

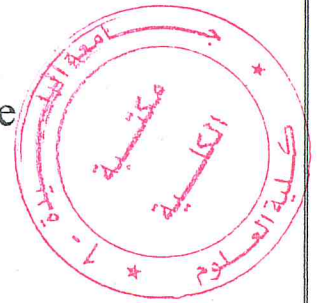
République algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences  
Département de physique

Mémoire de fin d'étude  
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique

Option : physique Appliqué



Thème :

Etude et simulation des structures à base des nouveaux matériaux pour les cellules solaire multijonction III-V

Présenté par :

Allal Meriem

Soutenu le 19/09/2018 devant le jury composé de :

M.A. Benamar	professeur à l'USDB	président
A. Aissat	professeur à l'USDB	Encadreur
M.C. Meziane	MAA à l'USDB	Examineur
W. Bellil	Doctorante à l'USDB	Co-Encadreur

MA-530-100-1

Blida 1-2017/2018



## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ceux qui m'ont servie pour donner de l'espoir et du courage nécessaire pendant mon long trajet d'étude, à vous mon cher père Rachid je vous estime fort ainsi que je vous aime.

A ma fleur de mes espérances, la source de la tendresse à la plus noble personne, à ma chère mère Fatiha ; je vous dis que vous resterez toujours la plus adorable dans ma vie.

A toute ma famille Allal et Ghalib.

A mes chers frères : Mohamed, Nour el Islem et Sidali.

A mes chères sœurs : Dalila et Maroua

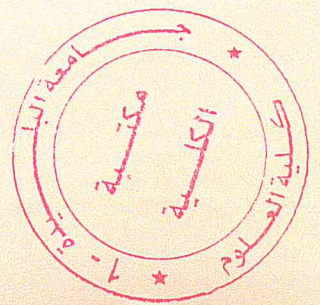
Et surtout ma fille : maria

Et mon marie : Rachid

A mes amies et à tous ceux qui ont la gentillesse de nous souhaiter la bonne

Chance : la promotion de physique Appliqué 2018.

En fin à celui qui lira ce document



Allal Meriem



## REMERCIEMENT

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage, la Volonté, la santé et la patience de mener à terme ce présent travail. Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur Aissat Abdelkader, pour son entière disposition, et ses judicieux conseils, sa patience et sa gentillesse, mais surtout pour son esprit paternel.

Je veux remercier aussi le président Benamar Mohamed amine et les membres de jury pour leur acceptation d'examiner mon travail.

Je veux remercier Co-promotrice Mme wafa belil.

Mes sentiments de profonde gratitude vont à mes professeurs qui tout au Long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Enfin, je remercie tout :

Mes collègues des études en physique appliqué pour leur soutien



ALLAL MERIEM

## Résumé :

Le but de ce travail est principalement avoir une idée sur les concepts généraux des nouveaux matériaux utilisés dans la construction des cellules solaires et ceci par l'étude de l'effet la variation de la concentration d'indium dans la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  sur les propriétés optoélectroniques tel que le paramètre de maille, la contrainte, l'énergie de gap et le coefficient d'absorption. En effet on a appliqué plusieurs modèles théoriques, et les résultats sont montre que la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est promotrice pour les cellules solaires mono et multijonction.

## Summary :

The purpose of this work is mainly to have an idea about the general concepts of the new materials used in the construction of solar cells and this by studying the effect of the variation of indium concentration in the structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N} / \text{GaN}$  on the optoelectronic properties such as the mesh parameter, the stress, the gap energy and the absorption coefficient. In fact, several theoretical models have been applied, and the results show that the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  structure is promoter for mono and multijunction solar cells.

## المخلص

الغرض من هذا العمل هو أن يكون لديك فكرة عن المفاهيم العامة للمواد الجديدة المستخدمة في بناء الخلايا الشمسية وذلك من خلال دراسة تأثير تباين تركيز الإنديوم في البنية على الخصائص البصرية الإلكترونية مثل المعلمة شبكة والإجهاد، والطاقة الفجوة ومعامل الامتصاص. في الواقع، تم تطبيق العديد من النماذج النظرية، وتظهر النتائج أن هيكل  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  هو محفز للخلايا الشمسية أحادية ومتعددة.



## Liste des figures :

### Chapitre 1 : Généralités sur les semi-conducteur

Figure 1.1 : les structures de bandes électriques des conducteurs .....	4
Figure 1.2 : principe de la conduction de semi-conducteur de type n.....	5
Figure 1.3 : principe de la conduction de semi-conducteur de type p.....	6
Figure 1.4 : les transitions optiques directes et indirectes.....	7
Figure 1.5 : structure d'une jonction PN.....	7
Figure 1.6 : tableaux périodique de Mendeleïev.....	8
Figure 1-7 : illustration des deux types de déformation.....	10
Figure 1-8 : structure accordée en maille, contrainte et relaxé.....	11
Figure 1.9 : structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct.....	13

### Chapitre 2 : les cellules solaires

Figure 2-1 : structure et diagramme de bande d'une cellule solaire.....	19
Figure 2.2 : cellule photovoltaïque multi jonction .....	21
Figure 2.3 : composante des cellules solaire multi jonction .....	22

### Chapitre 3 : Résultats et discussion

Figure 3.1 : illustrer le parametre de maille de la structure InGaN en fonction de l'indium.....	25
Figure 3.2 : représente les trois composantes de la contrainte .....	25
Figure 3.3 : la variation $dE_c$ et $dE_{hh}$ en fonction de l'indium.....	25
Figure 3.4 : représente les deux graphes la verte sans contrainte et la rouge avec Contrainte.....	26
Figure 3.5 : représente la variation de l'absorption avec l'indium.....	27



**Liste des tableaux :**

**Chapitre 1 :**

Tableau I-4 : le paramètre de l'équation de Varshni.....	16
Tableau I-5 : paramètre g et d du GaN et de L'InN.....	17



# TABLE DE MATIÈRES

Dédicace	
Remerciement	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Sommaire	
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Généralité sur les semi-conducteurs

1.1. Introduction .....	3
1.2. C'est quoi un semi-conducteur.....	3
1.2.1. Conducteurs.....	3
1.2.2. Isolants.....	3
1.2.3 semi-conducteur.....	4
1.2.4. Bande d'énergie.....	4
1.3 différents types de dopage .....	5
1.3.1 semi-conducteur dopé n.....	5
1.3.2 semi-conducteur dopé p.....	6
1.3.3. Gap direct et indirect.....	6
1.4. La jonction PN.....	7
1.5. Les semi-conducteur III-V.....	8
1.6 Les avantages des semi-conducteur III-V.....	8
1.7. Propriétés électroniques.....	9
1.7.1. Paramètre de maille.....	9
1.7.2 .la contrainte .....	9
1.7.3. Épaisseur critique.....	11
1.7.4. L'effet de la contrainte sur le gap.....	12
1.7.5 bande interdite.....	14



1.8. Propriétés optiques.....	14
1.8.1 l'absorption .....	14
1.9. Description du nitrure d'indium-gallium.....	15
1.9.1. Définition d'InGaN.....	15
1.9.2. Expression du gap des matériaux $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .....	15
1.9.3. Évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température.....	16
1.9.4. Évolution du gap d'énergie interdite en fonction de la pression.....	16
1.10.les propriétés de GaN.....	17

## Chapitre 2 : Les cellules solaires

2-1 : introduction .....	19
2-2 : historique sur le photovoltaïque .....	19
2-3 : principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....	19
2.4 : définition de cellules solaire multi jonction .....	21
2.5 : les cellules solaires multi jonction à haut rendement .....	21
2.6 : les composantes de cellules solaire multi jonction .....	22
2.6.1 : contact face avant arrière .....	22
2.6.3 : couche antireflet.....	23
2.6.4 : couche fenêtre.....	23
2.6.5 : l'émetteur.....	23
2.6.6 : la base .....	24
2.6.7 : cellule à champ arrière BSF.....	24

## Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1 : le parametre de maille.....	26
3.2 :la contrainte .....	26
3.3 : épaisseur critique.....	27
3.4. le décalage.....	28
3.5 : l'énergie de gap.....	29
Conclusion générale .....	30
Références.....	31

## Introduction générale :

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs. Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les semi-conducteurs interviennent dans presque tous les équipements électriques et optiques [1]. La plus grande partie des composants (transistors, diodes...) sont réalisés en silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés. 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 semi-conducteurs III-V a permis une nouvelle alternative pour l'électronique moderne. Dans ce mémoire ; Nous allons nous consacrer à l'étude des propriétés structurales et électroniques des semi-conducteurs III-V à base de InGaN. Ce travail est divisé sur trois chapitres le premier chapitre est consacré pour l'étude des semi-conducteurs en façon générale, puis les semi-conducteur III-V. le deuxième chapitre parler sur notion des cellules solaire et on présente le matériau de nitrure de gallium-indium (InGaN) qui est au centre de ce travail. Finalement on termine ce travail par résultat et discussion de la simulation de cellules solaires multijonction.



