

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
République Algérienne démocratique et populaire Ministère de l'enseignement  
supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية 1  
Université Saad Dahlab Blida 1

INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET  
DES ETUDES SPATIALES

معهد الطيران والدراسات  
الفضائية



## MEMOIRE DE MASTER

*Pour l'obtention du diplôme de Master en  
Aéronautique*

**Option : Communication Navigation Surveillance /  
Gestion du trafic aérien**

### **THEME :**

**ETUDE ET OPTIMISATION D'UNE PHOTODIODE POUR  
LA TELECOMMUNICATION**

### **Réalisé par :**

**GHERAB GOURAYA  
HAMOUD ANFAL**

### **Encadré par**

#### **Noms et Prénoms**

**Pr. AISSAT ABDELKADER  
Mr. AMERAOUI RACHID**

#### **Qualité**

**Encadreur  
Co-promoteur**

# **Remerciements**

*Nous tenons à remercier notre promoteur, Monsieur A. AISSAT de nous avoir accueilli au sein du laboratoire d'électronique et accompagné tout au long de nos recherches, nous le remercions pour son soutien, ses conseils judicieux et sa patience durant la préparation de ce travail.*

*Ainsi que notre co-promoteur M. Amraoui Rachid pour son aide et ses précieuses informations.*

*Nos vifs remerciements vont aussi, particulièrement, aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et juger notre travail.*

*Nos reconnaissances vont également aux enseignants de l'institut d'aéronautique et des études spatiales de l'université Blida 1 qui ont contribué à notre formation.*

*Nous tenons spécialement à remercier nos parents pour leurs soutiens et encouragements durant nos études.*

*Nous remercions vivement tous ceux qui nous ont porté aide, encouragés et soutenues de près ou de loin ; ainsi que tous nos amis et collègues pour leurs encouragements.*

## *Dédicace*

*A celle qui m'a été comme une ombre, à celle qui n'est jamais loin de moi, à celle qui m'a fait voir la lumière, à celle qui fait toujours de son mieux rien que pour me satisfaire et très chaleureusement à celle qui est très chère à mes yeux.*

*A ma maman.*

*A celui qui m'a appris un tas de choses sur la vie, à celui qui est toujours là pour me protéger, à celui qui ne m'a jamais manqué de rien, à celui que j'estime beaucoup.*

*A mon très cher papa.*

*A ceux qui sont toujours à mes côtés, à ceux qui ne m'ont jamais laissé tomber, à ceux qui me font toujours rigoler, à ceux auxquels je me suis habituée.*

*A mes chères sœurs Syssih et Soussa*

*A mon très cher frère Abderrahmane.*

*A Damon qui est plein de tendresse et d'affection.*

*A toute ma famille sans exception.*

*A mes très chères amies ; surtout Céline, Katia, Sarah, Kawther, Sissa, Imen, Sarah et Anfal.*

*A mon bien aimé "O".*

*Et à toutes les personnes que je connais dont je n'ai pas cité le nom.*

*GOUCHA*

# *Dédicace*

*À mes chers parents*

*À la mémoire de ma très chère grand-mère*

*À ma tante adorée Ina*

*À mes chères sœurs Bouchra et Ghadir, à mon frère Soheib*

*À mes meilleurs amis Chaima Daouia, Fadia et Waleed*

*Anfal*

## ملخص:

هذا العمل يركز على دراسة هيكلين أساسهما أنصاف نواقل (InGaN/GaN et InAsSb/GaAs) وهذا من أجل ظاهرة الكشف البصري عامة والثنائي الضوئي خاصة، تتمثل هذه الدراسة في تقييم تأثير كل من الأنديموم والأنتيمون على المركبين المذكورين سابقا حيث تتضمن عموميات على انصاف النواقل III-V مثل خصائصهم الفيزيائية والهيكلية والبصرية ثم محاكاة للمركبين والمقارنة بينهما وفوائدهما. كلمات مفتاحية: الكشف البصري - الثنائي الضوئي - أنصاف النواقل - (InGaN/GaN – InAsSb/GaAs) .

## Abstract:

This work represents the simulation of two semiconductor structures (InGaN/GaN and InAsSb/GaAs) for a photo-detection application. More precisely, it is about evaluating the influence of each of indium 'In' and antimony 'Sb' on the different parameters of these semiconductors for the design of a photodiode. This manuscript includes generalities on the III-V S.C, as well as the simulation of the two structures mentioned earlier and the comparison between them and their benefits.

Key words: Photo-detection– Photodiode - Semiconductors - (InGaN/GaN, InAsSb/GaAs).

## Résumé :

Ce travail porte sur la simulation de deux structures à base de semi-conducteurs III-V (InGaN/GaN et InAsSb/GaAs) pour une application de photo-détection. Il s'agit plus exactement d'évaluer l'influence de chacun de l'indium 'In' et l'antimoine 'Sb' sur les différents paramètres de ces semi-conducteurs pour la conception d'une photodiode. Ce manuscrit comporte des généralités sur les S.C. III-V, ainsi que la simulation des deux structures mentionnées et la comparaison entre eux et leurs avantages.

Mots Clés : Photo-détection –Photodiode - Semi-conducteurs – (InGaN/GaN, InAsSb/GaAs).

## Liste des acronymes et abréviations

**E** : Energie de photon

**h** : Constante de Planck

**C** : Vitesse de la lumière dans le vide

$\lambda$  : Longueur d'onde

**N**: Azote

**Ga**: Gallium

**In**: Indium

**As**: Arsenic

**Sb**: Antimoine

**BC**: Bande de conduction

**BV**: Bande de valence

$\alpha$ : Coefficient d'absorption

**q**: Charge élémentaire

**K**: Constante de Boltzmann

**EQE( $\lambda$ )**: Efficacité quantique externe

**I<sub>cc</sub>**: Courant de court-circuit

**V<sub>oc</sub>**: Tension à circuit ouvert

**FF**: Facteur de forme

**w**: Largeur de la couche active

**E<sub>QI</sub>**: Efficacité quantique interne

**E<sub>g</sub>**: Energie de gap

$\varepsilon$  : Déformation hydrostatique

**a<sub>s</sub>**: Paramètre de maille du substrat

**a<sub>e</sub>**: Paramètre de maille de la couche active

$\gamma$ : Coefficient de poisson

**C<sub>ij</sub>** : Tenseur d'élasticité

**$\Delta_0$** : Energie de spin orbite

**b**: Potentiel de déformation tétragonale

**n:** Indice de réfraction

**R:** Coefficient de réflexion

**T :** coefficient de transmission

**n1 :** Indice de réfraction de l'air

**n2 :** Indice de réfraction du matériau

**$\theta_1$  :** Angle de rayon lumineux incident

**$\theta_2$  :** Angle de rayon lumineux réfracté

# Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des abréviations et acronymes	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I.....</b>	<b>3</b>
<b>Les semi-conducteurs III-V .....</b>	<b>3</b>
1 Introduction.....	5
2 Généralités sur les semi- conducteurs.....	5
2.1 Structure cristalline .....	6
2.1.1. Cristal cubique .....	6
2.1.2. Les variants du composant du semi-conducteur.....	7
2.2 Notions de bandes d'énergie et gap.....	8
2.2.1. Gap direct.....	9
2.2.2. Gap indirect.....	9
2.3 Dopage .....	9
2.3.1. Semi-conducteur intrinsèque .....	9
2.3.2. Semi-conducteur extrinsèque.....	12
3 Présentation des semi-conducteurs III-V .....	12
4 Quelques propriétés .....	13
4.1. Propriétés structurelles .....	13
4.2. Propriétés physiques.....	15
4.2.1. Contrainte.....	15
4.2.2. Epaisseur critique .....	15
4.2.3 Energie de gap.....	16
4.2.4 Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température.....	16
4.3 Propriétés optiques .....	17
4.3.1 Absorption .....	17
4.3.2 Indice de réfraction.....	17
5 Domaines d'application et avantages.....	20
5.1 Domaines d'application.....	20
5.2 Avantages des matériaux III-V .....	21
6 Conclusion .....	21
<b>Chapitre II .....</b>	<b>21</b>
<b>Etude de la structure InGaN/GaN.....</b>	<b>21</b>
1. Introduction.....	23
2. Aperçu sur le logiciel Matlab .....	23

3.	Présentation de InGaN .....	23
3.1	Définition.....	23
3.2	Historique .....	24
3.3	L'intérêt d'avoir choisi InGaN.....	24
4	Résultats et interprétations .....	24
4.1	Paramètres physiques .....	24
4.1.1	Paramètre de maille .....	24
4.1.2	La déformation .....	25
4.1.3	L'énergie de gap.....	26
4.1.4	L'épaisseur critique .....	27
4.2	Paramètres optiques .....	28
4.2.1	Coefficient d'absorption .....	28
4.2.2	Indice de réfraction.....	29
4.2.3	Coefficient de réflexion .....	30
4.2.4	Coefficient de transmission.....	31
5.	Conclusion .....	32
	<b>Chapitre III</b> .....	33
	<b>Etude de la structure InAsSb/GaAs</b> .....	33
1.	Introduction.....	34
2.	Présentation de InAsSb .....	34
2.1.	Définition.....	34
2.2.	Historique .....	34
2.3.	L'intérêt d'avoir choisi InAsSb .....	35
3.	Résultats et interprétations .....	35
3.1.	Paramètres physiques .....	35
3.1.1.	Paramètre de maille .....	35
3.1.2.	Déformation .....	36
3.1.3.	Energie de gap.....	36
3.1.4.	Epaisseur critique .....	37
3.2.	Paramètres optiques .....	38
3.2.1.	Coefficient d'absorption .....	38
3.2.2.	Indice de réfraction.....	39
3.2.3.	Coefficient de réflexion .....	40
3.2.4.	Coefficient de transmission.....	41
4.	Comparaison.....	42
4.1.	Paramètre de maille.....	42
4.2.	Contrainte .....	43
4.3.	Energie de gap .....	43
5.	Conclusion .....	44
	Conclusion générale .....	45
	Références bibliographiques	

# Liste des figures

## Chapitre I : Les semi-conducteurs III-V

Figure 1 : Structure de bandes d'un métal, d'un semi-conducteur et d'un isolant à $T = 0$ K [2].	6
Figure 2 : Les réseaux du système cubique. a. Cubique simple. b. Cubique centré. c. Cubique face centrée [3].	7
Figure 3 : Représentation de l'association d'un atome de Silicium avec ses quatre voisins [3].	7
Figure 4 : Semi-conducteur composé : GaAs [3].	8
Figure 5: structure de bande d'énergie : gap direct et indirect [4].	9
Figure 6 : réseau cristallin des diamants [5].	10
Figure 7: représentation d'un atome sous deux phases[5].	11
Figure 8: Extrait de la classification périodique des éléments [6].	13
Figure 9 : Structure wurtzite (Hexagonale) [3].	14
Figure 10 : Structure zinc blende (Cubique) [3].	14
Figure 11 : Structure NaCl [3].	14
Figure 12: Schéma des chemins optiques [10].	19
Figure 13: Quelques applications possibles dans le domaine infrarouge[11].	20

## Chapitre II : Etude de la structure InGaN/GaN

Figure 14: Paramètre de maille de la structure InGaN en fonction de la concentration d'indium.	25
Figure 15: la déformation de la structure InGaN en fonction de la concentration d'indium x.	26
Figure 16 : Gap d'énergie d'InGaN en fonction de la variation d'indium à $T=300^\circ\text{K}$ .	27
Figure 17 : variation de l'épaisseur critique de la structure InGaN en fonction de la concentration d'indium x.	27
Figure 18 : Coefficient d'absorption de la structure InGaN.	28
Figure 19 : Indice de réfraction de la structure InGaN.	30
Figure 20 : Coefficient de réflexion de la structure InGaN.	31
Figure 21 : Coefficient de transmission de la structure InGaN.	32

## Chapitre III : Etude de la structure InAsSb/GaAs

Figure 22 : Paramètre de maille de la structure InAsSb en fonction de la concentration d'antimoine x.	36
Figure 23 : la déformation de la structure InAsSb en fonction de la concentration d'antimoine x.	36
Figure 24 : Gap d'énergie d'InAsSb en fonction de la concentration d'antimoine x à $T=300^\circ\text{K}$ .	37
Figure 25 : Epaisseur critique de la structure InAsSb en fonction de la composition d'antimoine x.	38
Figure 26 : Coefficient d'absorption de la structure InAsSb.	39
Figure 27 : Indice de réfraction de la structure InAsSb.	40
Figure 28 : Coefficient de réflexion de la structure InAsSb.	41
Figure 29 : Coefficient de transmission de la Structure InAsSb.	42
Figure 30 : Variation du paramètre de maille des structures InGaN et InAsSb en fonction de In/Sb.	42
Figure 31 : Variation de la contrainte des structures InGaN et InAsSb en fonction de In/Sb.	43
Figure 32 : La variation de l'énergie de la bande interdite des structures InGaN et InAsSb	44

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Les semi-conducteurs III-V

Tableau 1: valeurs du coefficient  $\beta$ . ..... 16

### Chapitre II : Etude de la structure InGaN/GaN

Tableau 2: Valeurs de quelques paramètres des semi-conducteurs III-V. .... 23

### Chapitre III : Etude de la structure InAsSb/GaAs

Tableau 3: paramètres des alliages composant la structure InAsSb. .... 34

# **Introduction générale**

De tout temps, les ondes ont été un moyen privilégié pour communiquer à distance et accroître le champ d'action des hommes, Jusqu'au dix-huitième siècle, les débits et les portées sont restés très limités.

Après l'invention du télégraphe optique, l'optique est rapidement abandonnée au profit de l'électronique dont la maîtrise progresse plus rapidement, depuis, les télécommunications n'ont cessé de se développer.

Aujourd'hui les besoins en débit croissent très rapidement. Pour satisfaire les exigences liées à la téléphonie mobile et à Internet, des débits de données de l'ordre du Tb par seconde sont nécessaires. Les bandes de fréquences utilisées (10 – 20 GHz) sont saturées et en limite de débit. L'utilisation de bandes de fréquences plus hautes en radiofréquence (RF) (bande Q/V, W... 30 à 110 GHz) et dans le domaine optique ( $\sim 200$  THz) est à l'étude.

L'optoélectronique est une branche de l'électronique et la photonique qui consiste en l'étude des composants électroniques, appelés aussi composants photoniques, ces derniers émettent de la lumière ou interagissent avec elle, parmi eux, les capteurs ou les diodes permettant la conversion de photons en charge électrique ou réciproquement, les systèmes permettant la gestion d'un signal optique dans les télécommunications par fibre optique ainsi que les systèmes d'optique intégrée.

Le traitement d'un signal de façon purement optique a de nombreux avantages par rapport aux possibilités offertes par l'électronique. Il est relativement facile d'obtenir et de faire se propager des impulsions lumineuses de durée très courte, de l'ordre de la picoseconde. Cette propriété, jointe à la possibilité théorique d'obtenir des mémoires optiques ayant des temps de commutation du même ordre de grandeur, pourrait se révéler intéressante pour la réalisation de systèmes très rapides. Par ailleurs, les ondes lumineuses ne sont pas sensibles aux champs électromagnétiques extérieurs, contrairement aux courants électroniques. Dans un environnement fortement perturbé, un système purement optique pourrait être plus digne de confiance qu'un système électronique.

Le Principe des télécommunications optiques est basé sur trois éléments essentiels:

- Emetteur : diode laser.
- Support de transmission : fibre optique.
- Récepteur : photo-détecteur.

