

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

KOUADRIA ASMA

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Micro-systeme

Thème

Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque multi-jonction à base de ZnO/ZnSe/SiGe

Proposé par : Mr. AISSAT Abdelkader

Année Universitaire 2014-2015

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.

Nos remerciements les plus chaleureux vont à Mr. Abdelmoumen pour toutes les facilités qu'on a eues 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

KAMIR.

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

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 FELLA.

A mes très chers frères MOHAMED, NOUH et YOUSSEF et ma sœur AMINA qui m'ont énormément aidée et à qui je témoigne mon affection et ma profonde reconnaissance, sans oublier mon fiancé AHMAD RACIME RIGHI, MAMA HORIA ET PAPA RACHID

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 ASMA, HADJER et SALAH EDINE

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

KOUADRIA ASSMA

الملخص

لأكثر من عقد، درست المواد V-III بشكل مكثف لاستعمالها في التطبيقات الكهروضوئية و خاصة في المجال الطيفي الموافق للأشعة فوق البنفسجية والزرقاء. أسفرت هذه الدراسات في عام 2003 عن تخفيض فجوة الطاقة . على وجه الخصوص، درست بشكل واسع تطبيقات الكهروضوئية نظرا لخصائصها الكهربائية الجيدة، مقاومتها لتوترات عالية وتغطيتها الواسعة للطيف الشمسي.

في هذا السياق، قمنا بدراسة الخلايا الضوئية باستعمال SiGe عن طريق المحاكاة ثنائية الأبعاد نحدد خلية مرجعية بواسطة خصائصها الفيزيائية والتكنولوجية من أجل دراسة تأثيرها على مردودية التحويل. على هذا الأساس، تم تحديد العديد من الخصائص: أبعاد وتركيز المناطق للخلية، وكذلك أبعاد وتركيز طبقات الحقل الخلفي

الكلمات المفتاحية : النمذجة، الخلايا الشمسية، المحاكاة الرقمية، أطلس/سيلفاك

Résumé :

Depuis plus d'une décennie, les matériaux III-V sont intensément étudiés pour des applications optoélectroniques dans l'UV et le bleu en 2003. la voie d'alliage pouvant couvrir quasiment tout le spectre solaire. En particulier, l'alliage SiGe fut largement étudié pour des applications photovoltaïques grâce à sa large couverture spectrale, ses bonnes caractéristiques électriques.

Dans ce contexte, nous avons étudiés le fonctionnement des cellules photovoltaïques à base ZnO/ZnSe/Si/Ge par la simulation numérique à deux dimensions sous éclairnement. Nous définissons une cellule de référence avec un ensemble de paramètres physiques, afin d'analyser leurs influences sur le rendement de conversion. Ainsi, plusieurs paramètres sont retenus : le dopage et le dimensionnement des régions n et p de la cellule.

Mots clés : Modélisation, semi-conducteur, cellules solaires, simulation numérique

Abstract :

For over a decade, the III-V materials are intensively studied for optoelectronic applications in the UV and blue. In 2003, paving the way for alloys can cover almost the entire solar spectrum. In particular, the SiGe alloy was extensively

studied for photovoltaic applications due to its wide spectral coverage, its good electrical properties In this context, we studied the operation of photovoltaic cells based on ZnO/ZnSe/Si/Ge by two-dimensional numerical simulation. We define a reference cell with a set of physical parameters, in order to analyze their influence on the conversion efficiency. Thus, several parameters are considered: Doping and dimensions of n and p regions of the cell.

Keywords: Modelling , semi-conductor, solars cells, numerical simulation.

Listes des acronymes et abréviations

SYMBOLE	DESCRIPTION
SC	semi-conducteur
Pv	Photovoltaïque
Ge	Germanium
Zno	L'oxyde de zinc
Hc	L'épaisseur critique
Si	Silicium
α	Coefficient d'absorption
n	Indice de réfraction
R	Coefficient de réflexion
a_s	paramètre de maille de substrat
a_e	paramètre de maille
Lc	l'épaisseur critique
a	paramétré de maille
ϵ	Déformation hydrostatique
Eg	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	4
I.2.1 Généralités.....	4
I.2.2 Différent types de dopage.....	5
a. Semi-conducteur dopé n.....	5
b. Semi-conducteur dopé p.....	5
I.2.3 Les semi conducteur III –V.....	6
I.2.4 Les semi-conducteur II-IV.....	6
I.2.5 Les composés binaires, ternaires et quaternaires de S-C.....	7
a. Les composés binaires	7
b. Les composés ternaires.....	7
c. Les composés quaternaires	8
I.2.6 Structure des bandes d'énergie des semi-conducteurs.....	8
a. L'oxyde de zinc ZnO.....	8
b. Propriétés électriques de ZnO.....	9
c. Propriétés optiques.....	10
I.2.7 Silicium.....	11
I.2.9 Le germanium.....	13
I.2.9.1 La structure de bande.....	13
I.3 La technologie photovoltaïque.....	14
I.3.1 Histoire.....	15
I.3.2 Le soleil.....	15
I.3.3 Spectre solaire.....	15
I.3.4 L'air masse.....	18
I.3.5 Le principe de l'effet photovoltaïque.....	20
I.3.6 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	22
a.L'interaction photon/ semi-conducteur.....	22
b.Absorption.....	22
c. Les Pertes de la cellule solaire.....	23
d. Procédures pour minimiser les pertes.....	24
I.3.7 Les Cellules solaires multi-jonction.....	26

a. Aperçu sur les Cellules solaires multi-jonctions.....	26
b. Utilité des cellules multi-jonctions.....	27
c. Structure et principe de base des Cellules solaires multi-jonctions.....	28
I.3.9 Conclusion	32

Chapitre II : Etude de la structure $Si_{1-x}Ge_x$

II.1 Introduction	33
II.2 Etude des paramètres électroniques de l'alliage $Si_{1-x}Ge_x$	34
II.2.1 Paramètre de maille	34
II.2.2 La contrainte... ..	35
II.2.3 L'épaisseur critique	37
II.2.4 Gap d'énergie... ..	38
II.2.5 L'absorption	40
II.2.5.1 Etude du coefficient d'absorption	41
II.3 Courant d'obscurité.....	42
II.3.1 Densité de courant dans un semi-conducteur	42
II.3.2 Densité de courant dans une jonction PN	44
II.4 Photocourant dans une multi-jonction.....	45
II.5 Les propriétés optiques.....	46
II.6 Conclusion.....	47

Chapitre III : résultats et simulation

III.1 Introduction.....	48
III.2 Simulation de la Structure et les paramètres de la cellule étudiée.....	49
III.2.1 Coefficient de réflexion des matériaux.....	51
III.2.2 L'absorption.....	53
III.2.3 Génération de porteurs.....	54
III.2.4 L'efficacité quantique externe.....	55
III.2.5 Les caractéristiques courant tension.....	56
III.2.6 La puissance.....	57
III.3 Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59

Liste des figures

Chapitre I :

Figure (I.1) : Schéma théorique représentant les bandes d'énergie dans un métal, un semi-conducteur et un isolant.	4
Figure (I.2) : Tableau périodique partiel	6
Figure (I.3) : Structure Wurtzite de l'oxyde de zinc.....	9
Figure (I.4) : Présentation du gap de l'oxyde de zinc.....	9
Figure (I.5) : Transmittance d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures	10
Figure (I.6) : Structure de bande	11
Figure (I.7) : Dopage du silicium.....	12
Figure(I.8) :Schéma de délimitation de l'absorption du silicium	12
Figure(I.9) : Représentation des minima de la bande de conduction du Ge.....	14
Figure (I.10) : Structure de bande du germanium	14
Figure (I.11) : Spectre électromagnétique.....	16
Figure (I. 12) : Différentes constantes d'illumination	18
Figure (I.13) : Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge)	19
Figure (I.14) : Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque	21
Figure (I.15) Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect.....	23
Figure (I.16) : Effet getter.....	24
Figure (I.17) : Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie.....	27
Figure (I.18) : Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/ InGaAs/ Ge.....	29
Figure (I.19) : caractéristique courant-tension $I = f(V)$ en obscurité et sous éclairnement d'une cellule photovoltaïque.....	31

Chapitre II :

Figure (II.1) : Maille élémentaire de type diamant du silicium	33
Figure (II.2) : Variation du paramètre de maille du cristal $\mathbf{Si_{x-1}Ge_x}$ en fonction de la concentration de Germanium.....	35
Figure (II.3): illustration des deux types de déformation a) Couche en tension b) couche en compression	36
Figure (II.4) : variation de la contrainte en fonction de la concentration de Ge.....	37
Figure (II.5) : Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de Ge.....	38
Figure (II.6) : décalage d'énergie de gap par la contrainte pour l'alliage $\mathbf{Si_{1-x}Ge_x}$ en fonction de la concentration Ge et de la température T	40
Figure (II.7) : La variation d'énergie de gap par la contrainte pour l'alliage $\mathbf{Si_{1-x}Ge_x}$ en fonction de la concentration Ge et puissance P (K Bar).....	41
Figure (II.8) : l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de concentration de Ge et la température T.....	42
Figure (II.9): l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de concentration de la longueur d'onde et la température T.....	43
Figure (II.10): Jonction PN.....	45

Chapitre III :

Figure (III.1) : schéma d'une structure à base de ZnO/ZnSe/Si/Ge.....	49
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 plisseurs valeurs d'indium.....	40
Figure (III.8) : Variation du 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_{ccet} 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 plisseurs 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 : Extrait du tableau périodique des éléments chimiques.....	7
Tableau I.2 : Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide.....	17
Tableau I.3 Résumé des différentes distributions spectrales.....	20
Tableau II.1 : Paramètres des atomes des cristaux de Silicium et de Germanium massifs.....	35
Tableau II.2. Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la Température.....	39
Tableau III.1 Les paramètres des couches ZnO , ZnSe , Si et Ge	51

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 Etats 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 de puis 1990. Cette recherche est orientée sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : (augmentation du rendement de la cellule, et la diminution du 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 standards. Ils pourraient à priori couvrir une large gamme de compositions et donc d'applications comme le montre la figure 1 [3].

L'étude présentée dans ce mémoire, porte sur la modélisation et la simulation d'une cellule photovoltaïque de type multi-jonction à base de ZnO/ZnSe/Si/Ge.

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions fondamentales des semi-conducteurs et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, la caractéristique électrique et les principaux facteurs limitant le rendement de conversion qui permettent de modéliser la cellule et les pertes de la cellule solaire.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des paramètres physiques de l'alliage **Si_{1-x}Ge_x** (paramètre de maille, la contrainte, épaisseur critique, et coefficient d'absorption) et les différentes équations qui donnent ces paramètres.
- le troisième chapitre est consacré à l'étude et la simulation de chaque paramètre caractérisant la cellule solaire pour aboutir à la fin au rendement de notre cellule multi-jonctions à base de ZnO/ZnSe/Si/Ge.

Chapitre 1 L'état de l'art

I-1 Introduction

Le développement dans le domaine de la micro-électronique a connu une énorme croissance durant le demi-siècle dernier. Ce développement est dû en grande partie aux évolutions techniques et en particulier à la miniaturisation des dispositifs semi-conducteurs, mais aussi à l'utilisation de nouveaux matériaux surtout les matériaux composés tel que les III-V et les II-VI pour différentes applications dans l'optoélectronique et l'électronique de puissance [04].

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.

Ce premier chapitre est consacré en premier lieu aux notions fondamentales des semi-conducteurs III-V, II-IV. Nous aborderons par la suite les notions nécessaires sur la source d'énergie exploitée dans le domaine photovoltaïque : le rayonnement solaire puis nous déduirons le principe de l'effet photovoltaïque et les constituants de base de la cellule solaire qui est l'une des nombreuses applications des semi-conducteurs.