# **Chapitre 1 :**

# **Généralités sur les**

# **semi-conducteurs**

# Généralités sur les semi-conducteurs

## 1.1. Introduction :

Ce chapitre est divisé sur trois parties la première est consacré pour l'étude des semi-conducteurs d'une façon générale où on va les définir, puis les semi-conducteurs III-V. La deuxième partie est dédiée à l'étude des propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs III-V tel que le paramètre de maille comme propriétés électronique, le coefficient d'absorption comme propriété optique et l'énergie de gap comme propriétés structurale. Et finalement dans la troisième partie on va aborder la structure InGaN sur le substrat GaN.

## 1.2. C'est quoi, un semi-conducteur ?

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité ( $\sigma$ ) des isolants sont comprises entre  $1 \times 10^{-11}$  et  $1 \times 10^{-19}$  S/cm et celles des conducteurs entre  $6 \times 10^7$  et  $1 \times 10^4$  S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre  $1 \times 10^3$  et  $1 \times 10^{-6}$  S/cm, on les appelle des semi-conducteurs. [2].

Quels sont les meilleurs matériaux semi-conducteurs ?

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, de son abondance naturelle et de son coût de mise en œuvre économique. On peut toutefois en citer quelques autres : le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.

### 1.2.1. Conducteurs :

Un conducteur est un matériau qui conduit aisément le courant électrique. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément comme le cuivre, l'argent, l'or et l'aluminium, ces éléments étant caractérisés par un seul électron de valence faiblement lié à l'atome. Ces électrons de valence peu retenus peuvent facilement se détacher de leur atome.

### 1.2.2. Isolants :

Un isolant est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. La plupart des bons isolants sont des matériaux composés de plusieurs éléments, contrairement aux conducteurs. Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant.



# Généralités sur les semi-conducteurs

## 1.2.3. Semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Un semi-conducteur à l'état pur (intrinsèque) n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant. Les éléments uniques les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le Silicium, le Germanium et le carbone.

Des éléments composés tels l'Arséniure de gallium sont aussi couramment pour les semi-conducteurs. Les semi-conducteurs à élément unique se caractérisent par des atomes à quatre électrons de valence.

### d)Bandes d'énergie :

La couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la bande de conduction. En terme d'énergie, la différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique.

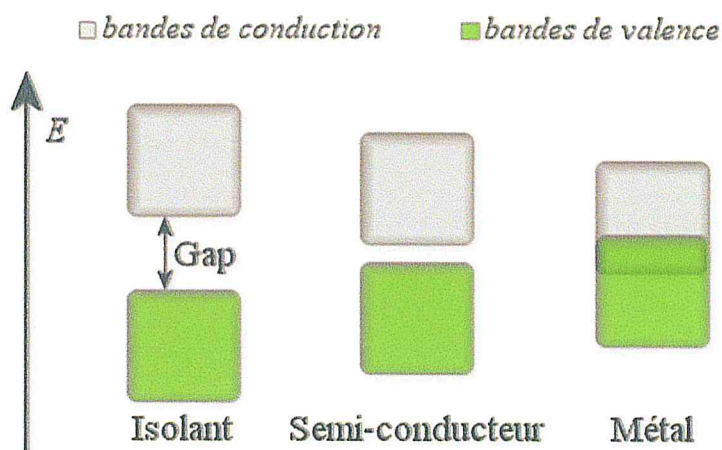


Figure 1.1: les structures de bandes électroniques des conducteurs, isolants et semi-conducteurs. [2]

On voit que dans un métal, certains électrons sont à la fois dans la bande de valence et dans la bande de conduction. Cela signifie qu'un métal peut conduire le courant sans autre forme de traitement physico-chimique. Dans un isolant, par contre, les deux bandes sont séparées par un espace appelé « bande interdite » : cela signifie que les électrons ne peuvent pas s'y trouver.

## Généralités sur les semi-conducteurs

Dans le cas des isolants, les électrons externes sont tous dans la bande de valence et aucun ne se trouve dans la bande de conduction : ces matériaux ne peuvent donc pas conduire l'électricité. Enfin, dans le cas des semi-conducteurs, au milieu, il existe une bande interdite aussi, mais cette dernière est très fine. Il suffit d'un petit quelque chose pour que les électrons de valence puissent passer dans la bande de conduction et ainsi rendre le semi-conducteur... conducteur [2].

### 1.3. Différent types de dopage :

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; Ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques [3].

#### 1.3.1. Semi-conducteur dopé n :

Pour un dopage de type N, il faut augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur intrinsèque. Dans le cas du silicium Si, ou du germanium Ge, qui sont tétravalents, on ajoute des atomes d'un élément pentavalent, comme le phosphore P, l'arsenic As ou l'antimoine Sb. Ces atomes, insérés dans le réseau cristallin, formeront quatre liaisons covalentes avec quatre atomes de silicium, le cinquième électron de la couche de valence restant libre. Cet électron qui n'est que très faiblement lié à l'atome va se placer sur un niveau énergétique plus près de la bande de conduction. Il lui suffira d'acquérir une faible énergie supplémentaire ( $\Delta E \approx 0,01 \text{ eV}$ ) pour accéder à cette bande. De ce fait, le matériau possède une meilleure conductivité électrique. Ces électrons libres ne créent pas de trous dans le réseau, le nombre total d'électrons est donc supérieur au nombre de trous. Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires. Les atomes dopants sont appelés atomes donneurs [3].

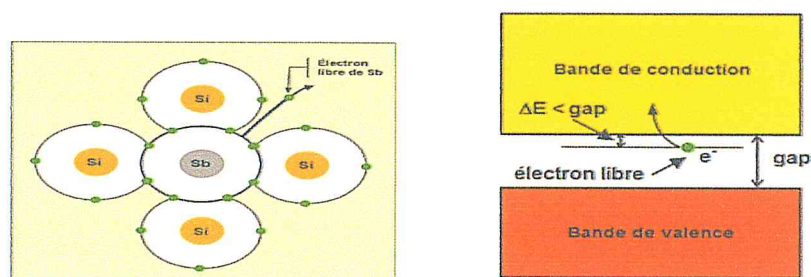


Figure1.2 : Principe de la conduction dans un semi-conducteur de type N[3]

#### 1.3.2. Semi-conducteur dopé p :



## Généralités sur les semi-conducteurs

Pour ce dopage il faut augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur intrinsèque. Dans le cas du silicium Si, ou du germanium Ge, qui possèdent quatre électrons de valence, on ajoute des éléments trivalents comme le gallium Ga, le bore B, l'aluminium Al ou l'indium In. Il leur manque un électron pour compléter les quatre liaisons covalentes avec les atomes de silicium voisins. Un trou est créé dans la structure. Ce trou crée un nouveau niveau d'énergie voisin de la bande de valence ( $\Delta E \approx 0,05 \text{ eV}$ ), accessible plus facilement aux électrons. Il peut être rempli par un électron d'un autre atome de silicium, qui à son tour libère un trou et ainsi de suite (figure ci-dessous). Le matériau devient ainsi conducteur de l'électricité. Comme au final le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons, les trous sont donc les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires. Les atomes dopants sont appelés atomes accepteurs

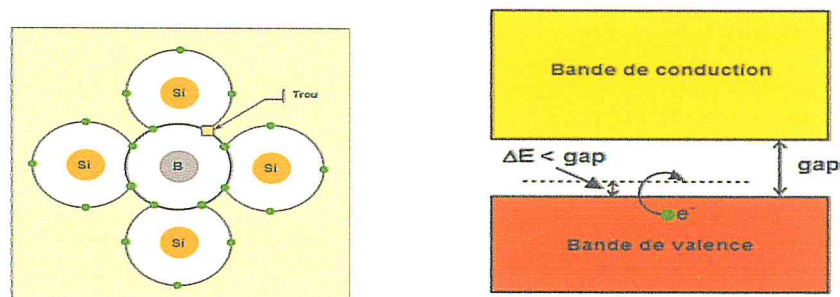


Figure 1.3 : Principe de la conduction dans un semi-conducteur de type P[3].

### 1.3.3. Gap direct et gap indirect :

Pour un cristal semi-conducteur, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction sont caractérisés par une énergie  $E$  et un vecteur d'onde  $k$ . Dans l'espace réciproque, si ce maximum et ce minimum correspondent à la même valeur de  $k$  : on dit que le semi-conducteur est à gap direct. Si au contraire, ce maximum et ce minimum correspondent à des valeurs de  $k$  différentes : on dit que le semi-conducteur est à gap indirect; c'est le cas du silicium et du germanium. Cette distinction entre matériaux semi-conducteurs à gap direct ou indirect est importante, particulièrement pour les applications optoélectroniques qui mettent en jeu à la fois des électrons et des photons.

En effet, lors de la transition d'un électron de la BV vers la BC ou de la recombinaison électron-trou, il faut conserver l'énergie (relation scalaire) et l'impulsion (relation vectorielle). La transition d'énergie minimale entre ces deux bandes peut avoir lieu sans changement de vecteur d'onde dans les semi-conducteurs à gap direct, ce qui permet l'absorption et l'émission de lumière de façon beaucoup plus efficace que dans les matériaux à gap indirect.

