

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BOUAKKAZA Hayet

&

HADJALLAH Fatima Zohra

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option théorie de l'information et système électronique

Thème

Etude et simulation d'une structure à base de GaInP/GaInAs/Ge pour le photovoltaïque

Proposé par : Mr. AISSAT Abdelkader

Co-promoteur : Mr. ELBEY Moussa

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions et louons notre Dieu, qui nous a permis de réaliser ce travail, puis nous remercions nos parents pour leur soutien permanent.

Nous remercions vivement les membres du jury pour nous honorer d'être examinateurs de notre modeste travail.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours d'une personne à qui nous voudrions témoigner toute notre reconnaissance.

Mr AISSAT Abdelkader notre promoteur qui nous a guidé pour aboutir à ce travail, et surtout il avait une patience remarquable avec nous.

Nous remercions du profond de notre Co-promoteur Mr EL-BEY Moussa.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à Mr. BESTAM RACHID pour toutes les facilités qu'on a eu pour avancer dans notre travail et aussi pour sa patience et sa gentillesse.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin.

Enfin, nous tenons à remercier très chaleureusement nos frères et sœurs, nos familles, nos collègues et nos amis.

Dédicaces

Je dédie humblement ce manuscrit à :

*Celle qui s'est toujours dévouée et sacrifiée pour moi ;
celle qui m'a aidée du mieux qu'elle pouvait pour réussir
; celle qui m'a accompagnée tout au long de ce parcours
périlleux ; celle qui a toujours été là dans mes moments
de détresse, ma très chère mère DJAMILA.*

*A celui qui m'a toujours encouragée et soutenue, mon
très cher père YOUCEF.*

*A celle qui m'a toujours ouvert ses bras et soutenue dans
tout ce que j'ai entrepris, celle qui a su être bonne,
gentille et compréhensive avec moi, ma très chère sœur
KHADIDJA.*

*A mes très chers frères MOHAMED et MEHDI qui
m'ont énormément aidée et à qui je témoigne mon
affection et ma profonde reconnaissance, sans oublier
MOUNIR mon tout petit frère.*

*A celles qui m'ont toujours aidée, écoutée, soutenue et
encouragée tout au long de mon parcours ; celles qui ont
toujours été présentes pour moi, mes très chères cousines
SOUMIA, HADJER, SORAYA, SABRINE et MARWA*

A Tout mes amis et tous ceux qui me sont chères.

Fatima ZOËRA

الملخص

هذا العمل يتناول محاكاة لهيكل أساسه أنصاف النواقل و هذا لتطبيق ضوئي . درسنا أولاً تأثير تركيز الأنديموم على مختلف معايير السبائك GaInAs و GaInP النامية على ركيزة الجرمانيوم Ge . في الواقع الزيادة في كثافة الأنديموم يقلل من الفجوة في السبيكة و هو مثير للاهتمام لامتناس الحد الأقصى من الطيف الشمسي. الدراسة تشمل الرسوم البيانية لتأثير تركيز الأنديموم على السبائك $Ga_{(1-x)}In_xP$ و $Ga_{(1-y)}In_yAs$ المشكلة لخلايتنا لتحديد خصائصها الفيزيائية و الكهربائية و تحسين تركيزات الأنديموم إلى قيمة 74% التي تعطي أعلى قيمة للمردود و هي 30% من تحويل الطاقة الضوئية.

كلمات البحث: تطبيق ضوئي. مردود. أنصاف نواقل .

Résumé :

Ce travail porte sur la simulation d'une structure à base des semi-conducteurs pour une application photovoltaïque. Nous avons étudié d'abord l'influence de la concentration d'indium sur les différents paramètres de l'alliage GaInAs et GaInP épitaxie sur substrat de Ge. En effet l'augmentation de la densité d'indium diminue le gap de l'alliage, ce qui est très intéressant pour absorber le maximum de spectre solaire.

L'étude porte sur l'impact de la concentration d'indium sur les alliages $Ga_{(1-x)}In_xP$ et $Ga_{(1-y)}In_yAs$ qui constituent notre cellule à double hétérojonction afin de déterminer leurs caractéristiques physiques et électriques et optimiser les concentrations d'indium de 74% qui donnent un rendement maximal de 30% de conversion photovoltaïque.

Mots clés : photovoltaïque, rendement, semi-conducteur.

Abstract :

This work deals with the simulation of structure-based semiconductors for photovoltaic application. We first studied the influence of the concentration of indium on the various parameters of the alloy GaInAs and GaInP epitaxial growth on Ge substrate. Indeed, the increased density of indium decreases the gap of the alloy, which is very interesting to absorb maximum solar spectrum.

The study includes the impact of the concentration of indium alloys $Ga_{(1-x)}In_xP$ and $Ga_{(1-y)}In_yAs$ which is our Double heterojunction cell to determine their physical and electrical characteristics and optimize indium concentrations giving a 30% yield of photovoltaic conversion.

Keywords: photovoltaic ,Efficiency ,semiconductor.

Listes des acronymes et abréviations

SYMBOLE	DESCRIPTION
SC	semi-conducteur
Pv	Photovoltaïque
Ga	Gallium
In	Indium
Ge	Germanium
P	Phosphore
As	Arsenic
E_{hh}	Niveau d'énergie des trous lourds
E_{lh}	Niveau d'énergie des trous légers
α	Coefficient d'absorption
n	Indice de réfraction
R	Coefficient de réflexion
a_s	paramètre de maille de substrat
a_e	paramètre de maille
L_c	l'épaisseur critique
a	paramétré de maille
ε	Déformation hydrostatique
E_g	Gap contraint
μ	la mobilité

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I: état de l'art	
I.1 Introduction	3
I.2 Les semi-conducteurs	3
I.2.1 généralités.....	3
I.2.2 Les composés binaires, ternaires des S-C III/V	4
I.2.2.1 Les composés binaires	4
I.2.2.2 Les composés ternaires.....	5
I.2.3 la structure cristalline	5
I.2.3.1 la structure diamant.....	5
I.2.3.2 la structure zinc blende.....	6
I.2.6 Semi-conducteur extrinsèque : dopage	7
I.2.6.1 semi-conducteur dopé n.....	7
I.2.6.2 semi-conducteur dopé p.....	9
I.3 Le cellule photovoltaïque	10
I.3.1 Histoire	10
I.3.2 Le soleil	10
I.3.3 Le spectre solaire	10
I.3.4 L'énergie solaire photovoltaïque	12
I.3.5 Principe de fonctionnement de la cellule PV.....	12
I.3.6 Collecte des charges	13
I.4 La cellule multi-jonction.....	14
I.4.1 généralités.....	14
I.4.2 les cellules multi-jonctions	15
I.4.3 Les cellule multi-jonctions en couche mince.....	16

I.5 Conclusion	16
----------------------	----

Chapitre II : Etude de la structure GaInP/GaInAs/Ge

II.1 Introduction	18
-------------------------	----

II.2 Les caractéristiques physique d'une cellule photovoltaïque.....	19
1. Les paramètres de maille.....	19
2. Epaisseur critique	22
3. L'énergie de bande interdite d'un semi-conducteur	22
4. Effet de la contrainte.....	24
5. Effet de la contrainte sur le gap.....	24
6. Étude du coefficient d'absorption	28
7. Coefficient de réflexion	28
8. Les coefficients élastiques	28
9. les longueurs d'onde absorbées	30

II.3 paramètres essentiels caractérisant une cellule solaire.....	30
-------------------------------------------------------------------	----

1. le courant déclarèrent	30
2. la zone de dépilation	31
3. tension de circuit ouvert	32
4. la puissance maximal Pm	32
5. efficacité cantique EQM.....	32
6. Facteur de forme	33
7. Le rendement de conversion d'énergie	33

II.4 Les propriétés optiques.....	33
-----------------------------------	----

II.5 Conclusion	34
-----------------------	----

Chapitre III : résultats et simulation

III.1 Introduction	35
--------------------------	----

III.2 simulation de la structure $Ga_{(1-x)}In_{(x)}As/Ge$	36
------------------------------------------------------------------	----

1. Paramètre de maille du ternaire $\text{Ga}_{(1-x)} \text{In}_{(x)} \text{As}$	36
2. Le désaccord de maille	37
3. Simulation de l'épaisseur critique	38
4. L'influence de la concentration d'indium sur l'énergie de Gap.....	39
5. L'effet de la contrainte sur le coefficient d'absorption	40
6. Spectre absorbé	41
7. L'efficacité quantique (EQE)	42
8. Caractéristique courant-tension	42
9. Courant de court circuit, la tension de circuit ouvert et facteur de forme.....	43
10. Rendement de la structure	45
11. Récapitulation.....	45
III.3 simulation de la structure $\text{Ga}_{(1-y)} \text{In}_{(y)} \text{P/GaInAs}$	46
1. Paramètre de maille du ternaire $\text{Ga}_{(1-x)} \text{In}_{(x)} \text{As}$	46
2. Le désaccord de maille	46
3. Simulation de l'épaisseur critique	47
4. L'influence de la concentration d'indium sur l'énergie de Gap.....	48
5. Spectre absorbé	49
6. L'effet de la contrainte sur le coefficient d'absorption	50
7. L'efficacité quantique (EQE)	50
8. la tension de circuit ouvert	51
9. facteur de forme	52
10. Rendement de la structure	53
11. Récapitulation	53
III.4 conclusion	54
Conclusion générale	55
Bibliographie	56

Liste des figures

Chapitre I :

Figure (I.1) : les réseaux possibles d'un cristal cubique.....	5
Figure (I.2) : représentation des minima de la bande de conduction du Si et de Ge...	6
Figure (I.3) : la structure cristalline de type zinc blende.....	7
Figure (I.4) :Semi-conducteur composé GaIn	7
Figure (I.5.a) : germanium dopé n ou bore à (T=0 K)	8
Figure (I.5.b) : germanium dopé n ou bore à (T ≠0 k).....	8
Figure (I.6.a) : silicium dopé p ou bore à (T=0 K)	9
Figure (I.6.b) : silicium dopé p ou bore à (T ≠0 k).....	9
Figure (I.7) : Schéma représentant les conditions AM _{0,5} , AM ₁ et AM _{1,5} (gauche) et le spectre d'émission solaire aux conditions AM ₀ et AM _{1,5}	11
Figure (I.8) : image d'une cellule et panneau et champ photovoltaïque.....	12
Figure (I.9) : schéma de la structure d'une cellule PV	13
Figure (I. 10)-schéma de principe de la conversion photovoltaïque.....	14
Figure (I.11) : Principe de la cellule à hétérojonction.....	15
Figure (I.12) : Cellule Tandem a-Si/μc-Si & spectre solaire et spectres d'absorption....	16

Chapitre II :

Figure (II.1) : schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et une couche contrainte relaxée(b).....	19
Figure (II.2) : déformation tétragonale d'une Couche épitaxiée sur un substrat de paramètre de maille différent.....	22
Figure (II.3):structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct.....	23
Figure (II.4) : Taux de réflexion.....	27
Figure (II.5) : Courbe I(V) et puissance maximale.....	30
Figure (II.6) : Courbe I(V) à T=25 et un éclairnement de 1000W/m ²	31
Figure (II.7) : Influence de l'éclairnement	32
Figure (II.8) : Influence de l'éclairnement sur la courbe Puissance(V).....	33

Chapitre III :

Figure (III.1) : schéma d'une structure à base de GaInP/GaInAs/Ge.....	34
Figure (III.2) : paramètre de maille de GaInAs en fonction de la concentration.....	35
Figure (III.3) : Variation du désaccord de maille en fonction de l'indium	36
Figure (III.4) : Variation de l'épaisseur critique de la couche GaInAs contraint sur Ge en fonction de la concentration d'indium	37
Figure (III.5) : la variation du gap de l'alliage Ga(1-x)In(x)As contraint sur le substrat Ge en fonction de la concentration d'indium	38
Figure (III.6) Variation du coefficient d'absorption en fonction de la concentration d'indium pour plusieurs énergies du photon incident	39
Figure (III.7): Spectre absorbé par GaInAs Contraint sur Ge pour plusieurs valeurs d'indium.....	40
Figure (III.8) : Variation de l'efficacité quantique en fonction de la concentration d'indium	41
Figure (III.9) : caractéristique courant-tension pour plusieurs concentrations d'indium	42
Figure (III.10): Variation de J_{cc} et V_{CO} en fonction de la concentration d'indium	43
Figure (III.11): variation de FF en fonction de la concentration d'indium	43
Figure (III.12) : Rendement en fonction de la concentration d'indium.....	44
Figure (III.13) : paramètre de maille de GaInP en fonction de la concentration d'indium	45
Figure (III.14) : Variation du désaccord de maille en fonction de l'indium	46

Figure (III.15) :L'épaisseur critique en fonction de la composition x de l'indium	47
Figure (III.16): Variation du gap en fonction de la concentration	48
Figure (III.17):Spectre absorbé par GaInP Contraint sur Ge pour plisseurs valeurs d'indium.....	48
Figure (III.18) Variation du coefficient d'absorption en fonction de la concentration d'indium pour plisieurs energies du photon incident	49
Figure (III.19) : Variation du l'efficacité quantique en fonction de la concentration d'indium	50
Figure (III.20): Variation de V_{CO} en fonction de la concentration d'indium	51
Figure (III.21): variation de FF en fonction de la concentration d'indium	51
Figure (III.22): Rendement en fonction de la concentration d'indium	52

Liste des tableaux

Tableau (I.1) :

Paramètre des principaux composés binaires III-V à 300 K4

Tableau (II.1):

Paramètre de maille a des matériaux GaIn, GaP, InAs, InP, GaAs, Ge...18

Tableau (II.2) :

donnée le gab des alliages binaire20

Tableau(III.3) :

les coefficients d'élasticité des matériaux binaire.....28

Tableau (III.1) :

Le rendement, $V_{coetJcc}$ pour différents valeurs pour le premier programme53

Tableau (III.2) :

le rendement, $V_{coetJcc}$ pour différents valeurs pour le deuxième programme53

Introduction générale



Introduction générale

Introduction générale :

La consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter à cause du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication. Plus de 85% de la consommation mondiale repose sur les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, uranium). Cependant, ces ressources sont limitées et pourront difficilement satisfaire les besoins mondiaux. Aussi, le coût de cette énergie ne cesse d'augmenter en raison de la forte demande et de l'épuisement de la matière première (pétrole). Cette augmentation pousse les états à chercher de nouvelles voies de production et de consommation d'énergie afin de réduire leur dépendance vis-à-vis de ce combustible. À cette situation vient s'ajouter l'échauffement climatique de notre planète dû aux émissions de gaz à effet de serre induites par l'utilisation massive des énergies fossiles [1].

Les conséquences de l'utilisation des énergies fossiles, imposent la recherche d'autres sources d'approvisionnement. Parmi les choix qui satisfont le coût, la durabilité et qui respectent l'environnement, les énergies renouvelables apparaissent comme un bon compromis. Ce sont des énergies inépuisables fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la chaleur de la terre...etc. Leur exploitation n'engendre pas d'émissions polluantes. Parmi ces énergies de l'avenir, l'énergie solaire photovoltaïque qui permet de convertir directement le rayonnement du soleil en électricité occupe une grande place dans la recherche, et connaît une croissance de plus en plus importante depuis 1990. Cette recherche est orientée sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler

opposés : (augmentation du rendement de la cellule, et la diminuant le coût de production) [2].

Ce développement passe essentiellement par la maîtrise des matériaux utilisés dans la conception des composants. La plupart de ces matériaux sont obtenus par alliage sur des substrats standard. Ils pourraient à priori couvrir une large gamme de compositions et donc d'applications [3].

L'étude présentée dans ce mémoire, porte sur la simulation et la caractérisation d'une cellule triple jonction GaInP/GaInAs/Ge pour déterminer leurs caractéristiques physiques et électriques et optimiser les concentrations d'indium qui donnent le meilleur rendement de conversion photovoltaïque.

- Le premier chapitre est consacré aux notions fondamentales des matériaux semi-conducteurs III V et la description du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des paramètres physiques de l'alliage $Ga_xIn_{(1-x)}P/Ga_xIn_{(1-x)}As$ (paramètre de maille, désaccord paramétrique avec le substrat Ge, épaisseur critique, et coefficient d'absorption) et les différentes équations qui donnent ces paramètres.
- le troisième chapitre est consacré sur l'étude et la simulation de chaque paramètre caractérisant la cellule solaire pour aboutir à la fin au rendement de notre cellule triple-jonctions à base de GaInP/GaInAs/Ge.

Chapitre 1 L'état de l'art

I.1 Introduction

Le monde des semi-conducteurs est dominé, en termes de marché, par le silicium. Ce dernier a un gap indirect de 1.11 eV et a été l'un des premiers matériaux utilisés (avec le germanium) pour fabriquer des composants électroniques. Dans les années 1960, une nouvelle famille est apparue, celle des matériaux III-V (GaAs, InP, GaN, etc.). Les composants fabriqués à partir de ces semi-conducteurs, qui ont des propriétés physiques remarquables, jouent un rôle majeur dans les applications hyperfréquences, l'électronique de puissance, mais surtout dans le domaine de l'optoélectronique [04].

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter et définir quelques propriétés des semi-conducteurs III-V. Puis nous parlerons du photovoltaïque qui est l'une des nombreuses énergies alternatives actuellement disponibles. Et à la fin de ce chapitre on aura les cellules multi jonctions.

I.2 Les semi-conducteurs

I.2.1 Généralités

Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev.

L'intérêt de ces composés est encore renforcé par la possibilité de réaliser des alliages par la combinaison d'éléments appartenant à ces colonnes III et V.

On obtient ainsi des alliages ternaires de type $Ga_xIn_{1-x}P$, $Ga_xIn_{1-x}As$, $InAs_xP_{1-x}$, ou $In_xGa_{1-x}P$ et même quaternaires du type $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$. Il est possible de réaliser des matériaux dont la largeur de bande interdite, et donc les propriétés optiques, varient dans une très large gamme de longueurs d'ondes.

On considérera donc essentiellement les composés à base de gallium, ou d'indium, dont les propriétés sont les plus intéressantes [05].

I.2.2 Les composés binaires, ternaires des S-C III/V

I.2.2.1 Les composés binaires

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 dont les quels la bande interdite est large et indirecte, et dans lesquels la masse effective des électrons est élevée.