I.2 Les Semi- conducteurs

I.2.1 Généralités

On différencie trois types de matériaux : les isolants, les conducteurs et les semi-conducteurs. Ceux-ci sont intermédiaires entre les métaux et les isolants : à $T=0K$ un semi conducteur se comporte comme un isolant. Néanmoins, il conduit l'électricité dès que la température augmente. La résistivité des semi-conducteurs varie entre $10^{-3}\Omega.cm$ et $10^{-9}\Omega.cm$, alors que celle des métaux est de l'ordre de $10^{-6}\Omega.cm$ et celle des isolants peut atteindre $10^{22}\Omega.cm$. Dans un semi conducteur il existe deux types de conduction : la conduction par électron et la conduction par trou. Lorsque dans un cristal certaines liaisons entre atomes se cassent, les électrons sont libres de se déplacer, l'emplacement de liaison cassée est appelé trou. Sous l'effet du champ électrique les électrons se déplacent dans le sens inverse du champ et les trous se déplacent dans le sens de champ. [05]

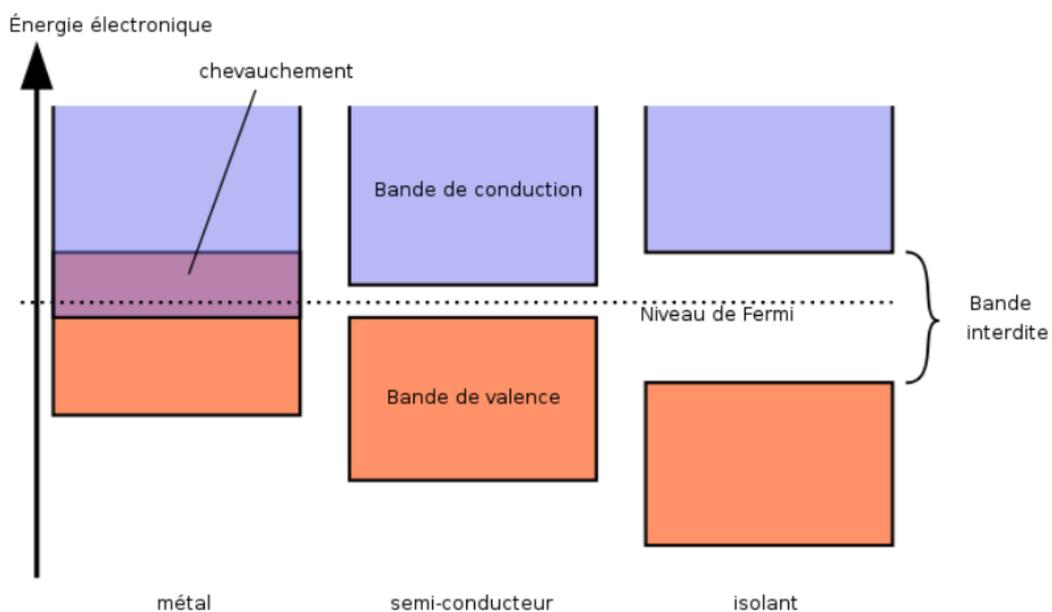


Figure I.1 : Schéma théorique représentant les bandes d'énergie dans un métal, un semi-conducteur et un isolant.

I.2.2 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 [06]

a. Semi-conducteur dopé n

Le matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous.

La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ;

$$(N_d - N_a > 0) \quad (1.1)$$

Ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

À la température ambiante pratiquement, tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$$n = n_0 + N_d$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous

b. Semi-conducteur dopé p

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons

La concentration d'accepteurs sera donc supérieure à la concentration de donneurs;

$$(N_a - N_d > 0) \quad (1.2)$$

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé p, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$P = P_0 + N_a$$

I.2.3 Les semi conducteur III –V

Les matériaux semi-conducteurs III-V sont des corps composés formés à partir d'un élément de la colonne III et d'un élément de la colonne V du tableau de la classification périodique de Mendeliev (**figure I.3**). Ainsi de nombreux composés binaires, ternaires et quaternaires peuvent être réalisés.

					III	IV	V	VI
					5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène
					13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre
30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium				
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure				
80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium				

Figure I.2 : Tableau périodique partiel [07].

I.2.4 Les semi-conducteur II-IV

Les semi-conducteurs II-VI sont constitués par l'association des atomes de la colonne II avec ceux de la colonne VI de la table périodique des éléments chimiques (**Tableau I.1**) [08].

IA-B	IIA-B	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB
Li ^{Z=3}	Be⁴	B ⁵	C ⁶	N ⁷	O⁸	F ⁹
Na ¹¹	Mg¹²	Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S¹⁶	Cl ¹⁷
Cu ²⁹	Zn³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se³⁴	Br ³⁵
Ag ⁴⁷	Cd⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te⁵²	I ⁵³
Au ⁷⁹	Hg⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po⁸⁴	At ⁸⁵

Tableau I. 1 : Extrait du tableau périodique des éléments chimiques.
(Colonnes II et VI en gras)

Ces atomes ne possèdent que 2 électrons de valence sur leur dernière orbitale s contre 4 sur les orbitales s et p. La liaison II-VI résulte donc de l'hybridation sp^3 des orbitales atomiques (liaison covalente) avec, en plus, une partie ionique non négligeable due à la différence de la nature chimique entre le cation (élément II) et l'anion (élément VI) très électronégatif [09].

I.2.5 Les composés binaires, ternaires et quaternaires de S-C

a. Les composés binaires

Les semi-conducteurs binaires sont composés de deux atomes dont la somme des électrons de valence des deux atomes est égale à huit.

Les semi-conducteurs binaires les plus courants sont les semi-conducteurs composés d'éléments des colonnes III-V et II-VI du tableau périodique.

b. Les composés ternaires

Les ternaires : Des composés ternaires sont synthétisés en mélangeant trois éléments. Ceux-ci désignés également sous le nom des composés ternaires ou des alliages. D'après la table périodique, on peut mélanger deux éléments du groupe III et un élément du groupe V pour former des ternaires tels que $Ga_xIn_{1-x}As$. Alternativement on peut mélanger un élément du groupe III et deux éléments du groupe V pour former des

ternaires tels que $ln_{1-y}As_y$, ici x et y sont des compositions chimiques, les valeurs de x et de y sont entre 0 et 1. Ces alliages sont caractérisés par la présence du coefficient stœchiométrique x.

Ex : $Al_xGa_{1-x}As$, $ln_xGa_{1-x}As$, $Al_xln_{1-x}As$.

c. Les composés quaternaires :

Ce type d'alliages semi-conducteurs fait intervenir quatre composés binaires et est caractérisé par la présence de deux coefficients stœchiométriques x et y. Un intérêt particulier a été porté récemment aux alliages quaternaires principalement à cause de l'avantage qu'ils offrent à concevoir des dispositifs avec des propriétés physiques souhaitées. Ex : $Ga_xln_{1-x}As_yP_{1-y}$, $Ga_{1-x}ln_xAs_ySb_{1-y}$.

I.2.6 Structure des bandes d'énergie des semi-conducteurs:

Les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons en fonction de leurs vecteurs d'onde. On les représente donc dans l'espace réciproque, et pour simplifier, dans les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin. Elles se décomposent en bandes de valence la plus haute, la bande de conduction la plus basse, et la bande interdite qui les sépare est qui détermine principalement les propriétés de transport du semi-conducteur.

a. L'oxyde de zinc ZnO

Structure cristalline

L'oxyde de zinc est un oxyde transparent conducteur du groupe II-VI. Il cristallise sous différentes structures comme le sel gemme, le zinc blende et la Wurtzite (**figure I.4**). Les films d'oxyde de zinc sont principalement connus sous la structure Wurtzite. Cette structure peut se définir comme un empilement hexagonal d'oxygène ($a=3,250\text{Å}$, $c=5,205\text{Å}$). Les tétraèdres sont liés entre eux par les atomes d'oxygènes et leurs centres sont occupés par un cation Zn^{2+} .

Les atomes d'oxygène et de zinc se trouvent respectivement dans les positions: $O^{2-}(1/3;2/3; z)$, $(1/3; 2/3 ; 0)$ avec $z= 0,38$.

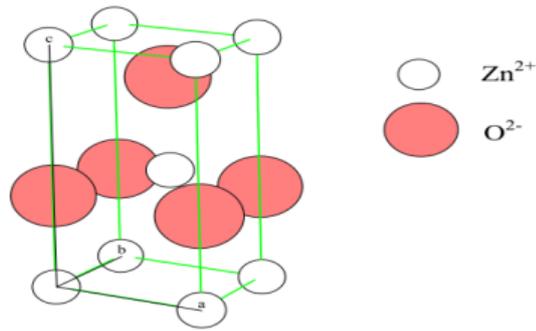
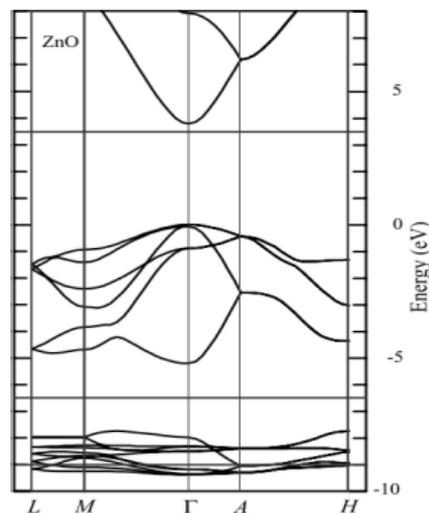


Figure. I.3: Structure Wurtzite de l'oxyde de zinc.

b. Propriétés électriques de ZnO

L'oxyde de zinc présente un gap direct (**figure I.4**); ceci est dû au fait que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent sur le même point de l'espace des k (k étant le vecteur d'onde dans la zone de Brillouin).

Figure. I.4: Présentation du gap de l'oxyde de zinc.



La conduction électrique de l'oxyde de zinc est due à la présence des atomes de zinc dans des sites interstitiels ainsi qu'aux lacunes d'oxygène. Par ailleurs, le ZnO stœchiométrique est un isolant. Le dopage permet d'améliorer la conductivité électrique de ce matériau.

L'oxyde de zinc est un TCO qui peut avoir un dopage type p ou type n [10]. Les éléments chimiques qui permettent un dopage type n du ZnO sont l'aluminium [11], le gallium [12] et l'indium [13].

Ces dernières années, des travaux de recherches se sont orientés vers l'étude et la synthèse de l'oxyde de zinc dopé p [14, 15]. Parmi les dopants qui permettent d'obtenir ce type de dopage, il y a l'azote, et le Co-dopage azote aluminium. Look et al ont réalisé des films de ZnO de type p, à l'aide d'un dopage à l'azote, présentant une mobilité μ_p des trous de l'ordre de $2 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ [11].

c. Propriétés optiques :

L'oxyde de zinc ZnO est un matériau transparent, son indice de réfraction varie entre 1,9 et 2,2 [16,17]. Il présente une absorption aux environs de 360 nm, longueur d'onde dans l'ultraviolet, ce qui explique la valeur du gap des films minces de ce matériau. Par contre, il est transparent dans le spectre visible et proche infrarouge comme l'indique la (**figure I.5**).

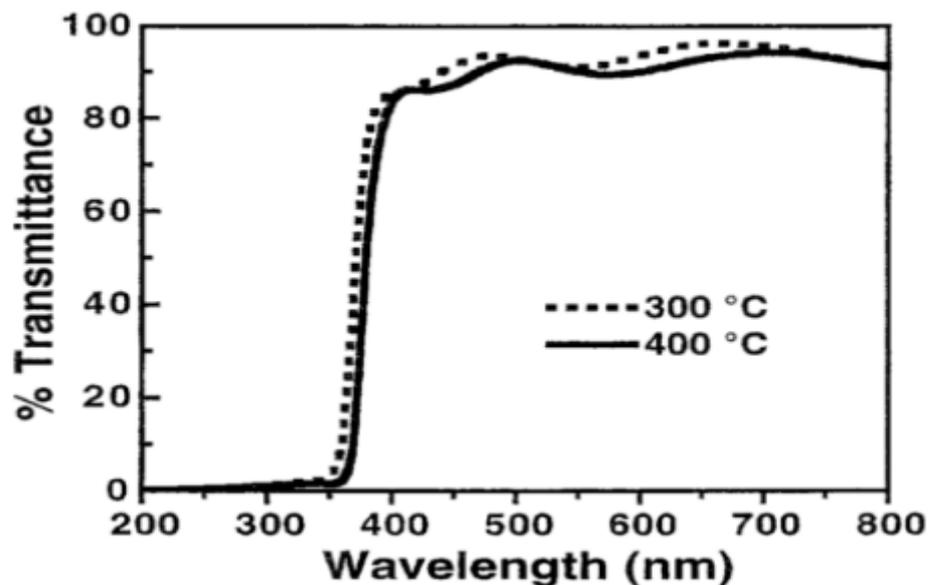


Figure I.5: Transmittance d'un film d'oxyde de zinc recuit pour différentes températures [18].

En plus des propriétés de transparence de l'oxyde de zinc, ce matériau présente aussi la propriété de luminescence. Sous l'effet d'un faisceau lumineux d'énergie supérieure au gap du ZnO, l'oxyde de zinc émet des photons. Ces photons ont généralement une longueur d'onde de l'ordre de 550 nm correspondant à la lumière verte [19-20].

I.2.7 Silicium

Le silicium est un élément abondant sur la croûte terrestre, parfaitement stable et non toxique, il est caractérisé par une structure de bande de type indirect c'est-à-dire que le maximum de bande de valence et le minimum de bande de conduction ne coïncident pas dans l'espace des vecteurs d'ondes K.

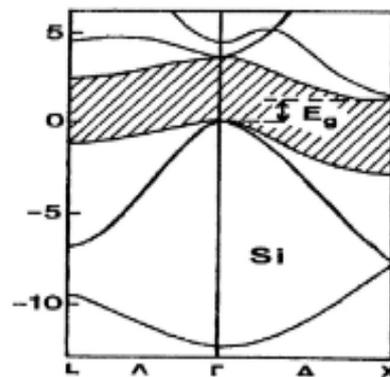


Figure I.6: Structure de bande [21]

Pour obtenir un matériau de type P, le dopage se fait avec le bore car il contient 3 électrons de valence, et pour obtenir un matériau de type N le dopage se fait avec le phosphore (5 électrons de valence).

