\lambda).n_2(\lambda)}{(n_1(\lambda)+n_2(\lambda))^2} \quad (1.9)$$



L'indice de réfraction des semi-conducteurs varie entre 3 et 4,2 à 300K, et nous ainsi, pour une incidence normale, nous obtenons un coefficient de une photo-détection sans traitement de surface particulier, nous avons dans la plupart des cas, environ 70 % du rayonnement pénètre dans le semi-conducteur.

Tableau 1. 2: Les indices de réfraction des principaux semi-conducteurs pour les photo-détecteurs à 300K, pour ( $h\nu \approx E_g$ ).

Semi-conducteurs	GaAs	InP	GaP	GaAsP
Indice de réfraction	3.6	3.5	3.38	3.7

#### 1.4.4. Coefficient d'absorption

Le flux de photons se propage dans le semi-conducteur et décroît selon la loi exponentielle proportionnelle à la distance de pénétration  $z$ , donné par l'expression suivante :

$$\varphi(z) = \varphi_0 \exp(-\alpha(\lambda) \cdot z) \quad (1.10)$$

avec

$\varphi_0$  est le flux de photons monochromatiques à l'intérieur du semi-conducteur.

$\alpha$  est le coefficient d'absorption de semi-conducteur.

$z$  est la distance de pénétration.

#### 1.4.5 Taux de photo-génération

Le flux de lumière diminuant pour permettre lieu à la génération de paires électrons-trous, il est utile d'exprimer le taux de photo-génération dans le semi-conducteur. Ce dernier est exprimé par le nombre de porteurs photo-générés par unité de volume et par unité de temps :

$$G(z) = -\frac{d\varphi(z)}{dz} \quad (1.11)$$

$$G(z) = \varphi_0 \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot z) \quad (1.12)$$

Lorsqu'on prend en considération la puissance optique à l'entrée du semi-conducteur, on peut formuler le taux de photo-génération de la manière suivante :

$$G(z) = \frac{P_{op}}{h\nu} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot \alpha(\lambda) \cdot \exp(-\alpha(\lambda) \cdot z) \quad (1.13)$$

### 1.4.6. Rendement quantique

Le rendement quantique EQ d'un photodétecteur est toujours inférieur à 1 ( $0 \leq EQ \leq 1$ ), il est défini comme étant le rapport entre le nombre de porteurs (paires électron-trou) générés pour produire un photo-courant ( $I_{ph}$ ) et le nombre de photons incidents pendant la même durée :

$$N_{ext} = \frac{n_e}{n_{ph}} \quad (1.14)$$

avec

$n_e$  est le nombre d'électrons créés.

$n_{ph}$  est le nombre de photons incidents.

Sachant que le courant créé par  $n_e$  électrons pendant un temps  $t$  est :

$$I_{ph} = \frac{n_e \cdot q}{t} \quad (1.15)$$

D'après (1.3) et (1.4) on trouve le rendement quantique est donné par la relation suivante :

$$EQE = \frac{I}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{opt}} \quad (1.16)$$

## 1.5. Les caractéristiques dynamiques

Une autre caractéristique très intéressante est la bande passante de photodétecteur ou sa fréquence de coupure à -3dB. Cette valeur est schématisée sur la figure 1.4, elle montre la fréquence à laquelle le courant utile de sortie est divisé par deux par rapport à la réponse maximale de sortie.

La bande passante est particulièrement limitée par trois effets, qui sont les suivants :

- Temps de transit des porteurs dans la Zone de Charge d'Espace
- Temps de diffusion des minoritaires
- Capacité de jonction

### 1.5.1 Temps de transit des porteurs dans la Zone de Charge d'Espace

En effet, les porteurs prennent un temps de transit pour traverser la Zone de Charge d'Espace. Le temps de transit ( $\tau_{tr}$ ) est exprimé :

$$\tau_{tr} = \frac{w}{v_{tr}} \quad (1.17)$$

$v_{tr}$  est la vitesse de dérive des porteurs.

$w$  est la largeur de ZGE

### 1.5.2 Temps de diffusion des minoritaires

Dans le cas de l'absorption hors ZGE, On doit prendre en compte le temps de diffusion des minoritaires jusqu'à la ZCE. Ce dernier est exprimé par [5] :

$$\tau_{dif} = \frac{w}{v_{dif}} \quad (1.18)$$

$v_{dif}$  est la vitesse de diffusion des minoritaires.

### 1.5.3. Capacité de jonction

Le signal ne rejoint pas instantanément la charge une fois que les porteurs électrons – porteurs ont quittés la ZCE. Ils sont encore retenus au voisinage de la jonction par une attraction coulombienne. La jonction se comporte comme un condensateur de capacité  $C_{jonction}$  exprimée par l'équation suivante [6] :

$$C_{jonction} = \frac{\varepsilon S}{w} \quad (1.19)$$

$S$  est la surface de la zone active.

$\varepsilon$  est la permittivité ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ).

Le temps de réponse de circuit est donné par :

$$\tau_{RC} = 2\pi R_c C_{jonction} \quad (1.20)$$

L'équation suivante donne directement la fréquence de coupure a(-3 dB). Fonctions d'exécution et de temporisation capacitive [7].

$$f(-3dB) = \frac{1}{\sqrt{\tau_{RC}^2 + \tau_{tr}^2}} \quad (1.21)$$

La fréquence de coupure  $f_c$  (-3dB) est dominée par le transit lorsque le temps de réponse du circuit est court devant le temps de transit :

$$f(-3dB) = \frac{1}{\tau_{(tr)}} \quad (1.22)$$

La fréquence de coupure  $f(-3dB)$  est dominée par le transit lorsque le temps de réponse du circuit est long devant le temps de transit :

$$f(-3dB) = \frac{1}{\tau_{RC}} \quad (1.23)$$

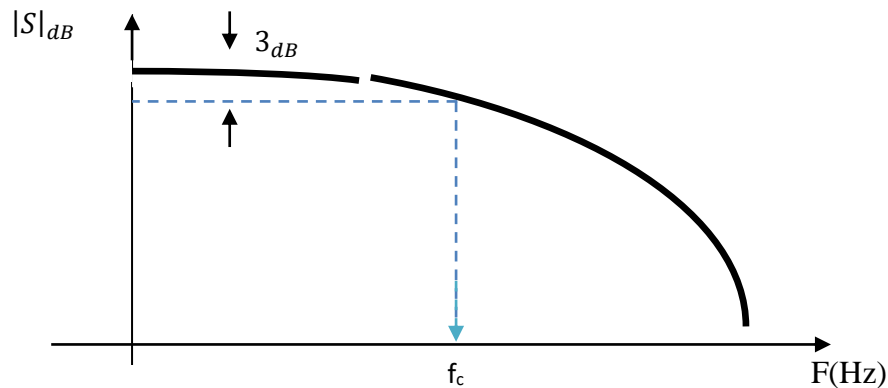


Figure 1. 4: Fréquence de coupure d'un photo-détecteur et sa bande passante a -3dB.

Afin de travailler dans les fréquences de coupure élevées pour les applications des hyperfréquences rapides. On doit trouver un compromis entre la diminution du temps de transit des porteurs et la diminution de la capacité du composant.

## 1.6. Les types des photo-détecteurs

Dans cette section, nous énumérerons et expliquerons comment les principaux photo-détecteurs exposés dans la littérature, ce sont les photoconducteurs, photodiode PN et photodiode PIN, photodiodes à avalanche, photodiodes UTC, photo-détecteurs MSM et phototransistors. Une comparaison entre ces différents types de photo-détecteurs est également apparaît à la fin de cette section.

### 1.6.1. Le photoconducteur

Dans leur structure de base, les photoconducteurs [8,9] sont des barreaux semi-conducteurs homogènes dont la connexion au circuit se fait par deux contacts ohmiques. La Figure 1.5 montre un circuit de polarisation classique pour un photoconducteur. Une source de tension délivre un courant  $I$  dans un semiconducteur. Sous l'action du faisceau lumineux, le photoconducteur génère des paires électron-trou, qui modifient la conductivité de la couche absorbante et donc des barreaux semi-conducteurs. Cela fait augmenter le courant  $I$  dans le circuit et donc la tension aux bornes de la résistance de charge  $RC$ .