Les composés contenant du bord, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie; ils ont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs ou pour l'optoélectronique ou 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 base de Gallium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs,InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes. Le tableau (1-1) résume quelques paramètres pour différents matériaux de la famille III-V [06].

Tableau (I.1) :Paramètres des principaux composés binaires III-V à 300 K.

Composé III-V	Eg (ev)	m*/m0	μ (cm ² /VS)	a (A°)
GaP	2,26	0,82	110 5	5,4512
GaAs	1,42	0,067	8500	5,6533
InP	1,35	0,077	4600	5,8686
InAs	0,36	0,023	33000	6,0584

I.2.2.2 Les composés ternaires

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 qui sont identifiés de la façon suivante : $A_xA'_{(1-x)}B$.

Exemple: $Ga_xIn_{(1-x)}P$, $GaInP$.

I.2.3 structure cristalline

La plupart des semi-conducteurs cristallisent selon un système cubique. Le système cubique comprend trois réseaux différents possibles, selon la disposition des atomes comme l'indique la figure (I.1) :

- Cubique simple : les atomes sont aux sommets du cube.
- Cube centré : identique au cubique simple mais avec un atome au centre du cube.
- Cube face centrée : identique au cubique simple mais avec un atome au centre de chaque face [07].

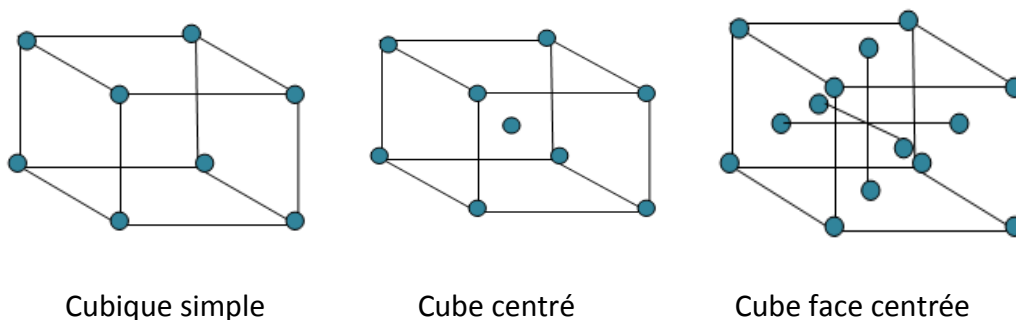


Figure (I.1) : les réseaux possibles d'un cristal cubique

I.2.3.1 La structure diamant

Dans la structure diamant chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, ce qui permet de former des liaisons covalentes. Elle peut être décrite comme étant formée de 2 structures c.f.c (cubique à faces centrée). Déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale.

La position de l'origine de la seconde structure c.f.c. par rapport à l'origine de la première est $(1/4, 1/4, 1/4)$. Le diamant cristallise dans cette structure, mais aussi le Silicium et le Germanium.

La structure de bande du Silicium a été l'objet de plusieurs études qui ont permis de connaître avec une grande précision. Le minimum de la bande de conduction du silicium est dans la direction $[010]$ et donc, par symétrie, aussi dans les directions $[0\ 10]$, $[001]$, $[00\ 1]$, $[100]$, $[100]$ soit au total six minima.

Au contraire, pour le germanium, le minimum de la bande de conduction a lieu dans les directions correspondant aux diagonales du cube, donc nous sommes en présence de 8 minima [08].

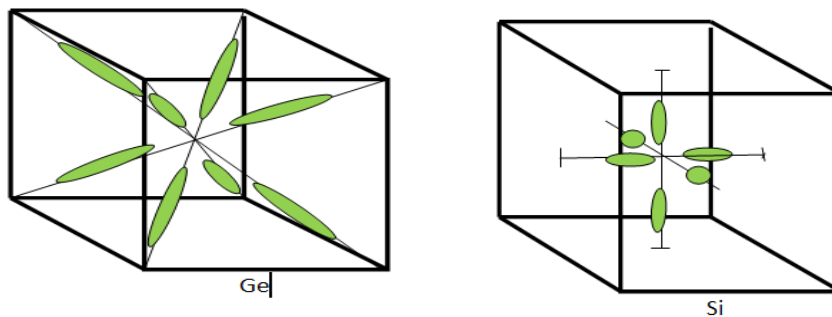


Figure (I.2) : Représentation des minima de la bande de conduction du Si et du Ge

I.2.3.2 la structure Zinc blende

La majorité des semi-conducteurs utilisés dans les applications électroniques (Si, autrefois Ge) ou optoélectroniques (composés dits III-V comme le GaAs ou l'InP) sont basés sur la même structure cristallographique: celle du diamant (Si, Ge) ou la structure zinc-blende (GaAs, InP).

La structure diamant est formée par deux réseaux cubiques faces centrées interpénétrés à la coordonnée $(1/4a; 1/4a; 1/4a)$, où a est la longueur de la face du cube du réseau considéré comme l'indique figure (I.3). Dans le cas de la structure du diamant, ces deux réseaux ont le même motif (un atome de Si ou Ge), alors que dans le cas de la structure zinc-blende, un réseau portera l'atome de Ga (prenant l'exemple du GaAs) et l'autre l'atome d'arsenic. Cette structure est représentée soit en perspective, soit en projection sur un plan formé par une des faces du cube. Une manière de le faire est de représenter une projection de ce cristal sur le plan, en indiquant les coordonnées [09].

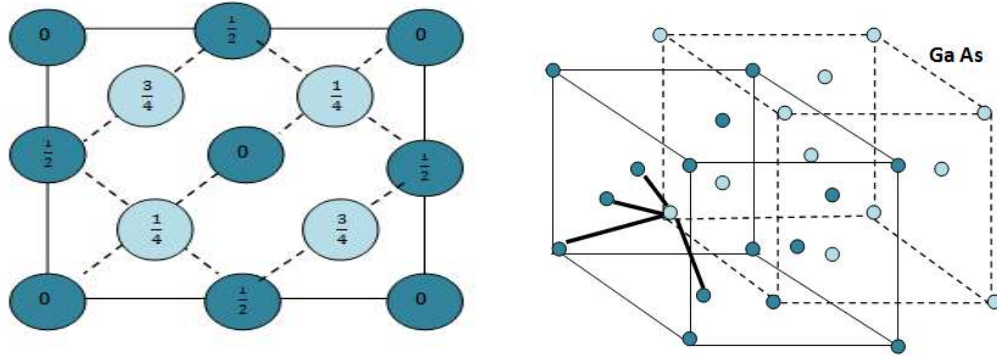


Figure (I.3) : la structure cristalline de type zinc blende

Un type de liaisons très proche de celui qui vient d'être décrit peut aussi se faire entre atomes de nature différente par exemple entre le Gallium ($Z=31$) et l'Arсениc ($Z=33$).

La figure (I.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 Ga^- et As^+ qui ont tous quatre électrons périphériques

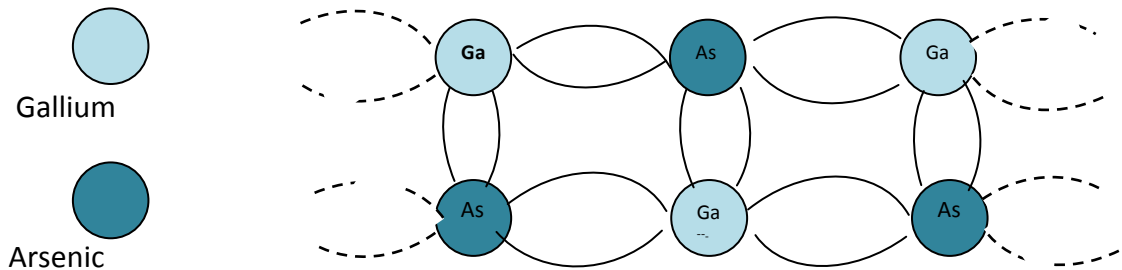


Figure (I.4) : semi-conducteur composé GaAs

I.2.5 Semi-conducteur extrinsèque (dopage)

L'introduction de certaines impuretés dans un matériau semi-conducteur permet d'y modifier le nombre de porteurs libres, de choisir le type de conduction (par électrons ou par trous) et de contrôler la conductivité.

I.2.5.1 Semi-conducteur dopé n

Pour un tel des atomes(ou impuretés) de type donneurs (d'électrons) ont été introduits(en général en faible quantité) afin de privilégier la conduction par

électrons plutôt que par trous. Les atomes peuvent être de la colonne V si le cristal initial est constitué d'atomes de la colonne IV. La figure (I.5) donne l'exemple du germanium dopé au phosphore qui possède cinq électrons sur la couche externe. Les quatre atomes voisins du germanium "prêtent" un électron chacun à l'atome de phosphore qui lui-même met en commun quatre de ses cinq électrons périphériques. Un faible apport d'énergie (0.04 eV), par exemple dû à une température différente de 0 K, peut « libérer » le cinquième électron de l'atome de phosphore figure (I.5.a) qui se retrouve alors ionisé positivement (charge fixe). Ce phénomène correspondant à l'apparition d'un niveau d'énergie E_d dans la bande interdite (avec $E_c - E_d = 0.04$ eV), représenté à la figure (I.5.b). Les atomes d'impuretés s'ionisent progressivement avec l'augmentation de la température et à partir d'environ 50 K toutes les impuretés sont « dégelées » [07].

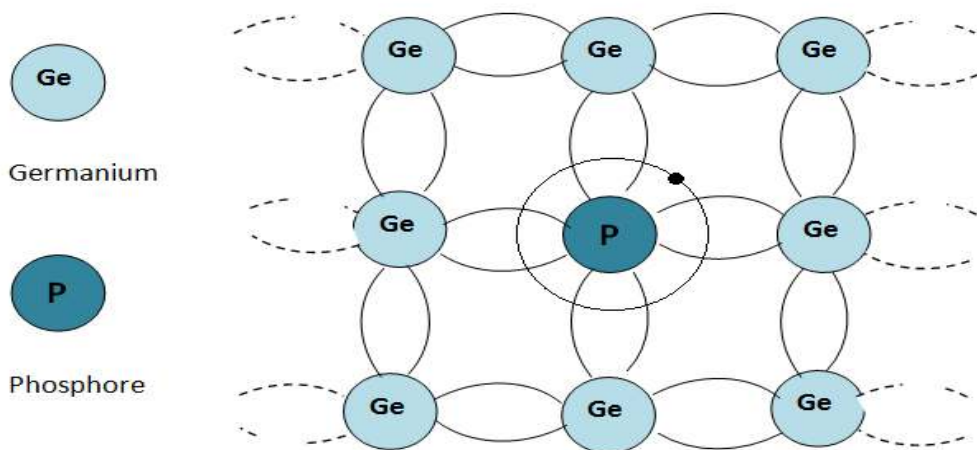


Figure (I.5.a) : germanium dopé au phosphore à $T=0K$

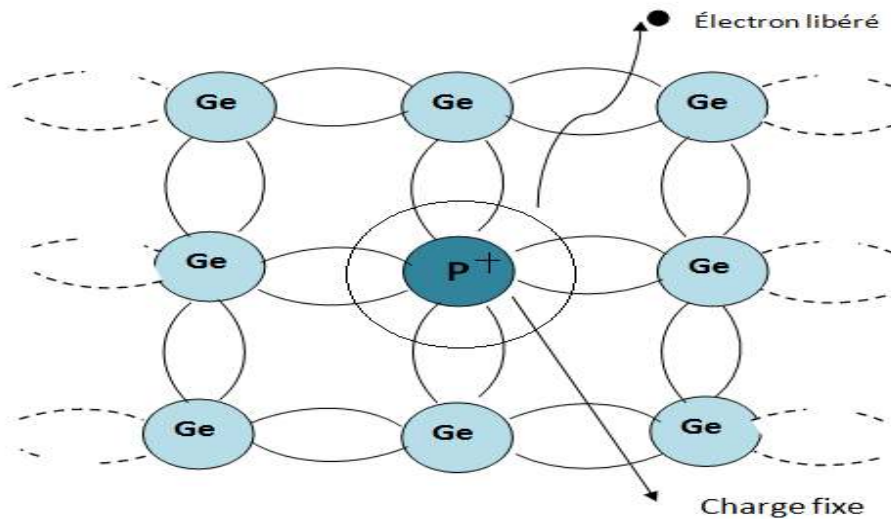


Figure (I.5.b) : germanium dopé au phosphore à ($T \neq 0$ K)

I.2.5.2 Semi-conducteur dopé P

Cette fois les impuretés sont de type accepteur d'électrons ce qui correspond aux atomes de la colonne III pour un cristal constitué d'atomes de la colonne IV. La figure (I.6.a) donne un aperçu de ce qui se passe pour un cristal de germanium dans lequel on a introduit des atomes de bore.

L'association avec ses quatre voisins confère à l'atome de bore sept électrons sur la couche externe ce qui est insuffisant pour le rendre stable et il est alors tenté d'en subtiliser un à un proche voisin qui lui-même peut en prendre un à un de ses voisins et ainsi de suite. Pour cela il faut un apport minimum d'énergie qui peut être fourni par les vibrations thermiques du cristal : le bore se retrouve ionisé négativement (charge fixe) et on assiste au déplacement d'un trou (libre) d'atome en atome. figure (I.6.b)[07].

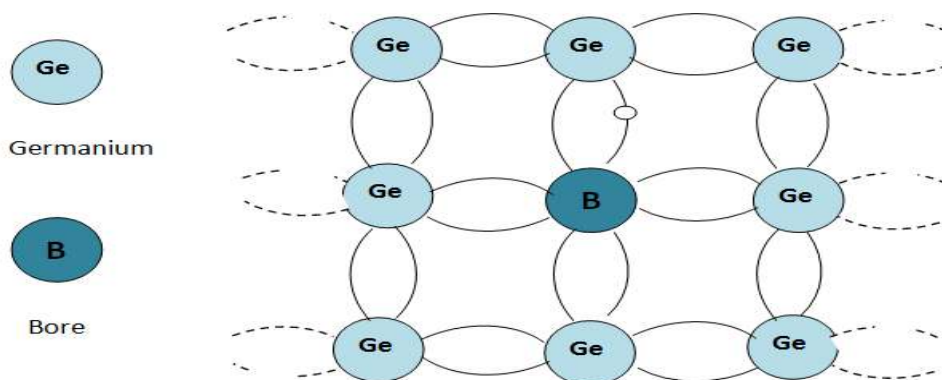


Figure (I.6.a) : germanium dopé au bore ($T=0$ K)

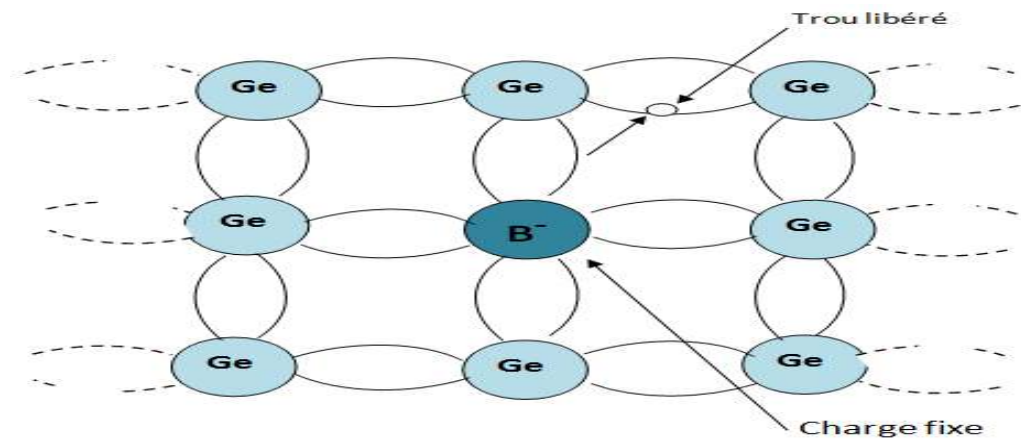


Figure (I.6.b) : germanium dopé au bore ($T \neq 0$ K)

I.3 Le cellule photovoltaïque

I.3.1 Histoire

Le terme photovoltaïque provient de photo qui signifie lumière, et de voltaïque qui signifie électricité, désignant donc la production d'électricité à partir de lumière. L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine Becquerel en 1839, Einstein expliqua ce phénomène en 1912 (et obtint le prix Nobel de physique sur ses travaux en 1921). En 1954, trois chercheurs américains (Char pin, Pearson et Price) des laboratoires BELL mirent au point la première cellule photovoltaïque au silicium avec un rendement de 4%. D'abord une curiosité de laboratoire, les cellules photovoltaïques virent leur première application pour obtenir de l'énergie électrique pour un satellite Vanguard en 1958. Une première maison alimentée par des cellules photovoltaïques fut construite par l'université de Delaware aux états Unis en 1973. En 1983, l'australien Hans Tholstrup construit le "Quiet Achiever", première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourant une distance de 4 000 km en Australie [10].

I.3.2 Le soleil

Le Soleil est une étoile, dont le diamètre est de 1 391 000 km, son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800°K. Il est situé à 150 millions Km de la

terre. Cette distance est grande, pourtant la lumière du soleil atteint la terre en seulement 8 minutes après avoir été émise. Pour rappel, la lumière a une vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s, c'est-à-dire qu'elle peut faire 7 fois le tour de la terre en 1 seconde [11].

I.3.3 Le spectre solaire

Le spectre solaire représente la distribution spectrale de la puissance lumineuse provenant du soleil arrivant sur la Terre. Il est en général caractérisé par la « masse d'air » (quantité d'atmosphère) traversée.

Ainsi, le spectre AM0 est le spectre solaire lorsque la lumière a traversé l'atmosphère, le spectre AM1 est le spectre solaire après que la lumière a traversé une atmosphère. Le spectre reconnu comme « standard » est le spectre AM1,5 car il est proche des conditions d'ensoleillement rencontrées sous des latitudes moyennes. Les spectres AM0 et AM1,5 sont représentés sur la Figure (I.7). Le spectre AM0 est proche du spectre d'émission d'un corps noir à 5700K. Le spectre AM1,5 est très similaire au spectre AM0, à la différence près que des molécules présentes dans l'atmosphère ont absorbé certaines plages de longueurs d'ondes.

Parmi ces molécules, l'eau et le dioxyde de carbone sont majoritairement responsables de l'absorption dans l'infrarouge et l'ozone est responsable de l'absorption dans l'ultraviolet.