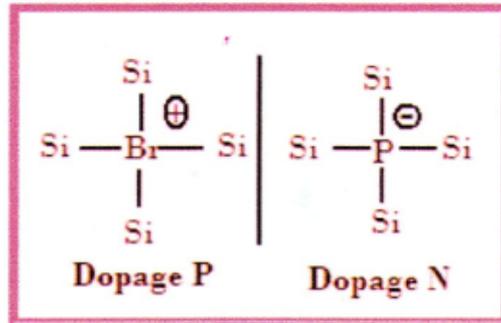


Figure I.7: Dopage du silicium

A la température ambiante, le silicium existe sous différentes textures comme le silicium amorphe ou le silicium cristallin.

La (**figure I.8**) représente la quantité d'énergie solaire convertie en énergie électrique, avec l'utilisation d'une cellule à base de silicium, le rayonnement solaire n'est pas totalement converti en énergie électrique. En effet, les photons d'énergie supérieure à l'énergie du gap seront absorbés et sont à l'origine de la création des paires électrons trous. Dans ce cas on peut observer la perte de l'énergie excédentaire sous forme d'énergie thermique. Les photons d'énergie inférieure à l'énergie du gap ne seront pas absorbés et leur énergie est considérée comme perdue.

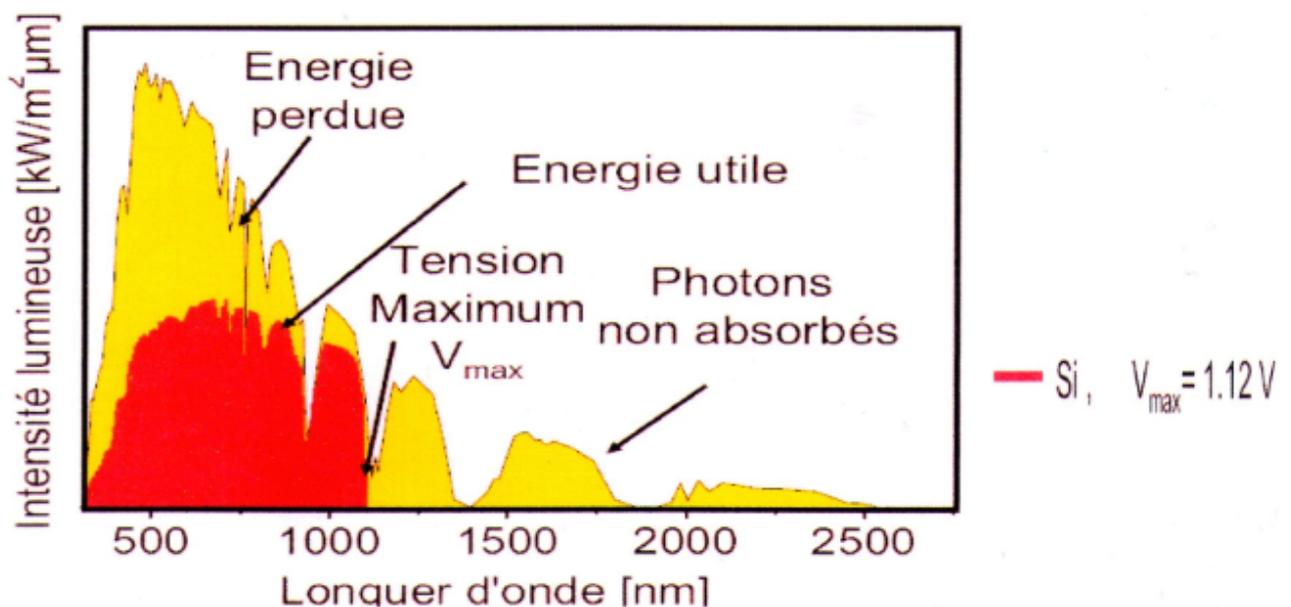


Figure I.8 : Schéma de délimitation de l'absorption du silicium [22].

a. Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires. L'intérêt de l'utilisation du silicium polycristallin est justifié par le faible coût du matériau tout en conservant un bon rendement des cellules qui est actuellement de l'ordre de 14% [23].

La limitation du rendement de collection est causée par une perte des porteurs de charge créés qui sont piégés sur des défauts de structure tels que les joints de grains ou les macles, mais aussi par des impuretés présentes dans le matériau. Les impuretés accumulées sur ces défauts de structure agissent comme centres recombinants, d'où une limitation de la durée de vie des porteurs de charge minoritaire. Ces défauts agissent comme des pièges pour les porteurs minoritaires et comme des barrières de potentiel pour les porteurs majoritaires induisant ainsi une diminution du photocourant [24].

I.2.9 Le germanium

Le germanium est découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1886, il peut être trouvé à 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) [25].

I.2.9.1 La structure de bande

La structure de bande du germanium est minimum de la bande de conduction à lieu dans les directions correspondant aux diagonales du cube, donc nous sommes en présence de 8 minima [25].

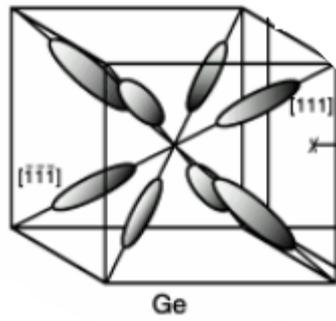


Figure I.9 : Représentation des minima de la bande de conduction du Ge.

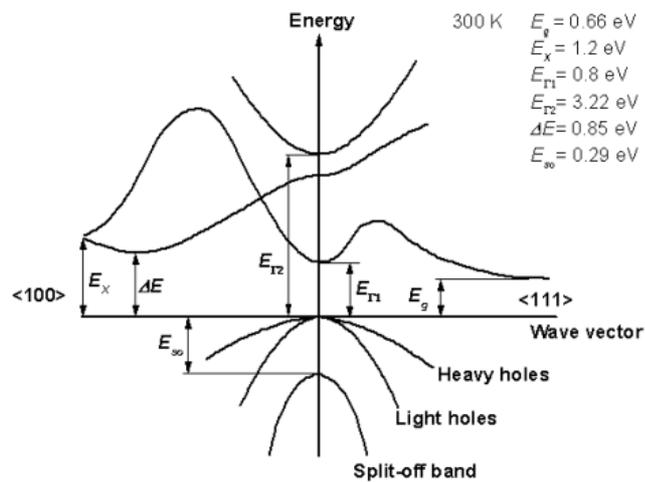


Figure I.10 : Structure de bande du germanium

I.3 La technologie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque (PV) transforme l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de semi-conducteurs. C'est la technologie qui a le plus grand potentiel, mais aussi qui nécessite le plus de développement technique. Cette technologie est à la base des cellules solaires photovoltaïques qui ont sérieusement commencées à être étudiées depuis les années 1950 quand la première cellule solaire à base de silicium cristallin, avec un rendement de 6%, a été développée dans les laboratoires Bell. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques pendant des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules solaires trouvèrent leurs premières applications dans l'alimentation des satellites.

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 (Charpin, 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 [26].

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 [27].

I.3.3 Spectre solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, sa décomposition en longueurs d'ondes est appelée spectre électromagnétique. Elle est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

Où h est la constante de Planck, ν la fréquence, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

C'est cette relation mise à jour par Louis de Broglie en 1924 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules « les photons » et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

La **figure I.14** montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre **390 nm** (violet) à **780 nm** (rouge).

Le **tableau I.2** montre la gamme de longueur d'onde approximative des couleurs visibles.

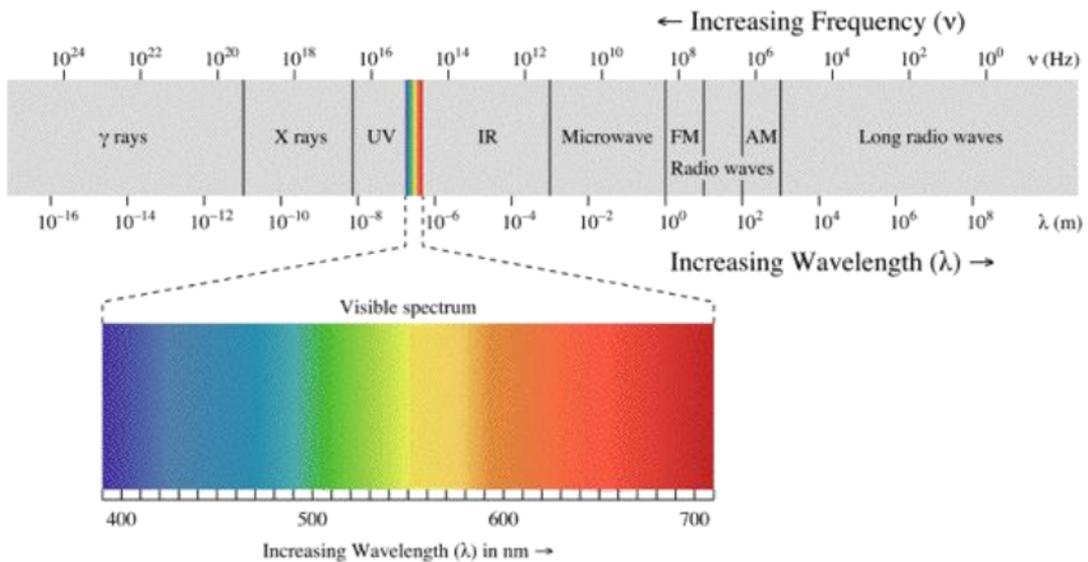


Figure I.11 : Spectre électromagnétique [28]

Le spectre de lumière visible	
Couleur	Longueur d'ondes (nm)
Rouge	622-780
Orange	597-622
Jaune	577-597
Vert	492-577
Bleu	455-492
Violet	390-455

Tableau I.2 Longueurs d'ondes approximatives des différentes couleurs dans le vide [29].

Le soleil émet de la lumière de l'ultraviolet aux infrarouges en passant par le visible du spectre électromagnétique. L'irradiance solaire a la plus grande ampleur aux longueurs d'onde visibles et un pic dans le bleu-vert.

I.3.4 L'air masse

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de **0.22** à **10 microns (um)**. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets (< 0.4 um).
- 47% dans la bande visible (**0.4** à **0.8 um**).
- 44% dans la bande des infrarouges(>**0.8 um**).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de **1.37 KW/m²** avec un spectre centré au voisinage de $\lambda = \mathbf{0.48\ um}$

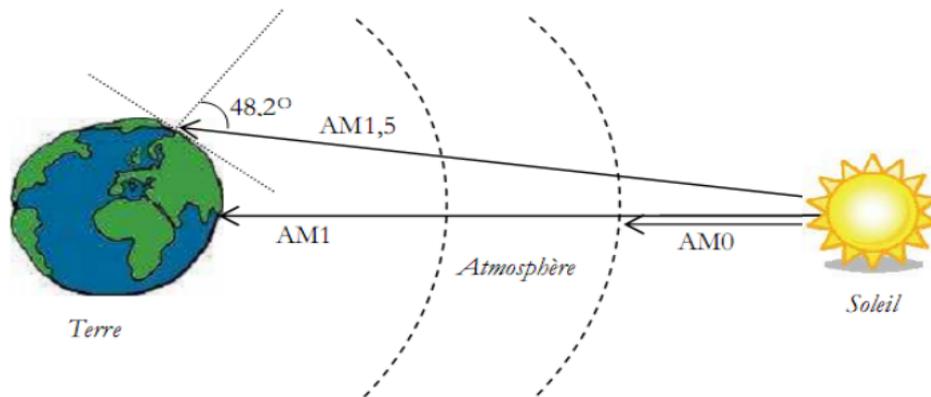


Figure I.12 : Différentes constantes d'illumination [30].

L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre n'est plus que de 0.9 KW/m^2 . Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse (figure 2.3), défini par $AM = 1/\cos\alpha$ où α représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale **AM0** représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère, sa puissance est de 1367W/m^2 , **AM1** correspond au soleil à la verticale ($\alpha = 0^\circ$) avec une puissance d'incidence de 925W/m^2 , **AM2** est obtenu pour un angle de 60° et à une puissance d'environ 691W/m^2 . L'air masse **AM1.5** défini par l'angle 48.2° au dessus de l'horizon, d'une intensité de 844W/m^2 est approprié pour les applications terrestres. Le spectre solaire est représenté sur la (figure I.13), le tableau I.3 montre un résumé des différentes distributions spectrales.