## Généralités sur les semi-conducteurs

Cette différence oriente le choix des matériaux pour les applications optoélectroniques. [4]

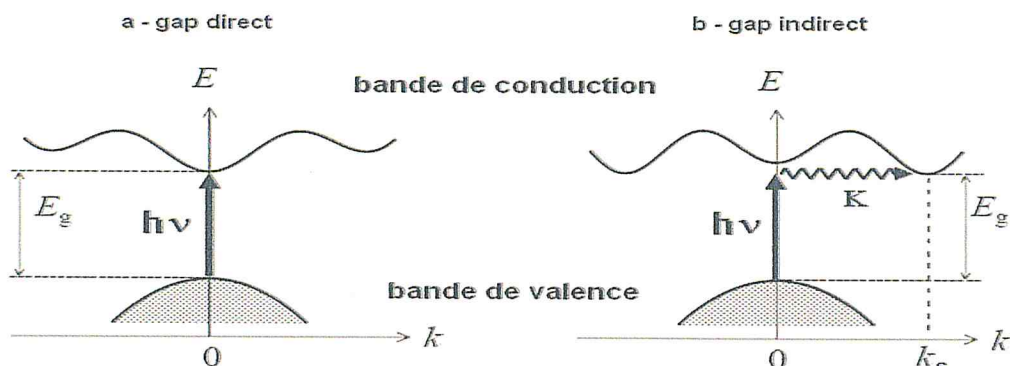


Fig. 1.4: Transitions inter bandes a) directe b) indirecte [4]

### 1.4. La jonction P-N

Parmi tous les dispositifs à semi-conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semi-conducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec  $x$  pour passer d'une région de type P à une région de type N.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. la zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE). En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. [5]

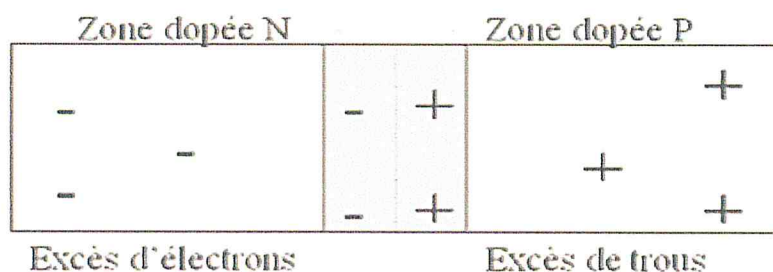


Figure (1.5) : Structure d'une jonction P-N[5]

### 1.5. Les semi-conducteurs III-V :





## Généralités sur les semi-conducteurs

- Leurs performances vitesse/consommation nettement supérieure à celles des

Calculateurs utilisant des circuits en silicium (applications numériques) [7].

### 1.7. Les propriétés électroniques :

#### 1.7.1. Le paramètre de maille :

Le paramètre de maille se définit comme étant la distance séparant deux mailles consécutives. Lors de la réalisation d'alliages avec des semi-conducteurs différents, le paramètre de maille de l'alliage peut être considéré comme évoluant linéairement en fonction de la composition des différents binaire suivant la loi de Végard qui est donnée par la relation suivante [8] :

$$a(x, y) = x \cdot a(\text{InN}) + (1-x) \cdot a(\text{GaN}) \quad 1.1$$

#### 1.7.2. La contrainte :

L'épitaxie de matériaux désaccordés est devenue bien maîtrisée, grâce notamment aux progrès accomplis au niveau des techniques de croissance. Ainsi, l'accord de maille n'est plus un impératif, mieux encore les effets des contraintes sont exploités dans plusieurs composants électroniques et optoélectroniques performants. En effet, l'utilisation d'hétéro structure à contrainte permet d'ajuster la longueur d'onde d'émission, en modifiant les positions en énergie des bandes de valence et de conduction.

Deux cas distincts doivent être envisagés lorsque l'on considère une hétéro structure :

- La filière adaptée en maille : c'est le cas le plus favorable où tous les matériaux épitaxiés sont en accord de maille avec le substrat et par conséquent aucune dislocation ne pourra exister.

- La filière pseudo morphique : les matériaux épitaxiés ont des paramètres différents, mais pas trop éloignés. Lors de la croissance d'une couche semi-conductrice de paramètre de maille  $a_F$  différent de celui du substrat (plus épais)  $a_S$ , c'est le matériau support qui impose son paramètre de maille dans le plan de la couche. Par conséquent, la couche épitaxie devient le siège de contraintes en compression si ( $a_F > a_S$ ) ou en tension si ( $a_F < a_S$ ), entraînant ainsi une déformation tétragonale de sa maille.

En considérant le dépôt d'une couche pseudo morphique dans la direction de croissance

(001), l'adaptation du paramètre de maille de la couche épit axiale avec le substrat dans le plan de la couche donne lieu aux déformations suivantes [9] :



## Généralités sur les semi-conducteurs

- dans le plan de la couche :

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \frac{a_s - a_F}{a_F} = \varepsilon_{//} \quad 1.2$$

- dans la direction de croissance :

$$\varepsilon_{zz} = \frac{a_{\perp} - a_F}{a_F} = \varepsilon_{\perp} \quad 1.3$$

La condition nécessaire à une bonne hétéro-épitaxie est évidemment que les deux matériaux aient la même structure cristalline. Lorsque les paramètres de mailles sont différents, le matériau constituant la couche de plus grande épaisseur impose sa maille à l'autre, au moins au voisinage de l'interface. Ceci entraîne l'existence, dans le matériau de faible épaisseur, d'une contrainte biaxiale dans le plan des couches. Prenons le cas des deux cristaux comme le montre la figure

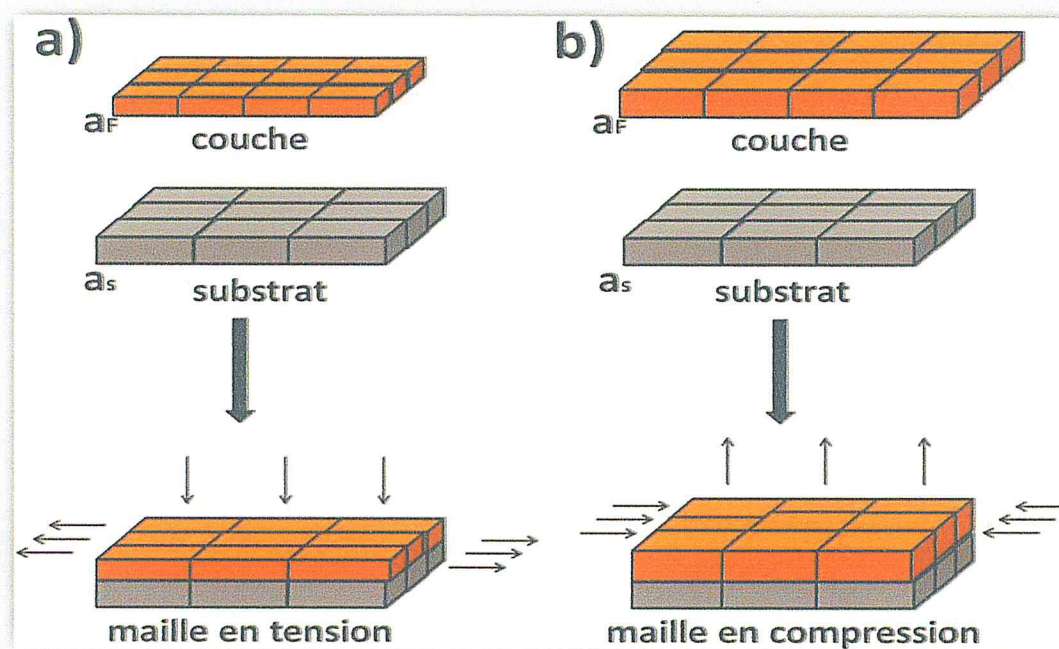


Figure 1.7 : illustration des deux types de déformation a) Couche en compression b) couche en tension

### 1.7.3. Epaisseur critique :

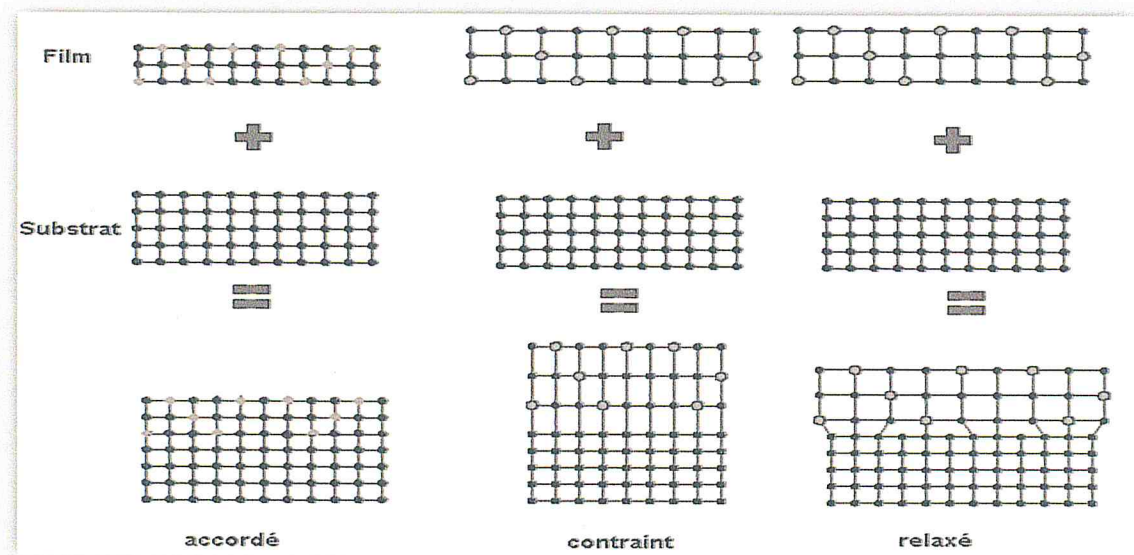
Lors de l'épitaxie d'un matériau sur un substrat de paramètre de maille différent, les couches contraintes commencent à relaxer, et génèrent des dislocations qui se propagent de l'interface de contact vers le ternaire, qui s'accompagne d'une accumulation d'énergie élastique. Cette épaisseur limite est 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.