L'intégration des courbes AM0 et AM1,5 donne les puissances lumineuses totales incidentes qui sont respectivement de $1,36 \text{ kW/m}^2$ et $1,00 \text{ kW/m}^2$ (appelées respectivement constantes solaires hors atmosphère et après 1,5 atmosphères). Enfin, les différentes zones du spectre AM1,5 sont l'ultraviolet (sous 400 nm, 4,6% du total), le visible (entre 400 nm et 800 nm, 54,2% du total) et l'infrarouge (au-dessus de 800 nm, 41,1% du total).[12]

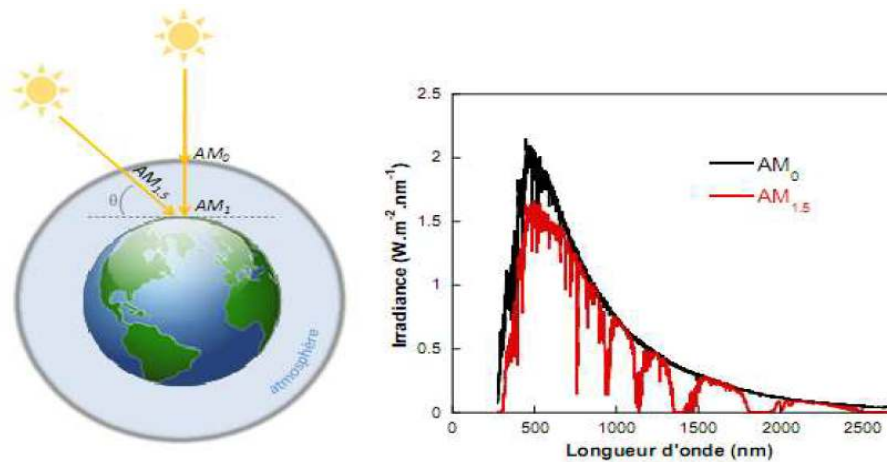


Figure (I.7) : Schéma représentant les conditions $AM_{0,5}$, AM_1 et $AM_{1,5}$ (gauche) et le spectre d'émission solaire aux conditions AM_0 et $AM_{1,5}$.

I.3.4 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque : désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire. (Ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. [10]



Cellule photovoltaïque

Panneau photovoltaïque

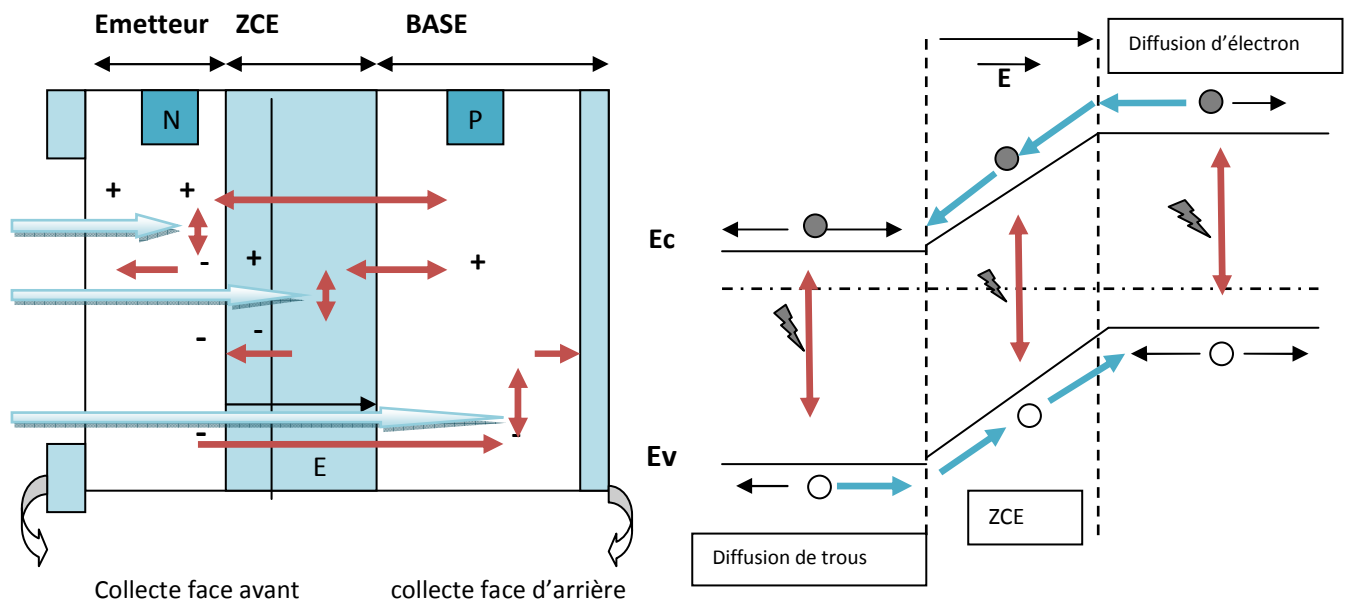
Champ photovoltaïque

Figure (I.8) : image d'une cellule, panneau et champ photovoltaïque

I.3.5 principe de fonctionnement de la cellule PV

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la (Figure 1.9). Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions N, P et la zone de charge d'espace. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres N et P, les photos porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique E vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photos porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion.

Dans la zone de charges d'espaces, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique E, l'électron est propulsé vers la région type N et le trou vers la région de type P. ces porteurs donnent naissance à un photocourant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité de la lumière [13].



a) phénomène de photo génération (b) collecte des porteurs pour différentes longueurs d'ondes.

Figure (I.9) : schéma de la structure d'une cellule PV

1.3.6 Collecte des charges

Une fois les charges électriques libérées (électrons chargés Négativement et trous charges positivement), il faut les séparer et les extraire hors du matériau semi-conducteur dans le circuit électrique.

La méthode utilisée pour créer ce champ électrique est celle du « Dopage » au moyen d'impuretés ; le dopage PN d'un matériau pur permet d'amener des charges électriques excédentaires qui améliorent sa conductivité [14].

La figure ci-dessus résume la conversion photovoltaïque.

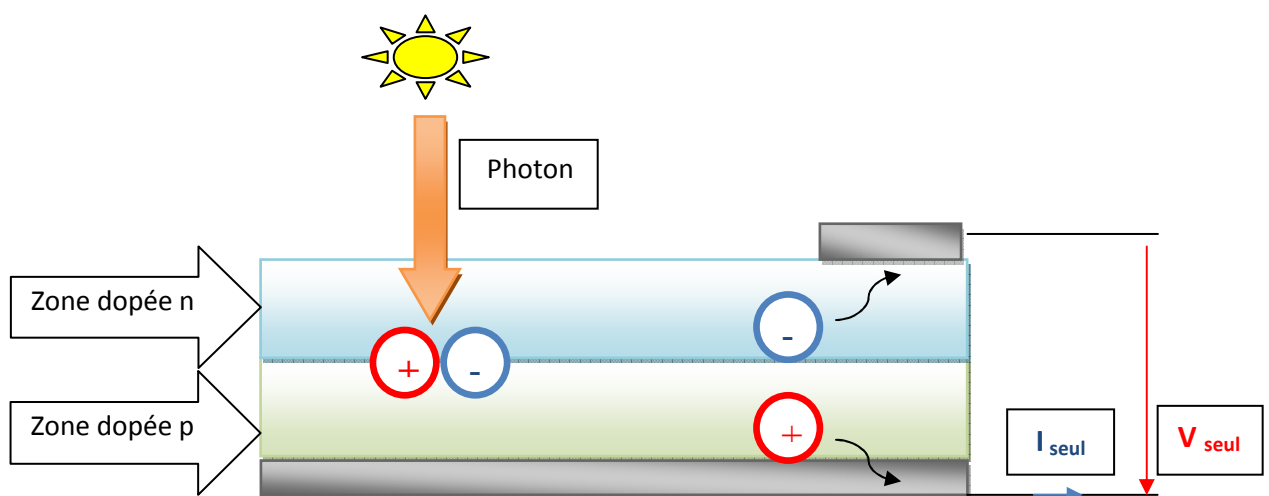


Figure (I.10) : schéma de principe de la conversion photovoltaïque

I.4 La cellule multi-jonction

I.4.1 Généralités

Le développement des systèmes de conversion photovoltaïques ces trente dernières années a permis des améliorations considérables en terme de coût et de performances. A ce jour les meilleurs rendements de conversion photovoltaïques sont obtenus avec des systèmes à concentration solaire utilisant des cellules multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V. Le record mondial dans ce domaine étant actuellement détenu par la société Spire avec un rendement de 42,3% mesuré sur une cellule multi-jonctions de type GaInP/GaAs/InGaAs bifaciale et pour un facteur de concentration du rayonnement solaire de 406. Précédemment en 2009, la compagnie SpectroLab (USA) avait obtenu un

rendement de 41,6% avec des cellules GaInP/GaInAs/Ge sous 364 soleils. Ces résultats bien qu'excellents, ont été obtenus pour des facteurs de concentration inférieurs à 500 soleils et à ce jour aucune cellule solaire n'a réellement été optimisée pour fonctionner avec des taux de concentration plus élevés (typiquement supérieur à 1000 soleils) [15].

I .4.2 .Les cellules multi-jonctions

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.

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, (Figure I.10). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants [15].

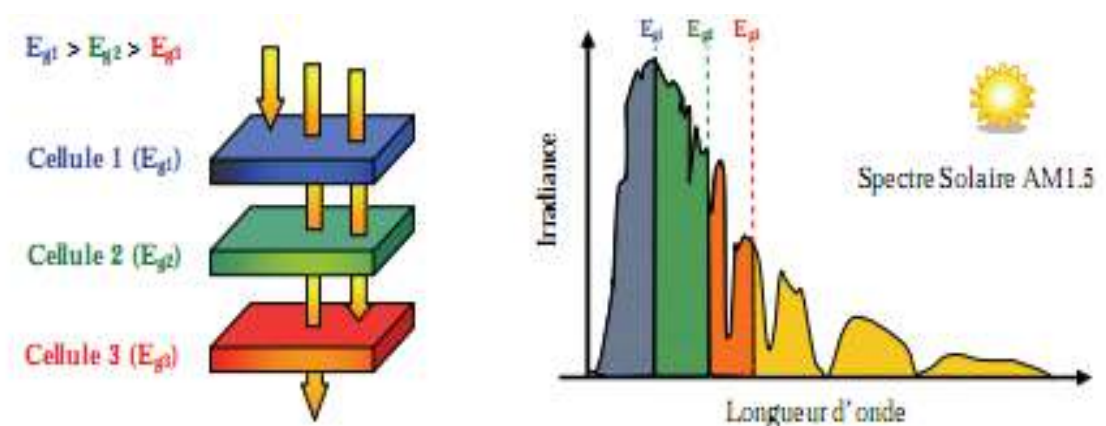


Figure (I.11) : Principe de la cellule à hétérojonction.

L'avantage à signaler pour ces cellules est leur robustesse vis-à-vis des radiations et des impacts. Au cours du temps, ces cellules ont démontré qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent très bien et qui peuvent produire de l'énergie même en ayant subi quelques détériorations. Le rendement des modules commercialisés contenant des cellules multi-jonction actuellement avoisine les 30% [16].

I.4.3 Les multi-jonctions en couche mince

Pour améliorer les performances des cellules couche-mince, des architectures double et triple jonctions ont été développées. Elles sont inspirées des cellules multi-jonction développées initialement pour le spatial pour bénéficier au maximum du spectre solaire. Elles présentent néanmoins une mise en œuvre plus simple et mieux maîtrisée aujourd'hui pour le marché terrestre. Nous pouvons citer par exemple les cellules tandem à base de silicium à la fois amorphe et polycristallin ($a\text{-Si}/\mu\text{c-Si}$). Les meilleurs rendements stabilisés en laboratoire sont de l'ordre de 12% pour ces cellules. Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes. Par ce mécanisme, l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Le procédé de fabrication est le même que pour les couches minces, les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma (PECVD) sur un substrat de verre [17].

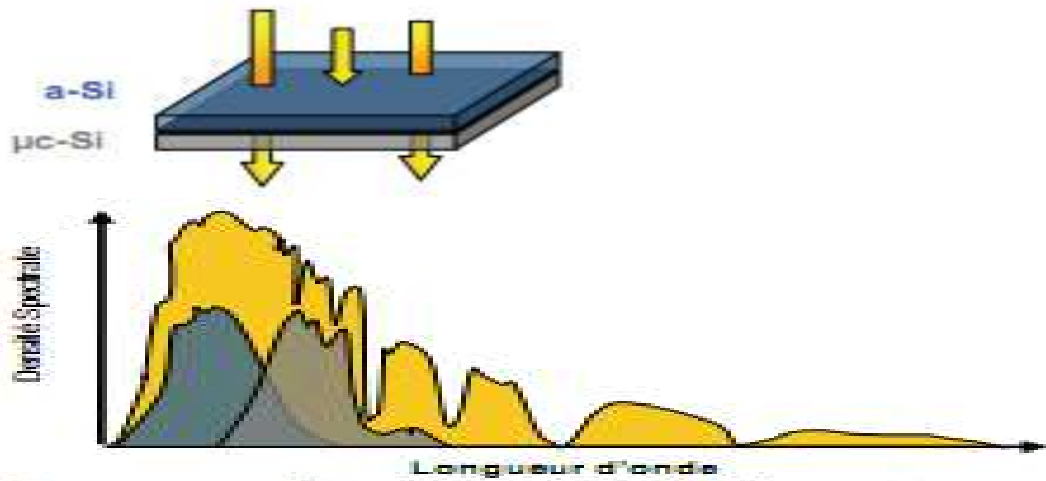


Figure (I.12). Cellule Tandem a-Si/ μ c-Si & spectre solaire et spectres d'absorption.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les notions fondamentales des semi-conducteurs III-V, en suite nous avons expliqué le principe de l'effet photovoltaïque, et à la fin la composition de la cellule solaire multi jonction et son fonctionnement.

Chapitre 2 Etude de la structure GaInP/GaInAs/Ge

II.1 Introduction

Le germanium a été découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1886, il peut être trouvé en beaucoup d'endroits, mais en concentrations faibles. Le germanium a servi de substrat semi-conducteur jusqu'à ce que le silicium prenne sa place, vers les années 1970. Aujourd'hui il n'est plus utilisé que dans le domaine des hautes fréquences, et pour la réalisation de diodes à faible chute (0,3 V environ, application en détection) [08].

Des enjeux économiques et scientifiques importants sont à l'origine d'une compétition faite de semi-conducteurs III-V apparus comme les matériaux de choix pour des applications spécialisées. Notamment l'arséniure de gallium (GaAs) et le phosphure d'indium (InP) se sont distingués par leur grande mobilité électronique et leur bande interdite directe. Leur grande mobilité électronique permet d'obtenir des dispositifs à haute rapidité de commutation en électronique, alors que leur bande interdite directe favorise les transitions optiques. Ces propriétés, communes à la plupart des matériaux III-V sont très prisées dans l'élaboration de dispositifs optoélectroniques.

L'objectif des travaux de recherche est alors d'élaborer de nouveaux matériaux basés sur la composition de semi-conducteurs ayant des propriétés que n'ont pas les semi-conducteurs purs.

II.2 Les caractéristiques physiques d'une cellule PV

1. Paramètre de maille

Le paramètre de maille définit la distance entre les atomes dans les réseaux cristallins. C'est un indicateur de compatibilité structurale entre différents matériaux.

L'adaptation de la constante de maille est importante pour la croissance de couches minces d'un matériau sur l'autre. Lorsque les deux constantes sont trop différentes, la couche subira des contraintes provoquant les défauts cristallins dans les couches épitaxiales. 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 binaires suivant la loi de Vegard [18].

Pour un alliage ternaire : $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, le paramètre de maille s'écrira ainsi:

$$a_{\text{GaInP}} = xa_{\text{GaP}} + (1-x)a_{\text{InP}} \quad (2.1)$$

Où a_{GaP} et a_{InP} sont respectivement les paramètres de maille des deux binaires GaP et InP.

Tableau(II.1): Paramètre de maille a des matériaux GaIn, GaP, InAs, InP, GaAs, Ge

	GaIn	GaP	InAs	InP	GaAs	Ge
$a(\text{Å})$	6.0954	5.6532	6.0584	5.8687	5.6532	5.66

Le tableau (II.2) donne le paramètre de maille des alliages binaires semi-conducteurs III-V utilisés dans ce travail.

2. Epaisseur critique

La croissance d'une couche contrainte sans une présence excessive de dislocations peut être obtenue si l'épaisseur de la couche est inférieure à l'épaisseur critique.

Si la différence de paramètre de maille est faible et l'épaisseur de la couche n'est pas trop grande, les atomes de part et d'autre de l'interface sont en parfait alignement. Cet écart de paramètre de maille est totalement accommodé par la déformation élastique de la couche épitaxiale. La croissance du film épitaxial est alors dite cohérente ou pseudo-morphique. L'énergie de déformation élastique dans la couche augmente d'une manière linéaire en fonction de l'épaisseur de la couche pseudo-morphique.

Lors de la croissance d'une couche contrainte épitaxiale, des dislocations sont générées à cause de l'énergie élastique stockée dans la couche et leur création devient énergétiquement favorable si l'épaisseur du film dépasse une épaisseur supérieure à l'épaisseur de la couche pseudo-morphique thermodynamiquement stable [19].

Cette épaisseur est définie comme l'épaisseur critique. L'épaisseur critique est calculée par Matthews et Blakeslee par la formule suivante [19] :

Où ν est le coefficient de Poisson.

$$\nu = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} \quad (2.2)$$

$$h_c = \frac{a_{epit}}{k \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \Delta_a} \times \frac{1 - (0.25 \cdot \nu)}{(1 + \nu)} \times \ln \left(\frac{h_c \cdot \sqrt{2}}{a_{epit}} + 1 \right) \quad 2.3$$

a_{epit} : paramètre de maille de la couche relaxée.

Δ_a : désaccord paramétrique.

C_{ij} : les coefficients élastiques (cm^{-2}).

K : est un coefficient égal à 1 dans le cas d'un super-réseau.