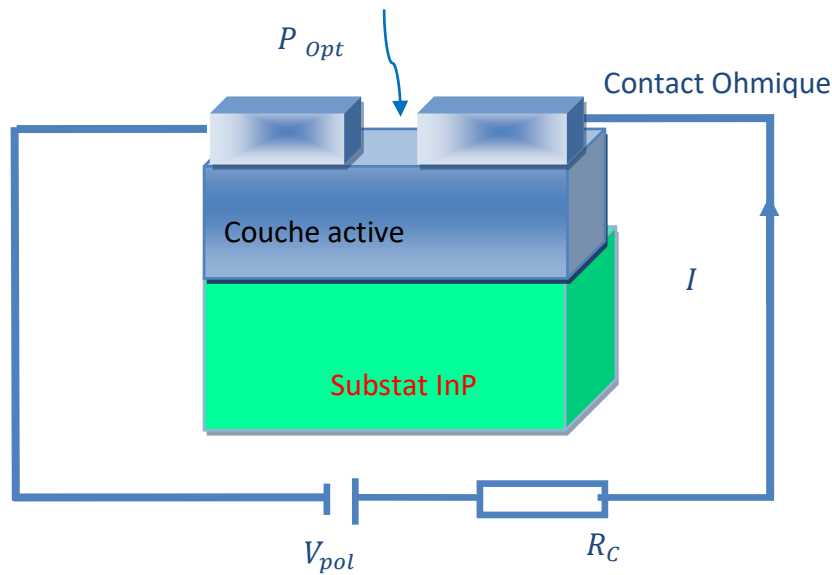


Figure 1. 5: Schéma de principe d'un photoconducteur et sa structure du circuit de charge .

Dans les matériaux semi-conducteurs, la mobilité des électrons est généralement bien supérieure à celle des trous. Les électrons sont ainsi collectés par l'un des contacts ohmiques beaucoup plus rapidement que les trous, laissant place à une charge positive nette dans la tige semi-conductrice. Pour le neutraliser, un second électron est placé dans la couche active via un second contact ohmique. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que les trous soient collectés ou recombinés dans le semi-conducteur. La durée de vie des paires électron-trou est alors déterminée par des mécanismes de piégeage spécifiques au matériau. Ce paramètre affecte fondamentalement la principale grandeur caractéristique du photoconducteur, à savoir son gain. Ce gain s'exprime par le rapport entre la durée de vie  $\tau_v$  de la paire électron-trou et le temps de transit  $\tau_{tr}$  du porteur de charge et s'exprime par la relation suivant [10,11].

$$G = \frac{\tau_v}{\tau_{tr}} \quad (1.24)$$

Donc  $G$  dépend du type de matériau et de sa géométrie. En effet, la mobilité des porteurs et la distance entre les électrodes affectent le temps de transit  $\tau_{tr}$ , tandis que le type de piège [5] affecte directement la durée de vie  $\tau_v$ .

La fréquence de coupure de la composante  $f_c$  est directement liée à la durée de vie de la paire électron-trou. Par conséquent, pour certains matériaux et structures, l'augmentation de la bande passante du photoconducteur obtenue en raccourcissant la

durée de vie de la paire électron-trou se fait au détriment de l'amélioration du photoconducteur.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_v} \quad (1.25)$$

### 1.6.2. La photodiode PN

Dans une diode "PN" la région de type P du semi-conducteur dopé A et la connexion métallique de la région dopée N forment une transition PN-A où le niveau de Fermi est presque en équilibre. Cela produit le flux de charge entre les N et P. Ainsi que à l'équilibre, nous trouvons une région autour de la jonction sans porteurs de charge libres, comme un condensateur chargé. Il y a des donneurs ionisés positivement sur les côtés N et P, Récepteurs sont ionisés négativement (cette région est appelée charge d'espace (ZCE)). Le donneur et l'accepteur ionisés fournissent une région de fixation, et en raison de la présence du donneur et de l'accepteur chargés, le champ électrique dans cette région plie la bande d'énergie et, lorsqu'il est en équilibre, forme une barrière d'énergie entre les deux régions [3].

Il s'agit d'une jonction "PN" qui subit une tension inverse qui étend la zone de charge d'espace où le champ électrique est élevé. Ceci est représenté schématiquement sur la figure 1.6 avec le diagramme de bande à l'équilibre. Le comportement des porteurs photogénérés dépend de l'endroit où ils sont photogénérés [11,5].

#### 1.6.2.1. Principe de fonctionnement de la photodiode PN

Si les porteurs sont à l'intérieur du ZCE, ils seront séparés par le champ électrique. Les trous sont dirigés vers la région de type P et les électrons sont dirigés vers la région de type N. Cela produit un photo-courant. Les porteurs minoritaires diffusent lorsqu'ils sont dans les zones neutres N et P. S'il a une durée de vie suffisante, il traverse la zone neutre et est accéléré par le champ électrique. Ils sont ensuite regroupés en zones où ils sont majoritaires. Ces porteurs contribuent à l'existence de photo-courants diffusés. Ces deux courants s'additionnent pour produire le photo-courant  $I_{ph}$ , qui contribue au courant inverse dans la diode. Cette photodiode a deux limitations.

- Diffusion des porteurs minoritaires. Lorsque cela se produit, la plage dynamique du temps de réponse de la photodiode est réduite.
- Efficacité quantique faible selon l'épaisseur de la zone vide, insuffisante pour absorber la majeure partie du faisceau lumineux.

Pour surmonter ces limitations, des photodiodes PIN ont été développées.

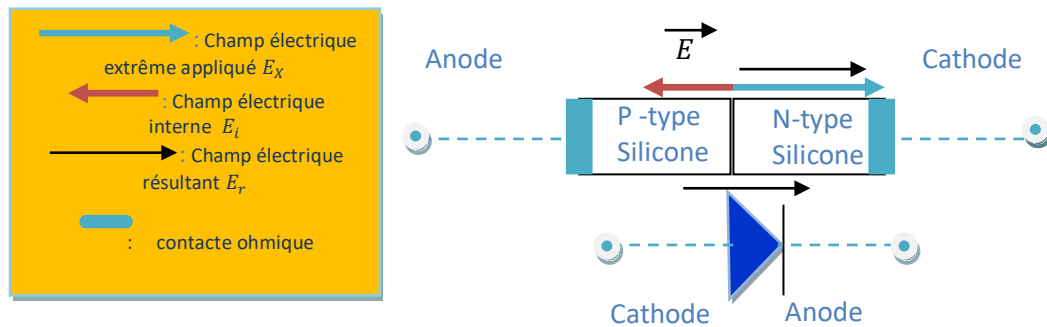


Figure 1. 6: Le symbole d'une diode associé à la représentation d'une jonction .

Jonction PN dans du silicium. Sur ce schéma, les régions p et n sont reliées à des contacts métalliques ou on trouve le contacte ohmique, ce qui suffit à transformer la jonction en diode. Le symbole d'une diode associé à la représentation d'une jonction PN.

### 1.6.2.2. La jonction PN polarisée en direct

Une tension électrique externe est appliquée à une jonction "PN" est appelée polarisation, cela veut dire que lorsque on applique une tension avec les bornes de chaque côté de la jonction PN avec une direction de voltage opposé du champ électrostatique de la barrière comme il est illustré dans la Figure(1.5).

### 1.6.2.2. La jonction PN polarisée en inverse

Lorsque nous appliquons une polarité inversée à une diode, en connectant l'électrode négative au matériau p et les électrodes positives au matériau n, nous créons un champ électrique qui s'ajoute au champ électrique de la barrière de potentiel, comme illustré dans la figure présentée. Ce champ électrique combiné favorise le mouvement des électrons ou des porteurs minoritaires dans le courant de conduction. De plus, les électrons libres dans la zone n et les trous dans la zone p, sous l'effet de ce champ électrique, se déplacent loin de la jonction.

Si nous examinons de plus près la figure (1.6), nous nous rappelons qu'il y a des porteurs minoritaires présents, à savoir les électrons du côté p et les trous du côté n. Les électrons du côté p seront repoussés par la polarité négative de la diode et passeront donc du côté n, tandis que les trous du côté n seront repoussés par la polarité positive et passeront du côté p. En conséquence, un courant de polarisation

inversée se manifeste en raison de la présence de ces porteurs minoritaires. Le nombre de porteurs minoritaires est indépendant de la tension appliquée et leur source est la chaleur. En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, ils sont produits par la rupture de liaisons chimiques entre les atomes due à la température. Cependant, ce courant est constant quel que soit le niveau de tension inverse appliquée. Ce courant est généralement appelé courant de saturation ou courant de fuite, et en pratique, il est de l'ordre du nano-Ampère.