## Généralités sur les semi-conducteurs

Le matériau tend alors à reprendre son paramètre de maille, et des dislocations apparaissent à l'interface (relaxation plastique). [10]

L'épaisseur critique dépend directement de la différence du paramètre de maille entre le substrat et la couche (figure 1.8).



**Figure 1.8 : Structure accordée en maille, contrainte et relaxé.**

Il définit l'épaisseur critique comme l'épaisseur à partir de laquelle une dislocation initialement présente à l'interface de contact se propage latéralement sous l'effet du champ de la contrainte. La valeur de l'épaisseur critique  $h_c$  qui en résulte dans le cas d'un matériau de structure sphalérite (blende de zinc) épitaxie sur la surface (001) est donnée par l'équation suivante :

$$h_c = \frac{a_e}{(\beta\sqrt{2}\pi\varepsilon)} * \frac{1-0.25\gamma}{1+\gamma} * \ln(h_c\sqrt{2})/(a_e+1) \quad 1.4$$

Où

$\varepsilon$  : est le désaccord paramétrique.

$\gamma$  : est le coefficient de poisson donné par :



## Généralités sur les semi-conducteurs

$$\gamma = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} \quad 1.5$$

Où :

$C_{11}$  et  $C_{12}$  sont les constants élastiques obtenus par l'interpolation linéaire des binaires, GaN.

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

### 1.7.4. Effet de la contrainte sur le gap :

Pour la description du rôle de la contrainte sur la structure de bandes nous avons suivi le modèle de van walle, et utilisé le formalisme de Krijn. [11]

Les deux composantes parallèle et perpendiculaire du tenseur de déformation peuvent être définies de la manière suivante :

$$\varepsilon_{//} = \frac{\varepsilon_{//} - a}{a} \quad 1.6$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_{\perp} - a}{a} \quad 1.7$$

Pour une structure totalement contrainte :

$$a_{//} = a_0 \quad 1.8$$

$$\varepsilon_{\perp} = -2 \frac{c_{12}}{c_{11}} \varepsilon_{//} \quad 1.8$$

Le rôle de la contrainte biaxiale sur la structure de bandes de la couche épitaxie est schématisé sur la (figure 1-9). Celle-ci présente la structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct en l'absence de contrainte (figure 1-9-a), soumis à une compression biaxiale (figure 1-9-b) et soumis à une contrainte biaxiale de tension (figure 1-9-c). [11]

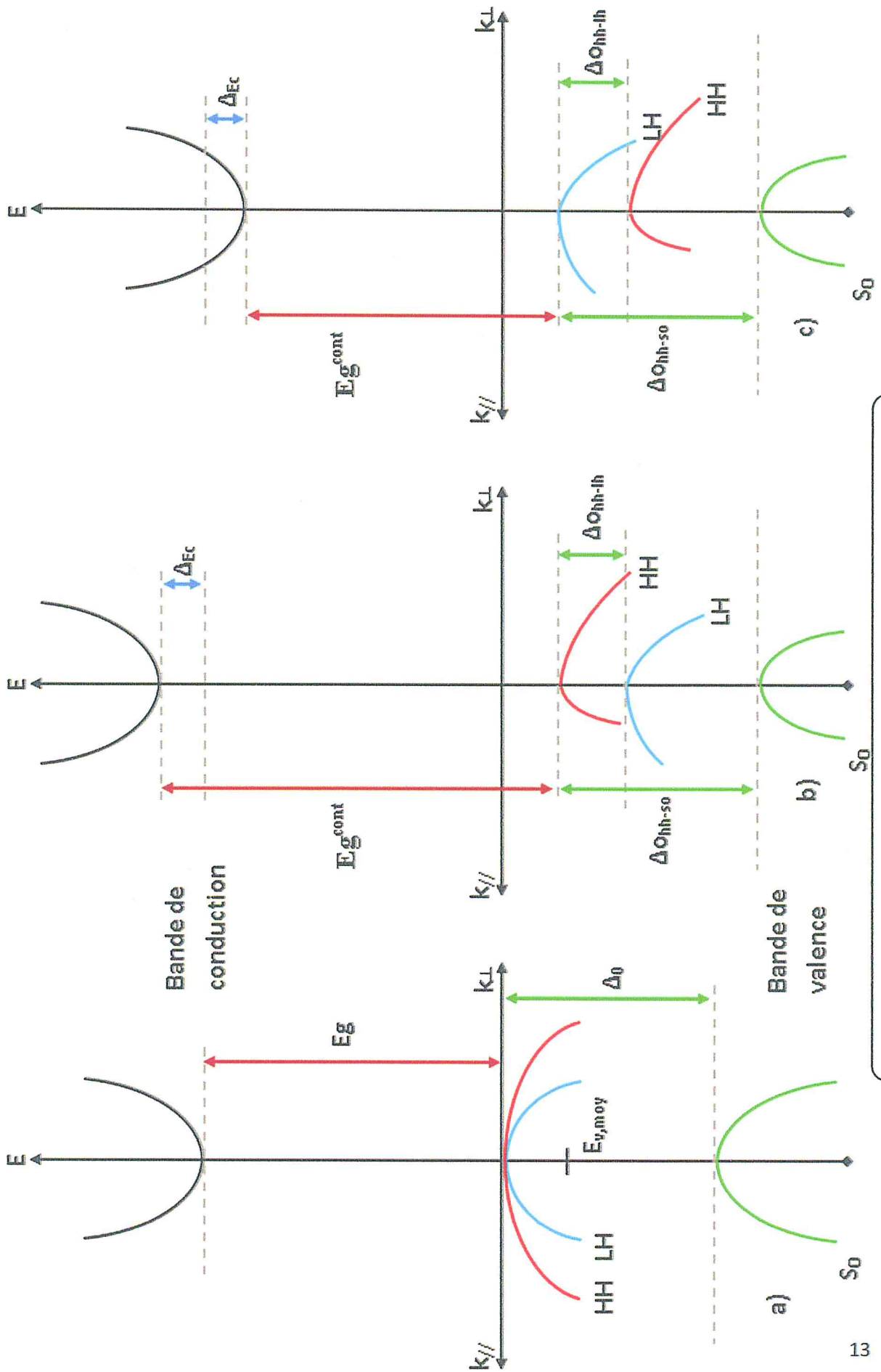


Figure 1.9. structure de bande d'un semi-conducteur à gap directe  
 a) Non contraint b) en tension c) en compression



## Généralités sur les semi-conducteurs

### 1.7.5 : la bande interdite :

Par définition, la bande interdite représente l'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Le GaN possède la plus large bande interdite (3,3 eV), l'évolution de la largeur de bande en fonction de la température [12].

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha \frac{T_2}{T + \beta} \quad (1.9)$$

Avec :

$$E_g(0) = 3.47 \text{ eV} ;$$

$$\alpha = 0.00077 \text{ eV/K et}$$

$$\beta = 600 \text{ °K}$$

### 1.8. 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 bande des électrons.

#### 1.8.1 Absorption :

Seule la lumière absorbée et restituée sous forme d'énergie électrique, le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire : il se caractérise par sa réponse spectrale, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il transforme l'énergie d'un rayonnement en énergie électrique. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau. Le coefficient d'absorption détermine la distance dans un matériau à partir de laquelle une longueur d'onde particulière peut pénétrer avant qu'elle soit absorbée. 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 la bande interdite ( $E_g$ ), puis passer à la bande de conduction. Le coefficient d'absorption  $\alpha(E)$ , pour une énergie du photon  $E$  supérieure à l'énergie du gap est donné par la relation suivante [13]:

## Généralités sur les semi-conducteurs

- Pour un semi-conducteur à gap direct :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \left( \frac{\sqrt{E - E_g}}{E} \right) \quad 1.10$$

- Pour un semi-conducteur de gap indirect :

$$\alpha(E) = \alpha_0 \left( \frac{E - E_g}{E} \right)^2 \quad 1.11$$

### 1.9. Description du nitrure d'Indium-Gallium :

#### 1.9.1. Définition d'InGaN :

Le matériau de nitrure de gallium-indium (InGaN) qui est au centre de ce travail. 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 III du tableau de Mendeleïev, à savoir le bore, l'aluminium, le gallium, l'indium et le thallium, voir Figure I-1. Le nitrure de gallium-indium est un alliage entre le nitrure de gallium (GaN) et le nitrure d'indium (InN). Ces matériaux nitrures-III sont activement étudiés parce qu'ils représentent une nouvelle catégorie de matériaux possédant des propriétés uniques : un large gap d'énergie interdite, de fortes liaisons interatomiques ou encore une forte conductivité thermique qui les rendent très intéressants pour l'optoélectronique à haute température et grande puissance [14].