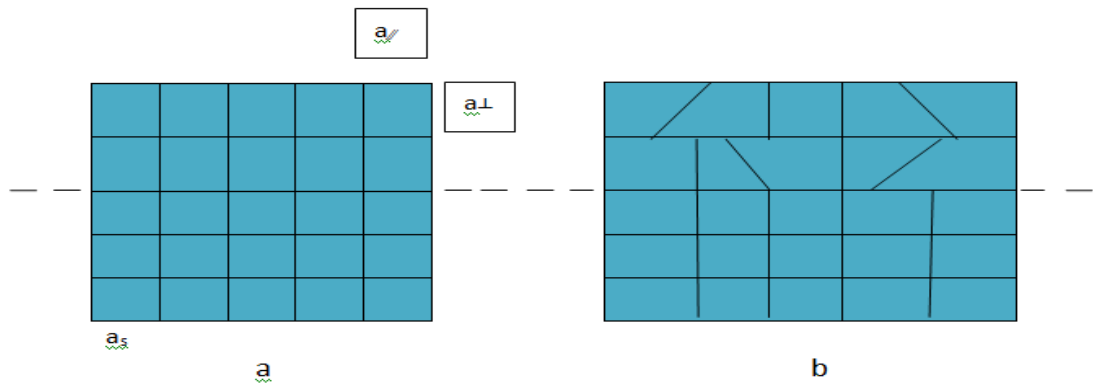


Figure (II.1) : schéma montrant une couche contrainte en compression (a) et une couche contrainte relaxée(b).

3. L'énergie de bande interdite d'un semi-conducteur

Le terme de gap apparait dans le cadre de la physique des semi-conducteurs lorsqu'on considère la bande de valence et la bande de conduction de ceux-ci. Entre les deux bandes se trouve un intervalle d'énergie dans lequel un porteur de charge ne peut pas se retrouver, il s'agit d'une bande interdite. L'intervalle d'énergie entre les deux bandes est ce qu'on appelle le gap.

Les semi-conducteurs sont caractérisés par un écart en énergie entre la bande de conduction B_c et la bande de valence B_v , appelée bande interdite ou gap . plus le gap est important plus le matériau est isolant .

Ce gap correspond à l'énergie nécessaire à fournir pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction .l'apport énergétique nécessaire à la transition est le plus souvent fourni par un photon ou par une excitation électrique, c'est sur ces transitions qu'est basée la technologie des panneaux photovoltaïque.

Les matériaux semi-conducteurs se divisent en deux types semi-conducteurs à gap direct et semi-conducteur à gap indirect [06].

a) Gap direct

Quand le minimum de la bande de conduction coïncide avec le maximum de la bande de valence dans l'espace des k , il s'agit d'un Gap direct.

b) Gap indirect

le maximum de la bande de valence ne coïncide pas avec le minimum de la bande de conduction dans l'espace des k .

Pour calculé l'énergie de GaInAs suivant la loi de Vegard :

$$E_g^{Ga_xIn_{1-x}P} = E_g^{GaIn}(1 - x) + E_g^{InP}x - x(1 - x)*b \quad (I.2)$$

Avec

b : paramètre de bowing

Tableau(II.2) : le gap des alliages binaires

	GaAs	GaP	InAs	InP	Ge
Eg(ev)(T=300)	1.51	2.86	0.41	1.35	0.74

4. Effet de la contrainte

Lors d'une croissance hétéro épitaxiale, la couche peut être déformée au-delà d'une certaine épaisseur à cause du désaccord du paramètre de maille entre la couche et le substrat ; le même phénomène peut se manifester si un désaccord entre les coefficients de dilatation thermique entre la couche épitaxiale et le substrat est présent.

Si l'épaisseur de la couche active est supérieure à une certaine épaisseur appelée épaisseur critique, les déformations induites par le désaccord de maille sont telles que la génération de dislocations au sein de la couche GaInP devient énergiquement favorable, autorisant ainsi la relaxation de la contrainte. Cette situation est catastrophique quant aux propriétés électroniques du matériau.

Si l'épaisseur de la couche active reste inférieure à l'épaisseur critique, le paramètre de maille du matériau GaInP peut s'adapter à celui du substrat dans le plan de croissance grâce à une déformation élastique de sa maille cristalline. La couche substrat, plus épaisse, reste non déformée.

La condition nécessaire à une bonne hétéro-épitaxie est évidemment que les deux matériaux aient d'une part la même structure cristalline et, d'autre part, des paramètres de mailles voisins.

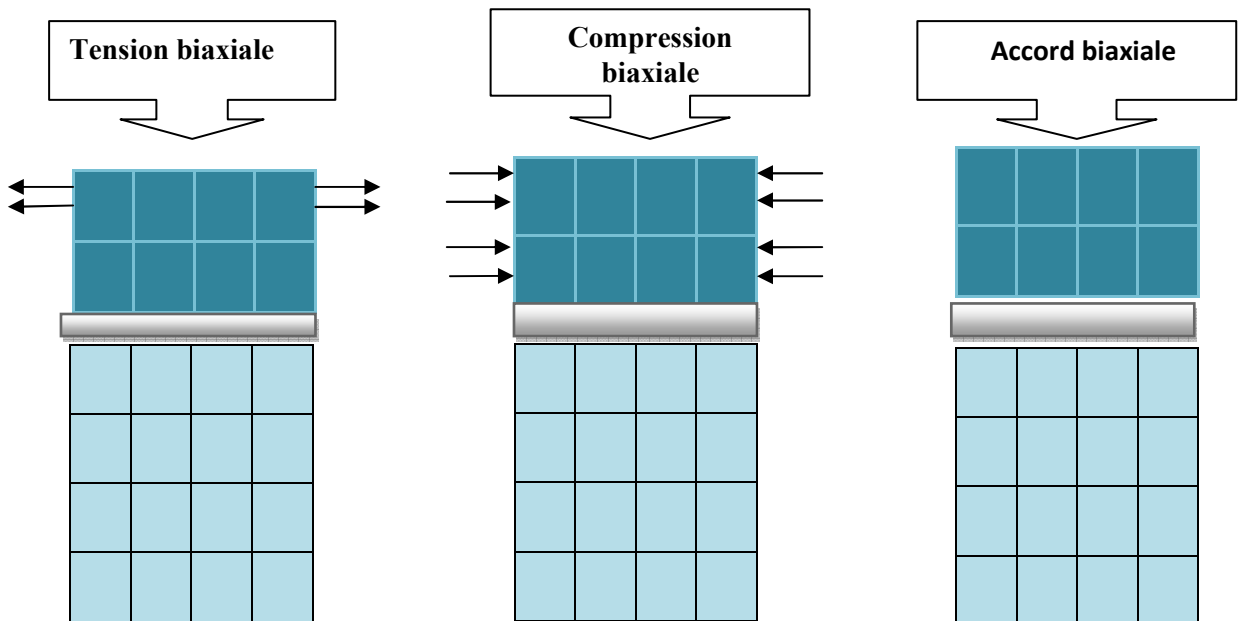
Lorsque les paramètres de mailles sont différents, le matériau constituant la couche de plus grande épaisseur impose sa maille à l'autre, au moins au voisinage de l'interface. Ceci entraîne l'existence, dans le matériau de faible épaisseur, d'une contrainte biaxiale dans le plan des couches. Prenons le cas de deux cristaux comme le montre la figure (II.2)[19].

Les différentes contraintes induites par le désaccord de maille sont calculées à partir des équations suivantes :

$$\varepsilon = \frac{a_s - a_e}{a_s} \quad (2.5)$$

On note : a_e paramètre de maille du substrat.

a_s paramètre de maille de la couche épitaxiée.



$a_{\text{substrat}} > a_{\text{alliage}}$ $a_{\text{substrat}} < a_{\text{alliage}}$ $a_{\text{substrat}} = a_{\text{alliage}}$

Couche épitaxiée Substrat

Figure (II.2) : déformation tétragonale d'une Couche épitaxiée sur un substrat de paramètre de maille différent : compression biaxiale ($a_{\text{substrat}} < a_{\text{alliage}}$) et tension biaxiale ($a_{\text{substrat}} > a_{\text{alliage}}$) et accord de maille ($a_{\text{substrat}} = a_{\text{alliage}}$).

5. Les coefficients élastiques

Les coefficients élastiques des natures cubiques ont été calculés par plusieurs groupes de théoriciens pour les trois binaires cubiques avec des différences notables entre les résultats. Les valeurs sont résumées dans la table (II.3) suivante : [20]

Tableau (II.3) : les coefficients d'élasticité des matériaux binaires.

	GaIn	GaP	InAs	InP
C11	1221	1405	832.9	1011
C12	566	620.3	452.6	561

6. Effet de la contrainte sur le gap

Pour la description de l'effet de la contrainte sur la structure de bande nous avons utilisé le modèle de Van et Walle et utilisé le formalisme de Krijin [36]. Les deux composantes parallèle et perpendiculaire du tenseur de la déformation peuvent être définies de la manière suivante :

$$\varepsilon_{||} = \frac{a_{||} - a_0}{a_0} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{a_{\perp} - a_0}{a_0} \quad (2.7)$$

$a_{||}$ et a_{\perp} , Sont les valeurs du paramètre de maille dans le plan et hors du plan de la couche non relaxée.

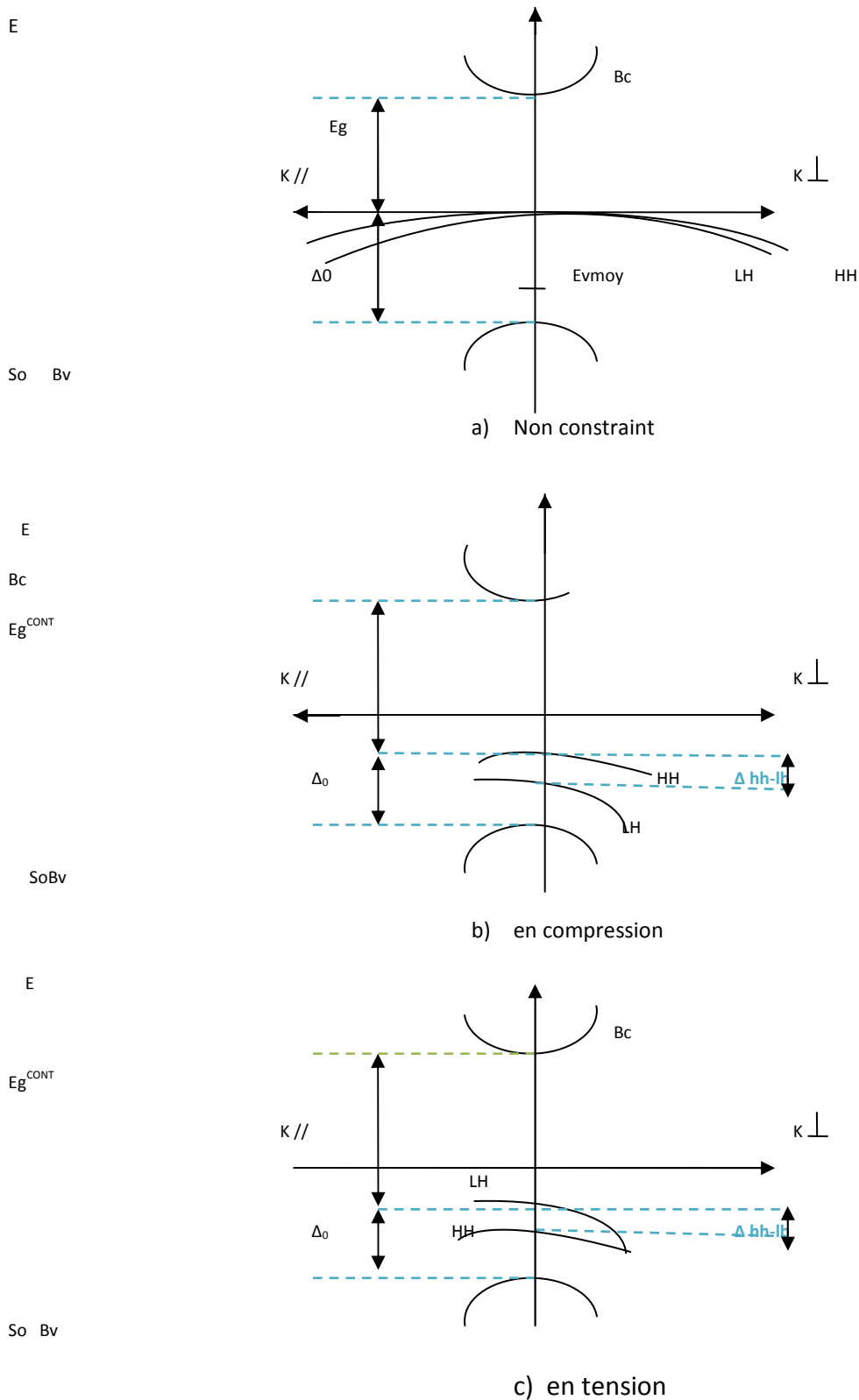


Figure (2.3):structure de bande d'un semi-conducteur à gap direct,

a)non contraint,b) en compression, c) en tension

Pour une structure totalement contrainte:

$$a_{\parallel} = a_{sub} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{\perp} = -2 \times \frac{C_{12}}{C_{11}} \times \varepsilon_{\parallel} \quad (2.9)$$

L'effet de la contrainte sur la structure de bandes de la couche épitaxiée est illustré sur la (figure 2.3). Cette figure présente la structure de bandes d'un semi-conducteur à Gap direct dans les trois cas possibles, non contraint, contraint en compression et finalement contraint en tension.

En absence de contrainte, les bandes de trous lourds et de trous légers sont isotropes et dégénérées au centre de la zone de Brillouin, et la bande de trous spin-splittée est située à une énergie Δ_0 en dessous de ces deux bandes. Le centre de gravité de la bande de valence d'énergie moyenne $E_{V,moy}$ se trouve par conséquent à $\frac{\Delta_0}{3}$ au dessous du haut de la bande de valence en $k=0$ (figure 2.3.a).

$$E_{V,moy} = \frac{E_{HH} + E_{LH} + \Delta_0}{3} \quad (2.10)$$

E_{HH} : Energie de la bande de trous lourds.

E_{LH} : Energie de la bande de trous légers.

Δ_0 : Energie de décalage des bandes des trous spin-splittée.

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

La composante hydrostatique, liée à la déformation selon l'axe de croissance, provoque un décalage du centre de gravité de la bande de valence ainsi que le centre de gravité de la bande de conduction. La contrainte de cisaillement, qui lève la dégénérescence des états énergétiques des trous lourds et des trous légers en $k = 0$ (typiquement d'une valeur Δ_{hh-lh} de l'ordre de 60-80 meV pour un désaccord paramétrique de 1%).

Pour une couche épitaxie soumise à une contrainte bi-axiale de compression, la composante hydrostatique augmente l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction, et la contrainte de cisaillement rend les bandes de valence fortement anisotropes ; la bande de plus haute énergie devient lourde selon k_{\perp} et légère selon k_{\parallel} (bande HH). La bande d'énergie inférieure devient elle légère selon k_{\perp} et lourde selon k_{\parallel} (bande LH) (figure 2.3.b).

Si la couche est soumise à une contrainte bi-axiale de tension (figure 2.3.c), le gap moyen diminue et les bandes de valences sont inversées par rapport à celles d'une couche en compression ; la bande de plus haute énergie (bande LH) restant légère selon k_{\perp} et lourde selon k_{\parallel} .

Les décalages énergétiques des centres de gravité de la bande de valence et de la bande de conduction en $K = 0$ induits par la contrainte hydrostatique, varient proportionnellement à la contrainte :

$$\Delta E_{v,moy}^{hyd} = a_v(2\mathcal{E}_{\parallel} + \mathcal{E}_{\perp})(2.11)$$

$$\Delta E_c^{hyd} = a_c(2\mathcal{E}_{\parallel} + \mathcal{E}_{\perp})(2.12)$$

Avec a_c et a_v les potentiels hydrostatiques de déformation pour la bande de conduction et la bande de valence respectivement.

Les décalages énergétiques induits par la contrainte de cisaillement dans chacune des bandes constituant la bande de valence sont les suivants, dans le cas d'une croissance sur substrat(100) [18].

$$\Delta E_{hh}^{cisa} = -\frac{1}{2} \times \delta E^{cisa} \quad (2.13)$$

$$\Delta E_{lh}^{cisa} = -\frac{1}{2} \Delta_0 + \frac{1}{4} \delta E^{cisa} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (2.14)$$

$$\Delta E_{so}^{cisa} = -\frac{1}{2} \Delta_0 + \frac{1}{4} \delta E^{cisa} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_0 \delta E^{cisa} + \frac{9}{4} (\delta E^{cisa})^2} \quad (2.15)$$

avec :

$$\delta E^{cisa,100} = 2 \cdot b \cdot (\mathcal{E}_{\parallel} + \mathcal{E}_{\perp}) \quad (2.16)$$

Où b est le potentiel de déformation tétragonale.

On peut définir l'énergie du haut de la bande de valence et l'énergie du bas de la bande de conduction.

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

$$E_v = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + \Delta E_{v,moy}^{hyd} + \max(\Delta E_{hh}^{cisa}, \Delta E_{lh}^{cisa}) \quad (2.17)$$

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

$$E_c = E_{v,moy} + \frac{\Delta_0}{3} + E_g + \Delta E_c^{hyd} \quad (2.18)$$

via les équations (2.13) et (2.10) on peut déterminer l'équation du Gap contraint E_g^{cont} :

$$E_g^{cont} = E_c - E_v = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \max(\Delta E_{hh}^{cisa}, E_{lh}^{cisa}) \quad (2.19)$$

Donc l'équation (2.18) devient pour une couche en compression :

$$E_g^{cont,com} = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{hh}^{cisa} \quad (2.20)$$

Et pour une couche en tension :

$$E_g^{cont,ten} = E_g + \Delta E_c^{hyd} - \Delta E_{v,moy}^{hyd} - \Delta E_{lh}^{cisa} \quad (2.21)$$

7. Étude du coefficient d'absorption

L'interaction entre les photons et les électrons peut s'exprimer pour les semi-conducteurs par unité d'épaisseur de matériau en fonction de la longueur d'onde [7].

Le coefficient d'absorption $\alpha(E)$, pour une énergie supérieure à l'Énergie de gap direct est donné par la relation (2.22) [06].

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\sqrt{E - E_g}}{E} \quad (2.22)$$

8. Coefficient de réflexion

Le calcul de l'indice de réfraction nous permet aussi de calculer la réflexion, nous devons aussi calculer la réflexion à l'extérieur (interface) qui peut atteindre 30%.