Parmi les principaux photo-détecteurs (composants photoniques) on trouve le capteur

CCD, la photodiode, photorésistance, phototransistor, cellule photoélectrique, diode laser, diode électroluminescente (DEL).

Dans ce travail, nous nous intéresserons à la photodiode et sa structure de base, cette dernière est une classe de diodes capables de transformer la lumière en électricité, et dont l'application principale est la détection de la luminosité.

L'objectif de ce travail est d'étudier les propriétés structurales, électroniques et optiques des alliages ternaires (InGaN/GaN) et (InAsSb/GaAs) en utilisant le logiciel Matlab

- Dans un premier chapitre nous parlerons des semi-conducteurs III-V, leurs propriétés, ainsi que leurs différentes utilisations et avantages.
- Dans le deuxième, nous allons étudier notre matériau principal, le nitrure d'indium gallium (InGaN), nous allons présenter ce dernier, voir ses paramètres optiques et physiques, discuter et interpréter les résultats obtenus par sa simulation.
- Dans le 3eme et dernier chapitre, nous présenterons notre deuxième matériau qui est l'antimonide d'indium arsenic (InAsSb), nous verrons ses différents paramètres à travers la discussion et l'interprétation des résultats de sa simulation.

Vers la fin de ce chapitre, nous ferons une comparaison entre ces deux matériaux et nous parlerons brièvement de l'utilité de notre étude dans l'optimisation d'une photodiode.

# Chapitre I

Les semi-conducteurs

III-V

## 1 Introduction

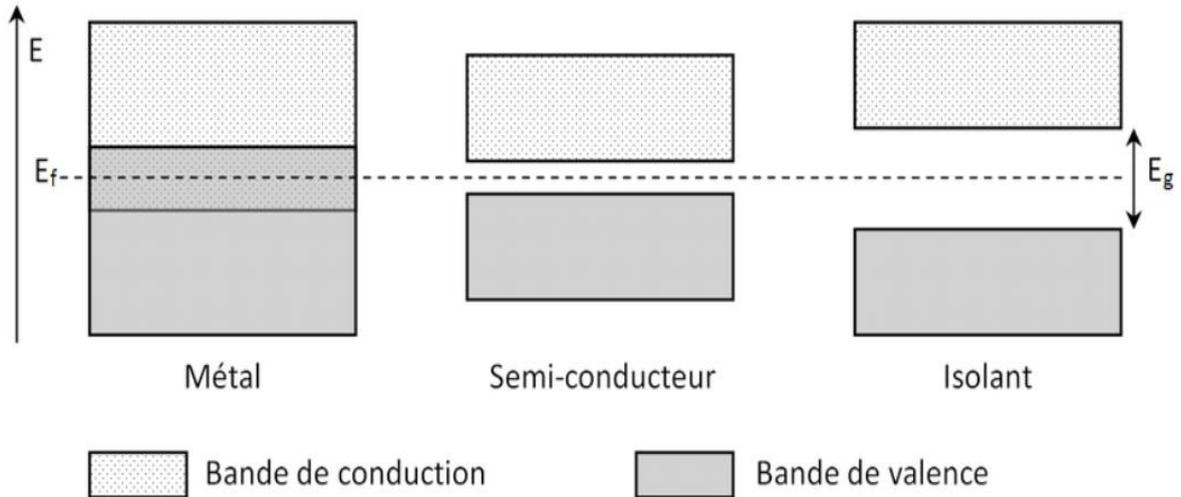
Les composants électroniques ont envahi les appareils domestiques, les voitures, les outils de communication et désormais tous les objets de la vie privée et professionnelle. Non contents de se multiplier, ils doivent être toujours plus petits, consommer moins d'énergie et coûter moins cher. Pour les produire, les fabricants des semi-conducteurs ont perfectionné la technologie du silicium. Mais ils atteindront bientôt les limites de la physique du solide. Pour franchir cette étape, ils travaillent sur de nouvelles approches de l'électronique à l'échelle nanométrique.

Dans ce premier chapitre, nous connaissons les semi-conducteurs III-V et pour bien comprendre leur rôle, nous verrons d'abord quelques généralités sur les semi-conducteurs. Ensuite, Nous allons définir les matériaux III-V, décrire leurs propriétés physiques, électroniques et optiques essentielles avant de présenter un certain nombre de leurs applications.

## 2 Généralités sur les semi- conducteurs

Entre le conducteur (métal) et l'isolant se trouve le semi-conducteur, ce composant électronique, plus petit qu'un grain de sable, sans lequel il est impossible de faire circuler des informations dans la machine est appelé le « le cerveau électronique ». La résistivité des semi-conducteurs varie de  $10^{-3}$  à  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  (ou plus). La conduction électrique se fait par les électrons et les trous, ou de façon préférentielle par l'un ou l'autre type de porteurs.

Un semi-conducteur est un matériau possédant une bande de valence et une bande de conduction avec un gap énergétique. C'est souvent un cristal épitaxié dont la maille est composée d'un seul élément chimique tel que le silicium, ou de plusieurs : l'indium, et le phosphore pour l'InP, le gallium, l'indium, et l'arsenic pour l'InGaAs. Or, il peut aussi y coexister des impuretés, en quantité variable, mais toujours en très faible concentration par rapport à la concentration d'atomes de la maille [1].



**Figure 1** : Structure de bandes d'un métal, d'un semi-conducteur et d'un isolant à  $T = 0 \text{ K}$  [2].

## 2.1 Structure cristalline

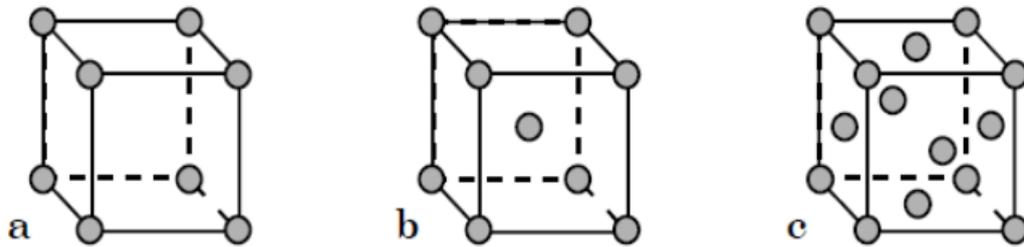
Un cristal peut être représenté à partir d'une cellule de base qui est répétée périodiquement. Selon la nature des opérations de symétrie qui laissent la structure cristalline invariante.

Dans l'espace tridimensionnel, il existe **7** solides primitifs, qui portent les mêmes désignations que les **7** systèmes réticulaires : triclinique, monoclinique, orthorhombique, quadratique, rhomboédrique, hexagonal, cubique.

### 2.1.1. Cristal cubique

La plupart des semi-conducteurs cristallisent selon un système cubique. Il existe trois réseaux différents possibles, selon la disposition des atomes comme l'indique la figure (2).

- Cubique simple : les atomes sont aux sommets du cube figure (2.a).
- Cubique centré : identique au cubique simple mais avec un atome au centre du cube figure (2.b).
- Cubique face centrée : identique au cubique simple mais avec un atome au centre de chaque face (figure (2.c)).

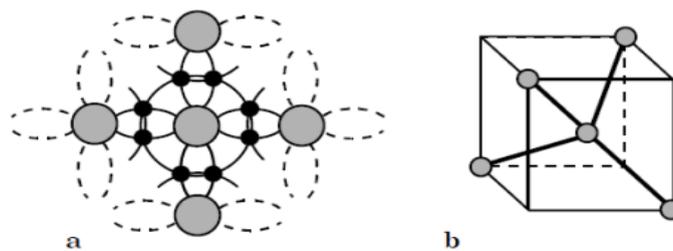


**Figure 2** : Les réseaux du système cubique. a. Cubique simple. b. Cubique centré. c. Cubique face centrée [3].

### 2.1.2. Les variants du composant du semi-conducteur

#### a. Réseau diamant

Les électrons d'un atome isolé prennent des valeurs d'énergie discrètes et chaque niveau d'énergie peut accueillir un nombre limité d'électrons. Ce nombre est égale à  $2n^2$  où  $n$  correspond au numéro du niveau (couche) en partant du noyau. Les électrons se répartissent en occupant d'abord les niveaux les plus proches du noyau (ce qui correspond à l'énergie minimale). Le système cubique, dans lequel, cristallise le Silicium, le Germanium (ainsi que C, Sn) est le réseau diamant. Il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées imbriqués (décalés du quart de la diagonale principale du cube) [3].

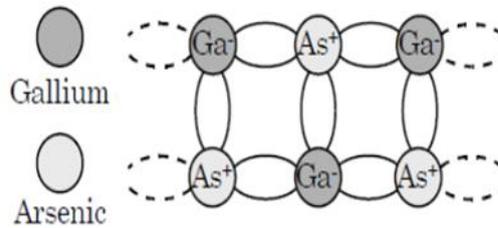


**Figure 3** : Représentation de l'association d'un atome de Silicium avec ses quatre voisins [3].

#### b. Réseau Zinc-blende

Un type de liaisons très proche de celui qui vient d'être décrit peut aussi se faire entre atomes de nature différente, ce sont les Semi-conducteurs composés (III-V ou II-VI). La figure (4) donne la représentation en deux dimensions du semi-conducteur GaAs dans lequel un atome de Ga prend quatre atomes de As comme voisins et l'As quatre atomes de

Ga. En réalité, le cristal se construit à partir des ions  $\text{Ga}^-$  et  $\text{As}^+$  qui ont tous quatre électrons périphériques [3].



**Figure 4 :** Semi-conducteur composé : GaAs [3].

Le réseau correspondant est celui de la blende (minerai de sulfure de zinc :  $\text{ZnS}$ ) qui peut être considéré comme une variante du réseau diamant : pour GaAs, il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (l'un de Ga et l'autre de As) imbriqués et décalés du quart de la diagonale principale.

## 2.2 Notions de bandes d'énergie et gap

La notion de gap direct et indirect est liée à la représentation de la dispersion énergétique d'un semi-conducteur.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparées par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie.

On appelle gap la largeur de la bande interdite, qui est l'intervalle d'énergies situé entre l'état de plus basse énergie de la bande de conduction et l'état de plus haute énergie de la bande de valence. On parle de gap direct lorsque ces deux extremums correspondent au même quasi-moment (quantité de mouvement associée au vecteur d'onde dans la première zone de Brillouin), et de gap indirect lorsque la différence entre les vecteurs d'onde de ces deux extremums est non nulle.

Les matériaux à gap direct et ceux à gap indirect se comportent très différemment du point de vue optoélectronique car les porteurs de charge des matériaux à gap direct peuvent passer d'une bande à l'autre en échangeant simplement un photon, dont la quantité de mouvement est négligeable à ces niveaux d'énergie, tandis que les porteurs des matériaux à

gap indirect doivent interagir à la fois avec un photon et avec un phonon afin de modifier leur vecteur d'onde, ce qui rend la transition bien moins probable [3].

### 2.2.1. Gap direct

Un électron du haut de la bande de valence acquière une énergie  $E_G$  passe dans la bande de conduction sans changer de quantité de mouvement (figure (5)).

### 2.2.2. Gap indirect

L'électron passe de la bande de conduction à un niveau d'énergie d'une impureté agissant comme « centre de recombinaison » et situé dans la bande interdite, puis il sera réémis vers la bande de valence avec un changement de quantité de mouvement ( $\Delta p = \hbar \Delta \vec{k} \neq 0$ ), avec  $\hbar$  : Constante de Planck réduite.

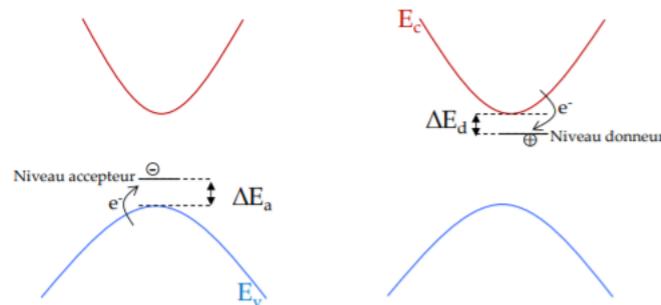


Figure 5: structure de bande d'énergie : gap direct et indirect [4].

## 2.3 Dopage

Un semi-conducteur est un corps non cristallin non conducteur à l'état pur, mais susceptible de conduire de l'électricité suite à un traitement spécifique, le dopage. Cette semi-conduction est obtenue en introduisant des impuretés : cela augmente la conductivité des semi-conducteurs.

### 2.3.1. Semi-conducteur intrinsèque

Les cristaux semi-conducteurs très purs et géométriquement parfaits s'appellent des semi-conducteurs intrinsèques. Dans ce qui suit nous allons voir comment se produit la conduction électrique dans ces derniers.

Pour clarifier ce phénomène, subdivisons les électrons des couches externes en deux catégories :

- Les électrons de valence, représentés figurent par des points noirs (6).

- Les électrons de conduction, représentés sur cette même figure par des points noirs traversés d'une flèche.

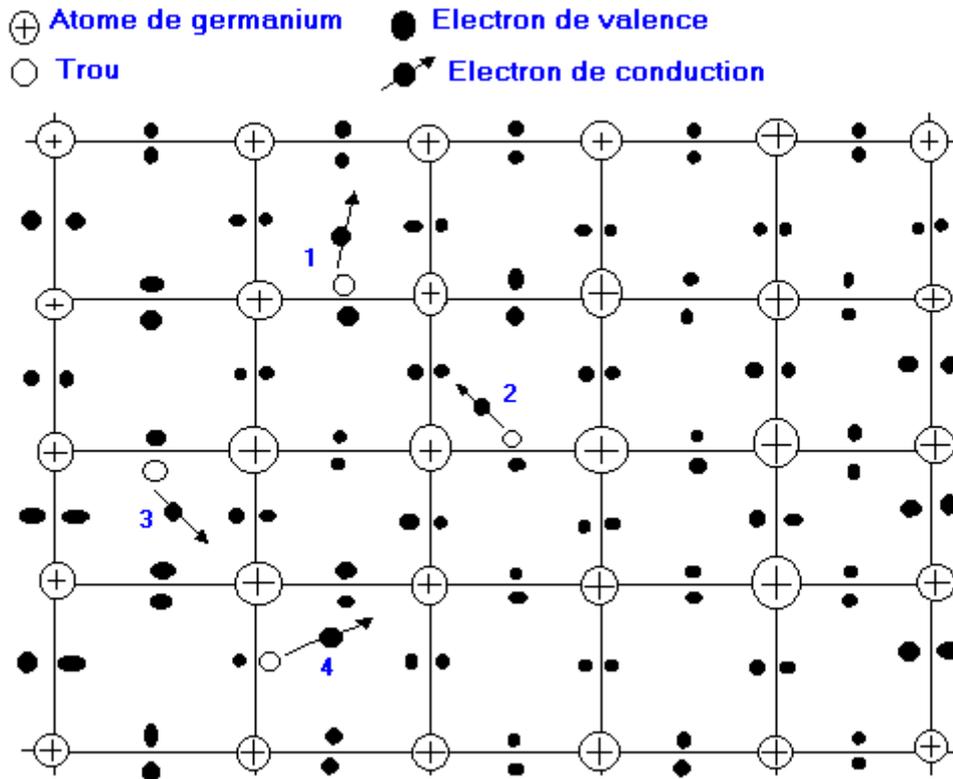


Figure 6 : réseau cristallin des diamants [5].

Les électrons de valence sont ceux, qui tout en se déplaçant d'un atome à l'autre, restent liés au réseau (comme dans le cas du diamant).