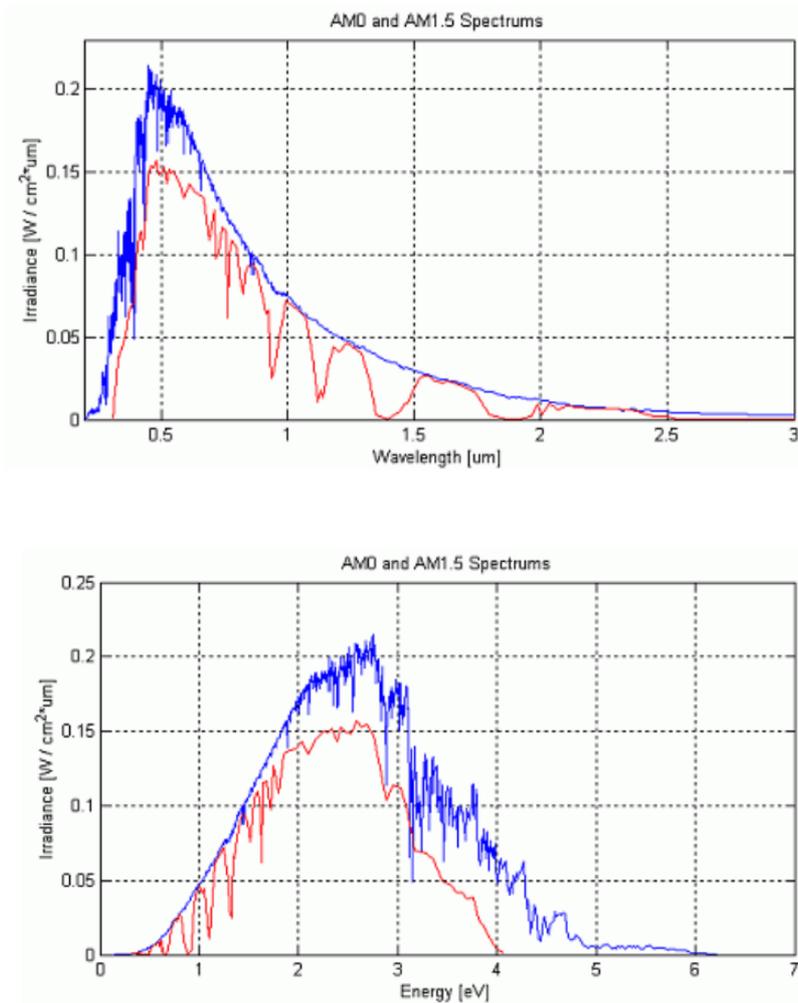


Figure I.13 :Distribution spectrale de l'énergie solaire AM0 (bleu) et AM1.5 (rouge) [31].

Hauteur	Position du soleil	Irradiance (intensité, puissance) (W/m^2)	Distribution spectrale
En dehors de l'atmosphère	-	1367	AM0
Surface	$\alpha = 90^0$	925	AM1
Surface	$\alpha = 48^0$	963	AM1.5
Surface	$\alpha = 60^0$	691	AM2

Tableau I.3 Résumé des différentes distributions spectrales.

I.3.5 Le principe de l'effet photovoltaïque

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. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **N** et dopée de type **P**. 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** devient 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 **PN** est donc formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones **N** et **P**, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite cèdent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **N** rejoignent les trous de la zone **P** via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule.

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la (**figure I.14**) [36]. Les photons incidents créent des porteurs dans les 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 **P** et **N**, les photoporteurs minoritaires diffusent.

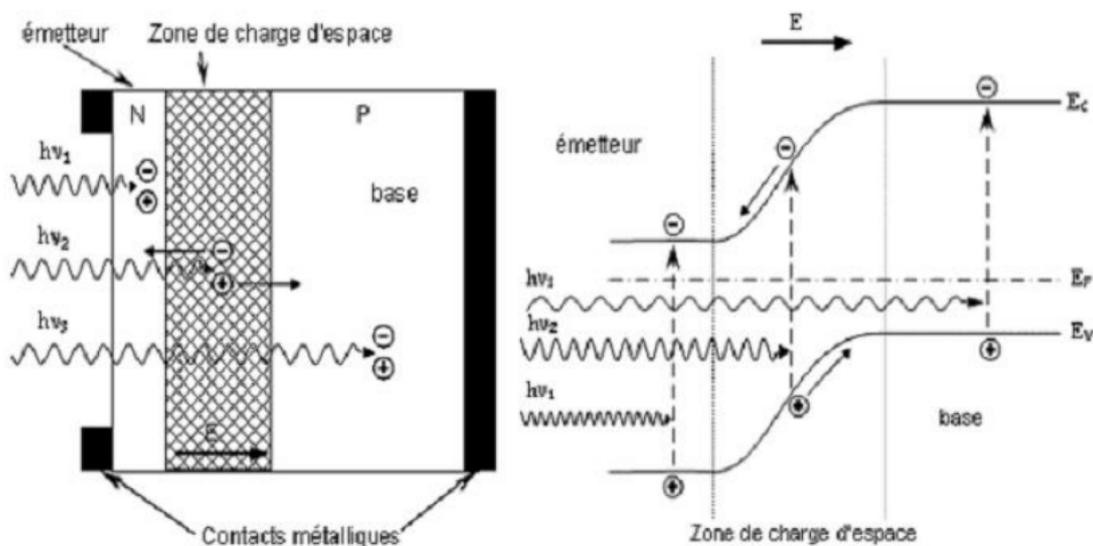


Figure I.14: Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [31].

Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photoporteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photocourant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type **N** et le trou vers la région de type **P**. Les porteurs donnent naissance à un photocourant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photocourant résultant I_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode.

I.3.6 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

a. L'interaction photon/ semi-conducteur

Dans un semi-conducteur, la nature de la bande interdite (gap) présente une caractéristique fondamentale pour l'absorption des photons. La **(figure I.16)** présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap.

Si le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k , il s'agit d'un gap direct. Les transitions sont donc directes et radiatives.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Il est toutefois possible d'exciter verticalement des électrons du sommet de la bande de valence vers le minimum central de la bande de conduction. Les électrons ainsi excités, se thermalisent (conversion de leur énergie cinétique par émission de phonons) ensuite dans le minimum absolu de la bande de conduction et peuvent participer aux phénomènes de conduction.

b. Absorption

➤ Processus d'absorption

Les principaux processus d'absorption sont l'absorption fondamentale bande-à-bande et par les porteurs libres.

➤ Absorption bande-à-bande

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur l'absorption des photons d'énergie suffisante pour pouvoir induire le saut d'un électron depuis un état occupé de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction. En réalité, cette transition se fait de différentes manières selon le gap du semi-conducteur. S'il s'agit d'un gap direct les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives, ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V. Dans le cas du gap indirect, les transitions sont obliques, les électrons du sommet de la bande de valence peuvent être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie [32].

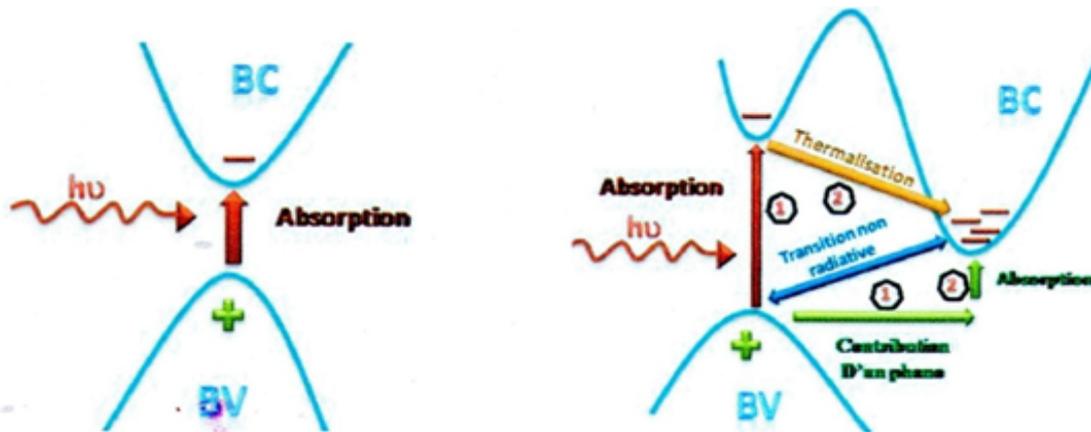


Figure I.15 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect [33].

➤ **Absorption par les porteurs libres**

L'absorption par les porteurs libres des photons incidents est un processus concurrent aux processus générant des paires électron-trou, ce processus est significatif pour les photons d'énergies inférieures au gap [34]. Dans ce processus, les électrons de la bande de conduction absorbent des photons et bougent vers des états supérieurs (même chose avec les trous).

c. Les Pertes de la cellule solaire :

Plusieurs facteurs actifs viennent influencer le rendement d'une cellule. On peut distinguer deux types de paramètres, certains facteurs ayant des limites fondamentales sur lesquelles on ne peut pas intervenir et d'autres facteurs technologiques sur lesquels on peut axer l'optimisation :

➤ **Pertes fondamentales :**

- ✓ Tous les photons d'énergie inférieure à l'énergie du gap vont être perdus, et les photons d'énergie supérieure à l'énergie du gap, vont dissiper une partie de leur énergie sous forme de chaleur. Pour les photons dont l'énergie est exactement égale

à l'énergie de la bande interdite, les pertes seront nulles et le rendement interne serait maximal (un photon créé une paire électron trou).

- ✓ Le passage du courant à travers la couche diffusée, les grilles métalliques, l'interface de contact et les prises de contact provoquent des pertes de puissance

➤ **Pertes d'origine technologique:**

Parmi ces pertes on trouve :

- ✓ Les pertes par réflexion: une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la face avant. Pour obtenir le maximum d'absorption des photons, ce problème peut être résolu par la mise en œuvre d'un traitement de surface spécifique ou/et d'un dépôt d'une couche antireflet.
- ✓ La recombinaison en surface et en volume : des porteurs photogénérés sont collectés, et d'autres seront recombinaés dans le matériau ou aux surfaces ce facteur peut être réduit à un minimum fondamental.
- ✓ La couverture par le contact sur la face avant diminue la quantité des photons transmis dans le matériau, ce facteur peut être réduit par l'utilisation des contacts métalliques semi-transparents et des grilles de faibles dimensions. [35]

d. Procédures pour minimiser les pertes :

Plusieurs techniques ont été utilisées pour réduire les pertes de la cellule solaire. Nous citons en particulier :

- La passivation de la surface de l'émetteur par une couche de silicium poreux, cette couche a pour effet de:
 - Réduire les défauts en surface.
 - Réduire la réflectivité.
 - Améliorer la mobilité des porteurs minoritaires.
- La zone active de la cellule est constituée de presque toute l'épaisseur, il est nécessaire de minimiser les impuretés métalliques du substrat pour améliorer le

rendement. L'effet «getter» [36] est une procédure qui permet la réduction de ces défauts.

L'effet «getter» nécessite une faible hauteur de barrière de potentiel, un coefficient de diffusion très élevé et la distance entre la région active et le site de piégeage doit être inférieure à la longueur de diffusion.

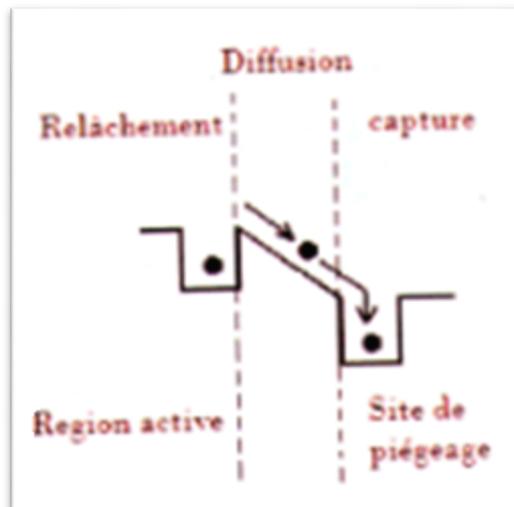


Figure I.16 : Effet getter [37]

- Le contact entre le métal et le semi-conducteur doit être ohmique pour minimiser la résistance de contact, d'où une augmentation du photocourant.
- La longueur entre deux doigts successifs doit être de l'ordre de la longueur de diffusion des porteurs libres, pour que les charges atteignent facilement les doigts du contact face avant [38] [39].

1.3.7 Les Cellules solaires multi-jonctions

a. Aperçu sur les Cellules solaires multi-jonctions

Comme son nom l'indique, la cellule solaire triple jonction est une combinaison de trois simples jonctions montées en série. Ces cellules ; qui sont à base de matériaux semi-conducteurs (III-V) ; ont été mise au point depuis les années 60 [46], le premier dispositif de la multi-jonction a été exploiter au début de 1980, il a convertie 16% de l'énergie solaire en électricité, et en 1994, US National Renewable Energy Laboratory

(NREL) a atteint un record de 30% [40] et actuellement, elles présentent un rendement très élevé environ de 42.3% [41]. Cependant, ces cellules restent peu connues face à leur coût de fabrication qui est très élevé, mais comme leur domaine de prédilection est le domaine spatial, le marché est moins sensible au coût qu'à la performance.

Le fameux 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-jonctions actuellement avoisine les 30% pour un spectre AM0. Certaines recherches se concentrent sur l'amélioration des technologies de fabrication pour en baisser le coût et les adapter aux besoins terrestres. Ils se frottent principalement aux problèmes d'interfaces et de passage de petits volumes de fabrication à des grandes quantités. Les progrès dans le domaine de l'énergie photovoltaïque se font à travers plusieurs technologies et sont incessants depuis 1970 (**Figure I.17**). Il est à noter que les rendements de conversion présentés dans ce paragraphe constituent les records certifiés.