La réduction de la réflexion de la lumière se fait en jouant sur les indices de réfraction des matériaux traversés. La réflexion s'exprime par l'équation suivante :

$$R = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \quad (2.23)$$

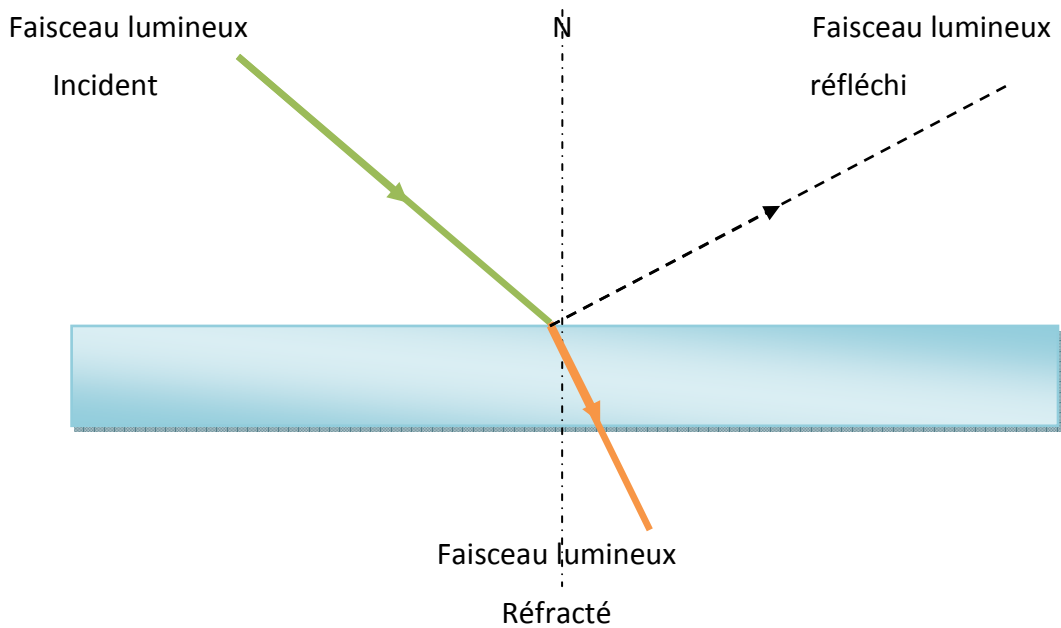


Figure (II.4): taux de réflexion

L'un des moyens de réduire ce taux de réflexion est d'intercaler entre la couche mince et l'air un empilement optique constitué de matériaux à indice de réfraction différent afin de diminuer la différence de réfraction entre l'air et la couche mince (figure II.4).

L'autre moyen le plus utilisé pour réduire le taux de réflexion est d'ajouter en surface un film antireflet qui diminue le renvoi de rayons lumineux vers l'atmosphère, et donc d'absorber une plus grande partie du flux lumineux.

Selon ce principe, un laboratoire d'Osaka traite la surface des cellules pour obtenir des microcavités, un fabricant de revêtement spécial (STI) a développé une cellule photovoltaïque qui réduit la réflexion du substrat et génère de nouveaux petits faisceaux à l'intérieur du revêtement augmentant ainsi le taux de conversion solaire de 3% à 5% [06].

9. les longueurs d'onde absorbées

Seule la lumière absorbée est restituée sous forme d'énergie électrique, le matériau photovoltaïque utilise différemment toutes les longueurs d'onde 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 ne soit absorbée.

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (2.24)$$

λ_c est la longueur d'onde caractérisant notre alliage.

II.3 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque

1. Courant d'éclairement

Dans la cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent, le courant d'éclairement (photo courant I_{ph}) et un courant de la diode appelé courant d'obscurité I_{obs} , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant $I(V)$ est

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs} \quad (2.25)$$

Avec

$$I_{obs}(V) = I_s \left(e^{\left(\frac{qv}{nkT}\right)} - 1 \right) \quad (2.26)$$

$$I_{ph} = q \int F(\lambda) EQM_{total}(\lambda) d\lambda \quad (2.27)$$

Où

q : Charge élémentaire ($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$).

k : Constante de Boltzmann ($k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$).

T : Température en (K).

n : le nombre de puits.

$F(\lambda)$: le spectre solaire.

EQM : l'efficacité quantique .

2. la zone de déplétion :

Dans la jonction , une zone de déplétion se crée,les donneurs ionisés N_d^+ ne sont plus compensés par les électrons, donc il apparait une charge d'espace positive. D'autre part la distance entre la bande de conduction et le niveau de fermi,qui traduit la population électrique est plus grande à la surface que à la profondeur du semi-conducteur [20].

L'expression de la largeur de la zone de déplétion W est donné par :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_d}{qN_D}} \quad (2.28)$$

Ou :

N_D : Densité d'atomes donneurs dans le semi-conducteur.

V_d : une tension de diffusion V_d qui équilibre les forces de diffusion et détermine l'état d'équilibre dans la structure.

q : Charge de l'électron($1,6.10^{-19}C$).

ε_s : Constante diélectrique du semi-conducteur.

3. Tension de circuit ouvert

Elle représente la tension aux bornes de la cellule sous éclairage sans circuit de charge, V_{co} est donnée par la relation suivante:

$$V_{co} = \left(\frac{KT}{q}\right) \ln \left[\left(\frac{I_{cc}}{I_0}\right) + 1 \right] \quad (2.29)$$

4. La puissance maximale P_M

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_M = I_m V_m \quad (2.30)$$

V_m : C'est la tension correspondante à la puissance maximale fournie.

I_m : C'est le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

5. Efficacité quantique EQM

L'efficacité quantique EQM c'est le rapport entre le nombre des charges électrique collecté et le nombre des photons incident. Elle définit par la formule suivante :

$$EQM(\lambda) = (1-R) \times (1 - \exp(-\alpha w)) \times \exp(-N \alpha^* w) \quad (2.31)$$

Avec :

$R(\lambda)$: le spectre solaire.

N : les puits quantiques.

α : le coefficient de réflexion.

w : Largeur de la zone de déplétion.

6. Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée $V_m I_m$ et la puissance idéale $V_{CO} I_{CC}$, on le note :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{CO} I_{CC}} \quad (2.32)$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension [21].

7. . Rendement de conversion d'énergie

Le dernier est le plus important paramètre caractérisant la cellule photovoltaïque est le rendement η . Il représente le rendement énergétique externe de conversion de puissance c'est-à-dire le rapport entre la puissance électrique fournie par la cellule et la puissance incidente. Il est défini par la relation suivante :

$$\eta = \frac{U_m I_m}{P_i S} = \frac{FF V_{CO} I_{CC}}{P_i S} \quad (2.33)$$

Avec : P_i puissance d'éclairement reçue par unité de surface ; et S : la surface de la cellule PV et FF : Facteur de Forme[21].

II.4 Les propriétés optiques

Dans cette partie nous nous sommes intéressé à étudier les propriétés sur lesquelles est basé la transformation de la lumière en énergie électrique [06].

Un rayon lumineux formé de photons entrant en contact sur un matériau solide subit trois manifestations optiques simultanées :

- l'absorption
- la réflexion
- la transmission.

II.5 Conclusion

Il est essentiel de faire l'étude fondamentale des semi-conducteurs III-V et de connaître leurs propriétés, pour bien savoir comment utiliser ces propriétés pour améliorer le rendement des structures à semi-conducteurs dans les dispositifs optoélectroniques.

Chapitre 3 simulations et Résultats

III.1 Introduction

La simulation numérique est toujours utilisée pour optimiser des cellules solaires, afin de décrire le comportement des composants électroniques. Cette méthode nous permet de confronter les résultats avec l'expérience, de ce fait la simulation numérique est indispensable avant la réalisation.

Dans ce chapitre on va étudier l'impact de la concentration d'indium sur les alliages $Ga_{(1-x)}In_xP$ et $Ga_{(1-x)}In_xAs$ qui constituent notre cellule à double hétérojonction figure (3.1) afin de déterminer leurs caractéristiques physiques et électriques et optimiser les concentrations d'indium qui donnent le meilleur rendement de conversion photovoltaïque.

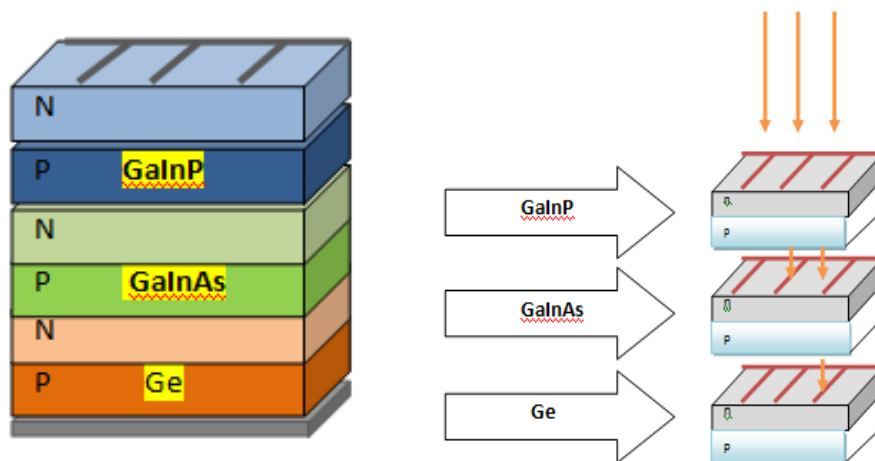


Figure (III.1) : schéma d'une structure à base de GaInP/GaInAs/Ge

La figure (III.1) montre la disposition des différentes couches qui constituent notre cellule, en fait avec la déposition de l'alliage GaInAs sur le substrat de Ge ; il apparaît une contrainte à l'interface de croissance qui se propage vers le haut de la structure, même avec la déposition du GaInP sur le GaInAs une autre contrainte

intervient à l'interface de la deuxième hétérojonction. Dans une première partie on va étudier l'effet de cette contrainte sur l'hétérojonction GaInAs/Ge afin d'optimiser la concentration d'indium dans l'alliage GaInAs et dans la deuxième partie on refait le même travail pour obtenir les concentrations adéquates qui donnent un meilleur rendement de conversion de cette cellule.

III.2 simulation de la structure $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_{(x)}\text{As}/\text{Ge}$

Cette partie elle est consacré à l'étude de l'hétérojonction GaInAs/Ge afin de déterminer les caractéristiques optiques, la caractéristique courant tension, l'efficacité quantique et le rendement.

1. Paramètre de maille du ternaire $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_{(x)}\text{As}$

Pour déterminer l'effet de l'Indium (In) sur la maille de GaInAs nous avons utilisé la loi de Vegard (voir le chapitre 2), la figure (III.2) illustre l'effet de la concentration d'indium sur le paramètre de maille de l'alliage GaInAs, on remarque que la maille elle augmente avec l'incorporation de l'indium dans la maille de GaAs.

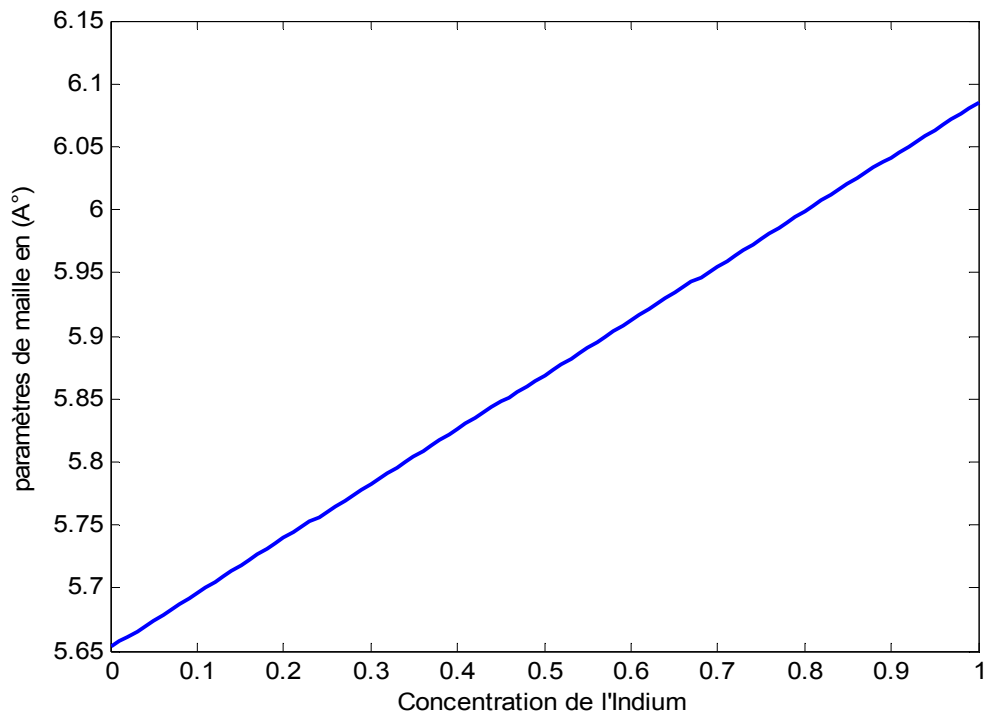


Figure (III.2) : paramètre de maille de GaInAs en fonction de la concentration d'indium.

2. Le désaccord de maille

Lorsqu'on met par épitaxie un matériau ternaire sur un substrat qui a un paramètre de maille différent, la couche épitaxie se déforme en compression ou en tension pour rattraper le désaccord de maille $\Delta\varepsilon$.

La figure (III.3) nous montre la variation du désaccord de maille en fonction de la variation des concentrations de l'indium dans le GaInAs ; on remarque que $\Delta\varepsilon$ diminue avec la concentration de l'indium et elle est toujours négative ce qui explique que quel que soit la concentration d'indium en aura toujours une contrainte en tension.

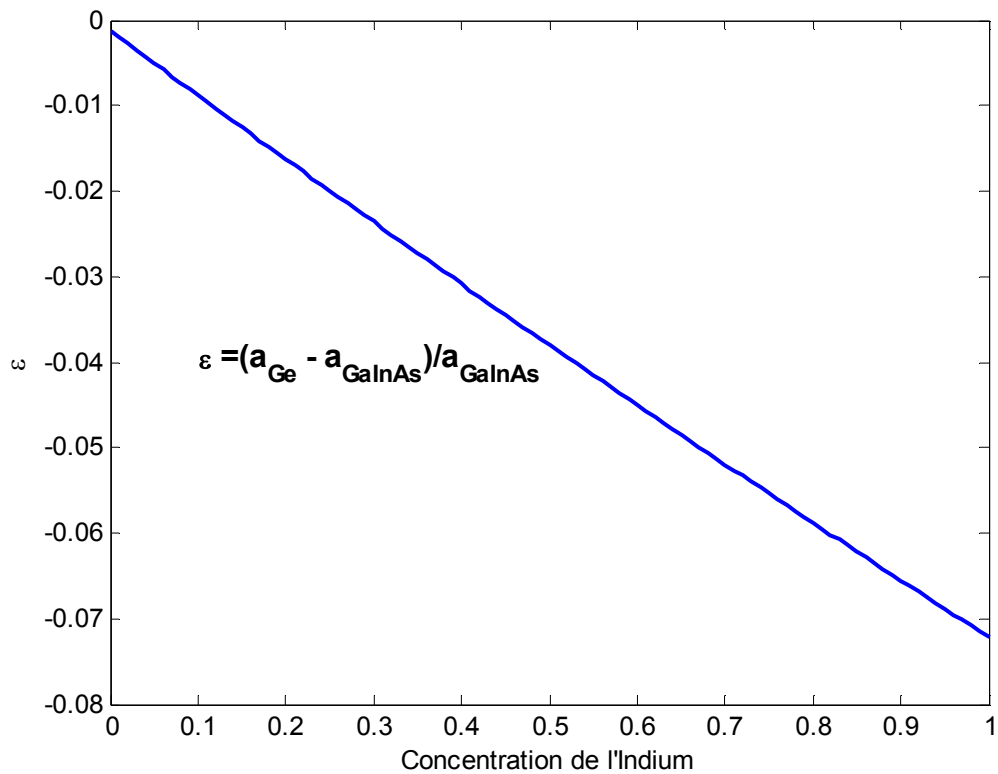


Figure (III.3) : Variation du désaccord de maille en fonction de l'indium.

3. Simulation de l'épaisseur critique

On rappelle, que pour le calcul de l'épaisseur critique de la couche $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{As}$, on a utilisé le modèle de Matthews et Blakeslee, qui traite des matériaux faiblement désaccordés ($\varepsilon < 2\%$).

En fait 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 contrainte. La figure suivante montre la variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de l'indium dans le GaInAs.

Une diminution de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium a été notée, et pour des valeurs supérieures à 25 % d'indium l'épaisseur devient inférieure à 80Å , à cet effet il est conseillé de prendre des valeurs inférieures ou égales à 25% d'indium.

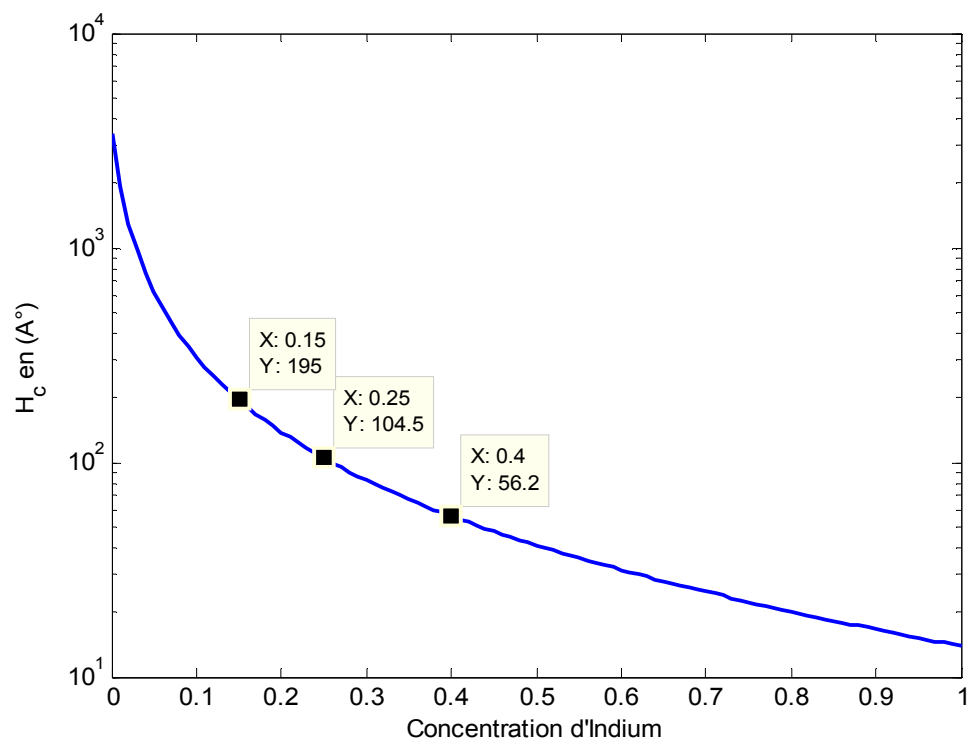


Figure (III.4) : Variation de l'épaisseur critique de la couche GaInAs contraint sur Ge en fonction de la concentration d'indium.