Dans le cas d'une diode, ce courant peut être considéré comme négligeable par rapport au courant continu. En conclusion, l'application d'une tension inverse à une jonction pn crée un champ électrique qui permet aux porteurs minoritaires de circuler, induisant ainsi un courant de polarisation inversée. Ce courant de saturation est constant et indépendant de la tension appliquée. Il est important de comprendre ces phénomènes pour une utilisation appropriée des diodes et pour une analyse approfondie de leur comportement électrique dans différents circuits [11].

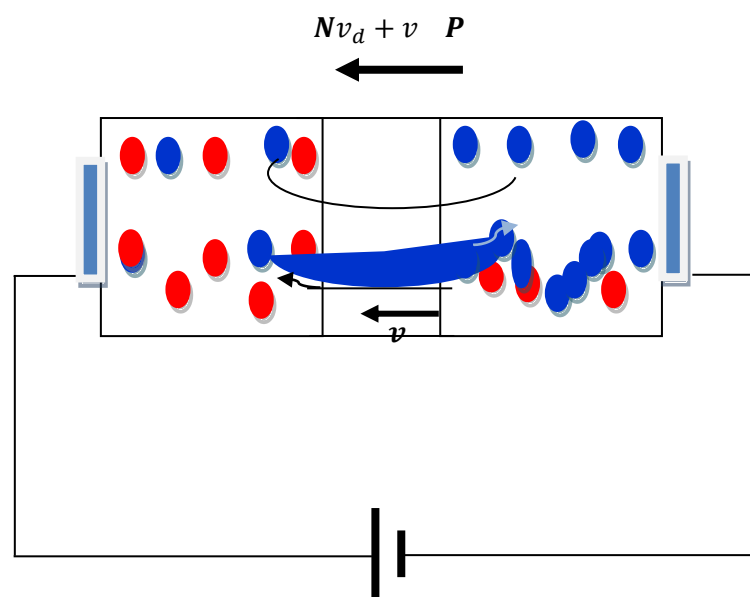


Figure 1. 7: la représentation d'une jonction PN polarisée en inverse .

### 1.6.3. La photodiode PIN

Une photodiode PIN est basée sur une simple jonction PN avec une couche intrinsèque a été ajoutée pour absorber les longueurs d'onde. L'idée de cette structure est destinée à augmenter la surface de charge d'espace, artificiellement la région d'absorption principale d'une photodiode, comme le montre sur le schéma ci-contre (1.7). Avec un biais inverse suffisant, toute la région intrinsèque est stressée fort champ électrique quasi-uniforme et donc porteurs de charge photo-générés et la vitesse de saturation est



rapidement atteinte. Cette structure de photodiode est très utilisée comme démodulateur optique hyperfréquence et donc aussi comme porteuse générée optiquement [1, 11].

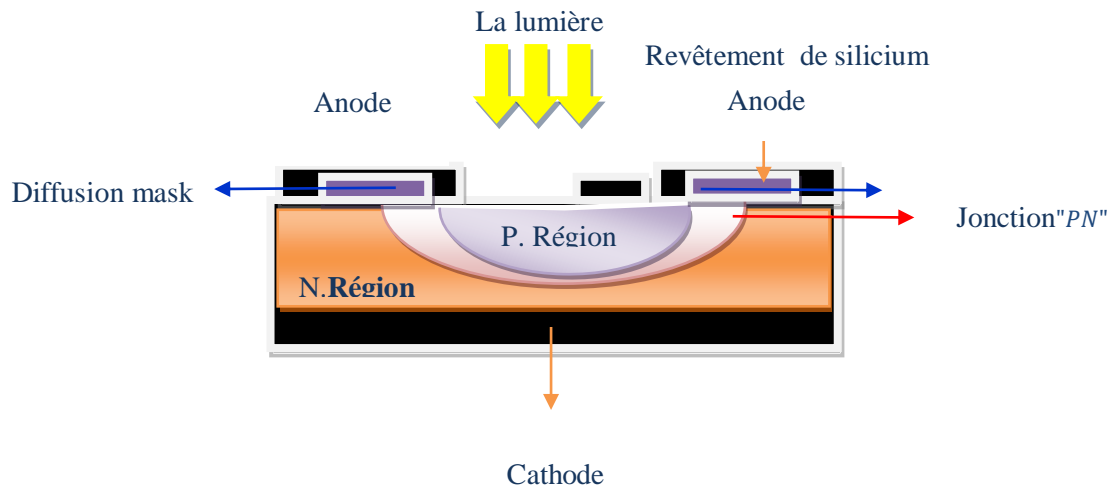


Figure 1. 8: Schéma d'une photodiode PIN avec une polarisation inverse suffisante .

### 1.6.3.1. Principe de fonctionnement de la photodiode PIN

Une photodiode PIN est basée sur une simple jonction PN au milieu. Des temps de réaction très courts sont visés pour ce type de composant c'est ainsi que le débit de données de communication peut être augmenté. Nous avons noté la présence de certains porteurs photogénérés dans la structure PIN "vierge" des phénomènes de diffusion se sont produits dans certaines zones. Cependant, dans la radiodiffusion comme il s'agit d'un phénomène très lent, cela réduit la bande passante. Application micro-ondes optique [6].

La portée doit être limitée pour améliorer la réponse en fréquence. L'absorption dans les zones propres raccourcit le temps de transport des porteurs. Hétérojonctions et nouveaux matériaux de jonction binaire et Turnerley a ouvert cette possibilité [2]. L'idée était d'utiliser un matériau Absorption à la longueur d'onde souhaitée de la zone propre et des deux autres zones les deux autres zones N et P utilisent des matériaux transparents fortement dopés.

La figure 1.7 résume le principe de fonctionnement d'une photodiode PIN. Éclairage vertical avec la zone autonome comme zone active. Éclairage vertical peut être fait par le haut ou par le bas selon la structure et le matériau est requis. L'éclairage latéral élimine le compromis entre vitesse et la détection. enfin, pour que le maximum de photons atteigne le ZCE, la région traversée par le flux doit être fine, par conséquent, les photodiodes PIN ont de meilleures performances que les photodiodes ordinaires est

un meilleur rendement qu'une photodiode usuelle , l'efficacité correspond au nombre de paires électron/trou qui participent au photo-courant généré par photon absorbé et le rendement est exprimer selon la relation suivante :

$$\eta = \frac{1240 \cdot S}{\lambda} \quad (1.26)$$

ou :

$\eta$  est le rendement.

$\lambda$  est la longueur d'onde en (nm) .

$S$  est la sensibilité spectral de la photodiode en (A/W)

### 1.6.3.2. Schéma électrique équivalent de la photodiode PIN

La figure (1.8) illustre le schéma équivalent de la photodiode. Le comportement non linéaire de composant est souvent modélisé par : La résistance  $R_c$ , la capacité  $C$  et la résistance  $R_{sh}$  varient linéairement avec la polarisation de la photodiode.

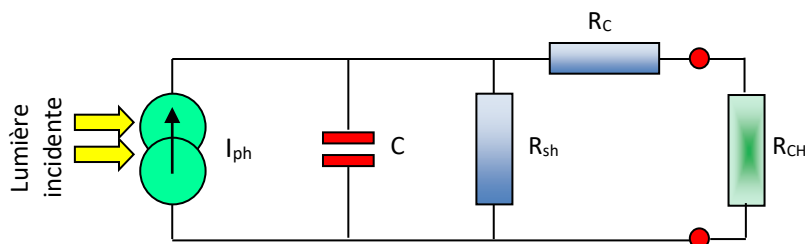


Figure 1. 9: Schéma équivalent de la photodiode .

### 1.6.3.3. Caractéristiques de la photodiode PIN

La montée en fréquence d'une photodiode PIN dépend de la largeur de sa ZCE et donc de sa couche intrinsèque. Alor, la taille de cette région affecte la valeur de la capacité  $C$  ainsi que le temps de transit des photo-porteurs. De plus, ces deux derniers jouent un rôle majeur dans la montée en fréquence de cette photodiode. De plus, deux types de limitation de fréquence peuvent être observés :

- ❖ Limitation à la montée de la fréquence, d'Equer la zone de charge augmente la capacité de photodiode diminue, en parallèle la bande passante augmente, Alor, la fréquence de coupure.
- ❖ Limitation à la montée de la fréquence associée au ZCE et le temps de transit  $\tau(t)$  et sa largeur  $W$  augmentent aussi la bande passante diminue.

Afin d'obtenir un bon rendement avec une bande passante pas trop limitée, il est donc nécessaire de bien choisir et étudier la ZCE,[11] et le temps de transit. Aussi peut aller de quelques centaines de nanosecondes à moins d'une demi-nanoseconde.