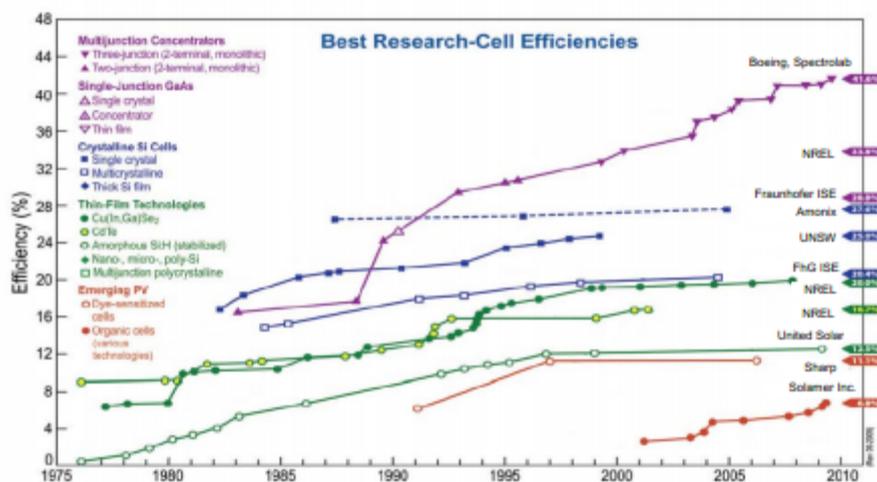


Figure I.17 : Les performances des cellules photovoltaïques en fonction de la technologie [42].

D'après la **(figure I.17)**, l'amélioration des différentes filières des cellules photovoltaïques augmente le rendement pour la filière de silicium (Silicium polycristallin, Silicium en couches minces monocristallin et amorphe) de 13% jusqu'à 17% depuis les années 1983 à 2003. Pour la filière des cellules organiques, un rendement de 5% jusqu'à 11.3% depuis les années 1992 à 2007. Pour la filière des cellules en couches minces, un rendement de 8% jusqu'à 16% depuis les années 1977 à 2003. Par contre pour la technologie des cellules multi-jonctions qui a été la plus performante parmi les autres technologies, une augmentation de 16% jusqu'à 40% depuis les années 1982 à 2007.

b. Utilité des cellules multi-jonctions

Le développement des cellules solaires multi-jonctions a été initié afin d'obtenir des rendements plus élevés non seulement dans l'état initial, mais, plus en particulier dans l'état stabilisé. Ceci est obtenu par la réduction des deux principales causes de perte résultantes de la non absorption des photons d'énergie $h\nu < E_g$ et les pertes thermique associées à la thermalisation des photoporteurs chauds créés par les photons d'énergie $h\nu < E_g$.

Dans cette approche, l'empilement de plusieurs simples jonctions ayant différents gap assure l'absorption efficace de différente partie du spectre solaire. En plus, l'utilisation des semi-conducteurs (III-V), ainsi que leurs alliages, est plus adéquate pour certaines raisons à savoir : leur gap direct et sa valeur qui est proche de la valeur optimum. Ainsi, ils sont mieux résistif au rayonnement cosmique et aux températures de fonctionnement en orbites ($\sim 50^\circ\text{C}$).

c. Structure et principe de base des Cellules solaires multi-jonctions

➤ Structure

Le concept des cellules solaire multi-jonction est simple, plusieurs cellules avec différents gaps sont empilées l'une sur l'autre de manière que ces sous-cellules allant en bas à une plus petite bande interdite que la précédente. Deux paramètres majeurs doivent être maîtrisés dans ce type de structure. Le premier est la réalisation, entre chacune des jonctions, d'une région conductrice avec contact ohmique de part et d'autre, transparente à la gamme spectrale exploitée par les cellules sous-jacentes. Ces liaisons

sont assurées par des diodes Tunnel. Le deuxième paramètre à maîtriser est l'accord du photocourant. En effet, vu que les tensions de circuit ouvert V_{co} s'ajoutent, les courants de court-circuit I_{cc} doivent être ajustés, car le plus faible d'entre eux impose sa valeur au courant résultant. Ainsi les gaps et les épaisseurs des cellules supérieures doivent être ajustés pour que ces dernières n'absorbent ni trop ni moins de rayonnement.

➤ Principe de base

Les cellules photovoltaïques à haut rendement utilisent des matériaux avec des bandes interdites qui couvrent tout le spectre solaire. Les cellules solaires multi-jonctions comprennent des sous-cellules à simple jonction superposées l'une sur l'autre de sorte que le rayonnement incident interagisse avec les cellules de gaps décroissant. Les cellules supérieures, à grands gaps, absorbent et convertissent les photons de haute énergie, et transmettent les photons de basse énergie aux cellules sous-jacentes de gap plus petits. Ces dernières absorbent alors et convertissent les photons de plus basse énergie [43].

L'expérience des cellules solaires multi-jonctions a une limitation fondamentale relative à la disponibilité des matériaux possédant des bandes interdites optimales qui permettent simultanément une grande efficacité grâce à sa faible densité des défauts. Les alliages des groupes III-V du tableau périodique sont des bons éléments pour la fabrication de ces cellules. Leurs bandes interdites couvrent une grande partie du spectre solaire, et la majorité des bandes interdites directes, ce qui implique un coefficient d'absorption élevé, et leurs structures complexes peuvent être déposées avec une très haute qualité cristalline par des techniques de croissance [44].

La **(figure I.18)** montre l'énergie solaire pouvant être théoriquement utilisée par une cellule triple jonction III-V.

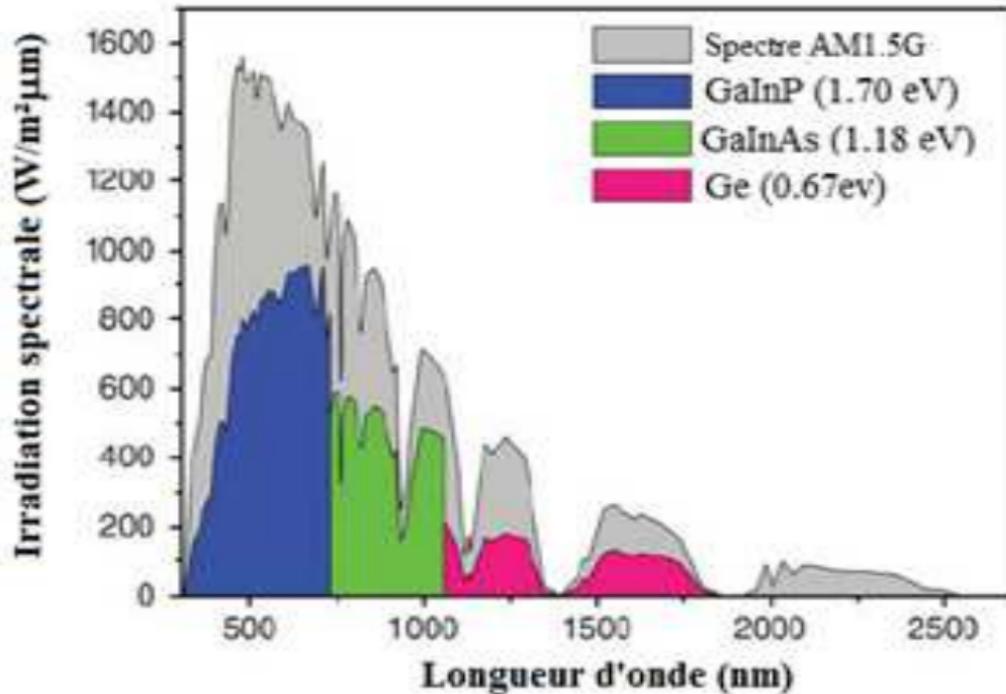


Figure I.18: Fraction du spectre solaire convertie par une cellule triple jonction à base d'InGaP/ InGaAs/ Ge.

I.3.8 Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque :

Dans la cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent, le courant d'éclairement (photocourant I_{ph}) et un courant de la diode appelé courant d'obscurité I_{obs} , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant $I(V)$ est [45] :

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

Avec

$$I_{obs}(V) = I_s \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right)$$

$$I_{ph} = q \times \Phi \left[1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha w} \right] \times A$$

Ou

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

V : Tension aux bornes de la jonction.

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

Φ : Flux incident.

T : Température en (K).

A : Surface de la cellule PV.

α : Coefficient d'absorption.

w : Largeur de la zone de déplétion.

I_s est le courant de saturation de la diode. n est le facteur d'idéalité de la diode, fonction de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est réelle).

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique courant-tension a l'allure présentée sur la (figure 1.19).

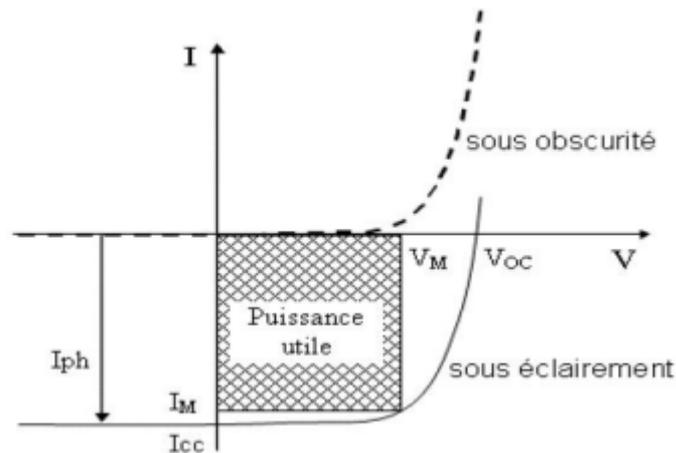


Figure 1.19: caractéristique courant-tension $I = f(V)$ en obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque [46].

A partir de la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque, on peut déduire les paramètres propres à la cellule et particulièrement :

I_{cc} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$).

V_{oc} : Tension en circuit ouvert (obtenu pour $I=0$).

I_M : Courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

V_M : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV.

η : Rendement de conversion.

FF : Facteur de forme.

Avec :

$$\eta = \frac{\text{(puissance électrique maximale fournie)}}{\text{(puissance solaire incidente)}}$$

$$\eta = \frac{V_M I_M}{P_i \cdot A} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_i \cdot A}$$

P_i : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface.

$$FF = \frac{\text{(puissance maximale délivrée sur la charge)}}{V_{oc} I_{cc}}$$

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{oc} I_{cc}}$$

I.3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions sur le semi-conducteur et le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué brièvement le fonctionnement des cellules solaires ainsi que les paramètres qui influent sur le rendement. Différentes méthodes qui contribuent à la minimisation des pertes ont aussi été relevées. En effet, dans l'objectif de réaliser des études sur les photopiles, en se basant sur les caractérisations optoélectroniques nous avons mis l'accent sur les paramètres qui peuvent être extraits et optimisés.

Chapitre 2 Etude de la structure $Si_{1-x}Ge_x$

II.1 Introduction

Le silicium fut découvert en 1824 par J.J. Berzelius à Stockholm, en Suède. C'est, après le carbone, l'élément le plus abondant de la terre. On le trouve généralement sous forme de silicate dans de nombreuses roches, argiles et terres. Le silicium est obtenu en réduisant la silice (le sable, SiO_2) par le carbone. Une fusion en zone subséquente donne un élément plus pur pour des applications nécessitant un silicium de haute pureté.

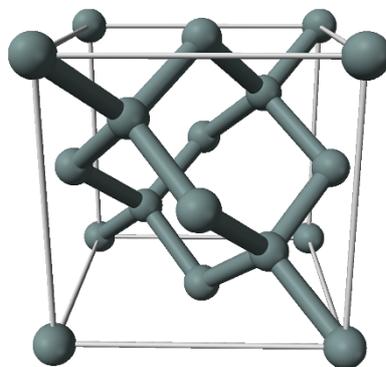


Figure II.1 : Maille élémentaire de type diamant du silicium

Les semi-conducteurs (germanium et silicium) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10¹¹ atomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque.

Le germanium est découvert par le savant allemand Clemens Winkler le 6 février 1869, il peut être trouvé à 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).

Les semi-conducteurs (germanium et silicium) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de les produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10^{11} tomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque [47].

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

II.2 Etude des paramètres électroniques de l'alliage $Si_{1-x}Ge_x$

II.2.1 Paramètre de maille

Le paramètre de maille noté « a » se définit comme étant la distance entre deux atomes dans un cristal. 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 (**équation. II.1**) qui est donnée par la relation suivante [48]:

Pour un alliage binaire : $Si_{x-1}Ge_x$, le paramètre de maille s'écrit ainsi:

$$a_{Si_{1-x}Ge_x}(A^\circ) = a_{Si} + x(a_{Ge} - a_{Si}) \quad (II.1)$$

x : Est la fraction de Ge dans l'alliage $Si_{1-x}Ge_x$.

a_M : Est le paramètre de maille du matériau M .

Il s'agit là du premier paramètre du SiGe variant avec la concentration de Germanium. La loi de Vegard appliquée à ce cas prédit une variation linéaire du paramètre. Ceci est une extrapolation extrêmement courante et utile. La mesure ne montre qu'une infime déviation autour de cette loi, **Figure III.1**.

	Si	Ge
a(A°)	5,43	5,66

Tableau II.1. Paramètres des atomes des cristaux de Silicium et de Germanium massifs.