Les électrons de conduction sont ceux, qui pendant les divers déplacements, acquièrent assez d'énergie pour rompre les liens covalents.

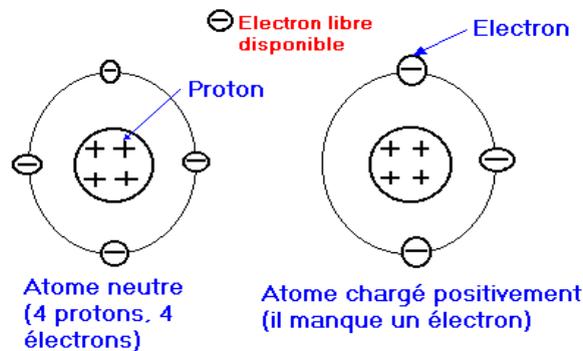
Dans un cristal très pur, géométriquement parfait et maintenu à une température très proche du zéro absolu ( $-273,16^{\circ}\text{C}$ ), tous les électrons des atomes appartiennent à la bande de valence.

En élevant la température ou sous l'effet d'une déformation du réseau ou encore en plaçant le cristal dans un champ électrique intense, une partie des électrons de valence gagne une certaine énergie et peut se libérer du réseau, c'est-à-dire passer de la bande de valence à la bande de conduction. Ce phénomène peut être plus ou moins important selon le type de cristal.

Lorsqu'un électron devient libre, il se promène de façon désordonnée dans les espaces du réseau, contrairement aux électrons de valence qui parcourent les mêmes espaces sur des orbites bien définies. D'autre part, à partir du moment où le lien covalent est rompu et que l'électron laisse une place libre, il se crée un vide sur une orbite.

En un point du réseau, il existe donc un trou (on dit aussi cavité ou lacune).

Ce phénomène est mis en évidence sur la figure (précédente) où l'on peut voir quatre électrons libres (électrons de conduction) et aussi quatre trous portant les numéros 1 - 2 - 3 et 4. Le trou représente une charge électrique égale à celle de l'électron mais de signe inverse. En effet, l'atome est neutre avec tous ses électrons. S'il en perd un, cet électron libre représente une charge négative disponible ; mais l'atome n'est plus neutre puisqu'il a perdu un électron ; il acquiert donc une charge positive, charge provenant des protons dont l'influence n'est plus compensée par le même nombre d'électrons qu'à l'origine. La figure 7 permet de mieux comprendre cette explication.



**Figure 7:** représentation d'un atome sous deux phases[5].

Ainsi, lorsque dans le cristal très pur il y a de nombreux électrons libres, il existe autant de trous. Il ne faut pas cependant croire que ces trous occupent une position immuable. En effet, dès qu'un trou vient d'être créé par fuite d'un électron, il est presque instantanément occupé par un électron de valence. Ce trou disparaît donc, mais ne reforme ailleurs dans la place laissée libre par l'électron de valence en question et ainsi de suite.

Les trous se déplacent donc d'un point à un autre du réseau, de façon imprévisible et désordonnée comme les électrons libres.

Ce mouvement désordonné des électrons de conduction et des trous constitue l'aspect fondamental de la conductibilité électrique dans les semi-conducteurs [5].

### 2.3.2. Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors,...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, ...), il en existe deux types :

#### *a. Semi-conducteur type N : (dopage N, donneurs)*

Un semi-conducteur type N est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type donneur. Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

#### *b. Semi-conducteur type P : (dopage P, Accepteurs)*

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteur. Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

## 3 Présentation des semi-conducteurs III-V

Après les résultats enregistrés dans la technologie Silicium, l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène (27,6%), dans le domaine de la microélectronique, la recherche de composants électroniques présentant des propriétés de transport supérieures à celles de ce dernier, conduit la plupart des grands laboratoires de recherches à s'intéresser à de nouveaux matériaux et en particulier les composés semi-conducteurs III-V. C'est alors qu'une nouvelle classe de matériaux fait son apparition, basés sur la création d'un potentiel dans un cristal par :

- La modulation de dopage.
- La variation de composition d'un alliage.
- La combinaison de ces deux.

Les matériaux semi-conducteurs III·V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la 3<sup>e</sup> colonne et d'un élément de la 5<sup>e</sup> colonne de la classification périodique. Le tableau de la figure 8 regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Parmi tous les

composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes, montre que les éléments les plus légers donnent des composés à large bande interdite, dont les propriétés se rapprochent de celles des isolants, et à structure de bande interdite. Les composés incluant du général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs, ou pour l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le thallium ou le bismuth donnent des composés à caractère métallique. On considérera donc essentiellement les composés à base de gallium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb).

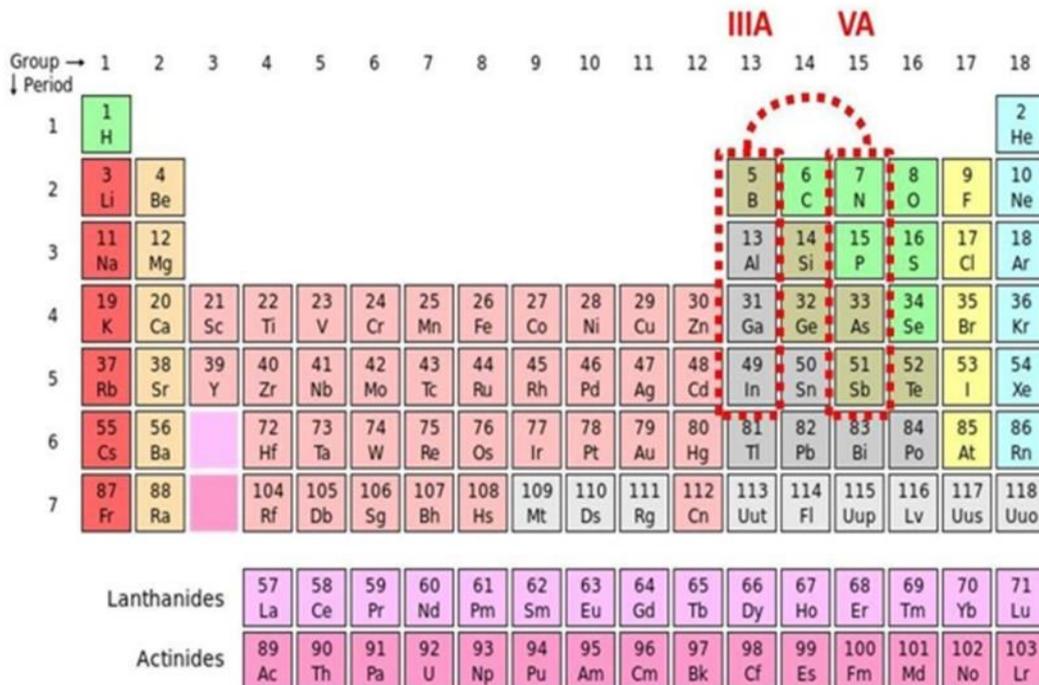


Figure 8: Extrait de la classification périodique des éléments [6].

## 4 Quelques propriétés

### 4.1. Propriétés structurales

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" (cubique), métastable du point de vue thermodynamique, présentée sur la figure 10.

Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (comme pour C, Ge, Si), est constituée de deux sous réseaux cubiques à faces centrées (cfc), interpénétrés et décalés l'un par rapport à

l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de  $a/\sqrt{3}$ , où  $a$  représente le paramètre de maille du matériau (paramètre cristallin) donné par l'équation suivante [7] :

$$a(A_xB_{1-x}C) = x \times a_{AC} + (1 - x) \times a_{BC} \quad (1)$$

Chaque atome se trouve donc au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un atome de l'autre espèce. La famille élémentaire, à partir de laquelle on peut reconstituer le cristal entier par un ensemble de translations, est formée par un atome de chaque type.

Il existe deux autres structures cristallines répondues dans les nitrures du groupe III : la wurtzite (hexagonale, figure 9), et la structure rocksalt (NaCl, figure 11). Aux conditions ambiantes, les structures thermodynamiquement stables sont wurtzite pour AlN, GaN et InN, et zinc blende pour le BN. La structure zinc blende pour GaN et InN a été stabilisée par la croissance épitaxiale des couches minces sur le plan cristallin (001) des substrats cubiques tels que le silicium, le MgO et le GaAs. Dans ces cas, la tendance intrinsèque de former la structure wurtzite est surmontée par compatibilité topologique. La structure rocksalt (la structure NaCl) peut être induite dans AlN, GaN et InN aux grandes pressions [3].

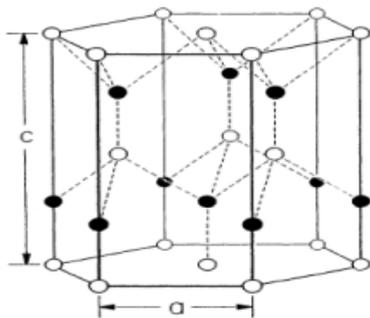


Figure 9 : Structure wurtzite (Hexagonale) [3].

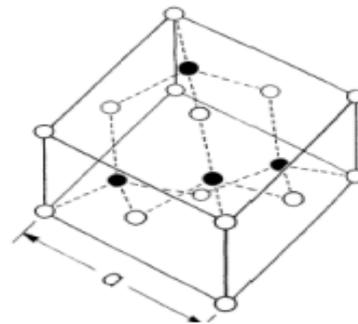


Figure 10 : Structure zinc blende (Cubique) [3].

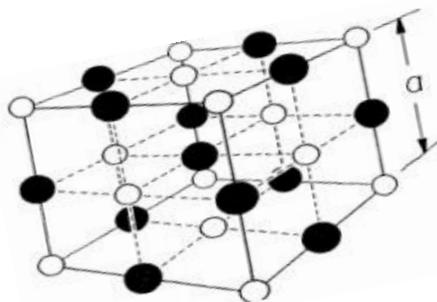


Figure 11 : Structure NaCl [3].

## 4.2. Propriétés physiques

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé, en physique de l'état solide, à l'aide de la théorie des bandes d'énergie.

### 4.2.1. Contrainte

L'épitaxie des matériaux et leurs paramètres de maille initialement différents provoquent 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 bi-axiales ( $\epsilon_{yy}$  et  $\epsilon_{zz}$ ) et uni-axiale ( $\epsilon_{xx}$ ) [7]. Cette déformation est exprimée par :

- Biaxiale dans le plan de croissance :

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_s - a_e}{a_e} = \epsilon_{//} \quad (2)$$

- uniaxiale dans la direction de croissance :

$$\epsilon_{zz} = -2 \frac{C_{12}}{C_{11}} \epsilon_{xx} = \epsilon_{\perp} \quad (3)$$

où :

- $\epsilon$  : La déformation ou le désaccord de maille.
- $a_s$  : Le paramètre de maille du substrat.
- $a_e$  : Le paramètre de maille de la couche épitaxie.
- $C_{ij}$  : Les coefficients d'élasticité.

### 4.2.2. Epaisseur critique

Lors de l'épitaxie d'un matériau sur un substrat de paramètre de maille différent, les couches contraintes commencent à relaxer, et génèrent des dislocations qui se propagent de l'interface de contact vers le ternaire, qui s'accompagne d'une accumulation d'énergie élastique. Cette épaisseur limite est appelée épaisseur critique. Au-delà de cette épaisseur critique, l'énergie élastique emmagasinée devient suffisante pour générer des défauts structuraux qui relaxent partiellement les contraintes dans le cristal.

L'épaisseur critique de la couche contrainte  $h_c$  est l'un des paramètres les plus importants que nous devons prendre en compte. La valeur de l'épaisseur critique  $h_c$  qui en résulte dans le cas d'un matériau de structure sphalérite (zinc blende) épitaxie sur la surface (001) est donnée par l'équation suivante :

$$h_c = \frac{a_e}{\beta\sqrt{2\pi\Delta}} \frac{1-0.25\gamma}{1+\gamma} \ln \left( \frac{h_c\sqrt{2}}{a_e} + 1 \right) \quad (1)$$

Avec :

- $\Delta$  : le désaccord paramétrique qui est donné par  $\Delta = \left| \frac{as-ae}{as} \right|$
- $\gamma$  : le coefficient de poisson qui est donné par  $\gamma = \frac{C12}{C11+C12}$

Où, C11 et C12 sont les constantes d'élasticité obtenues par l'interpolation linéaire des binaires.

Avec :

$a_e$  : Paramètre de maille de la couche relaxée.

$\beta$  : est un coefficient qui prend les valeurs suivantes selon le type de la structure.

Structure	Couche unique	Puits quantique	Super réseau
Valeur de $\beta$	4	2	1

**Tableau 1:** valeurs du coefficient  $\beta$ .

### 4.2.3 Energie de gap

L'énergie du Gap  $E_g$  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 la plupart des alliages ternaires est approximativement donné sous la forme d'une fonction quadratique (la loi de Vegard) :

$$E_g^{ABC} = (1 - x)E_g^{BC} + xE_g^{AC} - bx(1 - x) \quad (2)$$

avec :

$x$  : la composition de l'alliage [s.d.]

$b$  : le paramètre la courbure [eV]

$E_g^{ABC}$  : le gap d'énergie de l'alliage ternaire [eV]

$E_g^{BC}$  : le gap d'énergie du binaire  $BC_{1-x}$  [eV]

$E_g^{AC}$  : le gap d'énergie du binaire  $AC_x$  [eV]

### 4.2.4 Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température

L'évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température peut généralement être décrite par l'expression de Varshni :

$$E_g(T) = E_g(0) - \left( \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \right) \quad (3)$$

avec :

$E_g(0)$  : le gap d'énergie du matériau à 0 K [eV]

$\alpha$ : une constante empirique [eV. K<sup>-1</sup>]

$\beta$ : une constante associée à la température de Debye [K]

### 4.3 Propriétés optiques

L'interaction d'un électron avec un photon se fait comme toute interaction, avec conservation de l'énergie et du vecteur d'onde. Le vecteur d'onde du photon étant très inférieur à celui des électrons, les transitions optiques directes entre la bande de valence et la bande de conduction apparaissent verticales dans le diagramme de bandes des électrons [8].

#### 4.3.1 Absorption

Le coefficient d'absorption est un paramètre important puisqu'il va déterminer la quantité de photons absorbés par le matériau, et donc la quantité de porteurs pouvant être produits. Pour cela on choisit souvent donc des matériaux avec des coefficients d'absorption élevés pour la fabrication de photo-détecteurs. Les électrons dans la bande de valence d'un semi-conducteur peuvent absorber des photons dont l'énergie est plus grande que l'énergie de bande interdite ( $E_g$ ), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , pour une énergie  $E$  supérieure à l'énergie de la bande interdite est donné par :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (4)$$

Où :

$\alpha(E)$  : coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon  $E$

$\alpha_0$  : constante  $\alpha_0 = 2.2 \times 10^5 \text{m}^{-1}$

$E_g$  : énergie de Gap du matériau semi-conducteur

#### 4.3.2 Indice de réfraction

L'indice de réfraction, également appelé indice réfractaire, est défini comme le quotient de la vitesse de la lumière lorsqu'elle traverse deux milieux. Il s'agit d'un nombre sans dimension qui dépend de la température et de la longueur d'onde du faisceau lumineux. En langage clair, l'indice de réfraction décrit la vitesse à laquelle un faisceau lumineux

traverse un milieu, et cette relation est décrite par la formule suivante :

$$n = \frac{c}{v} \quad (5)$$

Où :

$n$  désigne l'indice de réfraction.

$c$  désigne la vitesse de la lumière dans le vide (ou l'air).