#### **1.6.4. La photodiode avalanche**

Les signaux optiques viennent au récepteur sont généralement faible le signal électrique délivré par la photodiode, des paires électron-trou sont créées par ionisation par impact. Ces opérateurs La sortie de la photodiode doit généralement être amplifiée. Le rôle de la photodiode à avalanche [9] est d'obtenir une amplification interne du photo-courant. Cette amplification est possible grâce à la région supplémentaire appelée région de gain créée par la photodiode PIN, de cette manière, lorsque les porteurs générés dans la région d'absorption atteignent la région de gain, ils peuvent obtenir suffisamment d'énergie pour provoquer un phénomène d'avalanche, c'est-à-dire que sous l'action du champ fort dans cette région, les porteurs libres obtiennent suffisamment d'énergie pour générer un phénomène d'avalanche. De nouvelles accélèrent à leur tour et peuvent créer d'autres paires et ainsi de suite. C'est ce processus cumulatif de multiplication des porteurs qui est connu sous le nom d'avalanche.

#### **1.7. Exigences et qualités principales des photo-détecteurs**

Les performances du système de communication par liaison optique des types numériques ou optiques/radiofréquence, sont en partie à l'aide d'un photo-détecteur. Ce composant représente l'élément critique sur lequel il intervient. La puissance seuil pouvant être détectée et bruit généré. Il existe des limites sévères à la conception de tels composants. Les principaux critères à considérer sont :

➤ Bon facteur de réponse à la longueur d'onde de fonctionnement (environ 0,85, 1,3, 1.55  $\mu\text{m}$ ). Il est important de concevoir un photo-détecteur capable d'atteindre cet objectif. Fournit un courant élevé pour une puissance optique donnée.

Bruit minimal, le bruit généré par le photo-détecteur doit être faible, et le courant d'obscurité doit être négligeable par rapport au photo-courant.

➤ Reconstruire le signal d'origine avec la plus grande fidélité. quand nous jouissons en eux composant de rendement lumineux élevé, la charge photo-générée s'accumule.

➤ Saturation du photo-détecteur. Pour maintenir un comportement linéaire, ce problème existe, devrait être considéré [4].

- Assure un bon couplage avec les fibres. A des débits très élevés, le photo-détecteur est très petit par rapport à la taille du mode fibre. Cela crée des problèmes de couplage fibre composant. En effet, il devient de plus en plus difficile d'assurer un emballage adéquat.
- Stabilité et fiabilité des performances : Les performances des photo-détecteurs doivent rester stables dans le temps et en température. Cela devrait fonctionner pendant plusieurs années.
- Déploiement et coûts

Pour les systèmes à grande échelle et les applications grand public, le photo-détecteur doit être facile à mettre en œuvre et avoir un faible coût, non seulement pour la photodiode, mais pour l'ensemble du photorécepteur. En particulier, le fibrage des photodiodes à grande vitesse occupe une grande partie du coût car leur petite taille nécessite des machines de précision associées à un alignement dynamique. En effet, à -1 dB, la tolérance de positionnement est légèrement supérieure à  $\pm 0,6\mu\text{m}$ . Par conséquent, la réduction des coûts nécessite l'utilisation de méthodes d'alignement passives qui nécessitent des composants avec une tolérance de positionnement de -1 dB compatible avec les applications grand public [12,13].

## **1.8. Bruit des photo-détecteurs**

En l'absence de puissance optique incidente, le photo-détecteur produit un courant d'obscurité qui doit être le plus faible possible, cela crée un bruit de fond qui dépend de nombreux paramètres tels que le types de matériaux utilisés, techniques de fabrication, températures de fonctionnement et surface active du photo-détecteur. Il quatre types de bruit associés aux photo-détecteurs [12]. Ici, il est représenté par une source de courant dont l'intensité effective est la valeur quadratique moyenne du courant de bruit correspondant.

### **1.8.1. Le Bruit de grenaille**

Le bruit associé au passage des porteurs à travers les barrières de potentiel est communément appelé bruit de fusil de chasse, pour un photo-détecteur, il est impossible de faire la distinction entre le bruit de grenaille quantique généré à partir des photons détectés par la photodiode et le bruit de grenaille électronique généré à partir du photo-courant circulant à travers la jonction PN dans la photodiode. La densité spectrale normalisée du bruit de grenaille courant s'écrit [12] :

$$i_n^2(f) = 2 \cdot q \cdot I_{ph} \quad (1.27)$$

où :

$q$  est la charge d'électron.

$I_{ph}$  est le photo-courant.

### 1.8.2. Le Bruit thermique

Le bruit thermique, ou bruit de Johnson-Nyquist, provient de collisions aléatoires de porteurs et d'atomes dans un réseau cristallin qui sont en oscillation perpétuelle en raison du mouvement thermique. La densité spectrale de courant de bruit thermique associée à la résistance de charge de la photodiode est donnée par la relation [14].

$$i_t^2(f) = \frac{4 \cdot k_B \cdot T}{R_C} \quad (1.28)$$

ou :

$k_B$  est la constante de Boltzmann,  $R_C$  est la résistance de photodiode et  $T$  est la température.

### 1.9. Conclusion

Le premier chapitre couvre les principes de base de la détection de la lumière et diverses, les propriétés optiques et électriques des Semi-conducteurs, la principale préoccupation est la largeur de bande et le type interdiction, la soi-disant lacune des semi-conducteurs, une condition préalable à son existence la génération de paires électron-trou se fait par des photons incidents. Fournir l'énergie qui surmonte cet écart à tous vous pouvez définir la longueur d'onde maximale du semi-conducteur. Et aussi appelée longueur d'onde de coupure. Nous avons aussi étudié les différents types de photo-détecteurs, et nous rappelons les photodiodes ci-dessus, les photoconducteurs, les photodiodes PN et PIN et avalanche. Chaque type de ces photo-détecteurs et ses propres avantages et inconvénients qui le rendent adapté à certaines applications. Enfin, nous avons montré une comparaison avec la cible.

## Chapitre 2: Résultats de simulation et discussions

### 2.1. Matériaux semiconducteurs III-V

#### 2.1.1. Paramètre de maille

Les semi-conducteurs III-V sont composés principalement par les éléments des colonnes III et V du tableau de classification périodique. Caractérisée par deux sous-réseaux à faces centrées décalés l'un par rapport à l'autre, avec une longueur de la diagonale du cube d'un vecteur  $(a/4, a/4, a/4)$  (figure 2.1.B). On not  $a$  l'arête de cube présenté dans (la figure 2.1.A), est le paramètre de maille (constante du réseau) du matériau. On a utilisé quelques valeurs de paramètre de maille des semi-conducteurs III-V qui ils sont affichées dans (le tableau 2.1.) et le paramètre de maille (constante du réseau) du matériau et il dépend de la nature chimique des éléments mis en jeu. Lorsqu'une maille cristalline est d'autant plus grande que le numéro atomique des éléments constituants est grand [15].

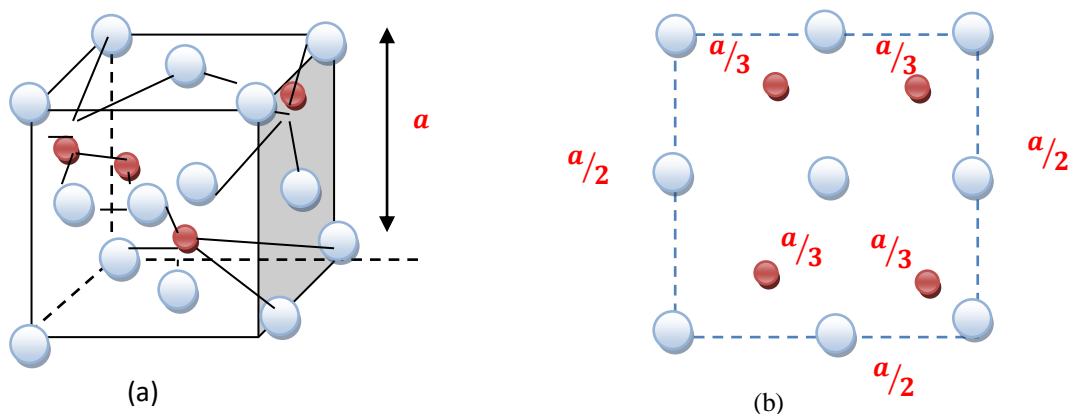


Figure 2. 1: Structure cristalline de: a) Maille élémentaire b) Vue de dessus .

Tableau 2. 1: Paramètre de maille à 300 K [16] .