4. L'influence de la concentration d'indium sur l'énergie de gap

La Figure (III.5) montre la variation du gap de l'alliage $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{As}$ contraint sur le substrat Ge en fonction de la concentration d'indium; on remarque une réduction de la largeur de la bande interdite avec l'augmentation de la concentration d'indium et que le Gap des trous lourds est toujours inférieur à des trous légers qui confirme la contrainte en tension.

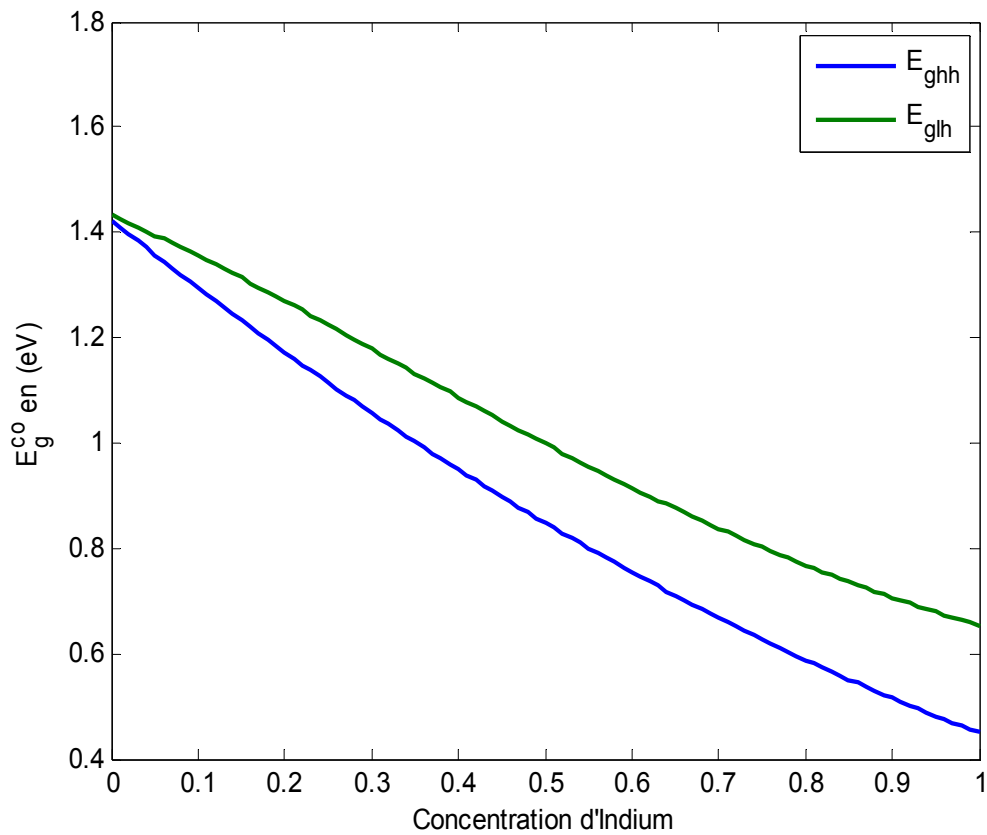


Figure (III.5) : la variation du gap de l'alliage $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_x\text{As}$ contraint sur le substrat Ge en fonction de la concentration d'indium.

5. L'effet de la contrainte sur le coefficient d'absorption

La figure (III.6) représente la simulation du coefficient d'absorption en fonction de la concentration de l'indium pour des énergies de photons incidents fixes.

On remarque que pour des énergies des photons incidents inférieures au Gap le coefficient d'absorption est nul, car ces énergies sont insuffisantes pour que les électrons franchissent la bande interdite de l'alliage GaInAs, mais avec l'augmentation de l'indium le Gap diminue dès que son énergie devient inférieure à celle du photon incident le coefficient d'absorption augmente d'une manière forte.

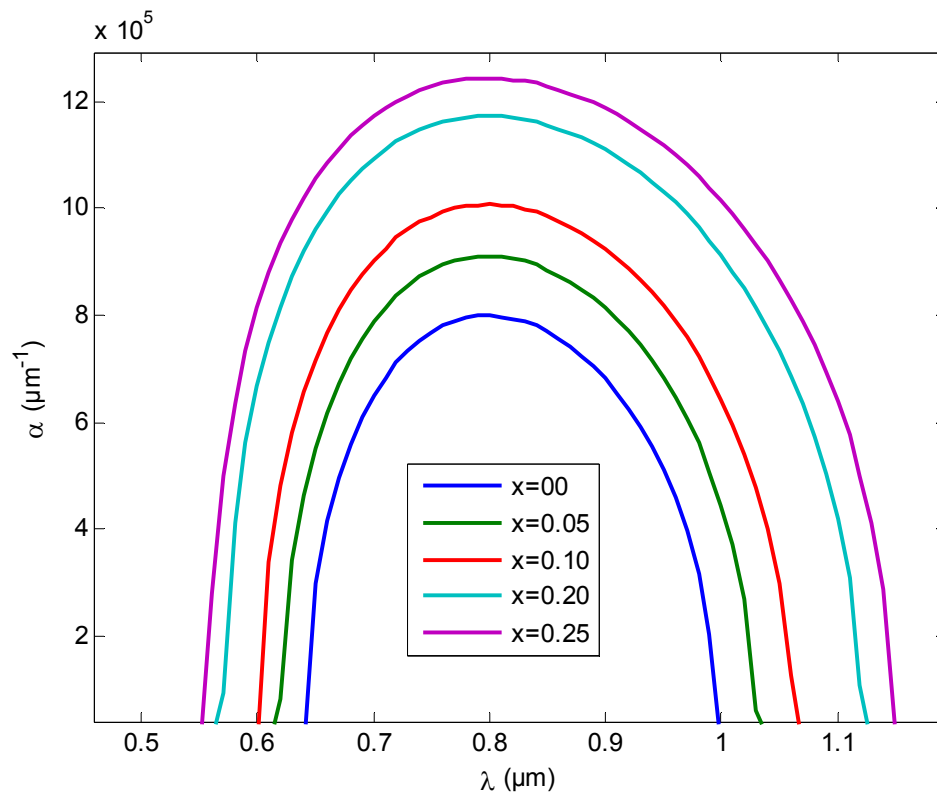


Figure (III.6) Variation du coefficient d'absorption en fonction de la concentration d'indium pour plusieurs énergies du photon incident .

6. Spectre absorbé

La figure (III.7) montre les gammes du spectre absorbé pour plusieurs concentrations d'indium ; le GaAs absorbe la bande [0.31 0.87] μm , et avec l'incorporation d'indium cette bande s'élargie pour atteindre la valeur de 1.114 μm (de 0.31 au 1.114 μm) pour une concentration de 25% d'indium.

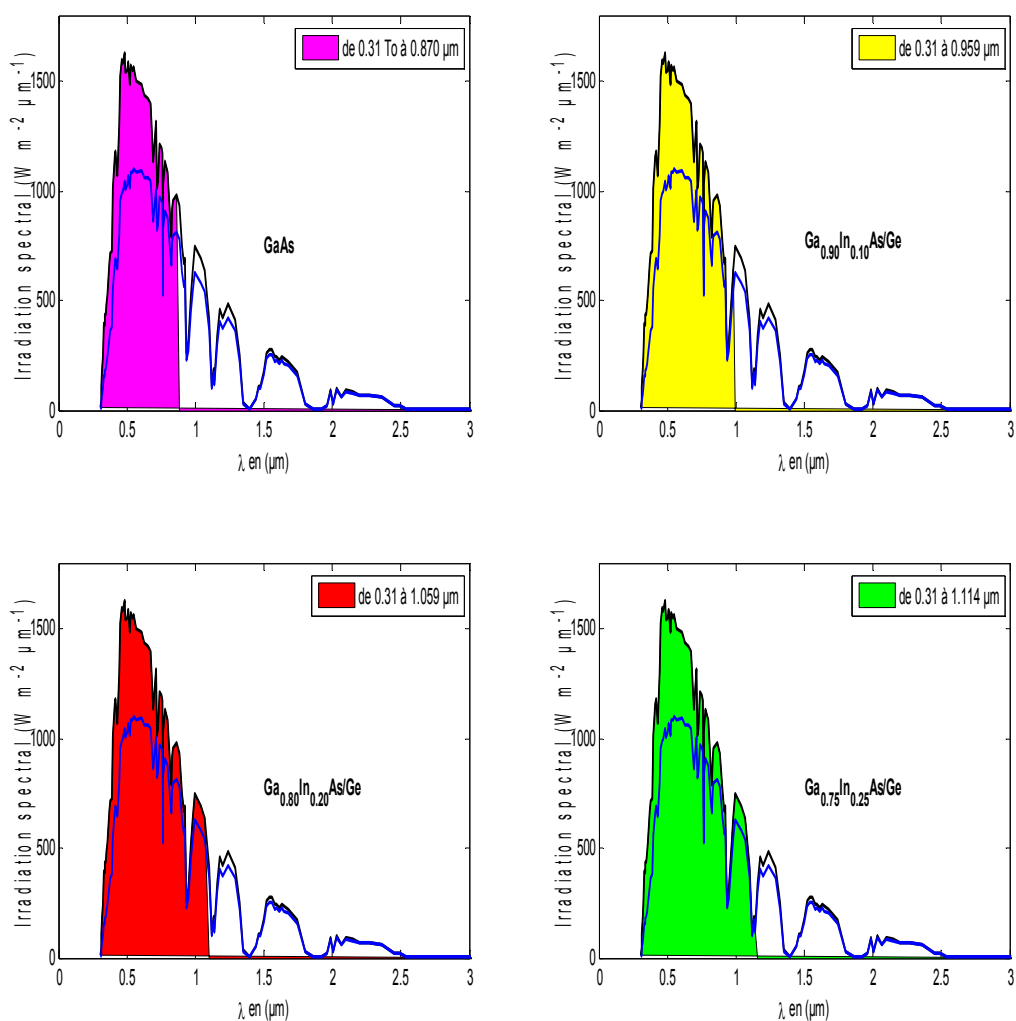


Figure (III.7): Spectre absorbé par GaInAs Contraint sur Ge pour plusieurs valeurs d'indium.

7. L'efficacité quantique

La figure (III.8) suivante montre la variation de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs valeurs d'indium. On remarque qu'avec l'augmentation de la concentration d'indium, l'amplitude d'EQE augmente avec un élargissement suivant l'axe des longueurs d'onde, et on note pour 25% d'indium une amplitude maximale de 73% et une bande de [0.55 1.15] μm .

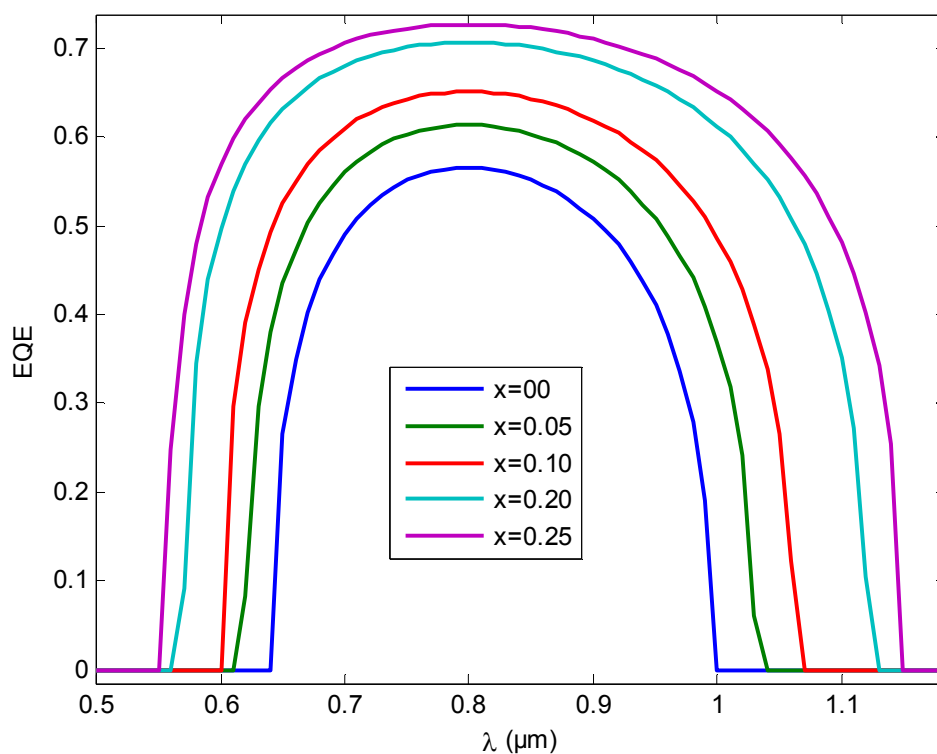


Figure (III.8) : Variation de l'efficacité quantique en fonction de la concentration d'indium

On constate une amélioration dans l'efficacité quantique avec l'augmentation d'indium.

8. Caractéristique courant-tension

Nous avons simulé la variation de la densité de courant en fonction de la tension pour différents pourcentage de l'indium.

On remarque qu'il y a une amélioration de la densité de courant avec l'augmentation de la concentration d'indium.

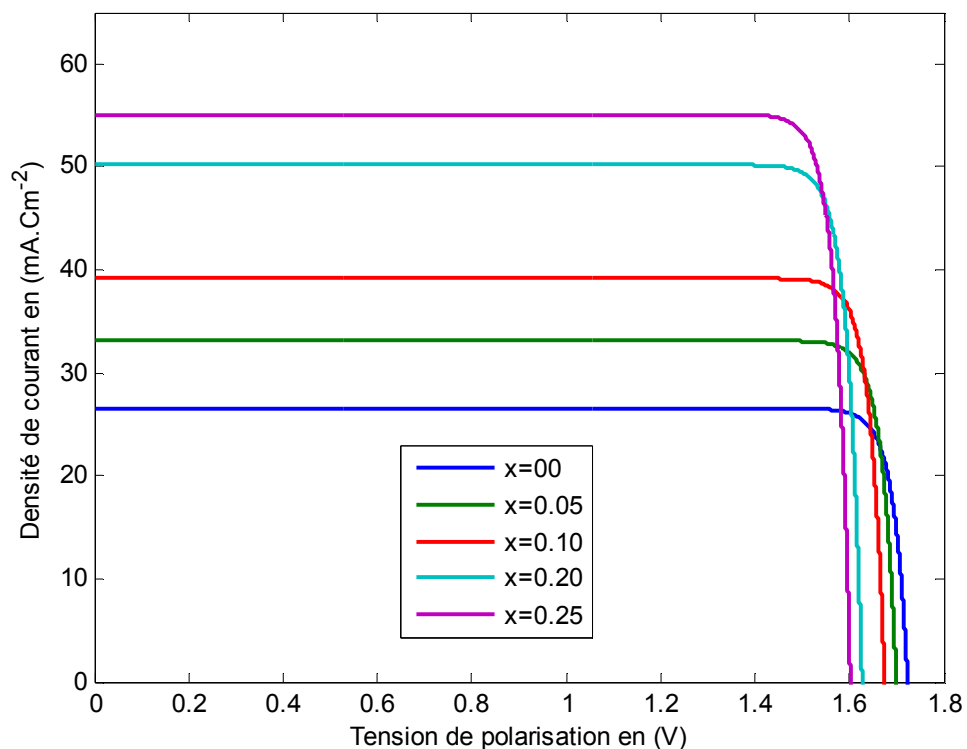


Figure (III.9) : caractéristique courant-tension pour plusieurs concentrations d'indium.

9. Tension de circuit ouvert et facteur de forme

D'après la simulation qu'est illustrée par la figure (III.10), on remarque que la tension du circuit ouvert décroît avec l'augmentation de la concentration d'indium, et comme FF (facteur de forme) est un rapport entre la puissance maximale et la puissance idéale de la cellule, on observe une augmentation qui varie de 40% à 42% de ce dernier en fonction de la concentration d'indium figure (III.11).