$v$  désigne la vitesse de la lumière dans le milieu.

L'indice de réfraction peut être quasiment calculé en utilisant le modèle d'Adashi pour les nitrures III-V donné par l'équation [9] :

$$n(E) = \sqrt{A(x) \left(\frac{E}{E_g}\right)^{-2} \left\{ 2 - \sqrt{1 + \frac{E}{E_g}} - \sqrt{1 - \frac{E}{E_g}} \right\} + B(x)} \quad (6)$$

Où  $E = \frac{hc}{\lambda}$  est l'énergie de photons et  $A(x)$  et  $B(x)$  sont des paramètres dépendants de la composition du matériau donnés par les expressions :

$$A(x) = 9.31(1 - x) + 13.55x \quad (7)$$

$$B(x) = 3.03(1 - x) + 2.05 \quad (8)$$

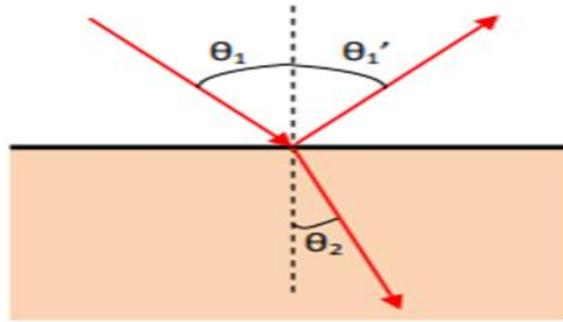
L'indice de réfraction intervient également dans la détermination des coefficients de réflexion et de transmission à travers la relation de Snell-Descartes [9] :

$$n_1 \times \sin\theta_1 = n_2 \times \sin\theta_2 \quad (9)$$

avec :  $n_1$  et  $n_2$  les indices de réfractons de deux milieux.

$\theta_1$  et  $\theta_2$  les angles des rayons lumineux par rapport à la normale (figure 12).

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E - E_g^{\text{InAsSb}}}}{E}$$



**Figure 12:** Schéma des chemins optiques [10].

Lorsqu'un corps solide est bombardé par une radiation lumineuse, elle interagit avec lui par échange d'énergie, le coefficient de réflexion caractérise la part d'énergie qui est réfléchi à l'interface de ce corps.

Le coefficient de réflexion  $R$ , est défini comme le rapport de l'intensité réfléchi  $I_r$ , sur l'intensité incidente  $I_i$ :

$$R = \frac{I_r}{I_i} \quad (10)$$

Le coefficient de transmission  $T$ , est défini comme le rapport de l'intensité transmise  $I_t$ , sur l'intensité incidente  $I_i$ :

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad (11)$$

Alors le coefficient de réflexion et le coefficient de transmission d'un faisceau incident normal peuvent s'exprimer à partir de l'indice de réfraction par :

$$R = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \quad (12)$$

$$T = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (13)$$

où :  $n_1$  on le prend souvent égal à 1 et  $n_2$  est l'indice de réfraction du matériau.

## 5 Domaines d'application et avantages

### 5.1 Domaines d'application

Le domaine infrarouge est un sujet de recherche actif et fécond depuis plusieurs décennies en raison de ses nombreuses potentialités d'applications détaillées en Figure 13. A l'intérieur du domaine IR, la gamme THz est particulièrement intéressante pour l'imagerie et la spectroscopie. En effet beaucoup de matériaux sont transparents dans le domaine térahertz entre 1 - 10 THz ce qui ouvre des perspectives dans le contrôle qualité non-destructif (plastiques, céramiques, bois, papier, tissus, matériaux composites pour l'aéronautique...) ou encore dans les contrôles de sécurité (détection d'armes, de substances dangereuses ou explosives...). En outre, les tissus vivants sont partiellement transparents dans ce domaine de fréquences ce qui ouvre des possibilités en imagerie médicale (dépistage de cancers, dentisterie...), ce qui inaugure une radiologie médicale non ionisante et inoffensive pour les yeux, un avantage crucial par rapport à la radiologie conventionnelle utilisant les rayons X. Des explications plus détaillées peuvent être trouvées dans la référence. De nombreuses absorptions rotationnelles de molécules se trouvent dans ce domaine de fréquences. Ces absorptions sont des indices précieux en astrophysique, en spectroscopie mais aussi en biologie (détection de polluants ou de drogues, contrôle qualité alimentaire...). De la même manière la spectroscopie atmosphérique THz permettrait le suivi des gaz présents dans l'atmosphère afin de mieux comprendre des phénomènes liés aux sciences de la Terre comme le réchauffement climatique [11].

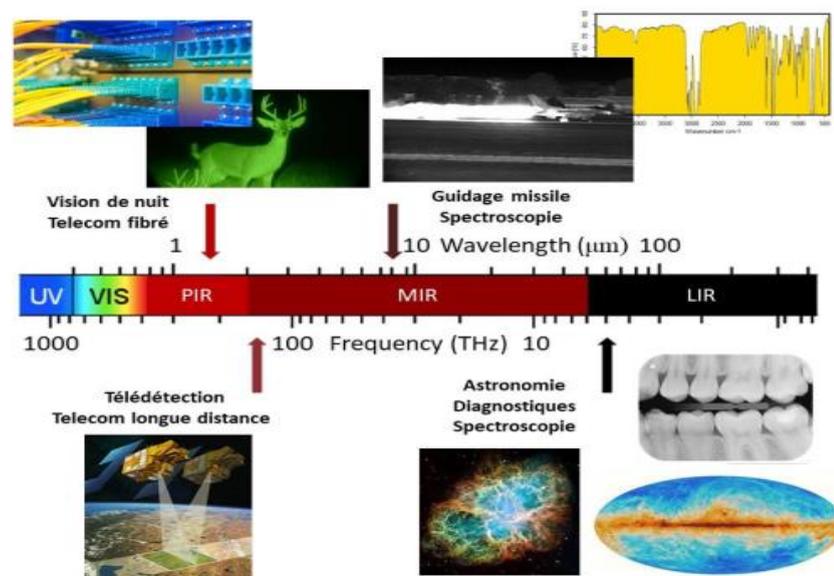


Figure 13: Quelques applications possibles dans le domaine infrarouge[11].

## **5.2 Avantages des matériaux III-V**

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électroniques et optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en général) sont réalisés en silicium, ce dernier joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés en électronique rapide et en optoélectronique, dans de telles applications, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs. Les propriétés du silicium le sont moins (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique).

Les matériaux III-V offrent donc de multiples possibilités, aussi bien pour la microélectronique rapide que pour l'optoélectronique, par la grande variété des composés réalisables et l'ouverture qu'ils donnent sur la conception de dispositifs totalement nouveaux par l'ajustement des structures de bandes ("band gap engineering").

## **6 Conclusion**

Ce chapitre résume le développement et l'avancement technologique dans le domaine optique et plus précisément la technologie des semi-conducteurs.

Les informations collectées seront mises en évidence dans les résultats obtenus durant notre simulation dans les chapitre II et III.

# **Chapitre II**

Etude de la structure

InGaN/GaN

## 1. Introduction

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est encore considérablement renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre élément de la même colonne. On sait par exemple obtenir des alliages ternaires du type  $Ga_xAl_{1-x}As$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As$ , ou quaternaire comme  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ . Il existe cependant une contrainte importante pour la fabrication de ces matériaux, qui sont réalisés en couches minces par croissance épitaxiale sur un substrat binaire : le paramètre cristallin doit être très proche de celui du substrat.

Dans ce chapitre on s'intéresse au matériau  $In_xGa_{1-x}N/GaN$ , le nitrure d'indium gallium sur le substrat nitrure de gallium. Nous allons d'abord définir ce dernier, ensuite voir son historique, enfin, nous discuterons les résultats de la simulation de ses différents paramètres grâce à laquelle nous allons principalement décrire les propriétés structurales, électriques et optiques de l'InGaN.

## 2. Aperçu sur le logiciel Matlab

Matlab (Matrix laboratory) est un langage de calcul scientifique très performant intégrant le calcul, la programmation et la visualisation dans un environnement simple à utiliser. C'est un système interactif qui permet de manipuler directement des données structurées (matrices et vecteurs).

## 3. Présentation de InGaN

### 3.1 Définition

Ce matériau est un semi-conducteur faisant partie de la catégorie des nitrures (III) c'est-à-dire, composé d'azote et d'éléments de la colonne (V) du tableau de Mendeleïev, à savoir le gallium et l'indium. Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN) [12].

Le tableau (1) indique les valeurs de quelques paramètres de GaN et InN.

Paramètres	GaN	InN
a (Å)	3.19	3.54
E (eV)	3.42	0.77
C11	390	223
C12	145	115

**Tableau 2:** Valeurs de quelques paramètres des semi-conducteurs III-V.

### 3.2 Historique

Le GaN fut utilisé pour la première fois par Warren. B Johnson en 1932 lors de son étude sur la structure cristalline du GaN sous des conditions normales. Mais c'est seulement à la fin des années 80 qu'on a commencé à réellement l'utiliser pour des diodes électroluminescentes et des détecteurs dans l'ultraviolet. Par contre l'InN fut utilisé pour la première fois en 1972 dans un procédé de pulvérisation radiofréquence. Malheureusement, les résultats obtenus ont montré que ce matériau avait une mobilité électronique très réduite. D'un autre côté, ce matériau avait l'avantage d'avoir un très grand seuil d'absorption de 1.9 eV qui lui permet d'avoir une grande absorption dans l'infrarouge, ce dernier n'avait pas une émission lumineuse proportionnelle à son gap d'énergie contrairement au matériau GaN. Cependant, l'utilisation de la technique de dépôt chimique en phase vapeur a permis de produire des couches d'InGaN et AlInN améliorés au niveau de la luminescence. Mais c'est seulement en utilisant la technique d'épitaxie par jet moléculaire qu'on a réussi à obtenir une meilleure qualité cristalline. En outre, il a fallu attendre plusieurs années pour obtenir des films de haute qualité disposant d'un gap d'énergie qui couvre quasiment tout le spectre solaire par Oussama et al, en 2002[12].

A présent, ce genre de matériau est devenu un sujet de recherche de haute importance.

### 3.3 L'intérêt d'avoir choisi InGaN

L'alliage de Nitrure de Gallium et d'Indium (InGaN) est devenu au cours des dernières années un semi-conducteur important pour la réalisation de composants optoélectroniques, du fait de sa bande interdite modulable en fonction de la composition d'indium, entre 0.7 eV à 3.4 eV. [14] Ceci permet l'absorption d'une grande partie du spectre solaire et fait de l'alliage InGaN un excellent candidat pour la réalisation de cellules solaires multi-jonctions et photodiodes à très haut rendement.

## 4 Résultats et interprétations

### 4.1 Paramètres physiques

#### 4.1.1 Paramètre de maille

Pour le calcul du paramètre de maille de l'alliage  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , Nous avons utilisé la loi de Vegard donnée par l'équation (1) du chapitre 1.

La figure 14 représente la variation du paramètre de maille en fonction de la concentration

d'indium de l'alliage InGaN.

Nous pouvons voir que l'indium a pour effet d'augmenter le paramètre de maille. Par exemple, en prenant les compositions 40% et 70%, le paramètre de maille augmente de 3.33Å à 3.44Å. On constate que la relation entre la concentration d'indium  $x$  et le paramètre de maille est proportionnelle.

Cette étude nous permet d'optimiser la couche épitaxiée afin d'éviter l'instabilité.

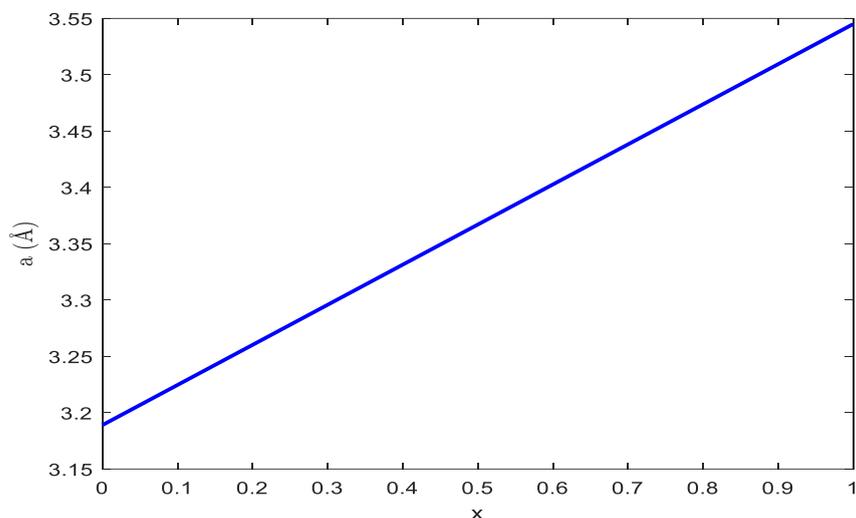
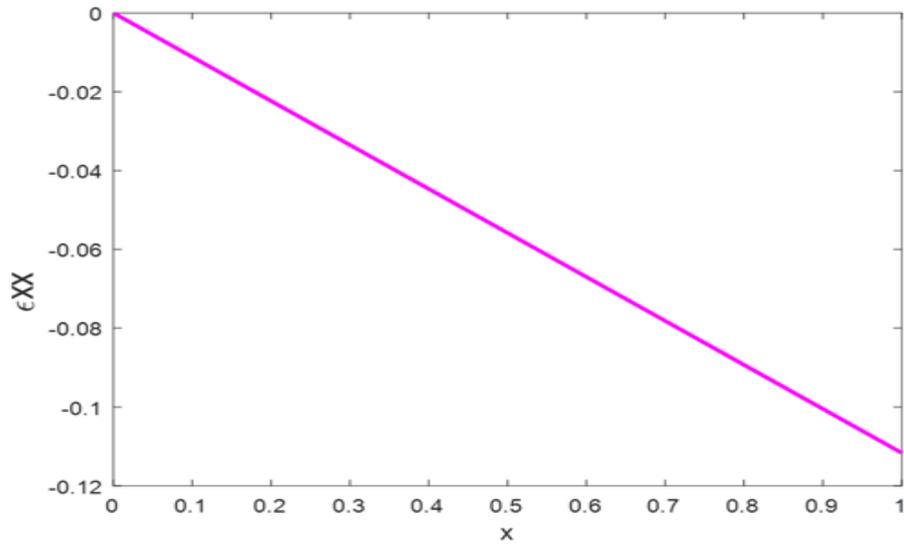


Figure 14: Paramètre de maille de la structure InGaN en fonction de la concentration d'indium.

#### 4.1.2 La déformation

L'épitaxie de l'alliage InGaN sur le substrat GaN se traduit par une déformation de la maille de la couche mince d'InGaN. En utilisant l'équation (3) cité dans le premier chapitre, on obtient la figure 15 qui représente la déformation ou autrement dit le désaccord de maille en fonction de la concentration d'indium.

Pour des concentrations d'indium  $x=0.1$  et  $x=0.3$  la déformation diminue de 1.12% à -3.35%. On observe que la déformation sur l'interface entre les deux couches actives et substrat décroît avec l'augmentation de la concentration d'indium. Dans notre structure la contrainte est compressive car le paramètre de la couche active est inférieur au paramètre de maille du substrat, par exemple pour  $x=0.2$  la déformation est de 2.23%. On peut fixer la concentration  $x$  pour avoir une déformation minimale afin d'augmenter la performance de la structure, qui est dans notre cas  $x=0.1$  on constate une déformation minimale qui est égale à 1.12%.