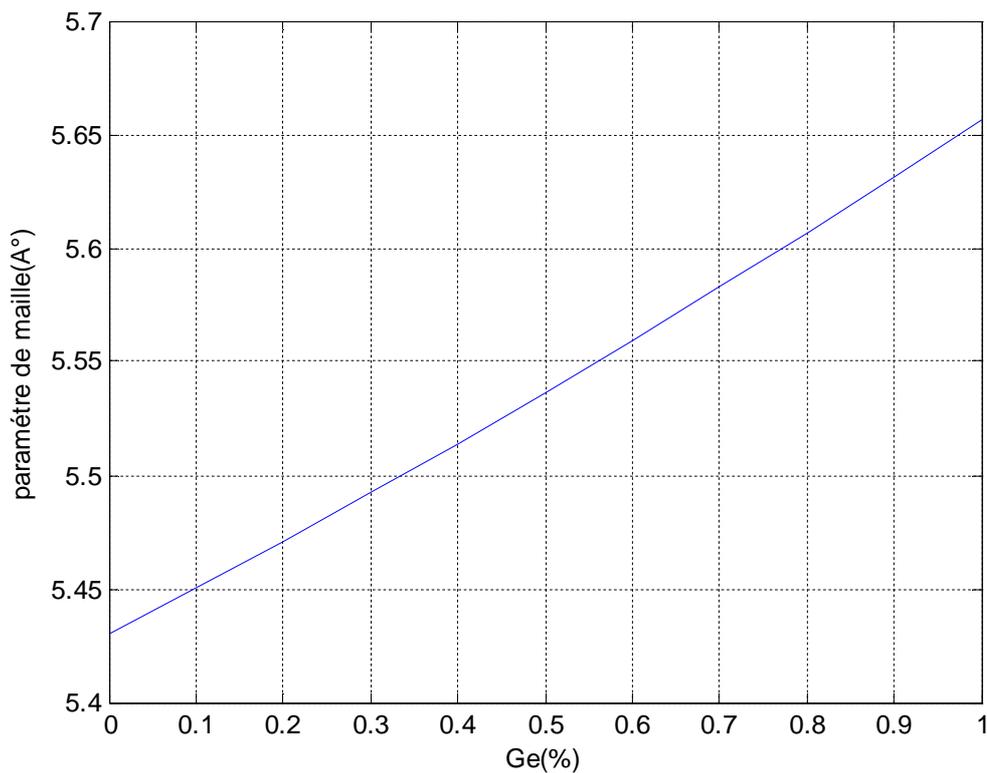


Figure II.2 : Variation du paramètre de maille du cristal $Si_{1-x}Ge_x$ en fonction de la concentration de Germanium.

La courbe représentée par la (figure II.2) montre la variation du paramètre de maille du cristal $Si_{1-x}Ge_x$ en fonction de la concentration de Germanium l'approximation par la loi de Vegard. Nous pouvons voir que le germanium a pour effet d'augmenter le paramètre de maille.

II.2.2 La contrainte

L'épitaxie du matériau $Si_{1-x}Ge_x$ sur Ge de paramètre de maille initialement différent provoque une contrainte. Le substrat de paramètre de maille a_s différent de celui de

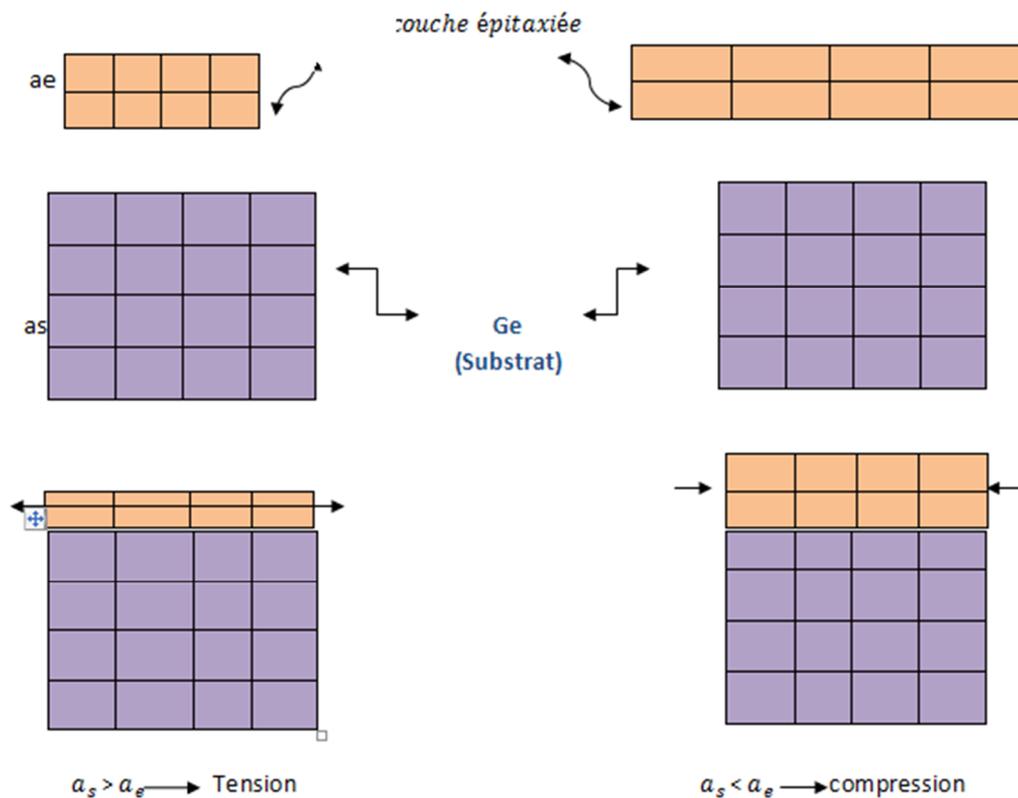
la couche épitaxiale a_e , impose sa maille à cette dernière, cette différence de maille provoque une déformation de la couche épitaxiée.

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) [53]. Les différentes contraintes induites par le désaccord de maille sont calculées à partir des équations suivantes [49]:

$$\epsilon = \frac{a_s - a_e}{a_s} \quad (II.2)$$

On note : a_s paramètre de maille du substrat Ge.

a_e paramètre de maille de la couche épitaxiée.



(a)

(b)

Figure II.3: illustration des deux types de déformation

a) Couche en tension

b) couche en compression

La simulation de la contrainte est représentée dans la (figure II.4) suivante :

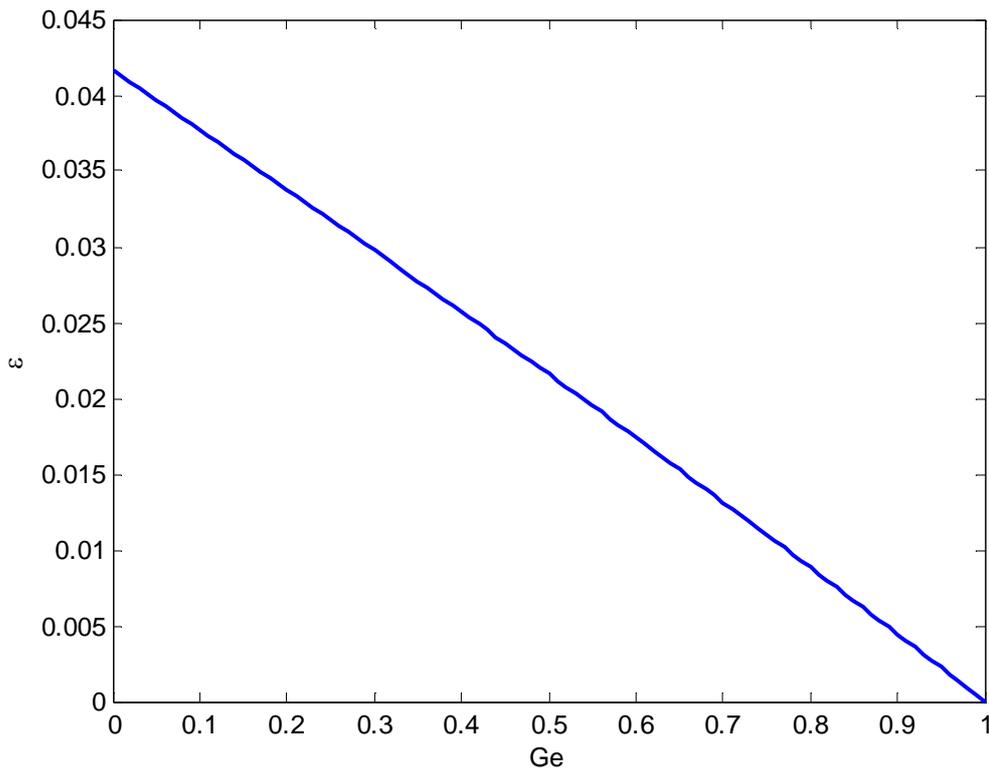


Figure II.4 : variation de la contrainte en fonction de la concentration de Ge

A partir de l'équation de la loi de Vegard (II-1) ; on a calculé le désaccord de maille dans le plan de la couche (figure II.4) et dans la direction de la décroissance par rapport à la variation des concentrations de Ge et dans l'alliage. On remarque sur la (figure II.4) que les valeurs de ϵ sont toutes positives parce que le paramètre de maille du substrat dans notre cas est supérieure à celui de la couche épitaxiée, donc on dit qu'on a une tension. Nous pouvons voir que la déformation ϵ diminue avec l'augmentation Ge.

II.2.3 L'épaisseur critique

L'épaisseur critique de la couche contrainte h_c est l'un des paramètres les plus importants que nous devons prendre en compte. Pour le calculer, on a utilisé le modèle le plus classique, celui de K. Koksa et B. Gonul, qui traite le cas d'un matériau faiblement désaccordé par rapport au substrat. 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) épitaxié sur la surface (001) est donnée par l'équation suivante [50] :

$$hc = \frac{1.9 \times 10^{-2} A^\circ}{f^2} \ln \frac{hc}{4A^\circ} \quad (II.3)$$

$$f = \frac{a_e}{a_s - a_e}$$

Épaisseur critique

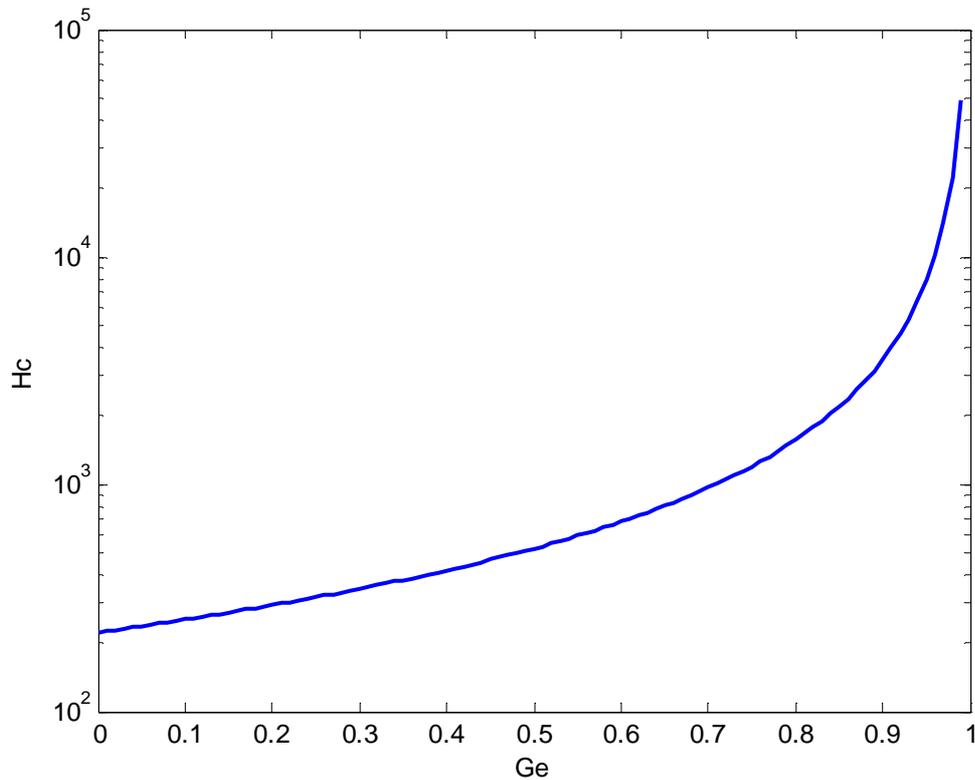


Figure II.5 : Variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de Ge

La (figure II.5) montre La variation de l'épaisseur critique en fonction de la concentration de Ge, nous constatons que Ge a pour l'effet une augmentation de l'épaisseur critique pour une contrainte en tension.

II.2.4 Gap d'énergie

L'alliage SiGe massif, ou relaxé, présente de manière générale un intermédiaire entre le cristal de Silicium et le cristal de Germanium. Ainsi, l'augmentation progressive de la fraction de Germanium dessine une modification continue des propriétés du cristal de Silicium vers celles du Germanium.