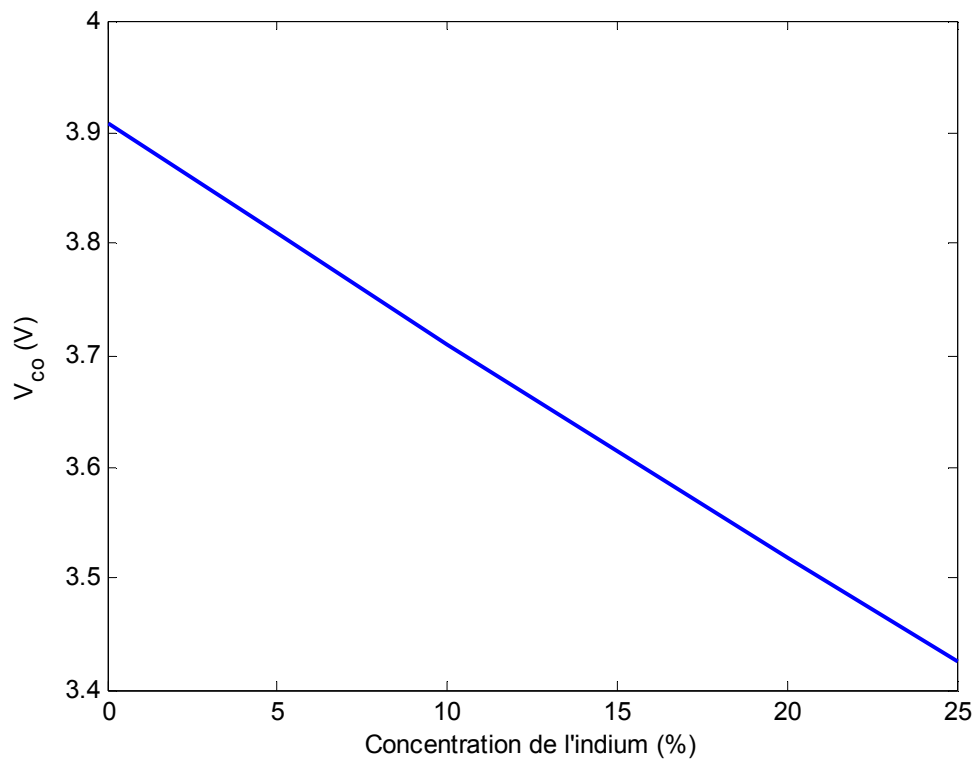


Figure (III.10): Variation de V_{co} en fonction de la concentration d'indium

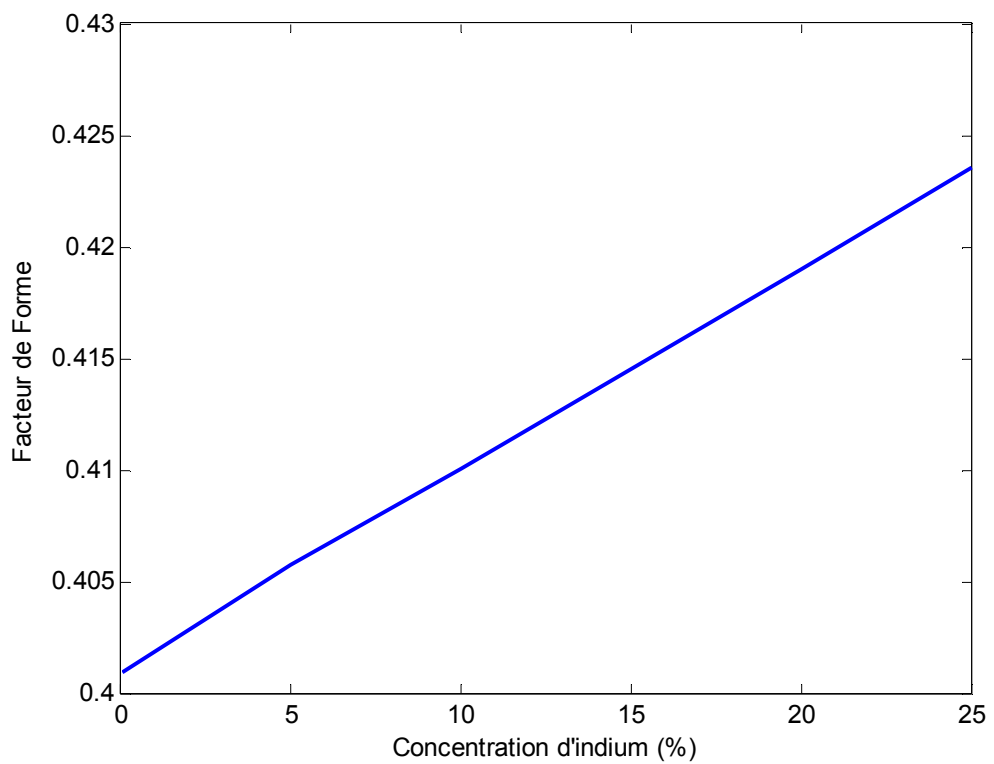


Figure (III.11): variation de FF en fonction de la concentration d'indium.

10. Récapitulation

Dans cette partie on a étudié l'hétérojonction GaInAs/Ge, et on a remarqué qu'avec l'augmentation de la concentration d'indium le gap diminue et donne un coefficient d'absorption important, mais d'ailleurs on ne peut pas dépasser les 25% d'indium car l'épaisseur de la couche active GaInAs devient très mince ($< 80 \text{ \AA}$).

Dans la partie suivante on va faire la même étude pour l'hétérojonction

$\text{Ga}_{(1-y)}\text{In}_y\text{P}/\text{Ga}_{0.75}\text{In}_{0.25}\text{As}$, afin d'obtenir le rendement total de la cellule étudiée.

III.3.3 Simulation de la structure GaInP/GaInAs

1. Le paramètre de maille de $\text{Ga}_{(1-y)}\text{In}_y\text{P}$

Pour déterminer l'effet de l'Indium (In) sur la maille de GaInP nous avons utilisé la loi de Vegard (voir le chapitre 2), la figure (III.13) illustre l'effet de la concentration d'indium sur le paramètre de maille de l'alliage GaInP, on remarque que la maille augmente avec l'incorporation de l'indium dans la maille de GaP.

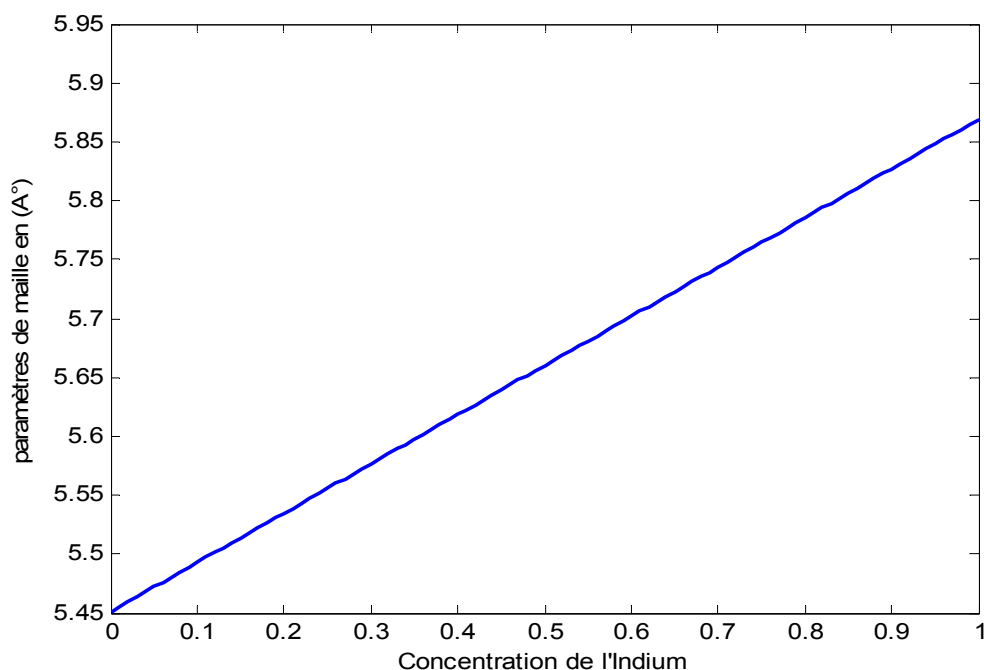


Figure (III.13) : paramètre de maille de GaInP en fonction de la concentration d'indium

2. Désaccord de maille

Lorsqu'on met par épitaxie un matériau ternaire sur un substrat qui a un paramètre de maille différent, la couche épitaxiée se déforme en compression ou en dilatations pour rattraper le désaccord de maille $\Delta\varepsilon$.

La figure (III.14) nous montre la variation du désaccord de maille en fonction de la variation des concentrations de l'indium dans le GaInP, on remarque que on un accord de maille à la concentration d'indium égale à 74%, Si la concentration d'indium est inférieure à 74% on a une contrainte extensive, si la concentration d'indium est supérieure à 74% à une contrainte compressive.

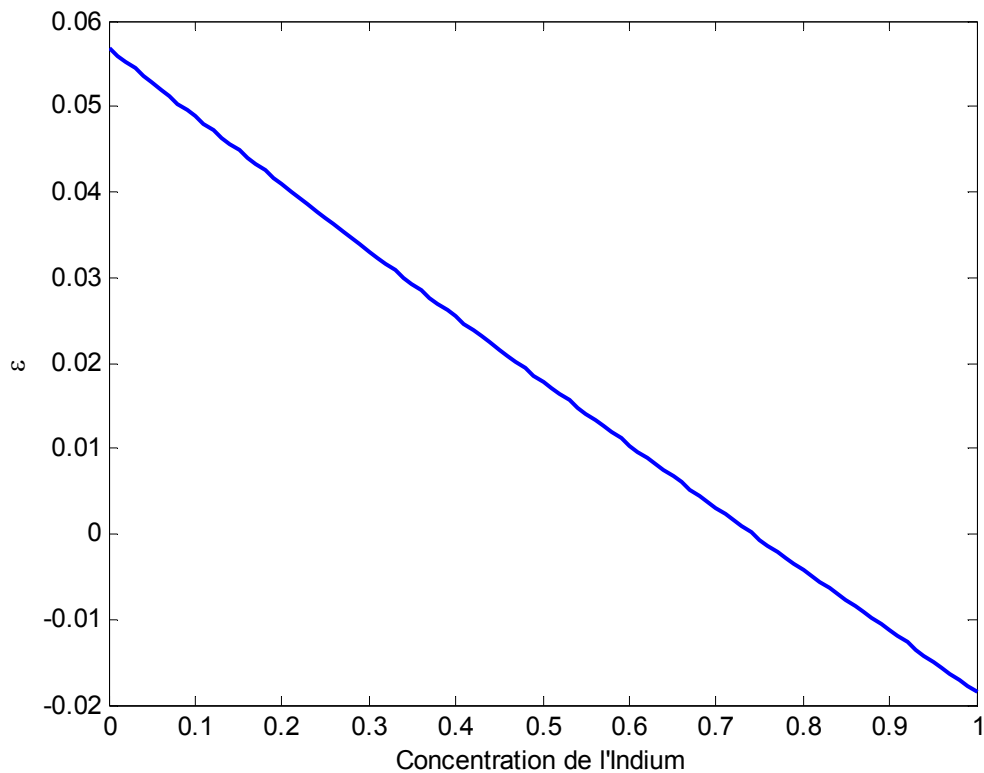


Figure (III.14) : Variation du désaccord de maille en fonction de l'indium.

3. Simulation de l'épaisseur critique

La figure suivante montre la variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de l'indium dans le GaInP.

Dans la simulation de l'épaisseur critique de la couche $\text{Ga}_{(1-y)}\text{In}_{(y)}\text{P}$, on a tracé les variations de l'épaisseur critique en fonction de la concentration d'indium dans la figure (III.15)., on remarque que h_c augmente avec l'augmentation de la concentration d'indium et tend vers l'infinie pour $x=0.74$, après elle commence à diminuer dans la partie contrainte en tension.

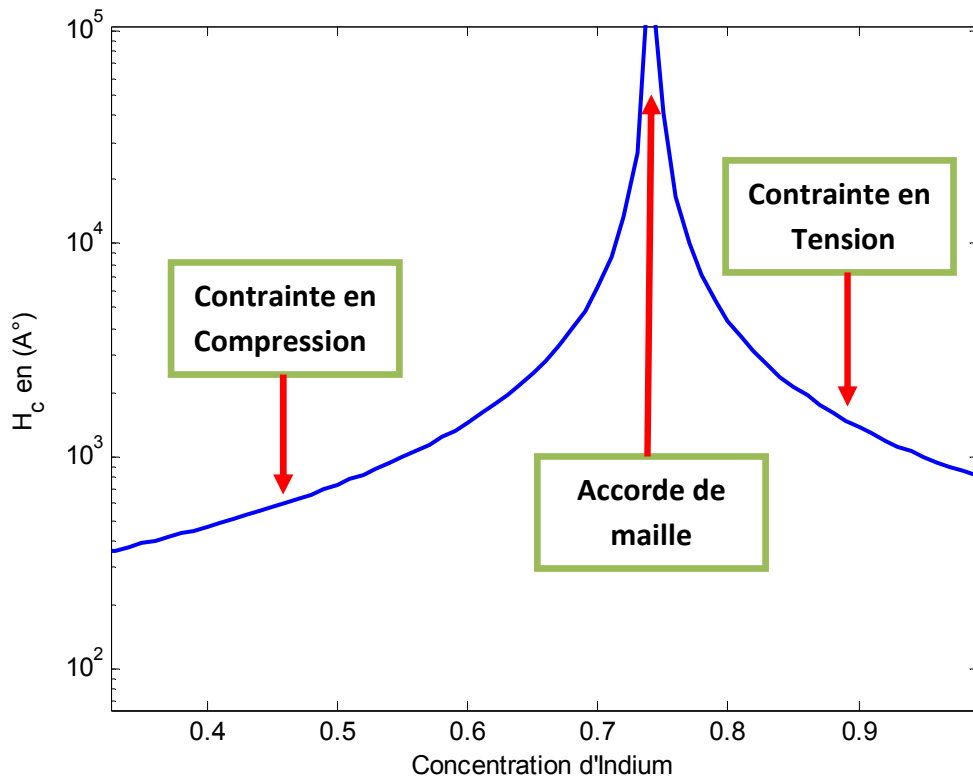


Figure (III.15) :L'épaisseur critique en fonction de la composition x de l'indium.

4. L'influence de la concentration d'indium sur l'énergie de Gap

La Figure (III.16) montre la variation du gap de l'alliage $\text{Ga}_{(1-x)}\text{In}_{(x)}\text{P}$ contraint sur le substrat GaInAs. On remarque une réduction de la largeur de la bande interdite avec l'augmentation de la concentration d'indium, pour $x=0$ on a une contrainte en

compression. on remarque que le gap des trous lourds(E_{ghh}) est supérieur à celui des trous légers (E_{glh}), et pour $x=0.74$ on a un accord de maille ,et pour $x=0.86$ on a une contrainte en tension expliquée par le gap des trous lourds(E_{ghh}) qui est inférieure à celui des trous légers (E_{glh}) .

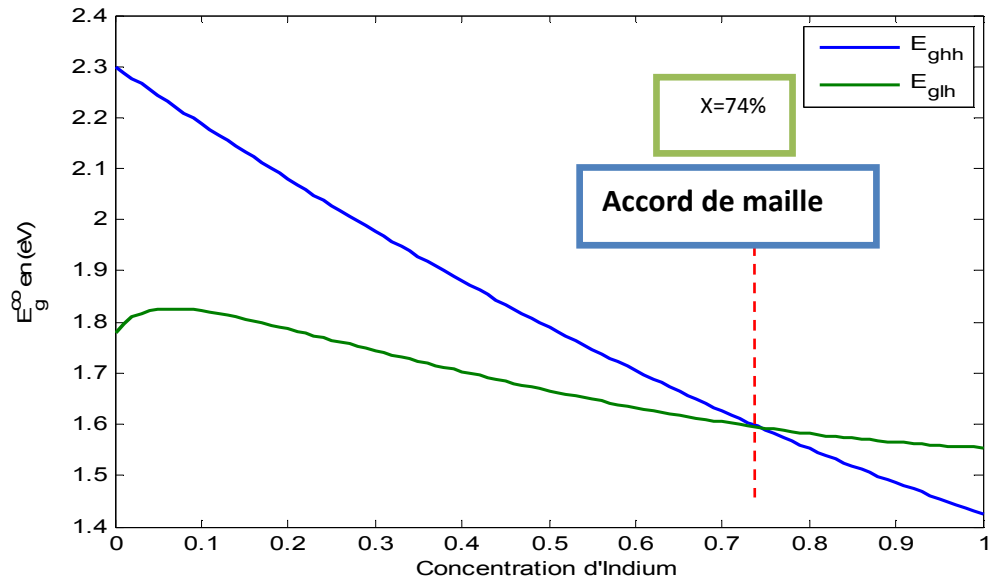


Figure (III.16): Variation du gap en fonction de la concentration

5. Spectre absorbé

La figure (III.17) montre les gammes du spectre absorbé pour plusieurs concentrations d'indium, et avec l'incorporation d'indium cette bande elle s'élargie faiblement pour atteindre la valeur de $0.8345\mu\text{m}$ (de 0.31 au $0.8345\mu\text{m}$).

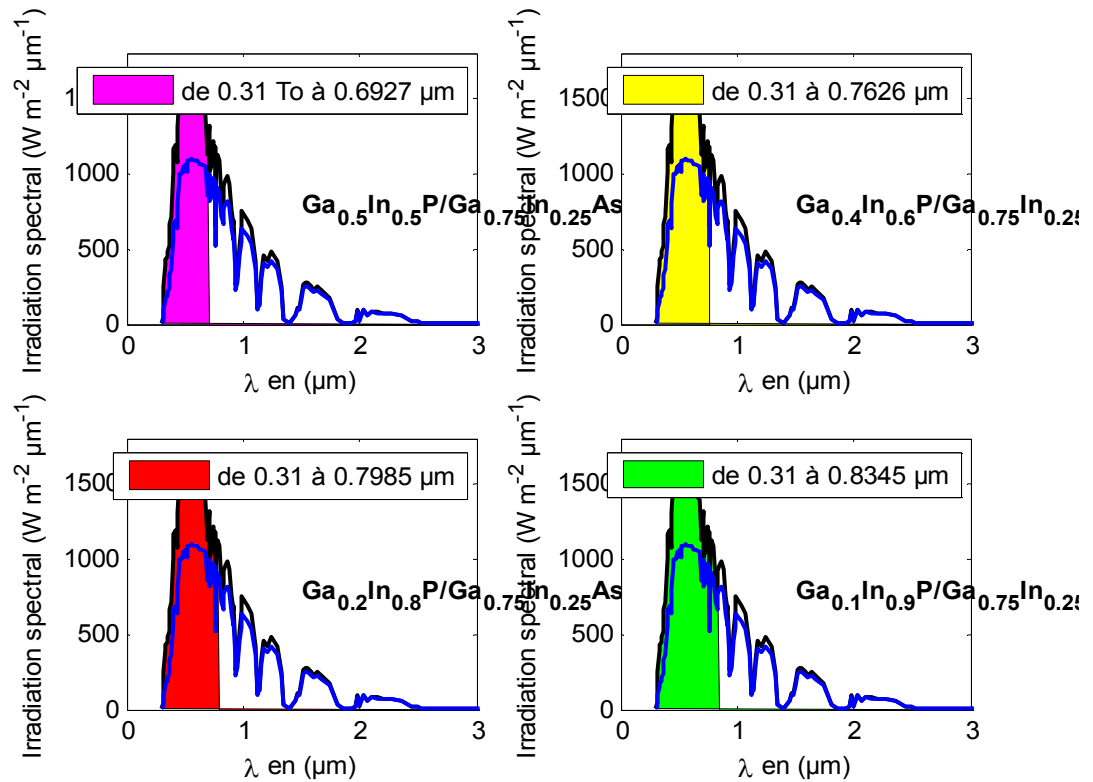


Figure (III.17): Spectre absorbé par GaInP Contraint sur GaInAs pour plusieurs valeurs d'indium.