**Figure 15:** la déformation de la structure InGaN en fonction de la concentration d'indium x.

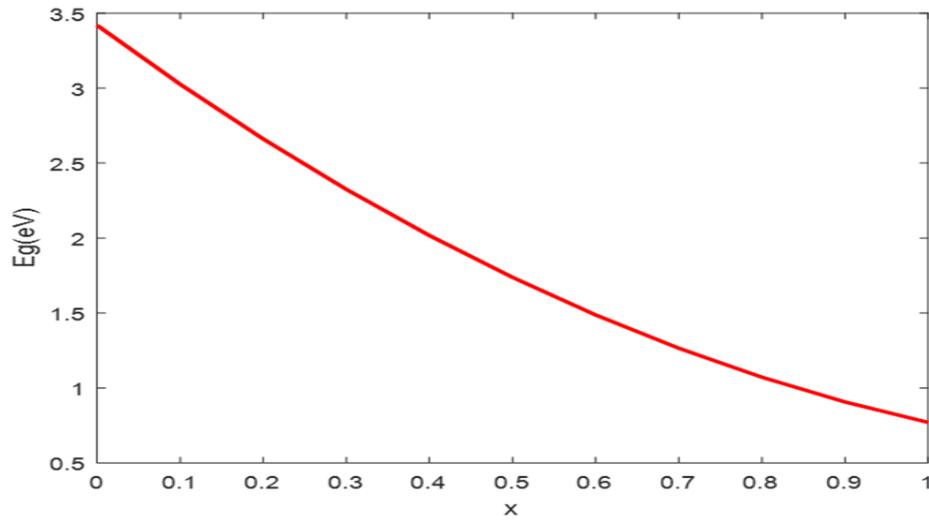
### 4.1.3 L'énergie de gap

A partir des gaps d'énergie interdite des composés binaires GaN et InN, il est possible de déterminer le gap d'énergie de l'InGaN en utilisant la loi de Vegard avec un paramètre de courbure b, définie par l'équation (5).

La figure 16 montre l'évolution de l'énergie de gap non contraint avec éclatement en fonction de la variation d'indium.

En prenant les valeurs  $x=0.2$  et  $x=0.5$  la valeur de la bande interdite d'InGaN diminue de 2.66 eV à 1.74 eV.

Cette figure nous montre l'influence de la concentration d'indium sur l'énergie de la bande interdite. On remarque que l'accroissement de la concentration d'indium provoque une diminution considérable de l'énergie de la bande interdite.

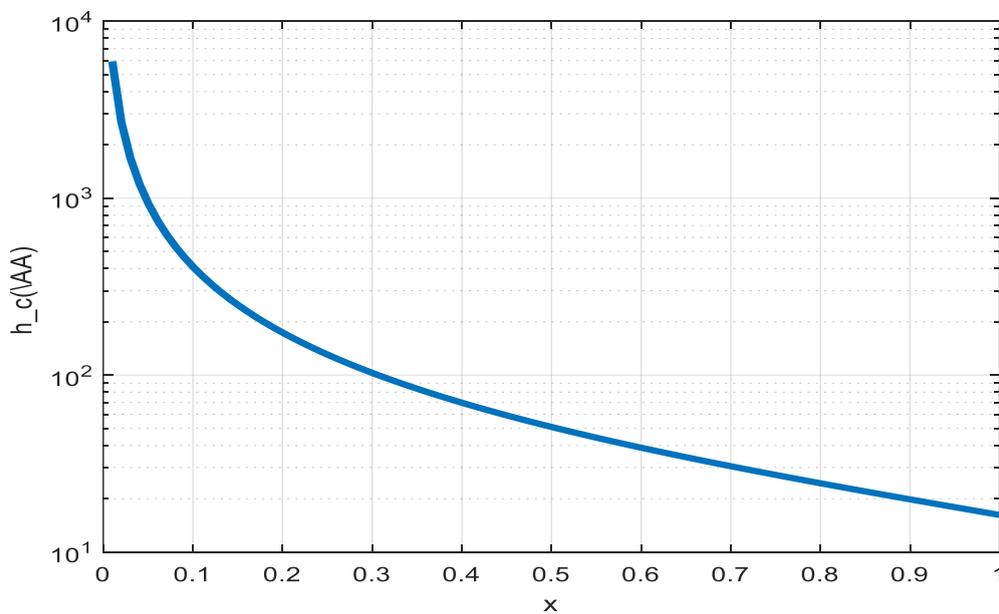


**Figure 16** : Gap d'énergie d'InGaN en fonction de la variation d'indium à  $T=300^\circ\text{K}$ .

#### 4.1.4 L'épaisseur critique

La figure (17) représente la variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium. En augmentant la valeur d'indium de  $\text{In}=20\%$  à  $\text{In}=40\%$  l'épaisseur critique  $H_c$  diminue exponentiellement de  $183.20\text{\AA}$  à  $68.81\text{\AA}$ .

De cela on distingue que l'épaisseur critique décroît exponentiellement avec l'augmentation de la composition d'indium  $\text{In}$ .



**Figure 17** : variation de l'épaisseur critique de la structure InGaN en fonction de la concentration d'indium  $x$ .

## 4.2 Paramètres optiques

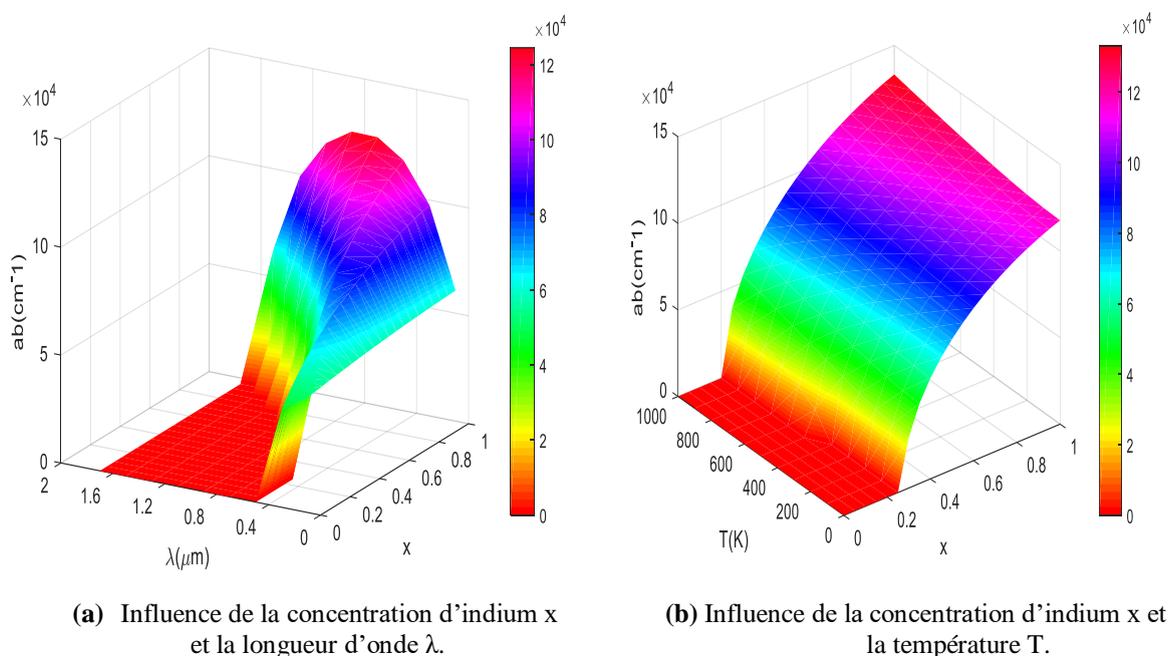
### 4.2.1 Coefficient d'absorption

Les figures 18.a et 18.b représentent la variation du coefficient d'absorption  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  et de la concentration d'indium  $x$  et en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  et la température  $T$  respectivement.

Dans la figure 18.a on remarque que l'absorption augmente en diminuant la longueur d'onde  $\lambda$  jusqu'à atteindre ses valeurs maximales pour des valeurs de  $\lambda$  entre  $0.6 \mu m$  et  $1 \mu m$  et  $x$  entre 0.7 et 1, on constate que plus la longueur d'onde est grande plus l'absorption diminue.

A partir de la figure 18.b, on remarque que l'absorption augmente de  $4.803 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  à  $9.928 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  pour une température fixe  $T=200\text{K}$  et une composition d'indium qui varie de 35% à 70%. En prenant une concentration d'indium de 45% et une température qui accroît de  $T=200\text{K}$  à  $T=800\text{K}$  l'absorption augmente de  $6.89 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  à  $7.98 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ .

En conclusion, Les figures 18 (a, b) nous montrent que la valeur du coefficient d'absorption dépend des trois paramètres  $x$ ,  $T$  et  $\lambda$ . La concentration d'indium  $x$  et de la température  $T$  tendent à augmenter l'absorption, tandis que des valeurs de longueur d'onde très élevées tendent à la diminuer.



**Figure 18 :** Coefficient d'absorption de la structure InGaN.

#### 4.2.2 Indice de réfraction

Les figures 19 (a et b) présentent l'influence des paramètres longueur d'onde  $\lambda$  et concentration d'indium  $x$  (figure 19.a) et température  $T$  (figure 19.b) sur la variation de l'indice de réfraction  $n$ .

Dans la figure 19.a On observe qu'à des longueurs d'onde élevées, l'indice de réfraction est légèrement plus faible, et il augmente pour des valeurs de  $\lambda$  faibles. L'indice  $n$  augmente jusqu'à atteindre des pics qui correspondent aux combinaisons de  $x$  et  $\lambda$  pour lesquels notre indice de réfraction est maximal.

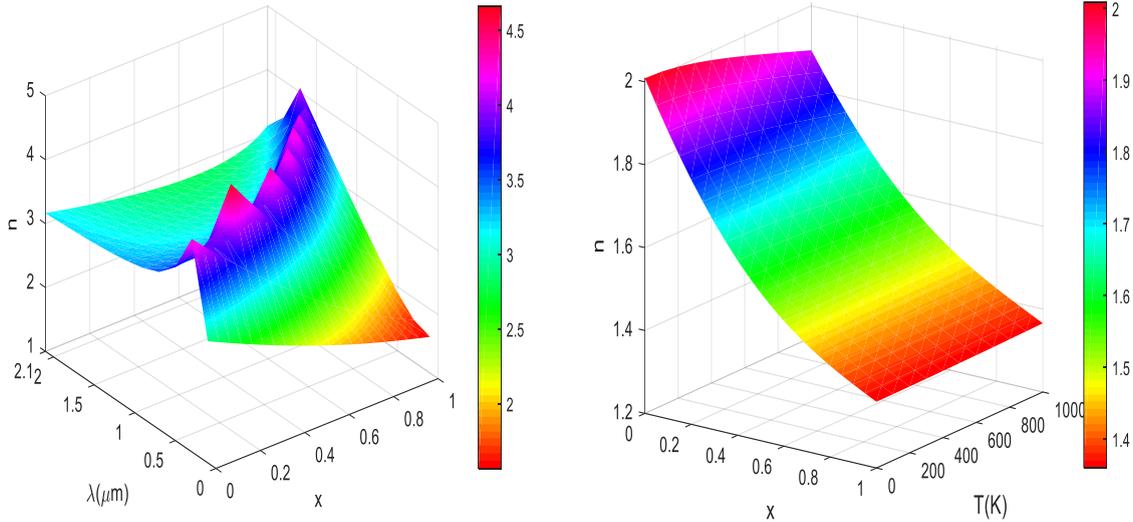
Le pic sur le graphe se produit approximativement avec les paramètres  $x=0.25$  et  $\lambda=0.5 \mu\text{m}$  d'où on obtient  $n=4.66$ .

On constate que l'indice de réfraction  $n$  dépend de manière significative de la longueur d'onde  $\lambda$ . Plus la longueur d'onde est grande, plus l'indice de réfraction est faible.

Dans la figure 19.b l'indice de réfraction décroît en augmentant la concentration d'indium  $x$ . Par exemple, pour  $T=400\text{K}$  et  $x$  qui varie de  $x=0.2$  à  $x=0.6$  l'indice  $n$  diminue de  $n=1.77$  à  $n=1.50$ . On remarque aussi qu'en augmentant la température  $T$ , les valeurs de  $n$  diminuent.

On constate que l'augmentation de la température  $T$  et de la concentration d'indium  $x$  a pour effet de diminuer l'indice de réfraction.

Pour conclure, à partir des figures 19 (a, b) on aboutit au résultat suivant : l'indice de réfraction  $n$  de notre matériau dépend généralement de la longueur d'onde  $\lambda$ , l'indice  $n$  est inversement proportionnel à la longueur d'onde. La concentration d'indium  $x$  influe de même sur l'indice  $n$ , d'après notre étude on obtient de grandes valeurs de  $n$  pour des concentrations  $x$  basses. Enfin, une augmentation de température induit une diminution de l'indice de réfraction  $n$  provoqué par une dilatation au cours de laquelle la densité diminue. De là, la variation des trois paramètres ( $x$ ,  $T$ , et  $\lambda$ ) permet d'améliorer la structure selon les besoins des constructeurs.



(a) Influence de la longueur d'onde  $\lambda$  et la concentration d'indium  $x$ .

(b) Influence de la température  $T$  et la concentration d'indium  $x$ .

**Figure 19** : Indice de réfraction de la structure InGaN.

### 4.2.3 Coefficient de réflexion

La réflexion en optique désigne un des phénomènes qui intervient lors de l'incidence de la lumière sur un matériau. Afin d'étudier le comportement du coefficient de réflexion  $R$  on a utilisé l'équation (15). D'où, on constate que les valeurs de  $R$  dépendent de celles l'indice  $n$ .

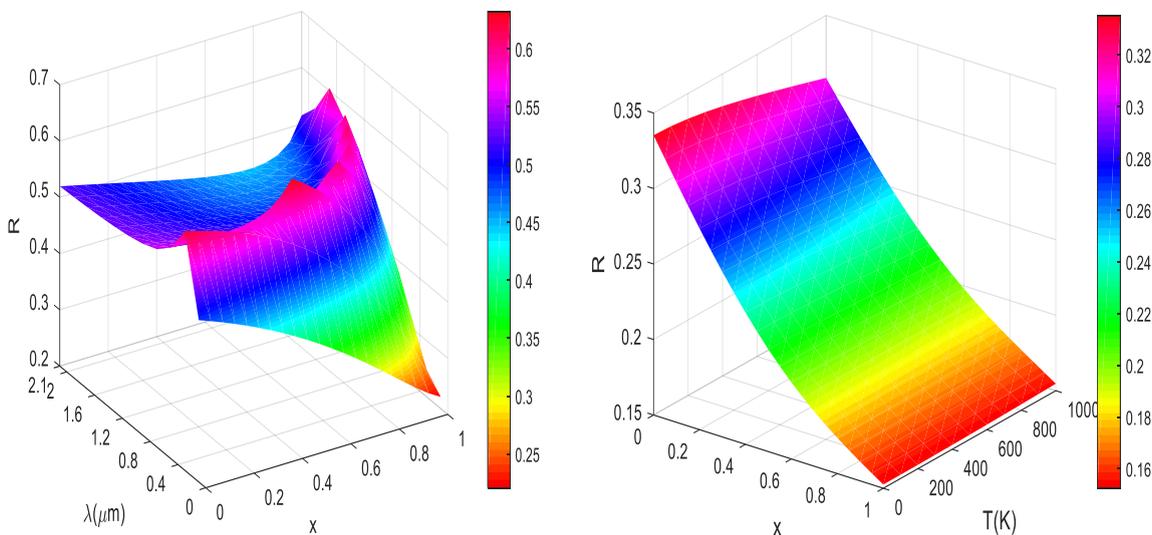
Les figures 20 (a et b) montrent l'étude du coefficient de réflexion  $R$  en fonction de la concentration d'indium  $x$  et longueur d'onde  $\lambda$  (figure 20.a), et en fonction de la température  $T$  et l'influence de la concentration d'indium  $x$  (figure 20.b).