#### 1.9.2. Expression du gap des matériaux $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ :

Les paramètres de maille des alliages ternaires de nitrures d'éléments III peuvent être calculés selon la loi de Végard qui relie la composition et les valeurs des paramètres de maille de l'alliage avec celles des composés binaires correspondants dans le cas où aucune contrainte ne déforme le réseau (le matériau est dit totalement relaxé). Dans le cas du ternaire  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , ces paramètres peuvent être calculés selon les expressions suivantes [15] :

$$E_g(\text{InGaN}) = (1-x)E_g(\text{GaN}) + xE_g(\text{InN}) - bx(1-x) \quad 1.12$$

Avec :

- ❖  $x$  : la concentration d'Indium dans l' $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (*s. d*)
- ❖  $b$  : le paramètre de courbure (*eV*).



## Généralités sur les semi-conducteurs

- ❖  $E_g$  : (*InGaN*) le gap d'énergie de l'*InGaN* (eV).
- ❖  $E_g$  : (*GaN*) le gap d'énergie du *GaN* (eV).
- ❖  $E_g$  : (*InN*) le gap d'énergie de l'*InN* (eV).

### 1.9.3. Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la température :

L'énergie de bande interdite varie avec la température : on observe expérimentalement une diminution de cette énergie lorsque la température augmente. Ceci est dû à deux phénomènes : la dilatation thermique qui modifie les distances interatomiques du réseau cristallin et deuxièmement l'interaction électron-phonon ; cette deuxième étant l'élément prépondérant dans la modification de l'énergie de bande interdite. Pour évaluer cette modification d'énergie on utilise la formule empirique permettant d'évaluer la variation de l'énergie de bande interdite en fonction de la température [15] :

$$E_g(t) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad 1.13$$

Avec :

- ❖  $E_g(0)$  : le gap d'énergie du matériau à 0 K [eV]
- ❖  $\alpha$  : une constante empirique [eV/K]
- ❖  $\beta$  : le paramètre de courbure (eV).

Ces paramètres pour le *GaN* et l'*InN* sont rassemblés dans le Tableau (1.1)

	$E_g(0K)$ [eV]	$\alpha$ [MeV/K]	$\beta$ [K]	$\Delta E(300 - 0K)$ [eV]
<i>GaN</i>	3.507	0.909	830	$72 \cdot 10^{-3}$
<i>InN</i>	0.69	0.41	454	$49.9 \cdot 10^{-3}$

**Tableau 1.1** : les paramètres de l'équation de Varshni [15].

### 1.9.4. Evolution du gap d'énergie interdite en fonction de la pression :

Nous avons vu précédemment que les couches de nitrures-III étaient généralement épitaxiales sur des substrats composés avec un autre matériau ayant donc des paramètres différents et notamment un coefficient d'expansion thermique différent. Ceci va entraîner la création de contraintes lors du refroidissement du composant à température ambiante après la

## Généralités sur les semi-conducteurs

croissance. Ces contraintes peuvent changer la structure de bande de la couche épitaxie. La dépendance du gap d'énergie,  $E_g$ , en fonction de la pression peut s'exprimer sous la forme :

$$E_g(P) = E_g(0) + gP + dP^2 \quad 1.14$$

Avec

- ❖  $E_g(0)$  le gap d'énergie du matériau sans contrainte,  $P=0$  [eV]
- ❖  $g$  et  $d$  des coefficients de pression [eV/kbar]
- ❖  $P$  la pression [kbar]

Les paramètres  $g$  et  $d$  du GaN et de l'InN sont rassemblés dans le Tableau (1.2) [16].

	$g$ [MeV/kbar]	$d$ [MeV/kbar]
GaN	3.3	/
InN	2.1	0

Tableau 1.2 : Paramètres  $g$  et  $d$  du GaN et de l'InN [15]

### 1.9.2. Les propriétés de GaN :

Le GaN est un semi-conducteur très utilisé dans la conversion photovoltaïque car il présente plusieurs avantages nous citons quelques-uns :

- A un gap direct
- Non toxique
- A un grand coefficient d'absorption dans le spectre solaire
- Il est dur et mécaniquement stable
- Sa bonne conductivité thermique et résistance à haute température, pression.

Le GaN est un matériau utilisé dans les diodes électroluminescentes utilisées dans l'éclairage des téléphones portables, éclairage public, affiche publicitaire et les transistors pour l'électronique.



## **Chapitre 2 : Etude et simulation des cellules solaires**

### 2.1. Introduction :

Ce chapitre est divisé sur deux parties, la première partie a été dédiée à l'étude des cellules solaires, définition, historique et son principe où on va définir les cellules solaires multijonction. Dans la deuxième partie on va parler sur la définition et ses composantes de ces cellules solaires.

### 2.2. Historique sur le photovoltaïque :

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile

- En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.
- L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- En 1954, réalisation de la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4% par les laboratoires BELL.
- L'espace devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

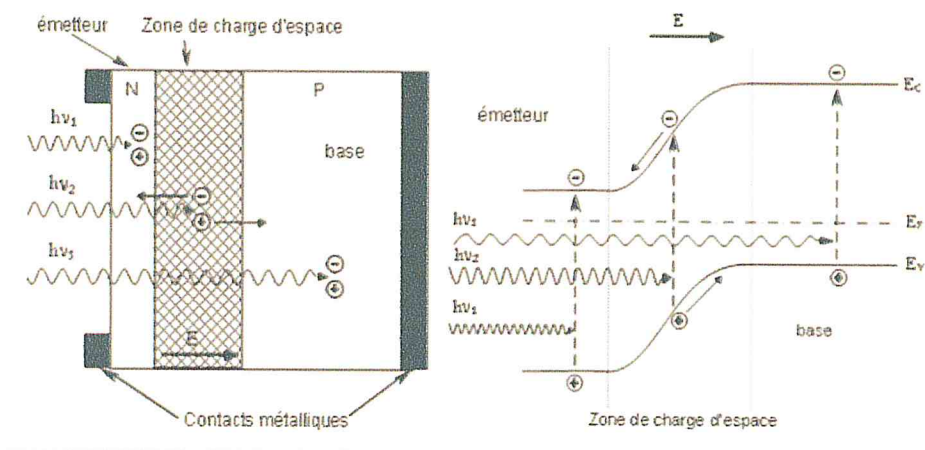
### 2.3. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur des charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Donc Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.



Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées [16]. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure I.3:



**Figure 2.1. Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [16].**

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure 2.1. Une cellule comporte trois parties • Zone Dopée de type n : excès d'électrons • Zone Dopée de type p : déficit d'électron. • Une jonction (dite p-n).

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque comme suit :

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photos porteuses auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion
- dans la zone de charge d'espace, les paires électron / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour

donner une photo courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

### 2.4. Définition d'une cellule solaire multijonction :

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

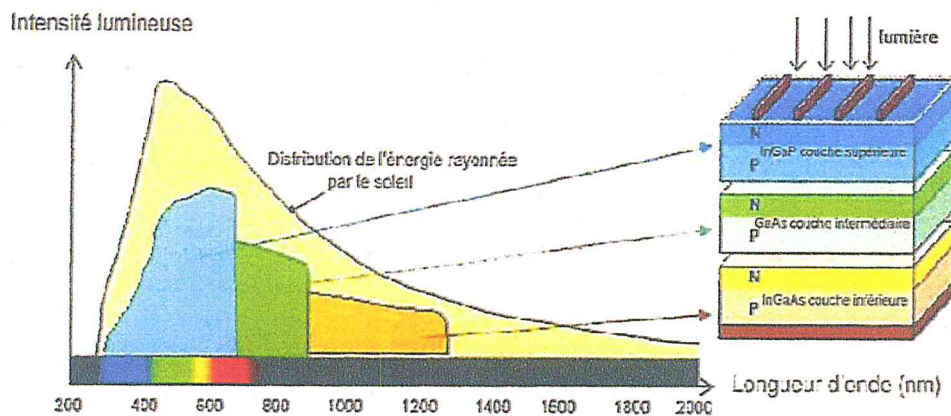


Figure 2.2. Cellule photovoltaïques multijonction [17]

### 2.5. Les cellules multi-jonctions à haut rendement :

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée  $E_g$  en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable. D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants. Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants. [18]



## 2.6. Les constituants d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction pn qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire. Elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations.