Les bandes d'énergies des deux extrêmes sont représentées en espace réciproque sur la Figure III.3 à 300K. Le Germanium et le Silicium sont tous les deux des matériaux à gap indirect. Le sommet de la bande de valence est situé en $k=0$ (région Γ) alors que le bas de la bande de conduction du Germanium se situe en vallée L, tandis que celui du Silicium se situe en vallée X. Ces bandes d'énergies définissent des valeurs de bande interdite, indirectes ou directes, qui sont donc différentes.

La taille E_g de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur. Ces variations peuvent être décrites approximativement par la fonction universelle suivante [51]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (II.4)$$

α et β sont des constantes.

Leurs valeurs à température ambiante sont données par le **Tableau II.2**.

	Si	Ge	SiGe
α (eV/K)	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$5,405 \cdot 10^{-4}$	$(4,73(1-x)+4,77x) \cdot 10^{-4}$
β (K)	636	235	$636(1-x)+235x$
$E_g(0)$	1,170	0,7437	$1,170(1-x)+0.7437(x)$

Tableau II.2. Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température [51].

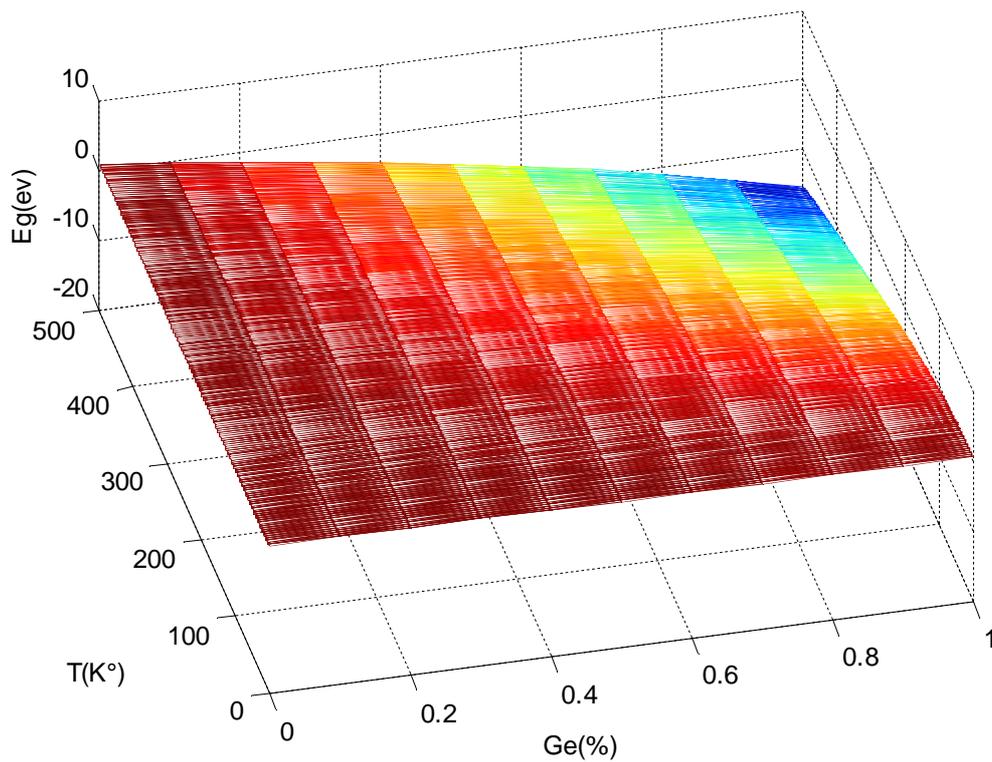


Figure (II.6) : décalage d'énergie de gap par la contrainte pour l'alliage $Si_{1-x}Ge_x$ en fonction de la concentration **Ge** et de la température **T**.

D'après le résultat de simulation représenté sur la (figure II.6) on peut remarquer l'effet de la variation de gap de l'alliage $Si_{1-x}Ge_x$ contraint sur le substrat de Ge. On peut remarquer la réduction de la largeur de la bande interdite avec l'augmentation de la concentration de Ge et que la température joue un rôle important sur l'augmentation de la bande interdite (E_g).

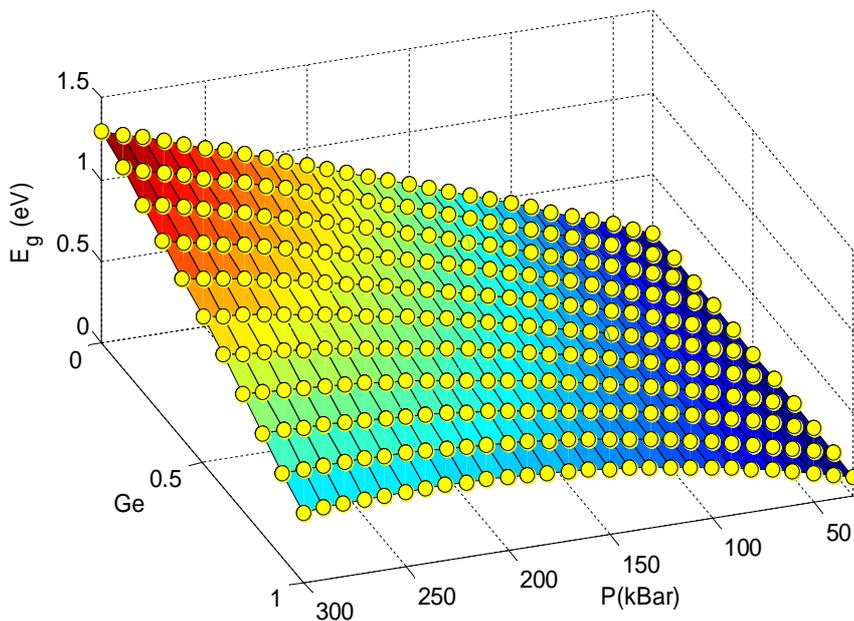


Figure (II.7) : La variation d'énergie de gap par la contrainte pour l'alliage $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ en fonction de la concentration **Ge** et puissance **P** (K Bar).

II.2.5 L'absorption

Seule la lumière absorbée est 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 [52].

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. [53].

II.2.5.1 Etude du coefficient d'absorption

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 [54]:

$$\alpha(E) = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (II.5)$$

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

α_0 : Constante,

E_g : L'énergie de gap du matériau semi-conducteur.

Nous avons représenté sur la (**figure II. 7**) , l'évolution du coefficient d'absorption ; une en fonction de la concentration de Ge et la température T pour différentes énergies des photons incidents fixes et l'autre en fonction des longueurs d'ondes des photons incidents pour différentes concentrations Ge.

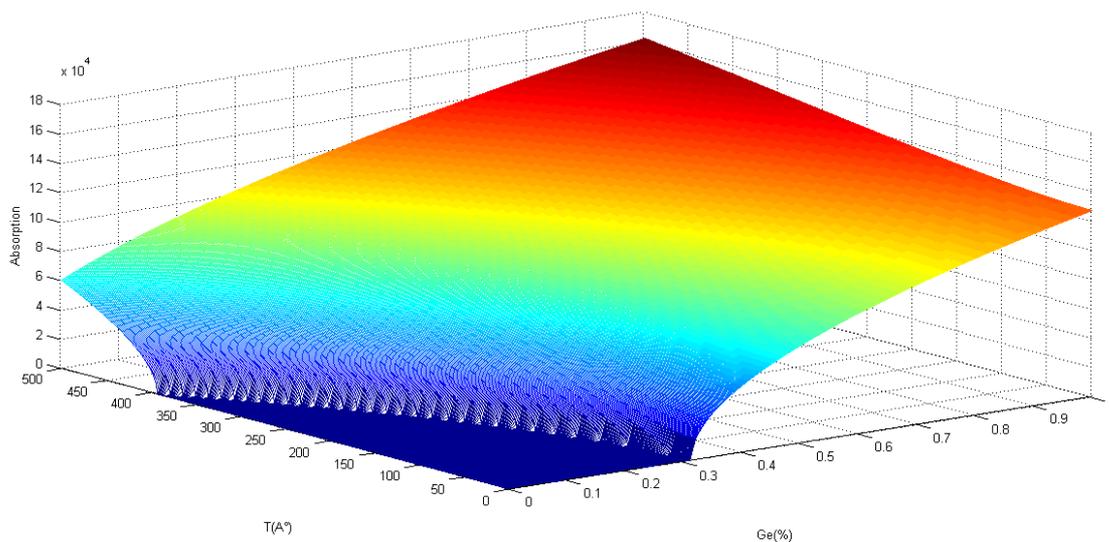


Figure II. 8 : l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de concentration de Ge et la température T.

A cause de la décroissance du gap en fonction de la concentration de Ge, une augmentation du coefficient d'absorption est obtenue (**Figure II.7**). On remarque aussi une Saturation du coefficient d'absorption avec l'augmentation de la température.

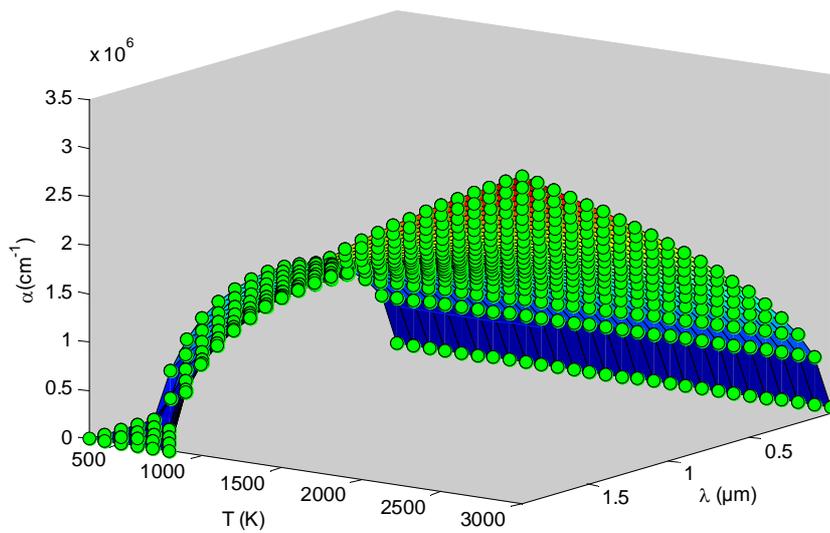


Figure II.9 : l'évolution du coefficient d'absorption en fonction de concentration de la longueur d'onde et la température T.

La **Figure II.9** représente la variation du coefficient d'absorption de *SiGe* en fonction de la température T 500 à 3000 et en fonction la longueur d'onde λ de 0 à 2 μm .

D'après les résultats obtenus on constate que le coefficient d'absorption est égale à $5.9 \cdot 10^5 cm^{-1}$ pour $\lambda=0.1 \mu m$, après il augmente jusqu'à la valeur maximale ($\alpha = 10^6 cm^{-1}$) pour la longueur d'onde $\lambda = 0.5 \mu m$, après cette valeur le coefficient d'absorption diminue. Lorsque la longueur d'onde λ est supérieure ou égale a la valeur de $1.1 \mu m$, on remarque qu'il n'ya pas d'absorption.

II.3 Courant d'obscurité

Une photopile sous éclaircment est considérée comme une diode polarisée en direct, un courant va s'établir dans le sens inverse du photocourant, c'est le courant d'obscurité. Le courant total sera donc la différence entre le photocourant et le courant d'obscurité [55].

II.3.1 Densité de courant dans un semi-conducteur

Dans un semi-conducteur de type N la concentration des électrons est donnée par :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{FN}}{KT}\right) \quad (\text{II.6})$$

n : Concentration des électrons

N_c : Densité d'états dans la bande de conduction.

E_c : Energie de minimum de bande de conduction

K : Constante de Boltzmann et T est la température (°kelvin)

E_F : Energie de Fermi, si le semi-conducteur est de type P, il se rapproche d'autant plus de la bande de valence et si le semi-conducteur est de type N, il se rapproche de la bande de conduction.