On note une apparition de pics pour certaines valeurs de  $x$  et  $\lambda$  sur la figure 20.a, ce sont les valeurs pour lesquels le coefficient  $R$  est maximal (où la majorité des photons sont réfléchis).

Des figures 20 (a et b) on observe que les graphes représentant le coefficient de réflexion  $R$  et l'indice de réfraction  $n$  (figure 19) sont semblables due au fait que  $R$  dépend des valeurs de  $n$ . Par conséquent, les paramètres  $x$ ,  $\lambda$  et  $T$  influe de la même façon sur le coefficient  $R$ , c'est-à-dire pour des valeurs élevées des trois paramètres le coefficient de  $R$  est faible.

A partir des résultats que nous avons obtenus on déduit que la réflexion de la lumière dépend largement des propriétés de la lumière, comme sa longueur d'onde et des propriétés du milieu de propagation (la température par exemple) et du milieu sur lequel le faisceau arrive. On dit que notre matériau est optimal lorsque le coefficient de réflexion est petit, cela veut dire quand la plupart des photons sont absorbés non pas réfléchis. La variation de la

longueur d'onde  $\lambda$ , la température  $T$  et la concentration d'indium  $x$  nous permet d'obtenir le pourcentage souhaité du coefficient  $R$  selon le choix et besoins des ingénieurs.



(a) Influence de la longueur d'onde  $\lambda$  et la concentration d'indium  $x$ .

(b) Influence de la température  $T$  et la concentration d'indium  $x$ .

**Figure 20** : Coefficient de réflexion de la structure InGaN.

#### 4.2.4 Coefficient de transmission

En optique, la transmission est la propriété d'une substance de permettre le passage de la lumière. Pour analyser de la variation du coefficient de transmission dans notre simulation on s'est servi de l'équation (16).

Tout comme le coefficient de réflexion  $R$ , le coefficient  $T$  dépend de l'indice de réfraction, mais il y a aussi une relation entre les deux coefficients  $R$  et  $T$  qui est :  $T + R = 1$ , ce qui nous laisse déduire que le comportement de  $T$  est contraire à celui de  $R$ . Par exemple pour  $R=30\%$  on aura  $T=70\%$ .

D'après les figures 21 (a et b), on remarque que la variation du coefficient de transmission  $T$  est contradictoire à celle du coefficient de réflexion  $R$  c'est-à-dire que lorsque le  $R$  augmente  $T$  diminue et vice versa. Donc, pour des valeurs élevées de la longueur d'onde  $\lambda$ , la température  $T$  et la concentration d'indium  $x$  le coefficient de transmission est élevé aussi. On observe aussi que pour les combinaisons de  $x$  et  $\lambda$  qui nous permettent d'avoir les valeurs maximales de  $R$  (les pics sur la figure 20.a) on obtient des creux (voir figure 21.a) qui représentent les valeurs de nos paramètres  $x$  et  $\lambda$  pour lesquels  $T$  est minimal.

On conclue par là qu'on variant les paramètres  $x$ ,  $\lambda$  et  $T$  permet aux constructeurs d'obtenir la structure ayant le coefficient de transmission optimal pour lequel la majorité des photons sera absorbée, selon leur milieu et moyens de travail.

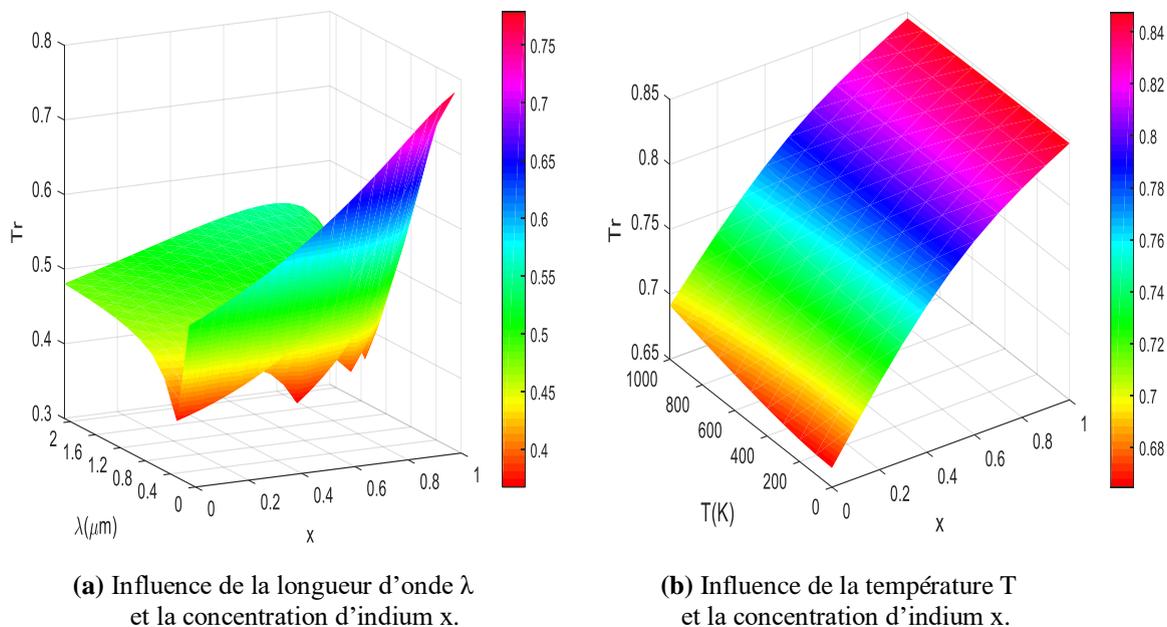


Figure 21 : Coefficient de transmission de la structure InGaN.

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le travail de simulation qui a été réalisé avec l'outil de simulation Matlab. Nous avons mené une étude sur le matériau InGaN/GaN, cette étude visait à déterminer la dépendance des performances par rapport aux paramètres physiques et optiques. En premier lieu, on a étudié les paramètres physiques de notre matériau en variant la concentration d'indium  $x$  et nous avons pu distinguer les valeurs de  $x$  pour lesquelles notre matériau est optimal. Par la suite, on a analysé l'influence de la longueur d'onde  $\lambda$ , la température  $T$  et la concentration d'indium  $x$  sur les paramètres optiques et afin d'améliorer le rendement de notre matériau.

# **Chapitre III**

Etude de la structure

InAsSb/GaAs

## 1. Introduction

Le nitrure et l'antimoine joue un rôle très important dans la fabrication des composants semi-conducteurs pour l'optoélectronique : Les semi-conducteurs III-Sb ont attirés beaucoup d'attention pour leur application potentielle dans des dispositifs optiques infrarouges qui sont requises pour les systèmes de communication à fibres optiques.

Dans ce chapitre nous avons choisi d'étudier le matériau semi-conducteur à base d'(InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs), l'antimoniure d'indium arsenic sur le substrat arséniure de gallium, nous décrirons ce dernier et son historique, nous discuterons les résultats de sa simulation et vers la fin du chapitre, nous établirons une comparaison entre ces derniers et ceux du chapitre précédent.

## 2. Présentation de InAsSb

### 2.1. Définition

L'alliage d'antimoine d'arséniure d'indium est un semi-conducteur III-V, composé de deux matériau binaires l'arséniure d'indium(InAs) et l'antimoine d'indium(InSb) [13] dont quelques paramètres sont mentionnés dans le tableau suivant (tableau 3).L'InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> présente une structure zinc blende et un gap d'énergie direct au centre de la zone de Brillouin [13].

Paramètre	InSb	InAs	GaAs
a (Å)	6.48	6.06	5.65
E (eV)	0.17	0.35	1.98
C11	684.7	832.9	1221
C12	373.5	452.6	566

**Tableau 3:** parametres des alliages composant la structure InAsSb.

### 2.2. Historique

Le développement de l'InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> (InAsSb) a une longue histoire. L'InAsSb a été synthétisé pour la première fois en 1958 par Woolley et Smith. Ils ont déterminé le diagramme de phase pseudo binaire InAs-InSb, la miscibilité et ont identifié la variation des propriétés telles que la bande interdite et les masses effectives en fonction de la composition. Des échantillons d'InAsSb poly cristallin qui ont été mesurés pour déterminer les paramètres fondamentaux. De nombreux problèmes liés à la croissance des cristaux d'InAsSb

proviennent du diagramme de phase pseudo binaire. Les taux de diffusion très faibles dans la phase solide, la grande séparation entre les liquides et les solides, et le décalage de réseau sont des défis pour la croissance cristalline [14].

### **2.3. L'intérêt d'avoir choisi InAsSb**

Ce matériau III-V appartient à la famille des semi-conducteurs à gap étroit. La largeur de bande interdite de ces semi-conducteurs et, par conséquent, la réponse spectrale des dispositifs peuvent être réglés pour des applications spécifiques des détecteurs. Les propriétés favorables des semi-conducteurs à bande interdite étroite : mobilité élevée des électrons, coefficient d'absorption optique élevé et faible taux de génération thermique, ainsi que la capacité d'ingénierie de la bande interdite. L'alliage InAsSb présente la bande interdite la plus faible parmi tous les semi-conducteurs III-V. Les valeurs sont de l'ordre de 0,1 eV à l'état pur. Pour cette raison, c'est un matériau important pour une variété de dispositifs optoélectroniques dans l'infrarouge moyen, y compris les lasers et les photo-détecteurs [15].

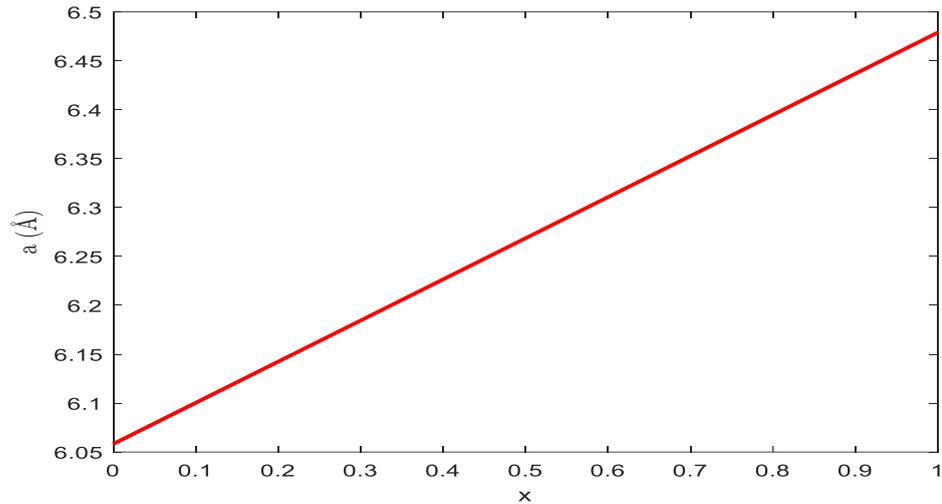
## **3. Résultats et interprétations**

### **3.1. Paramètres physiques**

#### **3.1.1. Paramètre de maille**

Le paramètre de maille peut être obtenu à partir de l'équation (1) citée dans le premier chapitre.

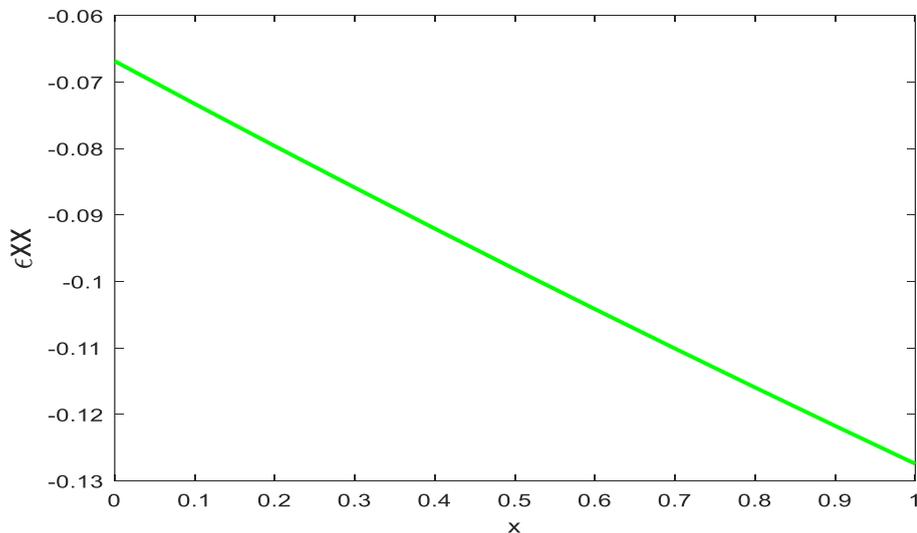
La figure 22 montre l'évolution du paramètre de maille  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  en fonction de la concentration d'antimoine. On remarque que lorsque cette dernière augmente, le paramètre de maille augmente, lui aussi, si on prend, par exemple, les valeurs 10% et 60% de la concentration, on obtient consécutivement les valeurs de 6.11Å et 6.31Å dans le paramètre de maille. C'est-à-dire le paramètre de maille de notre alliage est plus important lorsque la concentration est élevée.



**Figure 22 :** Paramètre de maille de la structure InAsSb en fonction de la concentration d'antimoine x.

### 3.1.2. Déformation

L'équation (3) nous a permis d'obtenir la simulation de la déformation ou bien la contrainte. La variation de la contrainte en fonction de la concentration de Sb est illustrée sur la figure 23. Pour la structure InAsSb /GaAs, cette dernière diminue avec la variation de Sb. D'après la figure, l'alliage InAsSb est contraint et la contrainte avec le substrat GaAs est en compression. Prenons, comme exemple les valeurs 20% et 40% de la composition x, on remarque que la contrainte a effectivement augmenté de 7.97 % à 9.20%.



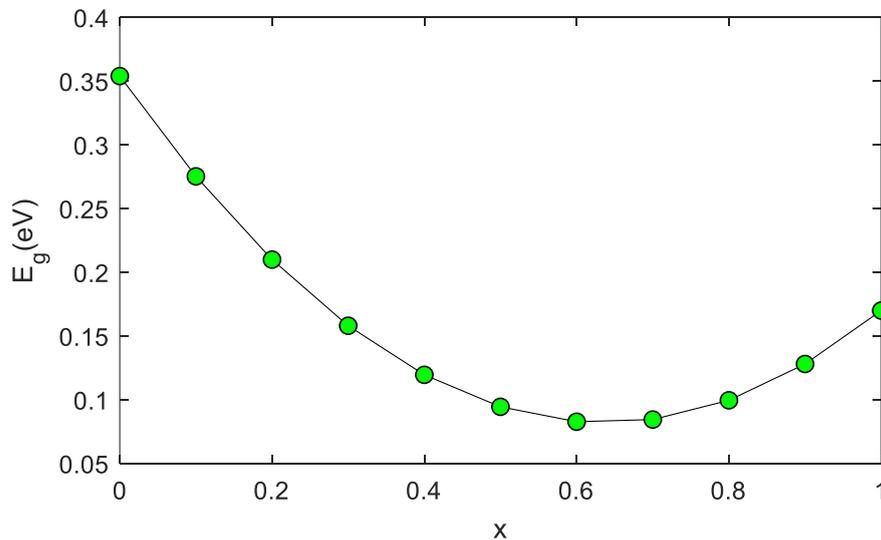
**Figure 23 :** la déformation de la structure InAsSb en fonction de la concentration d'antimoine x.