Composés	GaAs	InP	GaP
$a$ (Å)	5.65	5.87	5.45

#### 2.1.2. Structure de bande

La structure de bande des semi-conducteurs III-V à gap direct est comme de (GaAs) dans la (figure 2.2) où le maximum et le minimum de la bande de valence et de la bande de conduction se trouvent dans le même point de la zone de Brillouin. Les

transitions des électrons dans ce type de structure sont radiatives, ce qui provoque une émission et une absorption de la lumière importante. Cette propriété rend ces matériaux très utilisés dans la fabrication des dispositifs optoélectroniques tels que les diodes lasers, les photodiodes et les cellules photovoltaïques.

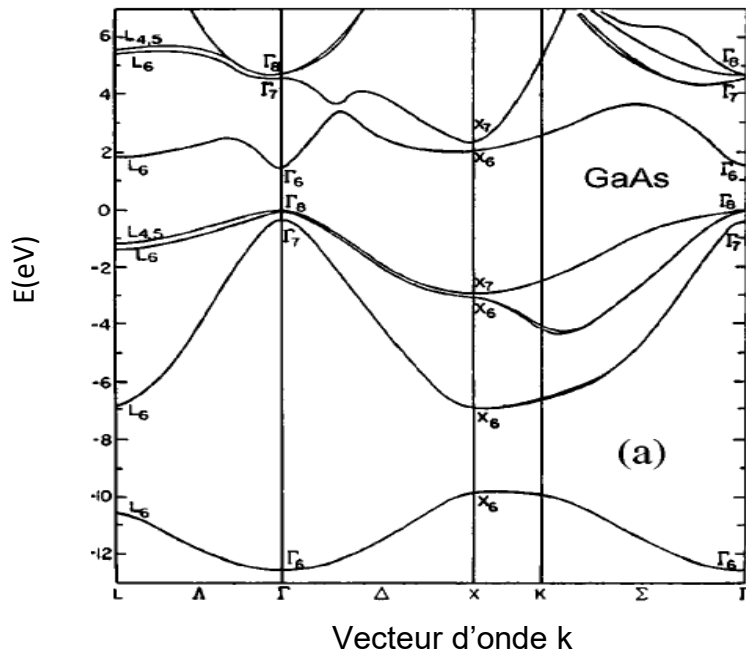


Figure 2. 2: Structure de bande électronique de GaAs [17] .

### 2.1.3. Les alliages

Un alliage est dit ternaire ou quaternaire si lorsque on mélange deux ou trois semi-conducteurs III-V. Cependant, la structure de cet alliage change à cause de la distribution aléatoire des atomes sur chaque site de la structure. Cette distribution interdit en particulier les propriétés d'invariance par translation on a plusieurs cas de l'alliage.

#### 2.1.3.1. Cas d'un alliage ternaire

Un ternaire (  $A_x B_{1-x} C$  ) est composé de binaire bande de conduction (AC) et band de valance (BC) avec les concentrations respectives  $x$  et  $(1-x)$  ; le calcul de leurs paramètres physiques  $T(x)$  est donné [18] :

$$T(x) = xP_{AC} + (1 - x)P_{BC} - x(1 - x)C_{ABC} \quad (2.1)$$

avec

$P_{AC}$  est le paramètre physique de couche de c conduction (AC).

$P_{BC}$  est le paramètre physique de couche de c conduction (BC).

$C_{ABC}$  est la déviation par rapport à une interpolation linéaire entre les deux binaires  $P_{AC}$  et  $P_{BC}$  et le paramètre de courbure (Bowling).

#### 2.1.4. Résultats et discussion

Le paramètre de maille du  $(GaAs_{1-x}P_x/InP)$  en utilisant la loi de Vegard.

Tableau 2. 2: Energie de la bande interdite en fonction de la concentration  $x$  de quelques alliages ternaires [18].

Alliage	Composés		C (eV)	$E_g(x)$ (eV)
$In_xGa_{1-x}P$	InP	GaP	0.65	$1.330x + 2.886(1-x) - 0.65x \cdot (1-x)$
	1.33 eV	2.886 eV		
$In_xGa_{1-x}As$	InAs	GaAs	0.477	$0.417x + 1.420(1-x) - 0.47x \cdot (1-x)$
	0.417 eV	1.420 eV		
$GaAs_{1-x}P_x$	GaAs	GaP	0.19	$1.330x + 1.420(1-x) - 0.19x \cdot (1-x)$
	1.420 eV	1.33 eV		

Les paramètres de maille des principaux semi-conducteurs sont donnés dans le tableau (2.2), nous avons tracé le paramètre de maille en fonction des paramètres de composition  $x$ ,  $y$ . La figure (2.3) montre la variation de paramètre de maille de la structure GaAsP en fonction de la concentration du phosphore à  $T=300K$ . On constate que l'augmentation de la concentration du phosphore provoque une diminution de paramètre de maille. Lorsque la concentration du phosphore  $x$  varie de 0 à 1 le paramètre de maille varie de 5.65 à 5.45 Å, c'est-à-dire on a une diminution de  $\Delta a = 0.2 \text{ \AA}$ . Cette simulation nous permet d'étudier la stabilité de la structure proposée. Le phénomène de la contrainte de la structure proposée a été pris en considération (Figure 2.4). Lorsque la concentration de phosphore croît la contrainte change de 3.70% (pour  $x=0$ ) à 7.6% (pour  $x=1$ ). Cette étude nous donne une idée sur la stabilité et fiabilité de la structure présentée. On peut optimiser la concentration du phosphore afin de réaliser une photodiode performante et fiable. Dans notre structure  $(GaAsP/InP)$  à une contrainte extensive c'est-à-dire que le paramètre de maille de matériau InP est



supérieure à celle du matériau GaAsP ( $a_{InP} > a_{GaAs}$ ). On note que pour une concentration du phosphore de 60% la déformation dépasse 6%.

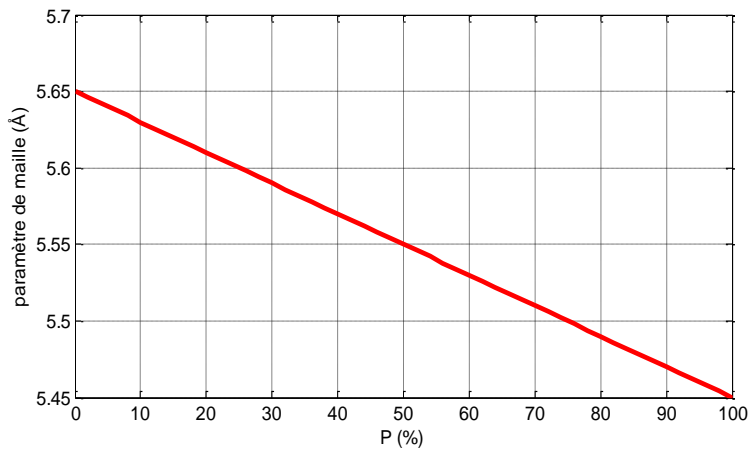


Figure 2. 3: La variation de paramètre de maille en fonction de la concentration de phosphore à T=300K .

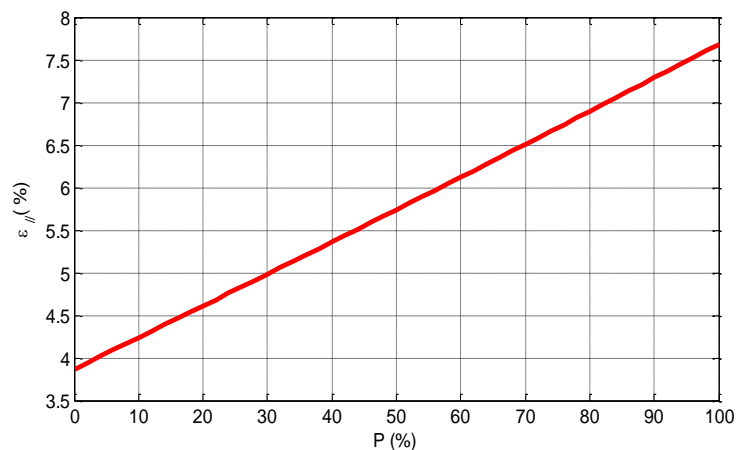


Figure 2. 4: La variation de la déformation parallèle en fonction de la concentration de phosphore à T=300K.

Dans cette partie on a négligé l'effet de la contrainte sur l'énergie de la bande interdite. On remarque que l'accroissement de la concentration du phosphore provoque une augmentation de l'énergie de la bande interdite de la couche absorbante ce qui permet d'absorber un maximum des photons. La figure (2.5) illustre la variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la concentration du phosphore à T=300K.