Les progrès réalisés en termes de rendement des cellules conventionnelles fabriquées dans l'industrie ont permis de passer d'un rendement de conversion moyen de 10% en 1979 à 18% en 2008 grâce à l'implémentation de nouvelles technologies.

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentées dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque standard industrielle est présentée sur la figure 2.3 :

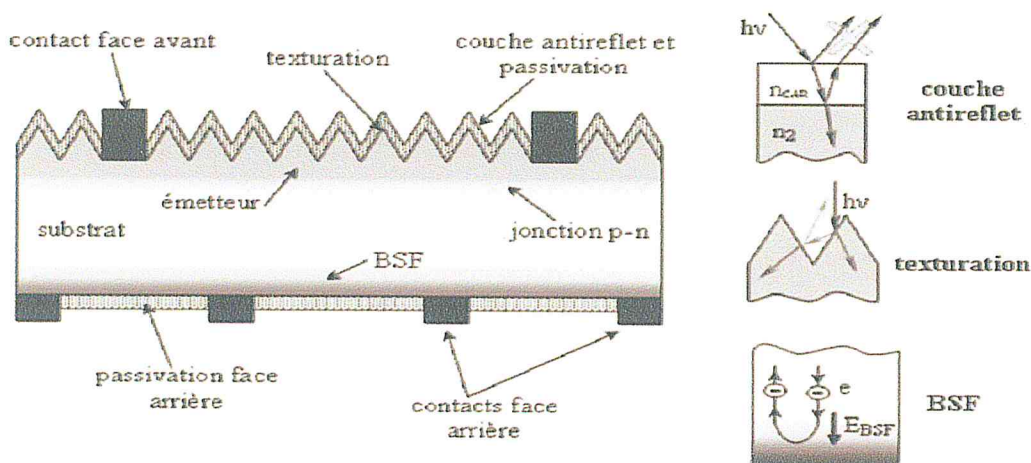


Figure 2.3 : les composants d'une cellule photovoltaïque [18]

### 2.6.1. Contacts face avant et arrière :

Les contacts métalliques de l'émetteur et du substrat servent à collecter le courant de porteurs photo-générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement [19]. Les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Les doigts de sérigraphie possèdent une largeur minimale de  $100\mu\text{m}$  et une épaisseur de  $10\mu\text{m}$  à  $30\mu\text{m}$  permettant de conduire une forte densité de courant. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées. La

qualité de contact sur la surface avant dépend fortement du niveau de dopage en surface et du type de texturisation. Les contacts avant sont déposés avec une pâte contenant essentiellement de l'argent au travers d'une grille. Puis, la pâte est séchée dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure. Ensuite, de même pour la métallisation arrière une pâte en aluminium est déposée sur la quasi-totalité de cette face.

### **2.6.2. Couche antireflet :**

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante. Le rôle de la couche anti-réfléchissante est de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant. Sans couches anti-réfléchissantes, la pile solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente sur la cellule. Cette couche réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques.

### **2.6.3. Couches "fenêtres" :**

Pour minimiser la recombinaison sur la surface avant de la cellule solaire, une fine couche à base de semi-conducteur III-V, fortement dopé, est réalisée à la surface. Le matériau utilisé doit répondre aux exigences suivantes [21].

Il doit déposer d'un paramètre de maille proche du paramètre de maille de l'émetteur. Son gap doit être supérieur au gap de l'émetteur. Il doit avoir une large bande de valence, décalée par rapport à l'émetteur, pour créer une barrière de potentiel pour les trous minoritaires. Sa concentration doit être  $\geq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Le matériau doit être de qualité élevée pour minimiser la recombinaison à l'interface. Certains matériaux utilisés dans les couches fenêtre posent le problème de contamination avec l'oxygène, comme dans les matériaux InGaN, ce qui crée des pièges au niveau du matériau. La solution consiste bien sûr à contrôler l'environnement de croissance et à utiliser certains dopants moins sensibles à l'oxygène comme le silicium et le sélénium.

### **2.6.4. L'émetteur :**

L'émetteur est en général formé par diffusion des dopants à partir d'un verre de phosphore obtenu suite à une oxydation thermique de la surface du Si sous une atmosphère de  $POCl_3$  et



d'oxygène. Pour favoriser le contact entre le métal et la surface, la concentration de dopants en surface doit être élevée. Ce fort dopage entraîne des recombinaisons par mécanisme Auger à la surface faisant augmenter le courant de saturation de l'émetteur [22]. L'épaisseur de l'émetteur dépend de la technique choisie pour réaliser les contacts. Sa valeur est de quelques dixièmes de microns. Si la technique de réalisation des contacts métalliques impose un émetteur épais (cas d'une métallisation par sérigraphie), là serait logiquement une mauvaise conversion de la lumière bleue. Pour obtenir une bonne réponse bleue, il faut réaliser un émetteur d'épaisseur variable, mince loin des métallisations, mais épais au voisinage de celles-ci.

### **2.6.5. La base :**

Cette couche de la cellule est composée de silicium dopé P. Elle possède donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs [23].

### **2.6.6. Cellule a champ arrière (B.S.F) :**

Un BSF (Back Surface Field) est une couche fortement dopée sur la face arrière de la cellule. Cette zone a le même type de dopage que celui de la base, conduisant à une structure p-p+. Ce dernier consiste à créer une barrière de potentiel sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence du niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base. Donc le but du champ arrière est de diminuer la vitesse de recombinaison. Le BSF le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque consiste en une couche d'aluminium déposée sur la face arrière, suivie d'un traitement thermique conduisant à un alliage de silicium et d'aluminium. La largeur du BSF va de quelques micromètres à plus de 10 $\mu$ m. L'effet d'un BSF est souvent modélisé par l'utilisation d'une vitesse de recombinaison de surface effective, qui est définie à la frontière de la région quasi-neutre de la base. Les valeurs typiques de ces vitesses obtenues avec un BSF en aluminium vont de 200 à 1000 cm/s, avec des variations selon le profil de dopage et la profondeur du BSF. Le principe de la formation d'un BSF est comme suivi : quand le substrat de silicium recouvert d'une couche d'aluminium est porté à une température supérieure à celle de l'eutectique (577 °C), un liquide est formé, mettant en jeu tout l'aluminium déposé et la quantité de silicium nécessaire [24].

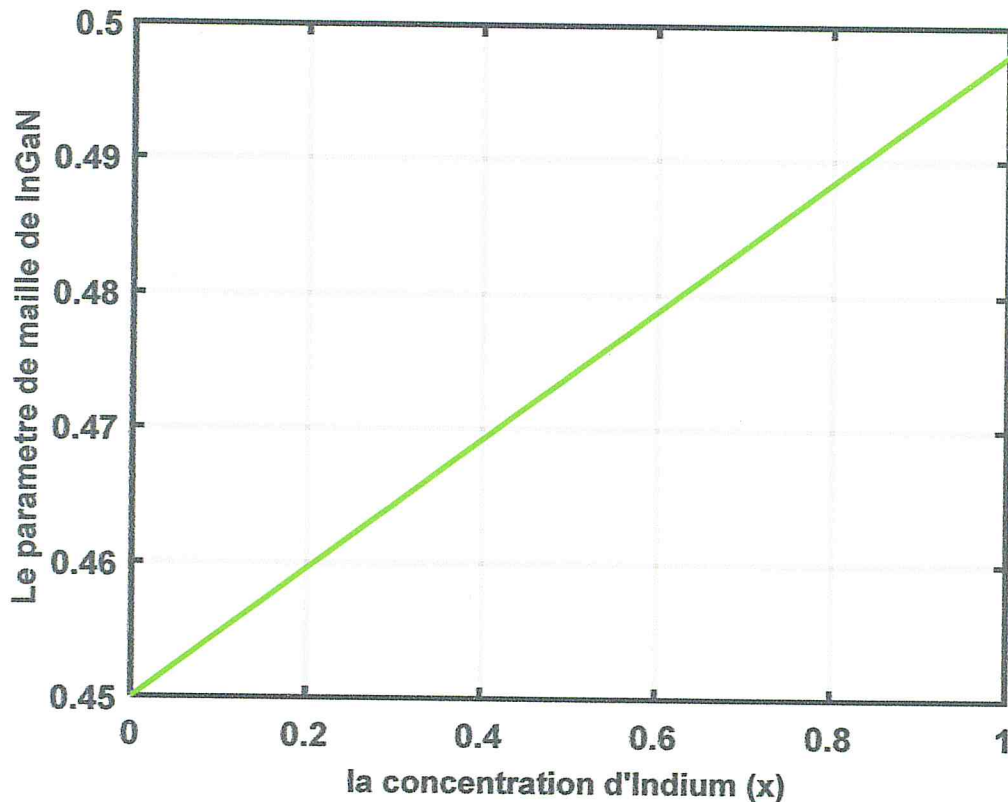
# **Chapitre 3 :**

## **Résultat et discussion**



## Résultats et discussion

### 3.1 : le parametre de maille :



La figure 3.1 : le paramètre de maille de la structure  $In_x Ga_{1-x}N$  en fonction de l'Indium