### 3.1.3. Energie de gap

La Figure 24 décrit la variation de l'énergie de gap du matériau InAsSb en fonction

de la concentration d'antimoine, qui est obtenue grâce à l'équation (5). On observe que l'énergie de la bande interdite se dégrade en mesure que la concentration de Sb augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur  $x=0.6$  ou elle est de 0.08 pour revenir augmenter ensuite. A partir de cette valeur, on remarque une légère augmentation de l'énergie de gap avec l'accroissement de la concentration d'antimoine.

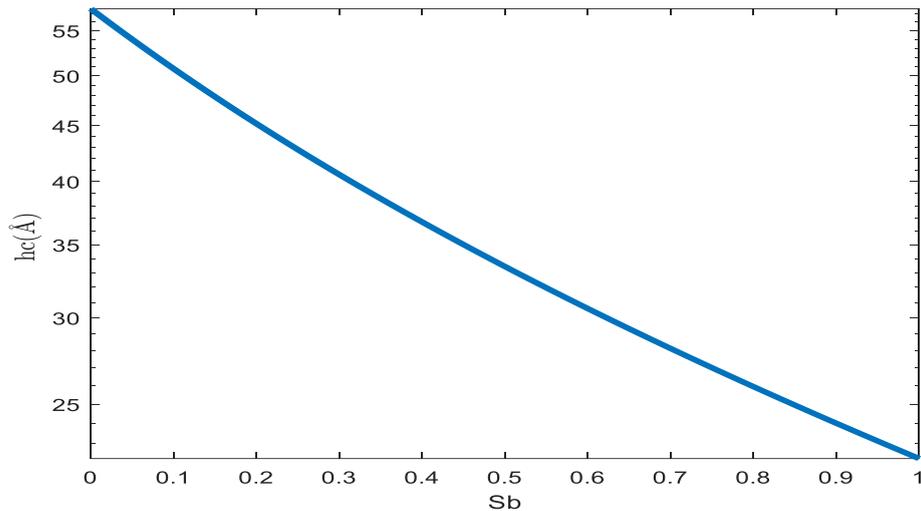
On constate que ce matériau a une bande interdite étroite ce qui permet une mobilité élevée des électrons.



**Figure 24** : Gap d'énergie d'InAsSb en fonction de la concentration d'antimoine  $x$  à  $T=300^\circ\text{K}$ .

### 3.1.4. Epaisseur critique

La figure 25, illustre la variation de l'épaisseur critique de la structure InAsSb/GaAs. L'épaisseur critique diminue avec l'augmentation de la concentration Sb, cette diminution est due à la contrainte ; plus la contrainte est importante plus l'épaisseur critique est petite. Comme le montre la figure 4, quand on varie la composition  $x$  de l'antimoine de 10% jusqu'à 30%, la valeur de l'épaisseur critique baisse allant de  $50.08 \text{ \AA}$  à  $40.47 \text{ \AA}$ .



**Figure 25 :** Epaisseur critique de la structure InAsSb en fonction de la composition d'antimoine x.

### 3.2. Paramètres optiques

#### 3.2.1. Coefficient d'absorption

La figure 26.a représente l'effet de la longueur d'onde  $\lambda$  et la concentration de l'antimoine x sur le coefficient d'absorption de l'InAsSb, Tandis que la figure 26.b décrit l'effet de la longueur d'onde  $\lambda$  et la concentration de Sb sur ce même paramètre.

On peut noter que lors du dédoublement de la longueur d'onde, il y a une augmentation du coefficient d'absorption.

Effectivement, pour  $x = 0.5$ , lorsque  $\lambda$  augmente de 1 à  $1.5 \mu\text{m}$ ,  $\alpha$  passe de  $1.9 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$  à  $2.28 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ , on remarque aussi que pour une concentration de Sb de 80%, par exemple,  $\alpha$  continue d'augmenter avec l'augmentation de  $\lambda$ , de là, on déduit qu'il y a une relation proportionnelle entre la longueur d'onde, la concentration de l'antimoine et le coefficient d'absorption.

Pour ce qui est de la température, selon la figure 26.b le coefficient d'absorption évolue proportionnellement avec cette dernière pour n'importe quelle valeur de x de Sb.

On fixant la température à  $T=400\text{K}$  tout en variant la concentration d'antimoine de  $x=0.15$  à  $x=0.3$ , l'absorption augmente de  $1.48 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$  à  $1.50 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ .

On constate que le coefficient d'absorption de InAsSb est assez élevé et dépend des trois paramètres cités en haut, ce qui fait de lui un bon matériau pour la conception de détecteurs.

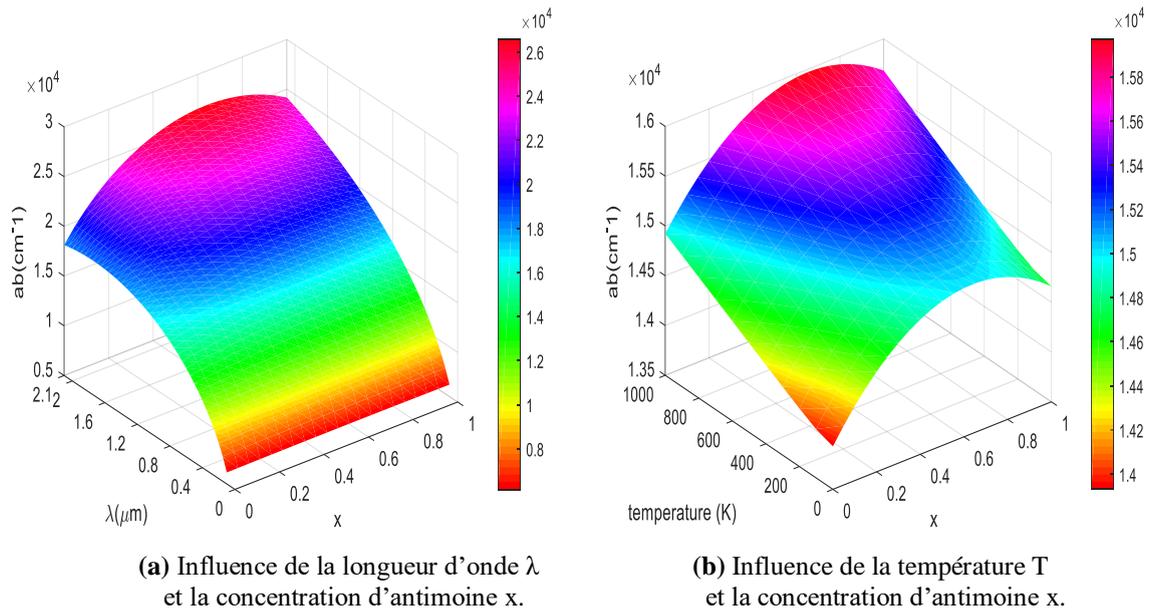


Figure 26 : Coefficient d'absorption de la structure InAsSb.

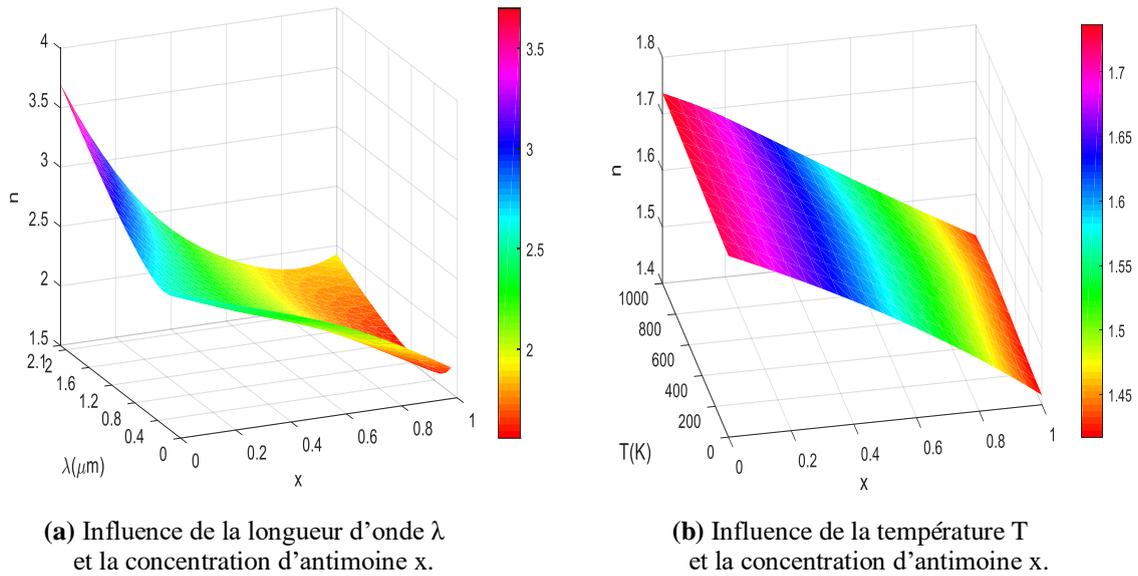
### 3.2.2. Indice de réfraction

La figure 27.a illustre l'influence de la longueur d'onde  $\lambda$  et la concentration de l'antimoine  $x$  sur l'indice de réfraction d'InAsSb, Tandis que la figure 27.b représente l'effet de la longueur d'onde  $\lambda$  et la concentration de Sb sur l'indice  $n$ .

D'après la figure 27.a on remarque que l'indice de réfraction augmente en augmentant la longueur d'onde  $\lambda$ . Par exemple, pour une concentration d'antimoine fixe de 20% et une longueur d'onde variant de  $0.4\mu\text{m}$  à  $0.6\mu\text{m}$ , l'indice de réfraction croît légèrement de 2.40 à 2.42. Par contre, l'augmentation de la valeur de  $x$  implique la diminution de l'indice  $n$ . Pour des valeurs de  $x$  allant de 0.1 à 0.4, l'indice de réfraction  $n$  décroît de 2.55 à 2.20 pour  $\lambda = 0.6\mu\text{m}$ .

On observe sur la figure 27.b que la température a tendance à légèrement augmenter l'indice de réfraction. Prenant une concentration d'antimoine de 45% et une température qui augmente de 100K à 500K, l'indice  $n$  évolue de 1.604 à 1.609.

A partir de là, on peut dire que l'indice de réfraction augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde  $\lambda$  et diminue avec l'accroissement de la concentration d'antimoine. Par contre, la température augmente à peine donc on peut dire qu'elle n'influe pas sur l'indice  $n$ .

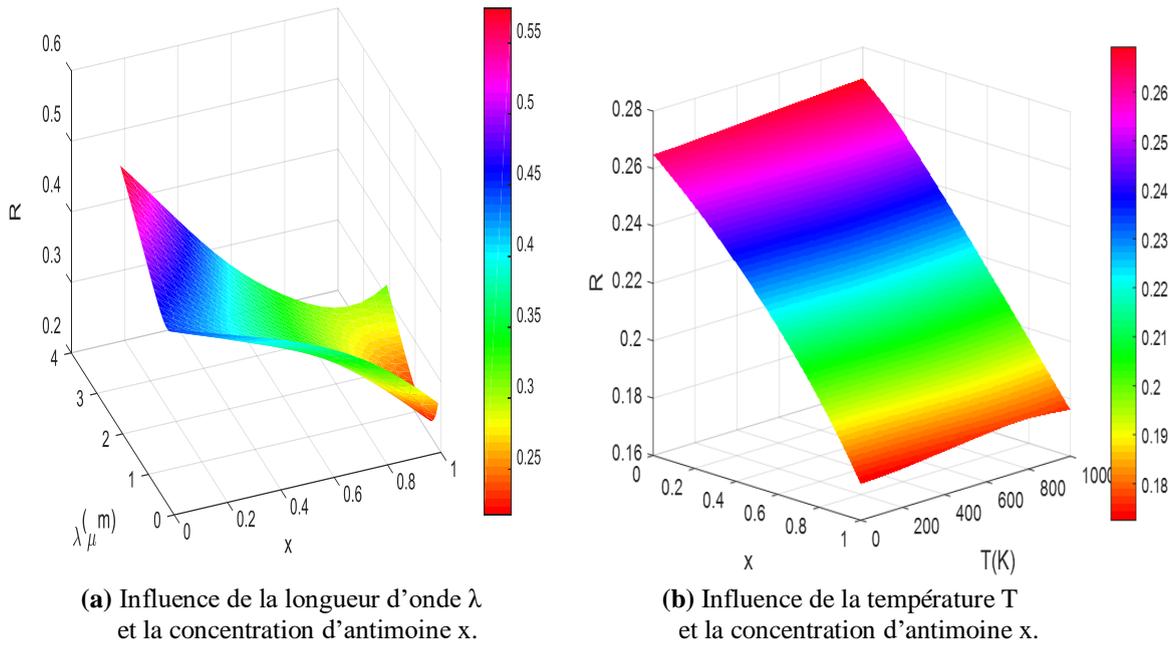


**Figure 27 :** Indice de réfraction de la structure InAsSb.

### 3.2.3. Coefficient de réflexion

La figure 28.a représenté l'influence de la concentration d'antimoine  $x$  et la longueur d'onde  $\lambda$  sur le coefficient de réflexion  $R$ , et la figure 28.b montre l'effet de la température ainsi que la concentration de Sb sur le coefficient  $R$ .

On remarque que les figures représentant le coefficient de réflexion  $R$  sont similaires a celle de l'indice de réfraction  $n$  car le coefficient  $R$  dépends totalement des valeurs de l'indice  $n$ . On conclue que les trois paramètres  $x$ ,  $T$  et  $\lambda$  de même sur la réflexion  $R$  que sur l'indice  $n$ , c'est-à-dire la réflexion croit en augmentant la longueur d'onde  $\lambda$ , décroit en augmentant la concentration d'antimoine  $x$ , et la température a presque pas d'effet sur le coefficient  $R$ .



**Figure 28 :** Coefficient de réflexion de la structure InAsSb.

### 3.2.4. Coefficient de transmission

La figure 29.a représente la variation du coefficient de transmission  $T$  en fonction de la concentration d'antimoine  $x$  et la longueur d'onde  $\lambda$ . Tandis que la figure 29.b interprète la variation du coefficient  $T$  en fonction de la température et la concentration d'antimoine  $x$ .

D'après les figures si dessous on déduit que le comportement du coefficient de transmission et opposé à celui du coefficient de réflexion  $R$ , donc pour les mêmes valeurs de  $x$ ,  $T$  et  $\lambda$  on aura une valeur de  $T$  et  $R$  complémentaire. En prenant par exemples les valeurs  $x=0.1$  et  $\lambda=0.4\mu\text{m}$  on aura  $R=43\%$  et  $T=57\%$ .

Cette étude nous permet de choisir les valeurs de nos trois paramètres de façon à ce qu'on obtient la structure ayant le meilleur coefficient de transmission  $T$ .