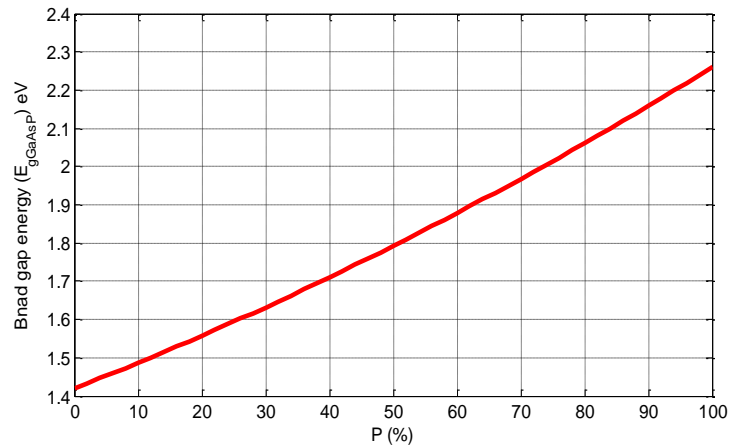


Figure 2. 5: La variation de la bande interdite en fonction de la concentration de phosphore a T = 300K.

L'évolution de la bande interdite d'un matériau semi-conducteur en fonction de la température peut être décrite par l'expression de Varshni [19] dans le cas d'un alliage ternaire :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (2.4)$$

$E_g(0)$  : Bande interdite du matériau semiconducteur à 0 K.

$T$  : Température.

$\alpha$  : Constante empirique.

$\beta$  : Constante associée à la température de Debye.

La figure (2.6) montre La variation de l'énergie de la bande interdite de GaAs et GaP en fonction de la température. Cette étude nous permet de simuler et d'optimiser le coefficient d'absorption de la couche absorbante.

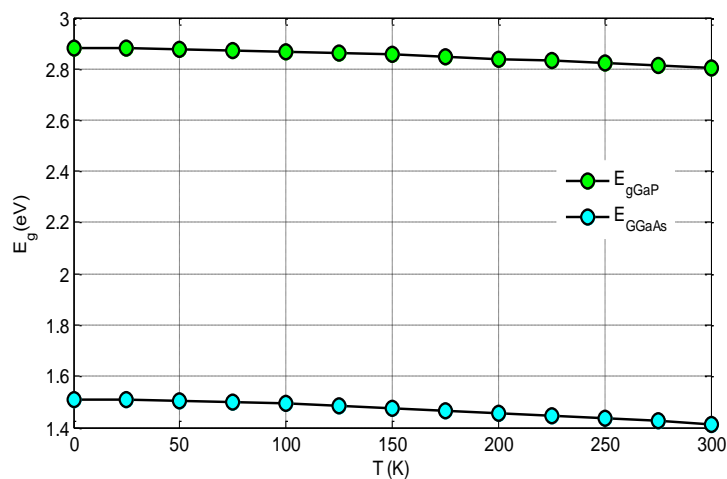
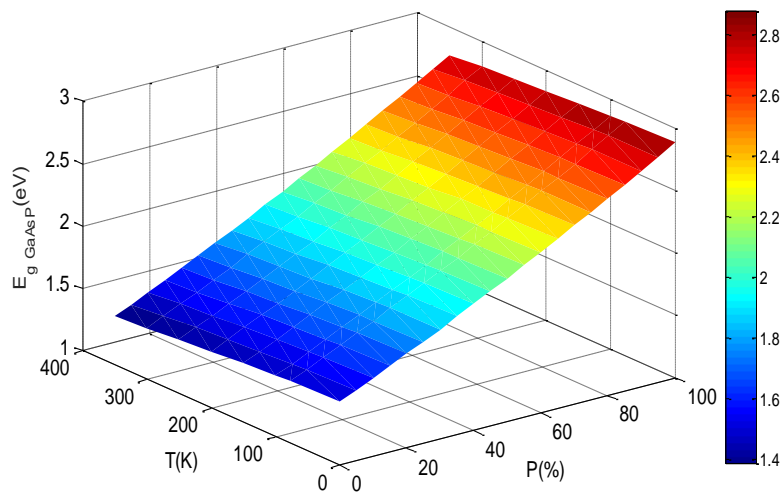


Figure 2. 6: La variation de l'énergie de la bande interdite en fonction de la température.

L'effet de la température sur le gap de l'alliage (GaAsP) pour plusieurs concentrations du phosphore illustré sur la figure (2.7). La variation de la température entraîne une légère diminution de la bande interdite : Pour  $T$  variant entre 300 et 350 K et une concentration de phosphore ( $x$ ) est égale 0.10, on a une réduction  $\Delta E_g = 0.022\text{eV}$ . Cette simulation montre que l'effet de la température sur l'énergie de la bande interdite est faible par rapport à l'effet du phosphore. Malgré que l'effet de la température sur le gap est faible, on doit trouver un compromis entre la concentration de l'alliage et la



température afin d'optimiser la structure du composant.

Figure 2. 7: Impact de la concentration de phosphore et la température sur l'énergie de la bande interdite.

La figure (2.8) illustre la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'énergie de la bande interdite pour plusieurs modèles. Cette étude nous montre l'impact de l'énergie de la bande interdite sur l'indice de réfraction. L'augmentation de l'énergie de la bande interdite cause une diminution de l'indice de réfraction. Dons on pourra optimiser l'indice de réfraction de la structure qui a un impact très important sur la propagation de la lumière dans le matériau.

L'influence de la longueur d'onde de propagation est modifiée par l'indice de réfraction qui nous provoque d'autres phénomènes par exemple la réflexion, l'absorption et la transmission. La figure (2.9) nous donne une idée sur la relation entre l'indice de réfraction du milieu et la longueur de propagation de la lumière. Cette étude nous montre l'influence de ces paramètres optique sur les performances des composants optoélectroniques. Dans notre étude l'augmentation de la réflexion sur l'interface

air/semi-conducteur cause des pertes dans le coefficient d'absorption qui va diminuer la conversion de la lumière en signal électrique. Alors on doit optimiser l'indice de réfraction, le coefficient de réfraction ainsi que le coefficient d'absorption.

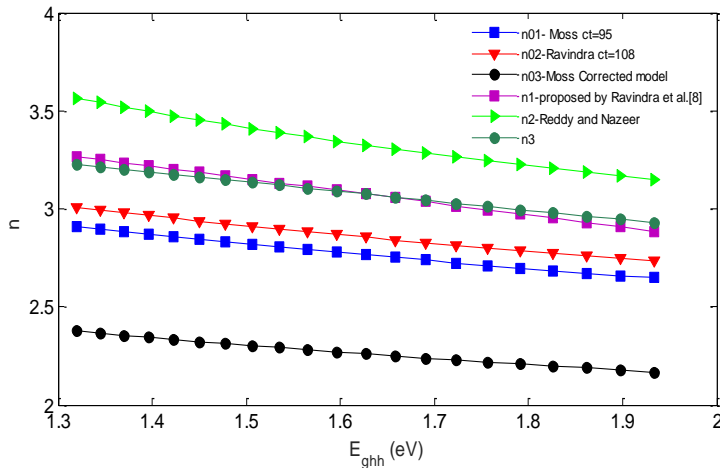


Figure 2. 8: la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'énergie de la bande interdite pour plusieurs modèles à T=300K.

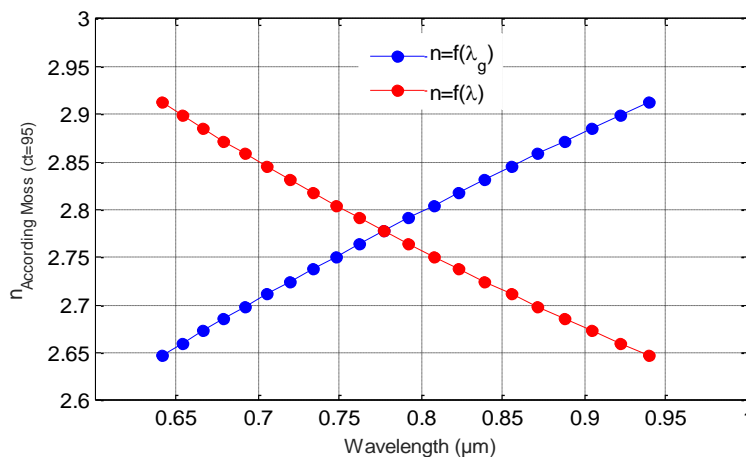


Figure 2. 9: La variation de l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

La figure 2.10 (a,b) représente la variation de coefficient d'absorption en fonction de l'énergie des photons et la concentration de phosphore x à T=300K. Cette simulation nous montre l'effet de la concentration x et l'énergie de photons incidents. On peut optimiser la concentration x et le flux des photons afin d'assurer la convention lumière en signal électrique. Pour réaliser un composant optoélectronique fiable et performant on doit trouver un compromis entre l'énergie de la lumière incidente sur l'interface du composant, la concentration de phosphore la température et les dimensions géométriques de la structure.