6. L'effet de la contrainte sur le coefficient d'absorption

La figure (III.18) représente la simulation du coefficient d'absorption en fonction de la concentration de l'indium pour des énergies des photons incidents fixes.

On remarque que ces énergies sont insuffisantes pour que les électrons franchissent la bande interdite de l'alliage GaInP, mais avec l'augmentation de l'indium le Gap diminue et dès que leur énergie devient inférieure à celle du photon incident le coefficient d'absorption augmente d'une manière forte.

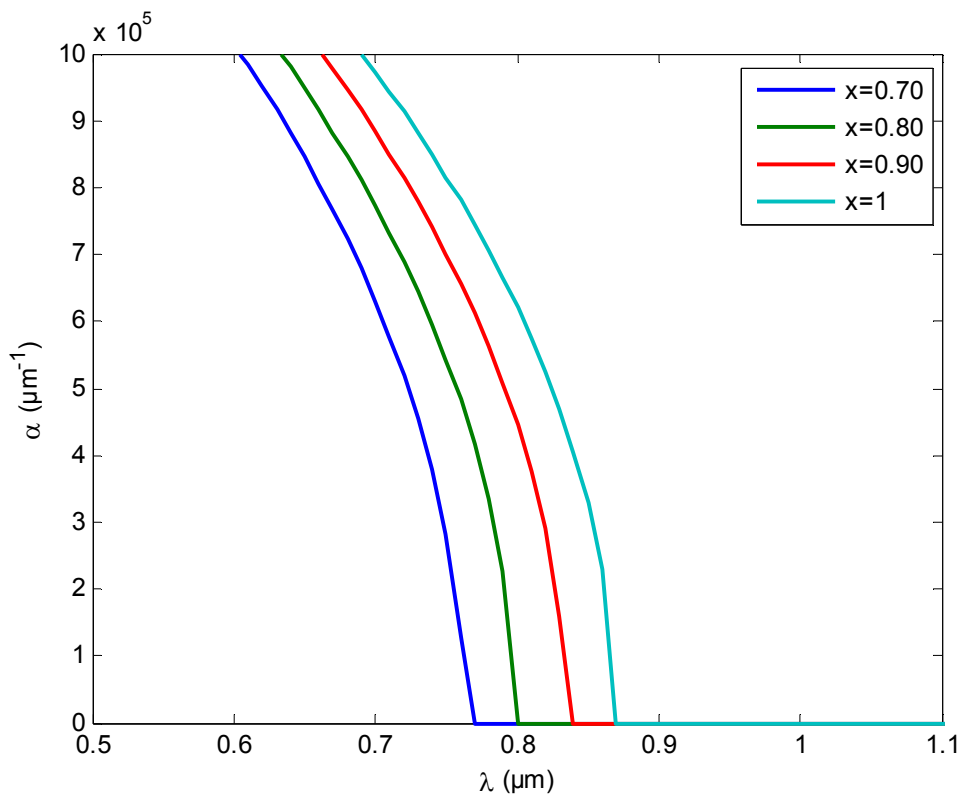


Figure (III.18) Variation du coefficient d'absorption en fonction de la concentration d'indium pour plusieurs energies du photon incident .

7. L'efficacité quantique

La figure (III.19) suivante montre la variation de l'efficacité quantique en fonction la longueur d'onde pour plusieurs valeurs le d'indium. On remarque qu'avec l'augmentation de la concentration d'indium, l'amplitude d'EQEaugmente avec un élargissement suivant l'axe des longueurs d'ondes.

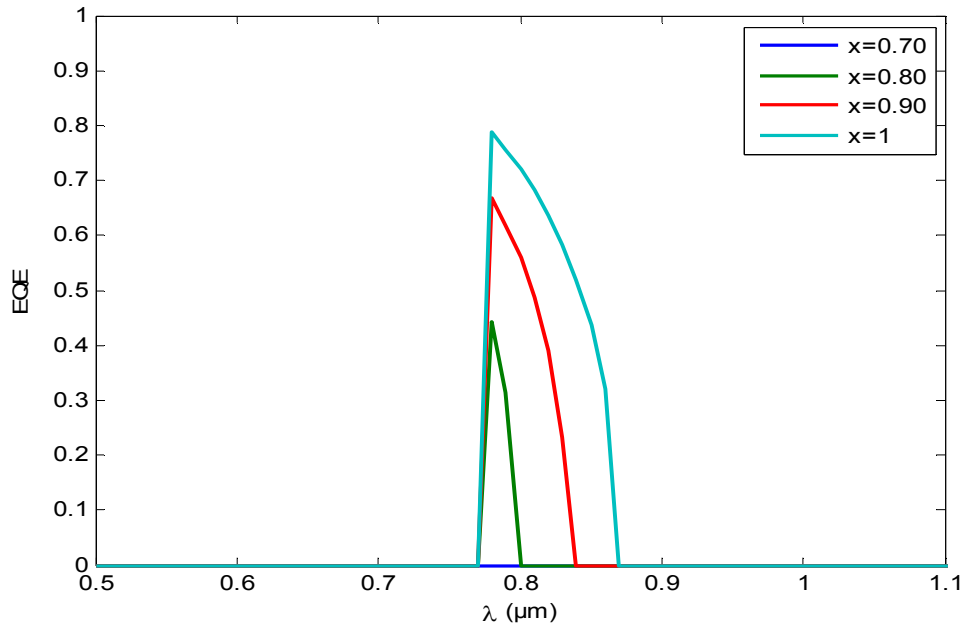


Figure (III.19) : Variation de l'efficacité quantique en fonction de la concentration d'indium

8. la Tension de circuit ouvert

D'après la simulation qui a été illustrée par la figure (3.20), on remarque que la tension du circuit ouvert décroît.

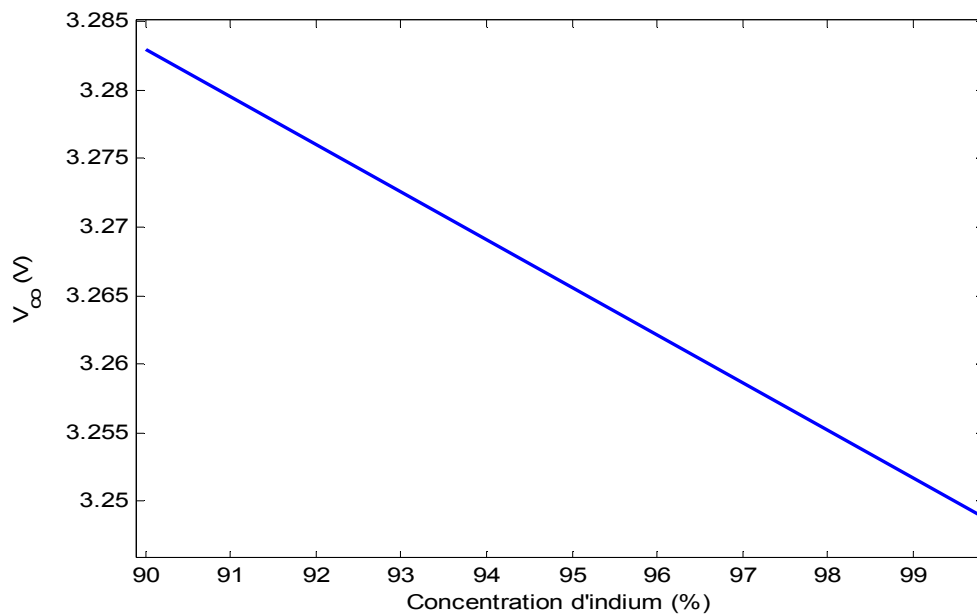


Figure (III.20): Variation de V_{CO} en fonction de la concentration d'indium.

9. facteur de forme

Le facteur de forme est un rapport entre la puissance maximal et la puissance idéal de la cellule, on observe une augmentation qui varie de 62% à 70% de ce dernier en fonction de la concentration d'indium figure (III.21).

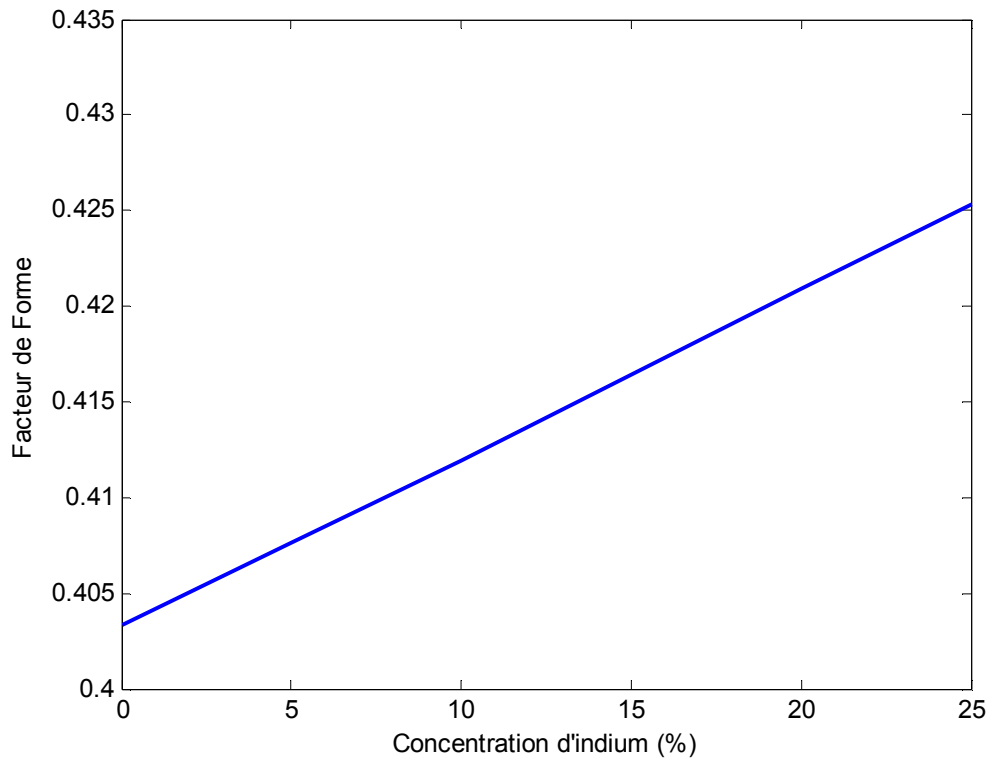


Figure (III.21): variation de FF en fonction de la concentration d'indium.

10. Le rendement

La figure (III.22) montre la variation du rendement de la structure étudiée en fonction de la concentration d'indium.

On remarque que le rendement augmente avec la concentration d'indium jusqu'à une valeur maximale de 38%.

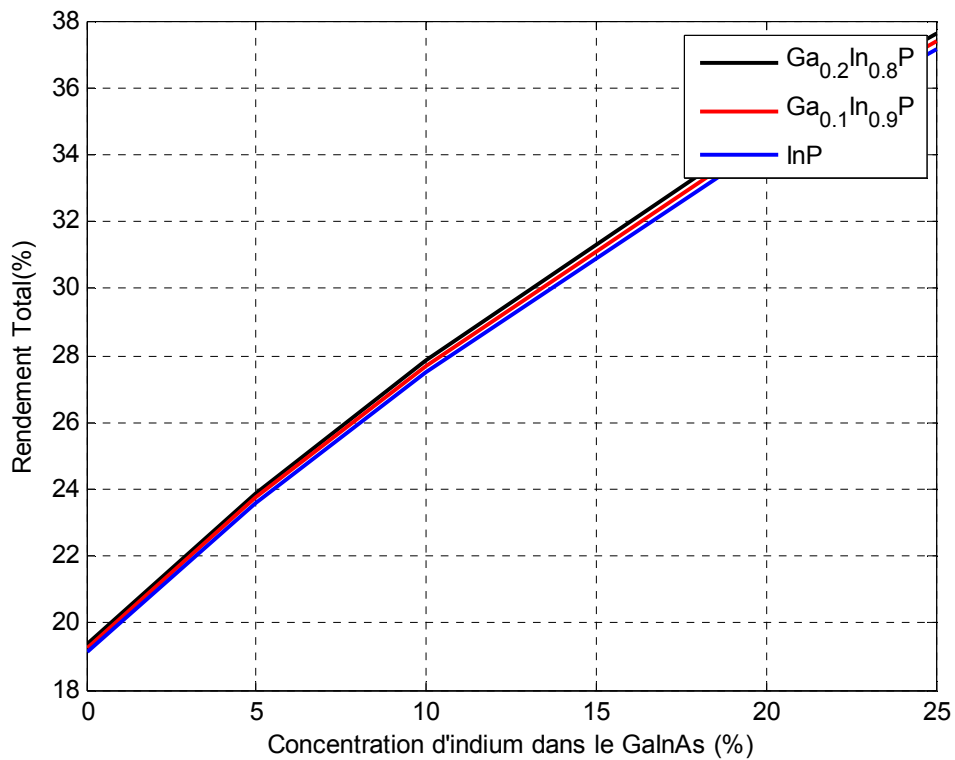


Figure (III.22): Rendement en fonction de la concentration d'indium.

III.4 conclusion

D'après la simulation de l'impact de la concentration d'indium sur les alliages $Ga_{(1-x)}In_xP$ et $Ga_{(1-x)}In_xAs$ qui constituent notre cellule à double hétérojonctions nous avons constaté que :

- l'augmentation de la concentration d'indium induit une diminution du gap et donne un coefficient d'absorption important.
- Le rendement final de la cellule est 38%.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié la structure d'une cellule photovoltaïque à double hétérojonctions GaInP/GaInAs/Ge. à travers cette modeste réflexion, par voie de simulation nous avons étudié, d'une part les procédés technologiques visant à décrire le comportement électronique et optique de notre cellule vis-à-vis du changement de la concentration d'indium, et d'autre part, sa caractérisation à travers la détermination de l'absorption maximale du rayonnement solaire.

Dans un premier temps, nous avons présenté le principe de fonctionnement des cellules solaires et les différents facteurs de perte limitant le rendement de conversion.

Dans le deuxième chapitre nous avons de fait l'étude fondamentale des semi-conducteurs III-V et de connaître leurs propriétés, pour bien savoir comment utiliser ces propriétés pour améliorer le rendement des structures à semi-conducteurs dans les dispositifs optoélectroniques.

Dans le troisième chapitre nous avons simulé l'influence de la concentration d'indium sur les différents paramètres physiques de l'alliage, et la contrainte entre les semi-conducteurs GaInP/GaInAs/Ge.

D'après ces simulations qui ont été faites dans la mémoire on a remarqué qu'avec l'augmentation de la concentration d'indium le gap diminue et donne un coefficient d'absorption important, et un rendement final de notre cellule est 38% .

Bibliographie

- [01] Bailly, I., "Cellules Photovoltaïques Organiques", l'Université Bordeaux, 2010.
- [02] Bouraoui, A., "Elaboration et Caractérisation des Couches minces CuInSe₂ par Electrodeposition" Université Mentouri, Constantin (08/10/2009).
- [03] Bordel, D., "Développement de Nouveaux Substrats", Ecole Centrale de Lyon, (18 décembre 2007).
- [04] Émilie des piau-pujo : 'Gravure des semi-conducteurs III-V par plasmas inductifs chlorés', école polytechnique paris tech, Thèse de doctorat 2009.
- [05] Damien BORDEL : « développement de nouveaux substrats compliants pour l'heteroeptaxie », école centrale de lyon ,2007.
- [06] BEDDA NAÏMA : étude des propriétés des semi-conducteurs Si, GaAs et GaAlAs', Université El-Hadj Lakhder- Batna, Magister en physique 2011.
- [07] A. Chovet, P Masson : « physique des semi-conducteurs », école polytechnique paris tech, 2004-2005.
- [08] Mme BENAHMED BENABDALLAH Nadia : « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et Si Ge », Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen Faculté Des Sciences, Thèse De Magister Juillet 2006.
- [09] Jérôme Faist : 'introduction à la physique des semi-conducteur', l'institut de physique', université de Neuchâtel, mai 2001.
- [10] Energie solaire photovoltaïque.doc << B. Flèche - D. Delagnes >>

- [11] Brousse, B., "Réalisation et Caractérisation de Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues par Dépôt Physique", Université de Limoges, (15 décembre 2004).
- [12] Tangui LE BAHERS : « Optimisation des cellules solaires à colorants à base de ZnO par une approche combinée théorie/expérience », Ecole doctorale chimie physique et analytique de Paris VI (ED388), 2011.
- [13] Lahoual Mohamed, « Etude de caractérisation d'un MESFET-GaAs hyperfréquence et application en circuit amplificateur linéaire à faible bruit (LNA) en bande étroite autour de 10GHz en technologie MMIC pour les systèmes à communications rapides », thèse de magister en électronique, université d'Oran 2009.
- [14] Professeur : J-J. PIREAUX : « Physique et énergie travail sur les panneaux photovoltaïques », Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur -- Année académique 2006-2007.
- [15] M. PETIBON Stéphane : « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [16] Garnier, J., "Elaboration de Couches Minces d'Oxydes Transparents et Conducteurs par Spray CVD assisté par Radiation Infrarouge pour applications Photovoltaïques ", Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, (2 décembre 2009).
- [17] Aouina Nabila Yasmina, Effet de la pression hydrostatique sur les propriétés électroniques du semi-conducteur AlAs dans la phase zinc blende, mémoire de Physique et Chimie des Matériaux, université de Msila, 2003.
- [18] K. Koksal, B. G., "Critical Layer Thickness of GaIn(n)As(sb) qws on GaAs and InP Substrates for (001) and (111) Orientations". the European Physical Journal (5 may 2009), 211–218.
- [19] Ecole d'Eté d'Optoélectronique, PHYSIQUE DES SEMICONDUCTEURS III-V S. LAVAL Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS (URA 022), Bat. 220. Université Paris Sud, F-91405 Orsay Cedex, France.

[20] Rachid BESTAM, Modélisation et Simulation d'une Structure à base de Semi-conducteur III-V pour le Photovoltaïque, université de Blida, thèse de Magister 2011

[21] Malika Madani « réalisation des couche antireflets dans les cellules solaire a couche mince » Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen (2006).