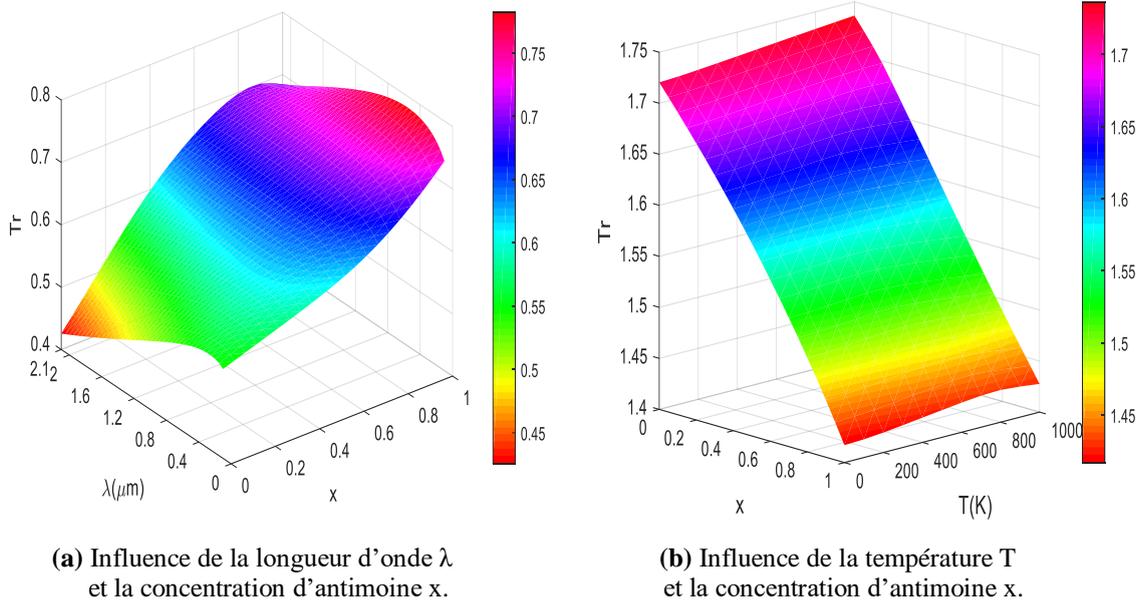


Figure 29 : Coefficient de transmission de la Structure InAsSb.

## 4. Comparaison

### 4.1. Paramètre de maille

La figure 30 représente la variation des paramètres de maille des deux alliages  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  et  $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  en fonction de la concentration d'indium (In) et d'antimoine (Sb). Cette étude permet de déterminer la structure la mieux adaptée pour nos applications en optoélectronique. Par exemple pour une concentration de In/Sb de 10% on a  $a_{\text{InGaN}} = 3.225 \text{ \AA}$  et  $a_{\text{InAsSb}} = 6.1 \text{ \AA}$ .

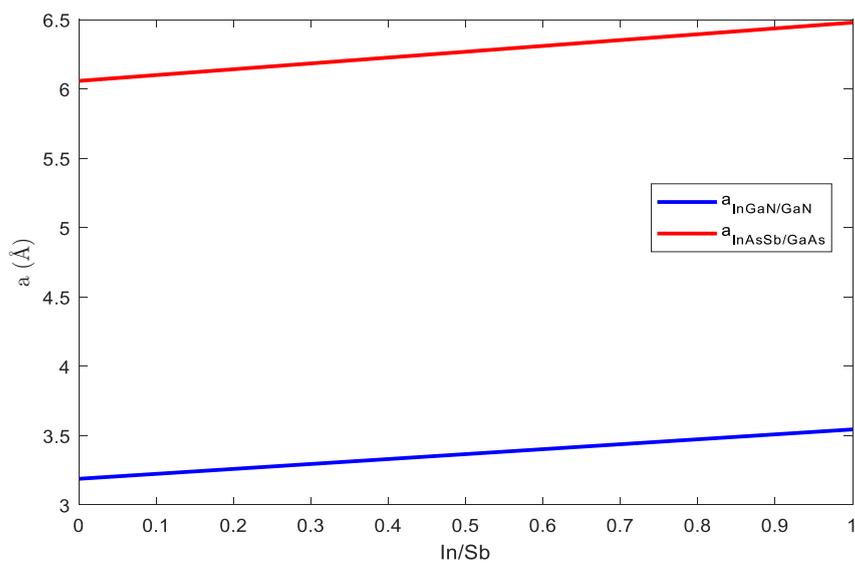


Figure 30 : Variation du paramètre de maille des structures InGaN et InAsSb en fonction de In/Sb.

#### 4.2. Contrainte

La figure 31 illustre la variation de la contrainte des deux structures InGaN et InAsSb en fonction de la concentration d'Indium (In) et d'antimoine(Sb).

On remarque que les deux contraintes sont compressives mais la déformation de l'alliage InAsSb est plus grande comparée à celle de InGaN. En prenant la valeur In/Sb=10%, la déformation est de 1.116% pour InGaN et 7.329% pour InAsSb. D'après la figure (31), la contrainte de l'InGaN est plus faible que celle de l'InAsSb ce qui fait que l'InGaN est meilleur.

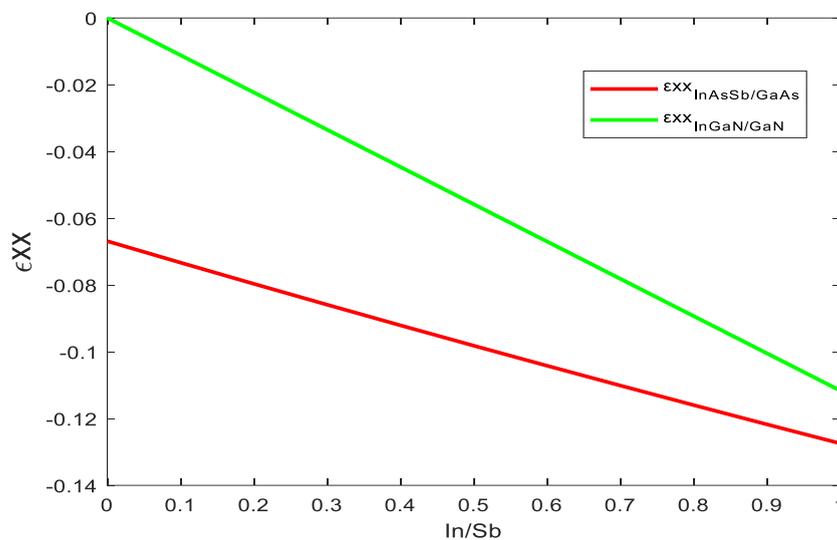
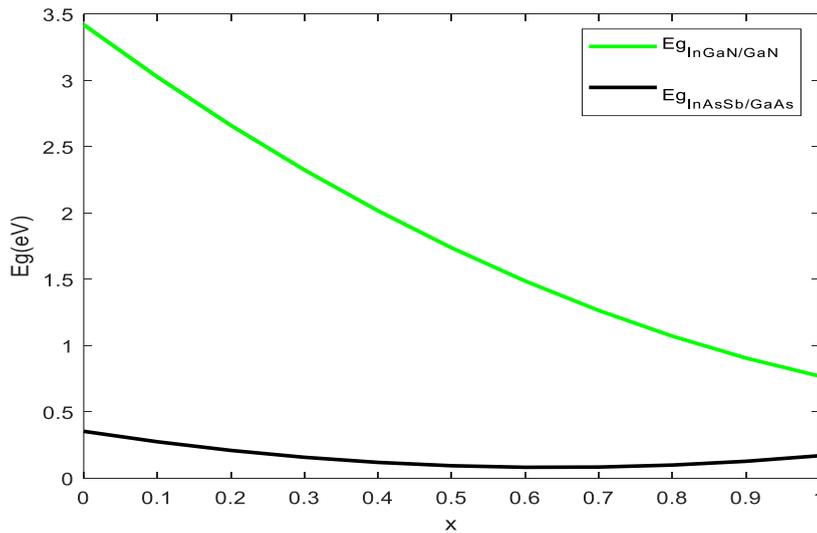


Figure 31 : Variation de la contrainte des structures InGaN et InAsSb en fonction de In/Sb.

#### 4.3. Energie de gap

La figure 32 montre l'évolution de l'énergie de gap en fonction de la concentration d'indium et antimoine pour les alliages InGaN et InAsSb.

Cette comparaison nous permet de voir quelle structure a l'énergie de bande la plus adéquate pour nos applications en télécommunication ,c'est-à-dire, le matériau ayant une bande interdite directe et inférieure à  $1.35\text{eV}$  . On remarque que pour toute concentration d'antimoine  $E_{g\text{InAsSb}} < 1.35\text{eV}$ , tandis que  $E_{g\text{InGaN}}$  est inférieur à  $1.35$  que pour les concentrations d'indium allant de 70% et plus. Donc, on conclue pour des propos de télécommunication l'InAsSb est plus adéquat.



**Figure 32 :** La variation de l'énergie de la bande interdite des structures InGaN et InAsSb en fonction de la concentration d'indium et d'antimoine.

## 5. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté les alliages ternaires InAsSb, comme nous avons étudié l'impact des paramètres électrique (dopage) et physiques (épaisseur) et optiques ( $n$ ,  $R$ ,  $T$ ) de notre alliage dans le but de concevoir une structure optimale à base de ce dernier qui donne le meilleur rendement électrique. A cet effet, nous avons simulé les propriétés de base des semi-conducteurs à base d'InAsSb en essayant de trouver les paramètres optimaux, donnant les meilleures caractéristiques de sortie. Nous avons alors, étudié l'effet de la bande d'énergie interdite et de l'épaisseur critique sur les caractéristiques de ce matériau III-V ainsi que sur le rendement électrique. Nous avons constaté que les deux paramètres, l'absorption et la déformation, ont un impact très significatif sur l'amélioration du rendement de la conversion électrique. En effet, la variation de la contrainte peut affecter l'épitaxie de l'alliage et le substrat.

D'un côté, il est préférable de diminuer au maximum la contrainte pour qu'elle se rapproche le plus du 0. Par contre, pour ce qui est de l'absorption il faut prendre en considération la concentration qui fait que cette dernière augmente afin de permettre une meilleure détection.

On a aussi confirmé que ce matériau a la plus faible bande interdite ce qui fait de lui un matériau presque parfait et idéal pour la conception de détecteurs qui sont appliqués dans une large gamme de spectre IR.

# **Conclusion générale**

La recherche que nous avons élaborée avait pour objectif d'évaluer les performances de deux matériaux faisant partie des semi-conducteurs III-V afin de permettre de concevoir des photo-détecteurs performants et économiques, pour cela, on a proposé une utilisation de ces matériaux très répandus dans l'optique pour fabriquer ces composants électroniques vu leur importance dans le domaine de la télécommunication et leur rapidité. Pour atteindre le but désiré, cette étude a été faite en différentes étapes.

Des généralités sur les semis conducteurs et les semi-conducteurs III-V ont été présentés, tels que leurs structures et propriétés, ce qui permet la compréhension de cette notion clé dans notre recherche et sa relation avec le développement du domaine de la télécommunication.

Pour l'étude des caractéristiques de ces dispositifs on a optimisé les paramètres physiques et électriques de deux matériaux III-V l'un à base d'InGaN, l'autre à base de InAsSb on les a brièvement présentés, puis réalisé leur simulation.

La simulation de nos deux matériaux InGaN/Gan et InAsSb/GaAs, réalisée avec le logiciel Matlab, nous a permis de déterminer les paramètres principaux de ces matériaux permettant leur évaluation et la comparaison entre eux.

D'après les résultats obtenus, on a déduit que l'utilisation des matériaux III-V est très bénéfique et innovante pour le domaine optique, que chacun des matériaux cités a des avantages qui permettent la conception de composants performants et que le nitrure d'indium gallium est efficace dans le spectre visible tandis que d'antimoine d'arséniure d'indium l'est en spectre infrarouge.

Notre étude nous a mené à réaliser l'importance des semi-conducteurs à base de l'InGaN du fait de sa bande interdite modulable en fonction de la composition d'indium. Ce qui permet l'absorption d'une grande partie du spectre solaire et fait de cet alliage un excellent candidat pour la réalisation des photodiodes à très haut rendement.

D'une autre part, on a distingué les propriétés favorables des semi-conducteurs à base d'InAsSb, qui ont une bande interdite étroite ce qui permet une mobilité élevée des électrons, on a aussi pu constater que le coefficient d'absorption optique de ce matériau est élevé ce qui fait de lui un matériau presque parfait pour concevoir des détecteurs qui sont appliqués dans une large gamme de spectre IR.

Cependant, il existe d'autres matériaux dans ce domaine qui ont été ou qui sont ou vont être en cours de l'étude tels que les alliages quaternaires...

Les résultats obtenus ainsi que les déductions de cette étude vont permettre la

simulation d'autres paramètres de ces matériaux tels que le VOC, ICC, FF..., qui seront bénéfiques dans la conception d'une photodiode ayant la meilleure performance possible, le meilleur rendement et qui coutera le moins aux fabricants. Ainsi notre travail associé à d'autres recherches actuelles permettra la réalisation de cette photodiode et contribuera dans l'amélioration technologique et le développement du domaine des télécommunications.

# **Références bibliographiques**

## Bibliographie

- [1] Yacine MAROUF, « Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V », thèse de doctorat, université de Biskra, 2019.
- [2] A. Lanjon, « nano composite conducteur polymère/ nano fils métalliques : élaboration et analyse des propriétés physiques », thèse de doctorat, université de Toulouse III, 2010
- [3] Chachou. I ; Baddiar. H, « L'étude de l'influence des paramètres technologiques sur la caractéristique I(V) d'une photodiode PIN en Si », mémoire de master, Université de Moulay Tahar SAIDA , 2016.
- [4] Florian Le Goff, « Intégration de matériaux semi-conducteurs III-V dans des filières de fabrication silicium avancées pour imagerie proche infrarouge », thèse de doctorat, université de Strasbourg, 2017.
- [6] J.M. DUTERTRE, « Introduction aux semi-conducteurs La jonction PN », Cours électronique analogique, INSMIN, Saint-Etienne, France, 2021.
- [7] M. Piralaee, A. Asgari, « The role of silver nanoparticles in performance of multi-quantum well double heterojunction InGaN/GaN solar cells », Chemical Physics Letters (2020).
- [8] S. Laval, « physique des semi-conducteurs III-V », CNRS, université paris sud, France.
- [9] M.Elbar, B. Alshehri, S. Tobbeche, and E. Dogheche, « Design and Simulation of InGaN/GaN p-i-n Photodiodes », photodiodes original paper, 2018.
- [10] Laichi..M ; Boukhlef..B, « Amélioration des structures à boîtes quantiques à base d'InAsSb/GaAs pour les cellules solaires », mémoire de Master, université Saad Dahleb Blida, 2016.
- [11] Arnaud Jollivet. « Dispositifs infrarouges à cascade quantique à base de semi-conducteurs GaN/AlGaIn et ZnO/ZnMgO », [quant-ph], Université Paris Saclay, 2019.
- [12] M. Mimoune, « étude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies », mémoire, Université du Québec, 2016.
- [13] T.Manyka, J. Rutkowskia, P. Martyniuk, A. Rogalskia, « Uncertainty in the estimation of the InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> intrinsic carrier concentration”, article, 2021
- [14] A.Rogalski, P.Martyniuk, M.Kopytko, P.Madejczyk and S.Krishna,“InAsSb-Based Infrared Photodetectors: Thirty Years Later On”, article, 2020.
- [15] I. Vurgaftmana, J. R. Meyer and L. R. Ram-Mohan, « Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys », applied physics review, 2001.

### **Webographie**

[5] Structures des Cristaux - Semi-Conducteurs Intrinsèques consulté le 20-08-2021 sur <https://www.electronique-et-informatique.fr>.