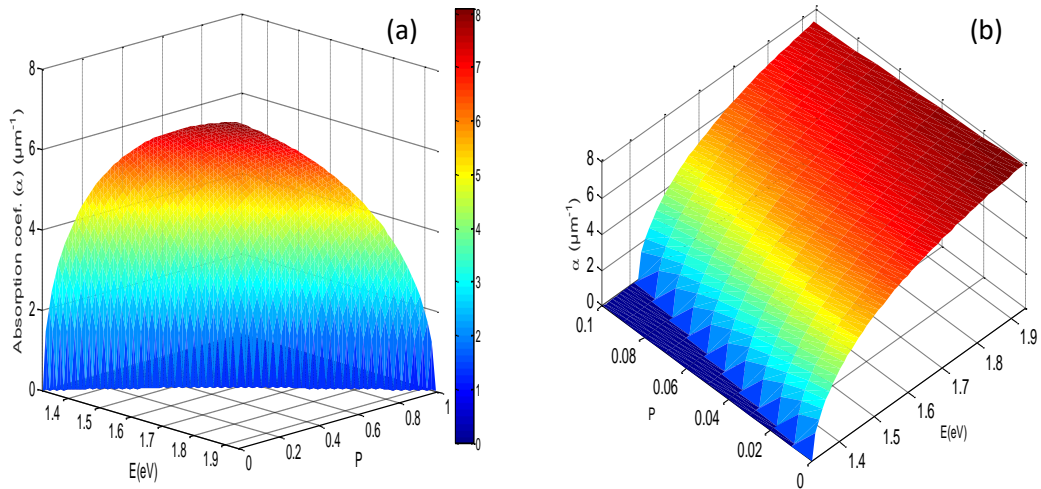


Figure 2. 10: (a,b).la Variation de coefficient d'absorption en fonction de la concentration de phosphore et l'énergie de photon à T=300K.

La figure 2.11 illustre la variation de la réponse impulsionnelle des trous en fonction de temps pour une concentration  $x=0.30$ , l'épaisseur de la couche absorbante  $d_{abs}=0.50\mu\text{m}$  avec  $\alpha=6.501\mu\text{m}^{-1}$ . On constate que l'amplitude de l'impulsion dépasse  $15 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$ . La variation de la réponse impulsionnelle des électrons en fonction de temps a été simulé (figure 2.12).

La figure 2.13 illustre la variation de réponse de la photodiode PIN en fonction de la fréquence pour la structure GaAsP /InP avec  $x=0.30$ ,  $d_{abs}=0.50\mu\text{m}$  et T=300K. La fréquence de coupure  $f_c$  atteint 107.45GHz. Cette simulation nous permet de choisir la structure de la photodiode en jouant sur la concentration de l'alliage, l'épaisseur de la couche absorbante et la température.

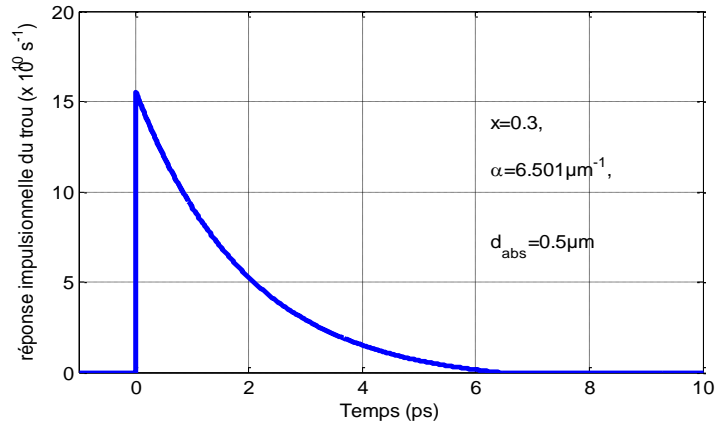


Figure 2. 11: Variation de la réponse impulsionnelle des trous pour  $x=30\%$ ,  $T=300\text{K}$ .

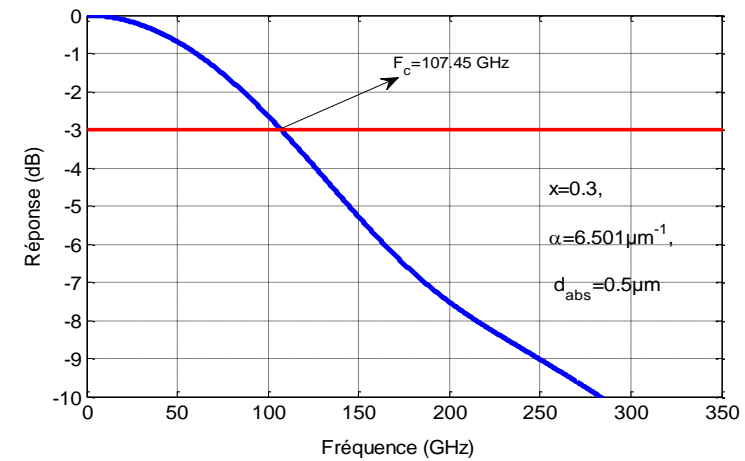
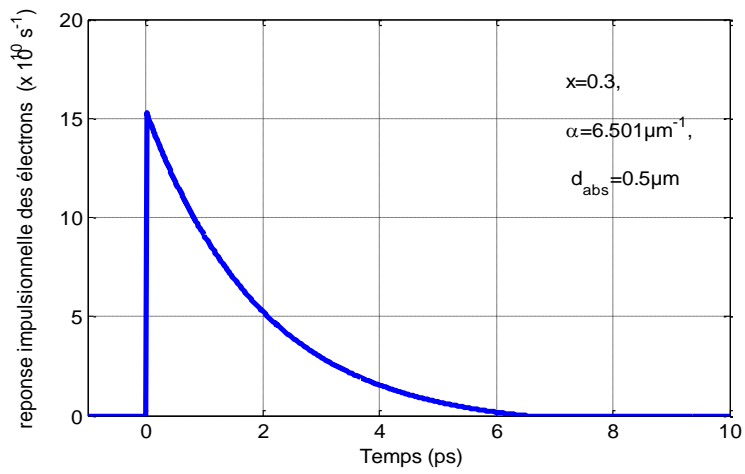


Figure 2. 12: Variation de la réponse impulsionnelle des électrons pour  $x=30\%$ .

Figure 2. 13: Réponse en fonction de la fréquence  $x=30\%$ .

La figure 2.14 illustre la variation de la réponse impulsionnelle des trous en fonction de temps pour une concentration  $x=0.40$ , l'épaisseur de la couche absorbante  $d_{\text{abs}}=0.50 \mu\text{m}$

avec  $\alpha=5.949\mu\text{m}^{-1}$ . On constate que l'amplitude de l'impulsion ne dépasse pas  $15 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$ . La variation de la réponse impulsionnelle des électrons en fonction de temps a été simulé (figure 2.15). La figure 2.13 illustre la variation de réponse de la photodiode PIN en fonction de la fréquence pour la structure GaAsP /InP avec  $x=0.40$ ,  $d_{\text{abs}}=0.50\mu\text{m}$  et  $T=300\text{K}$ . La fréquence de coupure  $f_c$  atteint  $102.45\text{GHz}$ . Cette simulation nous permet de choisir la structure de la photodiode en jouant sur la concentration de l'alliage, l'épaisseur de la couche absorbante et la température. On constate que l'augmentation de la concentration de phosphore induit une diminution de la fréquence de coupure de la photodiode. Pour un changement de la concentration de 30 à 40% on a eu une diminution de  $\Delta\alpha=0.55\mu\text{m}^{-1}$  ce qui influe sur la fréquence de coupure c'est-à-dire on a une perte en fréquence de coupure de  $\Delta f=4.70\text{GHz}$ . Alors, on doit trouver un compromis entre la stabilité, la performance, la fiabilité et l'application du composant.