Il est clair que le parametre de maille de la structure influe par le concentration d'indium de tel façon que le parametre de maille augmente avec la concentration d'indium, car l'atome d'indium est large

### 3.2. La contrainte :

On a :

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} \text{ et } \varepsilon_{tot} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \text{ donc } \varepsilon_{tot} = 2\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz}$$

Avec

- $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ : la contrainte selon le plan de croissance
- $\varepsilon_{zz}$ : la contrainte selon l'axe de croissance

On remarque que la composante  $\varepsilon_{xx}$  et  $\varepsilon_{tot}$  diminue avec augmentation de l'indium par contre  $\varepsilon_{zz}$  augmente avec in

## Résultats et discussion

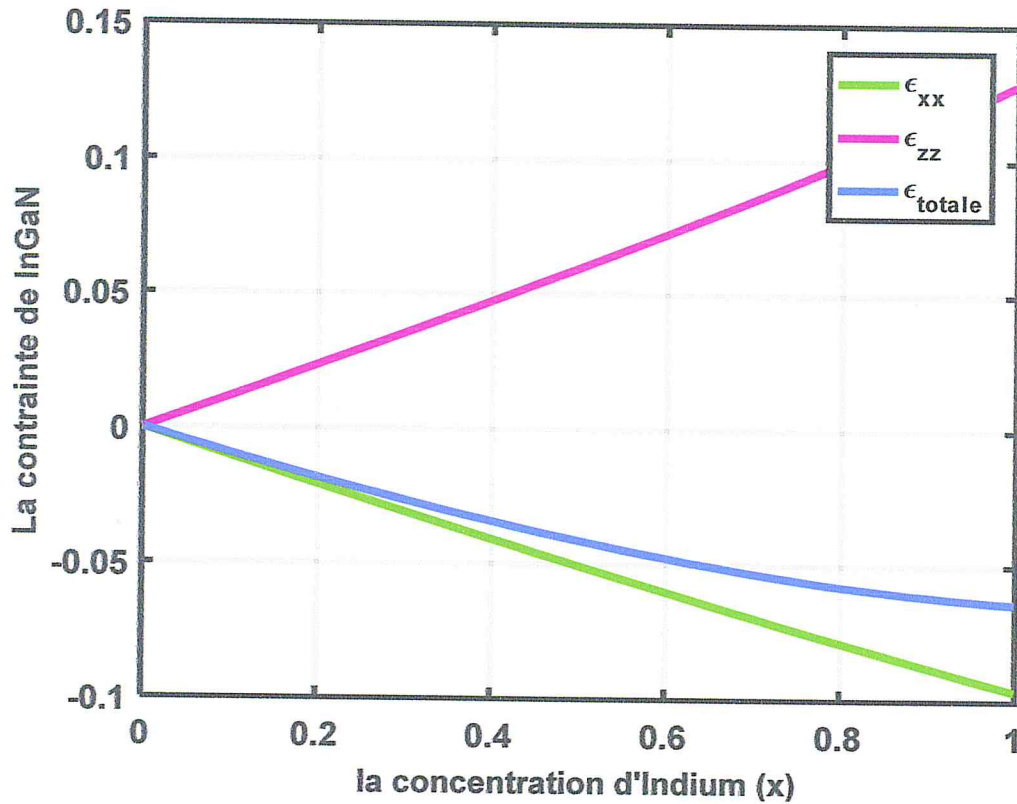


Figure 3.2 : illustrer les trois composantes de la contrainte  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{zz}$  et  $\epsilon_{tot}$

### 3.3. L'épaisseur critique :

La figure 3.3 nous montre la variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium ; ou on remarque que l'épaisseur critique diminue avec l'indium jusqu'à la valeur 35% ou l'épaisseur critique devient inférieure à 1 nm ce qui est difficile à réaliser expérimentalement. Ce résultat est validé par plusieurs travaux dans la littérature. Donc la limite de l'indium de 35% est justifiée par l'épaisseur critique qui devient minimale voire zéro pour des valeurs d'indium au-delà de 35%.

### 3.4. L'énergie de gap :

La figure 3.4 nous montre la variation de l'énergie de gap en fonction de la variation de la concentration d'indium. La figure illustre deux courbes : la courbe verte avant l'épitaxie c.-à-d. (sans contrainte) et la courbe rouge (après l'épitaxie c.-à-d. avec contrainte).



## Résultats et discussion

On remarque que les deux graphes démontrent que l'énergie de gap diminue avec indium et varie de 3.4 jusqu'à la valeur 0.7 pour la verte et de 3.4 jusqu'à 1.2 pour la rouge. Sur la figure on remarque que l'énergie de gap après l'épitaxie (avec contrainte) strictement supérieur par rapport à l'énergie de gap (en verte) est cela veut dire qu'on une contrainte en compression car l'énergie de gap comme ont illustré sur la figure 3.5 est augmenté par rapport à celle en tension.

### 3.5. Le décalage :

On remarque que  $dE_c$  augmente avec d'indium c-à-d. si on augmente d'indium l'énergie de gap va diminuer car le  $dE_c$  augmente.  $dE_{hh}$  augmente avec d'indium donc l'énergie de gap diminue avec indium.

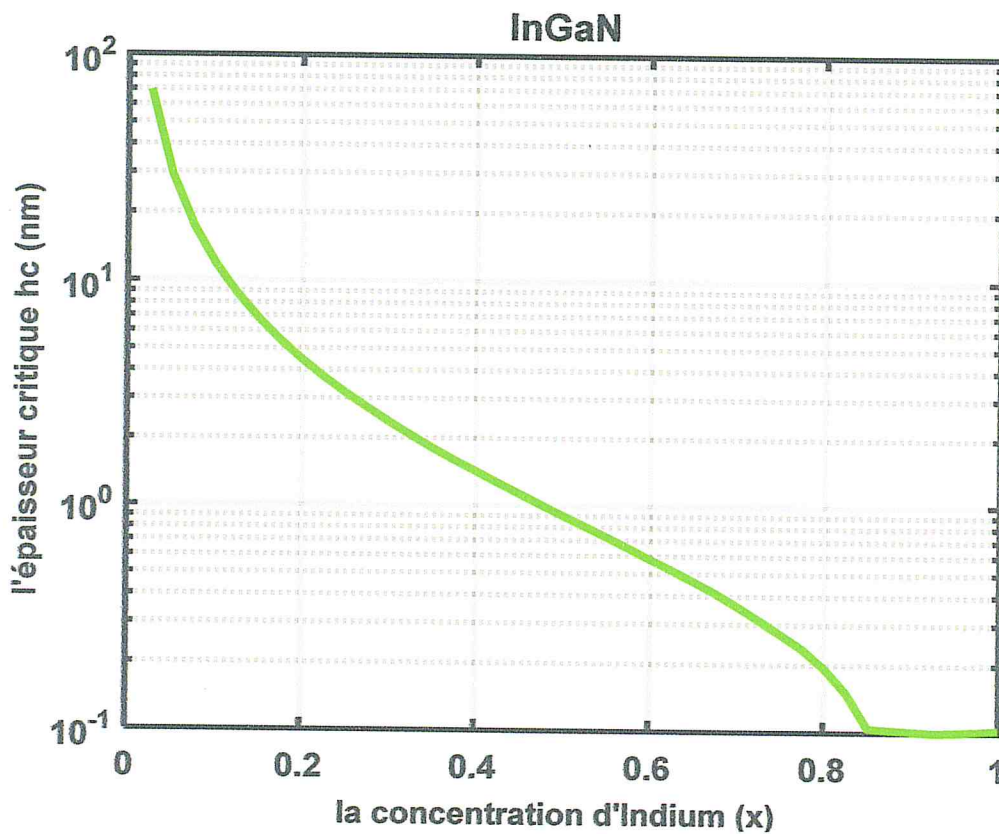


Figure 3.3 : la variation de l'épaisseur critique de InGaN avec la concentration de l'indium.