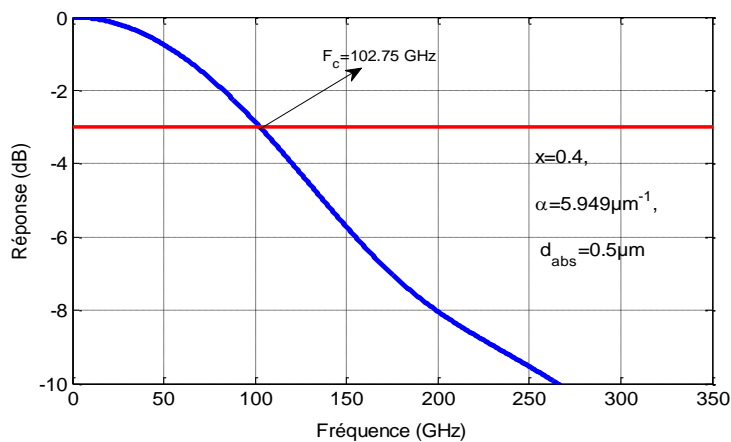
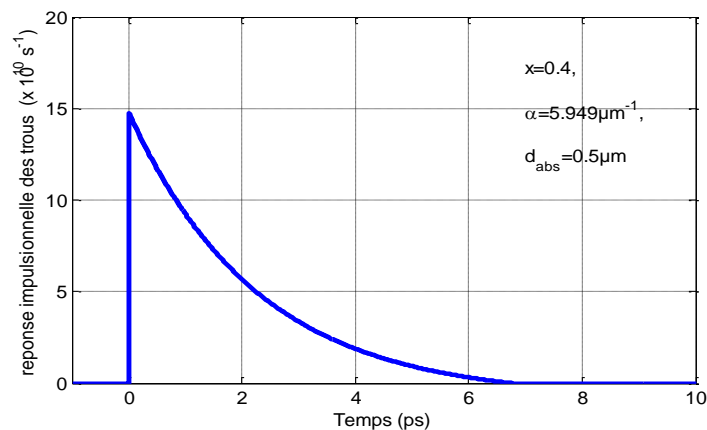


Figure 2. 14: variation de la réponse impulsionnelle des électrons pour  $x=40\%$ .

Figure 2. 15: Réponse en fonction de la fréquence  $x=40\%$ .

Les résultats obtenus par simulation de la photodiode PIN pour différentes structures sont résumés dans le tableau ci-dessous, Ces résultats montrent que la photodiode PIN étudiée dont l'épaisseur de la couche absorbante est 0.5 $\mu\text{m}$  peut atteindre des fréquences de coupure très élevés pour une faible composition de phosphore et une contrainte réduite.

Tableau 2. 3: Résultats de simulations de la photodiode PIN pour différentes compositions de phosphore.

x(%)	10	20	30	40	50	...	80
$\epsilon$ (%)	3.906	3.943	3.979	4.016	4.053	...	4.201
$\alpha$ ( $\mu\text{m}^{-1}$ )	7.422	6.988	6.501	5.949	5.314	...	2.23
$F_c$ (GHz)	115.65	111.7	107.45	102.75	97.65	...	78.6

### 2.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé les différentes propriétés et comportements des matériaux étudiés. Les objectifs de ces simulations étaient de mieux comprendre les relations entre les paramètres clés, d'analyser les réponses et les variations, ainsi que d'optimiser les caractéristiques des matériaux dans des applications spécifiques. Cette étude visait à évaluer la variation de la déformation parallèle et verticale en fonction de la concentration de phosphore. Les résultats ont montré une augmentation linéaire de la contrainte parallèle avec l'augmentation de la concentration de phosphore, ce qui suggère une corrélation positive entre ces deux paramètres. Cette information est précieuse pour la compréhension des propriétés mécaniques des matériaux et peut être utilisée pour la conception de dispositifs présentant des caractéristiques de déformation spécifiques. Ces simulations nous a permis d'analyser la variation du paramètre de maille en fonction des paramètres de composition. Les simulations ont révélé une diminution du paramètre de maille avec l'augmentation de la concentration de phosphore, mettant ainsi en évidence l'impact direct de la composition chimique sur les propriétés structurales du matériau (GaAsP). Cette connaissance est essentielle pour la compréhension des propriétés physiques et électroniques du matériau, ainsi que pour la conception de dispositifs à des fins spécifiques.



## Conclusion générale

Dans l'ensemble, ces simulations ont permis d'approfondir notre compréhension des propriétés des matériaux étudiés (GaAsP), en fournissant des informations cruciales pour la conception et l'optimisation de dispositifs optoélectroniques avancés. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des nouvelles perspectives de recherche et des nouvelles applications technologiques, en exploitant les caractéristiques uniques des matériaux et en maximisant leurs performances dans des domaines tels que la photonique, l'électronique et l'optoélectronique.

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude, s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la réponse en fréquence d'une photodiode dont la structure est basée sur un semi-conducteur III-V pour la détection rapide qui représente une partie importante dans une chaîne de communication optique. Ceci est basé essentiellement sur une étude physique des différents paramètres en jeu, et qui influent directement sur la réponse de la photodiode tel que la composition du phosphore, la température, la contrainte, l'énergie de gap et le coefficient d'absorption.

En effet, nous avons obtenu des résultats très encourageants. Les simulations effectuées affirment que la photodiode étudiée peut atteindre des vitesses de détection très élevées dont la fréquence de coupure qui arrive jusqu'à 107 GHz. Ces résultats ouvrent la voie à de futures études de cette structure dont laquelle on peut introduire l'influence de la couche active ainsi l'étude qui vise à minimiser l'effet capacitif.

## References

- [1]. B.Garcia, Jr, Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas", thesis naval postgraduate school Monterey California. 2007.
- [2]. Maury, J.P., and Maury-Kaufmann, M., Une histoire de la physique sans les équations. Culture scientifique, 2000 : Vuibert.
- [3]. Jacques Boutigny, Le Champ électrique dans les milieux matériels, Vuibert, 1997
- [4]. Sidi Ali Mebarek, Z., Télécommunications Optiques, Sources, Fibres et Détecteurs. Office des Publications Universitaire (O.P.U), 2001, Algérie.
- [5]. Boumédiène Zebentout A.D., Contribution A L'étude De Photodétecteurs Rapides. Cas Du Photodétecteur Métal Semiconducteur Métal Sur Matériau, III-V. Thèse de Doctorat, 2012, Université Djillali Liabes De Sidi Bel Abbès.
- [6]. kato, k., hata, s., kawano, k., and kozen. a., high sensitivity p-i-n photodetectors. IEEE Trans. Electron., e76-c(2) 1993: p. 214-221.
- [7]. J.wilson, J.F.B. Hawkes, "Optoelectronics: an introduction", Ed. Prentice-Hall, London, 1983.
- [8]. Brahim, H., " Etude en bruit de systèmes optiques hyperfréquences modélisation, caractérisation.
- [9]. Publication a la métrologie en bruit de phase et à la génération de fréquence ». Thèse de Doctorat, 2010, Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [10]. I.S. Ashour, "Etude de photo-détecteurs Metal-Semiconducteur-Metal pour les applications micro-ondes", Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Spécialité : Electronique, 25 Novembre 1994.
- [11]. F.Journet, "Modélisation de photodiodes PIN pour un Fonctionnement en Hyperfréquence sous forte puissance", Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, Spécialité : Electronique, 27 Mars 1996.
- [12]. D.decoaster, j. harari, "détecteurs optoelectroniques (traite egem, serie optoelectronique)", ed. hermes science publications, lavoisier, paris, 2002.
- [13]. S. Demiguel, "photodiodes rapides à adaptateur de mode intégré pour les liaisons optiques/radiofréquences à 60ghz et les transmissions numériques à 40gb/s", thèse de doctorat de l'université de rouen, spécialité : optoélectronique, 26 octobre 2001.
- [14]. Dentan, M., Photodiode p-i-n en grands signaux hyperfréquences : modélisation, réalisation et caractérisation. Thèse de Doctorat Université de Paris-Sud., 1989,

- [15]. Marc.Haelterman, physique des semi-conducteurs II, 3<sup>e</sup> éd, Université Libre de Bruxelles, 1998, pp 46-50.
- [16]. C.Chauvin, J. Math : Les ondelettes comme fonctions de base dans le calcul de structures électroniques, I. N. Pol. De Grenobl, 2005.
- [17]. N.Bouarissa, T.kobayasi, and H.Nara , Solid. State. Commun. 96 (1995) 689.
- [18]. A. Aissat, F. Kerkar, S. Nacer et al., Gain optique d'un laser a puits quantique contraint à base de  $Ga_xIn_{1-x}N_yAs_{1-y}/GaAs$ . IEEE 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 25-29, 2007, Tunisia .
- [19]. Y. P. Varshni, Physica 34, 149 (1967).