## Résultats et discussion

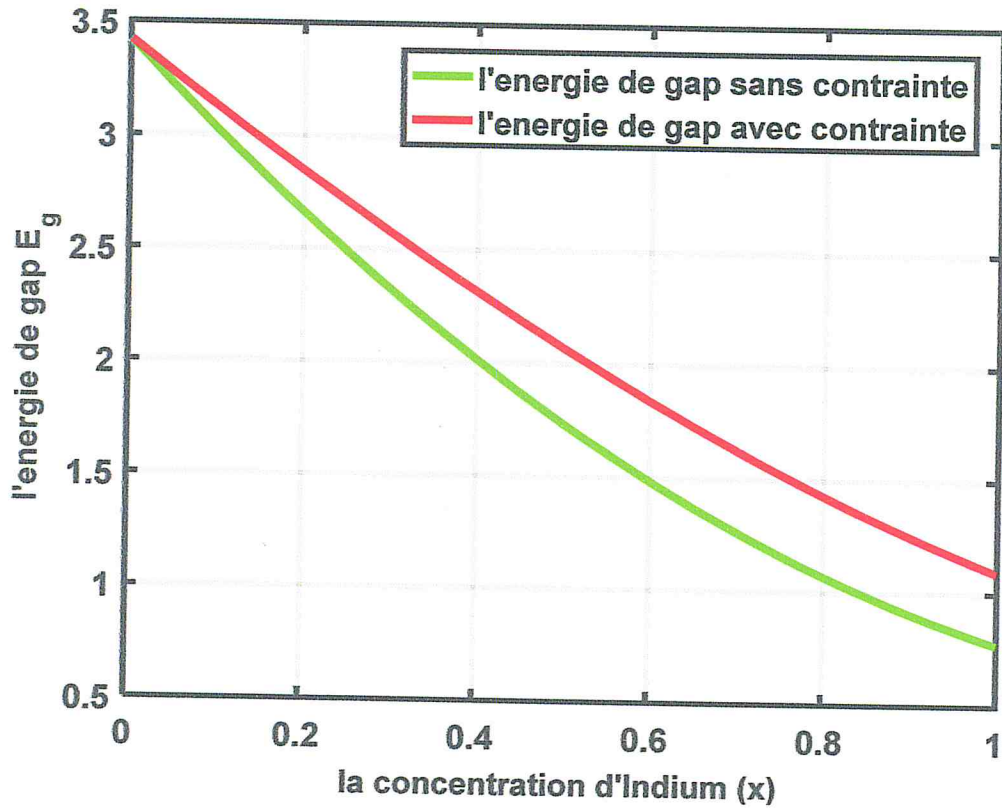
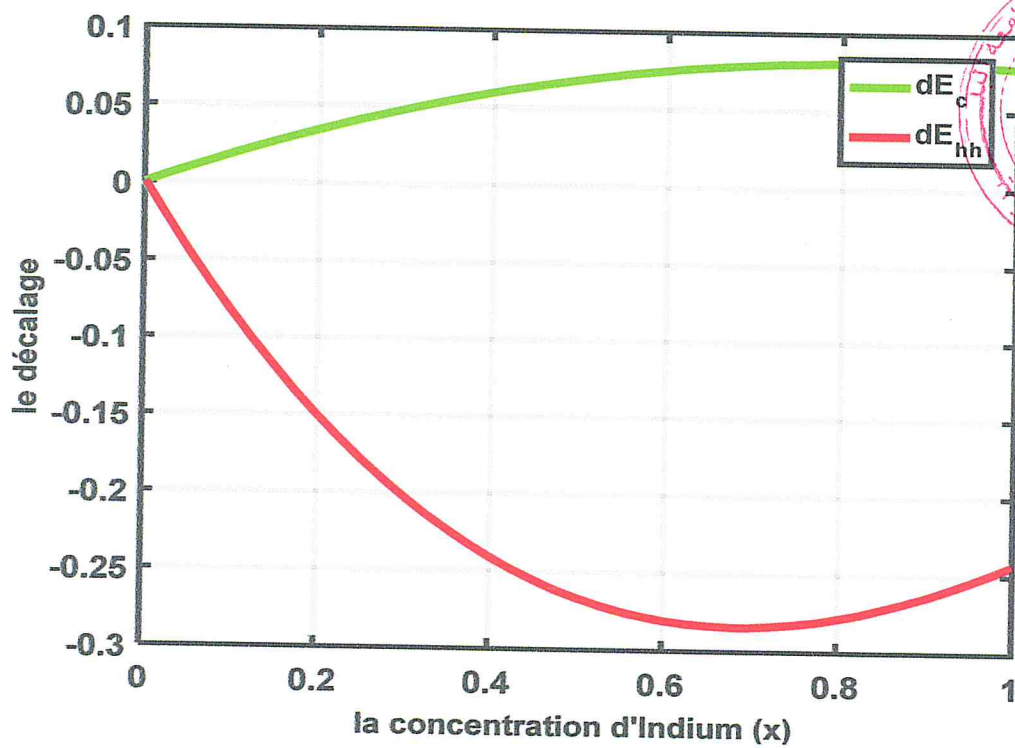


Figure 3.4 : illustrer les deux graphes avant et après l'épitaxie



La figure 3.5 : la variation de  $dE_c$  et  $dE_{hh}$  en fonction de l'indium



## Conclusion générale :

Dans cette mémoire, on a étudié les notions générales de semi-conducteurs et les caractéristiques électriques de la cellule solaire photovoltaïque et les cellules solaires à multi jonction. Donc principalement avoir une idée sur les concepts généraux des nouveaux matériaux utilisés dans la construction des cellules solaires et ceci par l'étude de l'effet la variation de la concentration d'indium dans la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  sur les propriétés optoélectroniques tel que le paramètre de maille, la contrainte, l'énergie de gap et le coefficient d'absorption. En effet on a appliqué plusieurs modèles théoriques, et les résultats sont montre que la structure  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  est promotrice pour les cellules solaires mono et multijonction.

Dans le premier chapitre est consacré pour l'étude des semi-conducteurs d'une façon générale où on va les définir, puis les semi-conducteurs III-V, après l'étude des propriétés optoélectroniques des semi-conducteurs III- V.

Le deuxième chapitre est divisé sur deux partie, la première partie a dédié de l'étude des cellules solaire, définition, historique et son principe où on va définir puis on va parler sur les cellules solaire multijonction dans la deuxième partie tel que la définition et ses composantes de ces cellules solaires.

Pour conclure, ce travail de thèse s'inscrit donc dans les différentes étapes du développement d'une cellule solaire, du matériau au composant.

## Bibliographie :

- [1]  
<http://www.edu.upmc.fr/uel/chimie/elements1/apprendre/gcb.eld.fa.101.a2/content/access.htm>
- [2] <https://www.edfenr.com/lexique/semi-conducteur/>
- [3] S. Ismat Shah, D. Glocker, « Handbook of Thin Film Process Technology », Institute of Physics Publishing Bristol & Philadelphia, 1995.
- [4] [http://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/propri\\_semiconducteurs\\_2.htm](http://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/propri_semiconducteurs_2.htm) ct
- [5] - P. Faller, Thèse de doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg (1993).
- [6] L.I. Popova, M.G. Michailov, V.K. Gueorguiev and A. Shopov, Thin Solid Films 186,259-262 ; 1990.
- [7] A. Ouazzane, S. Gautier, C. Sartel, J. Martin, S. Hamady. Epitaxial growth of III-Nitride materials for short-wavelength (200 to 400 nm) light meeting optoelectronic devices
- [8] File : Isolator-metal-semicond-fr.svg
- [9] A.E Merad, Thèse de Doctora "Semi Empirical and Ab initio States of Tellurium- Based II-VI Semiconductors, under Stress and Doped with Manganese". University Abou-Bekr BELKAIDTLEMEN.(2004).
- [10] T. Takano, M. Kurimoto, J. Yamamoto, H. Kawanishi, J. Cryst. Growth. 237/239 (2002) 972.
- [11] : BAGHDADLI Nawal, "Évolution du paramètre exciton de BOHR en fonction Des propriétés optoelectroniques des semi-conducteurs III-V", thèse doctorat, université ABOUBAKR BELKAÏD – TLEMEN, 2013.
- [12] : Annaïg DENIS, " élaboration, cristallogénèse et caractérisations physico-chimiques des nitrures des éléments de la colonne IIIA et en particulier de GaN, "thèse doctorat, université de BORDEAUX I, 2003.



- [13] : Agnès PHILIPPE, "Caractérisation électrique et optique du nitrure de gallium Hexagonal et cubique en vue de l'obtention d'émetteurs bleus", thèse doctorat, l'institut National des sciences appliquées de Lyon, 1999.
- [14] : Olivier BONNAUD, "Composants à semi-conducteurs de la physique du solide aux Transistors", Ellipses, Paris 2006.
- [15] : Taleb Ibsen Yasser, "Etude des propriétés de quelques nitrures : Application aux Photodiodes ", mémoire de magister, université ABOU BAKR BELKAÏD – TLEMCEM, 2012.
- [16] : EL GMILI Youssef, ' Étude et caractérisations par cathodoluminescence de couches minces d'InGaN pour le photovoltaïque" thèse doctorat, l'Université de Lorraine & l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah–Fes, 2013.
- [17] : Samira BOUZID-DRIAD, "Réalisation et caractérisation de transistor HEMTS GaN pour des applications dans le domaine Millimétrique", thèse doctorat, université des sciences et technologies de Lille, 2013.
- [18] : Be-rnardini, F., Fiorentini, V. and Vanderbilt, D. Spontaneous polarization and piezoelectric Communications. 11, 1972, 617.
- [19] L. Vergard. Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome. Zeitschrift für Physik, 17-26.
- [20] Y.P. Varshni, Physica 34, 149 (1967)
- [21] M. Lopez (contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour une unité de production isolée), thèse de doctorant université PARIS SUD 11, 2008.
- [22] Wei, S.H. and Zunger, A. Predicted band-gap pressure coefficients of all diamond and zinc blende semi-conducteurs : Chemical trends. Physical Review B. 1999, Vol. 60, 5404.
- [23] S.M.SZE, "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons, 1981.