La densité de courant J_n dans un semi-conducteur de type N est :

$$J_n = qD_n \text{grad } n + qn\mu_n E \quad (\text{II.7})$$

Ou D_n est le coefficient de diffusion, μ_n est la mobilité des électrons et E le champ électrique En dérivant l'équation (1) on obtient :

$$\frac{dn}{dx} = -\frac{N_c}{KT} \exp\left(-\frac{E_c - E_{FN}}{KT}\right) \frac{d}{dx}(E_c - E_{FN}) = -\frac{n}{KT} \frac{d}{dx}(E_c - E_{FN})$$

Ce qui donne :

$$\text{grad } n = \frac{n}{KT} (\text{grad } E_{FN} - \text{grad } E_c)$$

Le champ électrique total est :

$$E = -\text{grad } V = \frac{1}{q} \text{grad } E_c \quad (\text{II.8})$$

On remplace l'équation 3, 4 et 5 dans 2 et on utilise la relation d'Einstein $\frac{KT}{q} = \frac{D_n}{\mu_n}$

On obtient :

$$J_n = n\mu_n \text{grad } E_{FN} \quad (\text{II.9})$$

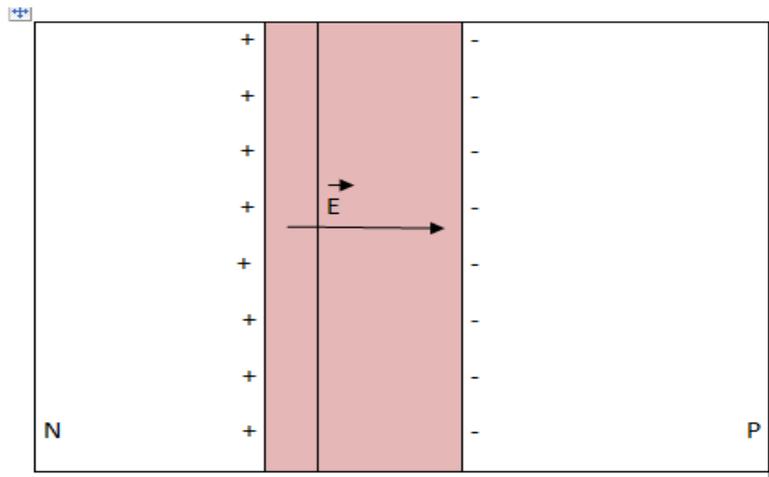
De même, la densité de courant I_p due aux trous est :

$$J_p = p\mu_p \text{grad } E_{FP} \quad (\text{II.10})$$

II.3.2 Densité de courant dans une jonction PN

Lorsque on assemble deux régions, une de type P et l'autre de type N, la différence de concentration entre les porteurs dans les deux zones va provoquer la circulation d'un courant de diffusion qui tend à égaliser la concentration en porteurs dans les deux régions.

Figure II.10 : Jonction PN



Le courant dû aux électrons dans une jonction, est défini par la somme du courant de diffusion des majoritaires J_{nn} de N vers P, et du courant des minoritaires J_{np} dans la zone P.

$$J_n = J_{nn} + J_{np}$$

La densité de courant correspondant aux majoritaire est :

$$J_{nn} = J_{N0} \exp\left(-\frac{qV_{b0}}{KT}\right)$$

De même pour les trous la densité de courant est :

$$J_p = J_{PP} + J_{PN}$$

Le courant de diffusion total est un courant direct dirigé de P vers N dû aux majoritaires à la fois pour les électrons et pour les trous, il est donné par :

$$J_D = J_{nn} + J_{PP}$$

$$J_D = J_0 \exp\left(-\frac{qV_{b0}}{KT}\right)$$

De même, le courant de saturation est donné par :

$$J_S = J_{np} + J_{pn}$$

Si aucune polarisation et aucune perturbation extérieure ne sont appliquées à la jonction

$$E_{FN} = E_{FP}, \text{ d'ou } J_S + J_D$$

Ou E_{FP}, E_{FN} sont les niveaux de Fermi pour un semi-conducteur de type N, respectivement de type P.

II.4 Photocourant dans une multijonction

Lors de la mise en contact de deux semi-conducteurs, les porteurs vont diffuser d'une région à l'autre de la même façon que pour une homojonction. A l'équilibre thermodynamique, le niveau de fermi est unique Le long de toute la cellule, une région de déplétion se forme. Les écarts d'énergie des bords de bandes, dans ces deux semi-conducteurs engendrent des discontinuités ΔE_c pour la bande de conduction et ΔE_v pour la bande de valence.

Les photons ayant une énergie inférieure à E_{g1} , et supérieure à l'énergie E_{g2} , traversent le premier matériau ayant E_{g1} , et sont absorbés par le second matériau [55].

II.5 Les propriétés optiques

Dans cette partie nous nous sommes intéressé à etudier les propriétés sur les quelles est basé la transformation de la lumiere en énergie électrique [56].

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.6 Conclusion

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

La simulation montre de l'impact de la concentration de germanium sur les alliages $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ qui constituent notre cellule:

L'augmentation de la concentration de germanium induit une diminution du gap et donne un coefficient d'absorption important.

Le prochain chapitre sera consacré à la simulation d'une cellule multi-jonction.

Chapitre 3 Simulation et résultats

III.1 Introduction

Pour mieux comprendre les mécanismes physiques agissant à l'intérieur de la cellule solaire, et par conséquent les différents paramètres qui affectent ces caractéristiques, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'identification de ces paramètres, non seulement pour l'augmentation du rendement de la cellule photovoltaïque, mais aussi pour pouvoir simuler son comportement, et optimiser ses différentes caractéristiques [57].

Ces paramètres sont déterminés difficilement par les méthodes de mesure dynamique, et surtout pour la production des cellules solaires.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'optimisation du rendement de la cellule solaire s'en basent sur l'amélioration de leurs rendements. Le problème sera présenté sous forme d'une optimisation multi - objectif des paramètres électriques et géométriques. Le travail effectué dans le chapitre précédant nous a permis d'extraire ces paramètres électriques, qui seront utilisés comme des fonctions fitness de l'optimisation multi- objectif par les algorithmes génétiques afin de minimiser les pertes d'énergie et maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie pour l'objectif d'avoir des performances maximales de la cellule solaire.

Nous présentons l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire à multi-jonction (ZnO/ZnSe/Si/Ge). L'absorbeur de la cellule (c'est-à dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous l'illumination). En augmentant, la largeur de son gap d'énergie E_g varie généralement 0.67 à 3.33 eV.

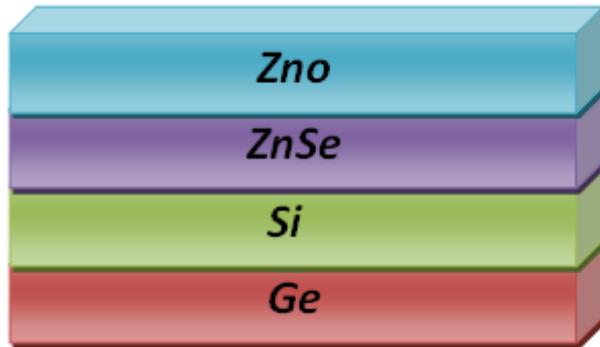


Figure (III.1) : schéma d'une structure à base de ZnO/ZnSe/Si/Ge.

La **figure (III.1)** montre la disposition des différentes couches qui constituent notre cellule, en fait avec la déposition 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 **ZnSe** sur le **Si** une autre contrainte intervient à l'interface de la deuxième hétérojonction. Dans une première partie on va étudier la structure et les paramètres de la cellule solaire. En considérant la réflexion à partir de la surface de **ZnO** et **ZnSe** et représentant l'absorption de la surface caractéristique de la densité de courant - tension (J-V), dans la deuxième partie on refait le même travail pour obtenir les concentrations adéquates qui donnent un meilleur rendement de conversion de cette cellule [58].

III.2 Simulation de la Structure et les paramètres de la cellule étudiée

La structure de la cellule solaire à multi-jonction (ZnO/ZnSe/Si/Ge) étudiée dans ce travail est illustrée dans la figure III-2. Cette partie est consacrée à l'étude de multi-jonction afin de déterminer les caractéristiques optiques, la réflexion, l'absorption, la caractéristique courant-tension et le rendement. La réflexion et l'absorption des différentes couches incluses dans la simulation par le logiciel MATLAB sont fixées aux valeurs illustrées toujours dans la (**figure III.2**).

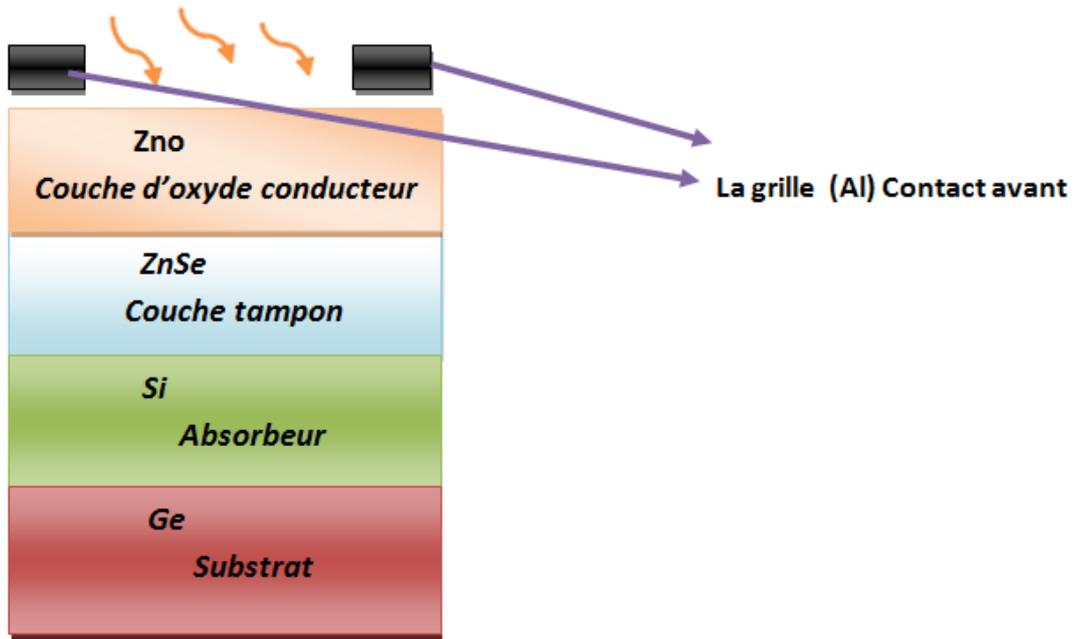


Figure III.2 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (ZnO/ZnSe/Si/Ge) étudiée.

Les paramètres des couches **ZnO**, **ZnSe**, **Si** et **Ge** ainsi que les propriétés de leurs défauts sont présentés respectivement dans le **tableau III.1**

	ZnO	ZnSe	Si	Ge	Distribution gaussienne
Nature d'énergie de gap	Direct	Direct	Indirect	Indirect	
E_g	3.4	2.7	1.12	0.67	ev
N_c	0.31	0.31	2.8	1.54	10^{19}
N_v	0.87	0.87	1.02	1.9	10^{19}
D_n	5.2	14	35	100	$cm^{-2}s^{-1}$
D_p	0.26	0.4	12.5	50	
n_i	1×10^6	5.7×10^{13}	1.5×10^{10}	2.5×10^{13}	cm^{-3}
m_n	0.24	0.1	0.2	0.08	
m_p	0.59	0.6	0.49	0.28	
Flux(F)	3	12	60	25	%

Tableau III.1 Les paramètres des couches **ZnO, ZnSe, Si** et **Ge**

Dans ce **tableau III.1**, présente le gap d'énergie, N_c et N_v les densités des états effectives, μ_n et μ_p les mobilités des électrons et trous respectivement. n et p concentrations des dopants donneurs et accepteurs respectivement.

III.2.1 Coefficient de réflexion des matériaux

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 [59] :

$$R_f = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \quad (III.1)$$

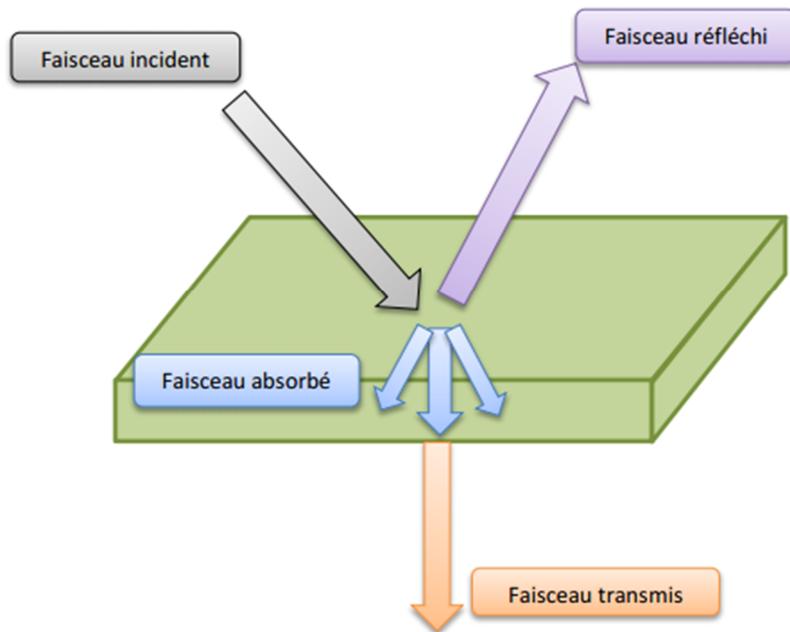


Figure (II.3): taux de réflexion

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.3).

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% [60].

III.2.2 L'absorption

Dans beaucoup d'études, il a été constaté que la relation entre le gap optique E_g et le coefficient d'absorption α pour un semi-conducteur typique est comme suit [61] :

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad cm \quad (III.2)$$

Avec α_0 , une constante de proportionnalité, qui dépend des densités des états liés à l'absorption de photon et E l'énergie d'irradiation. On peut obtenir un gap optique d'une valeur de $E_g = 1.02 \pm 0.02$ eV.[61]

La (figure III.4) représente la simulation du coefficient d'absorption des matériaux Si et Ge en fonction de la longueur d'onde.

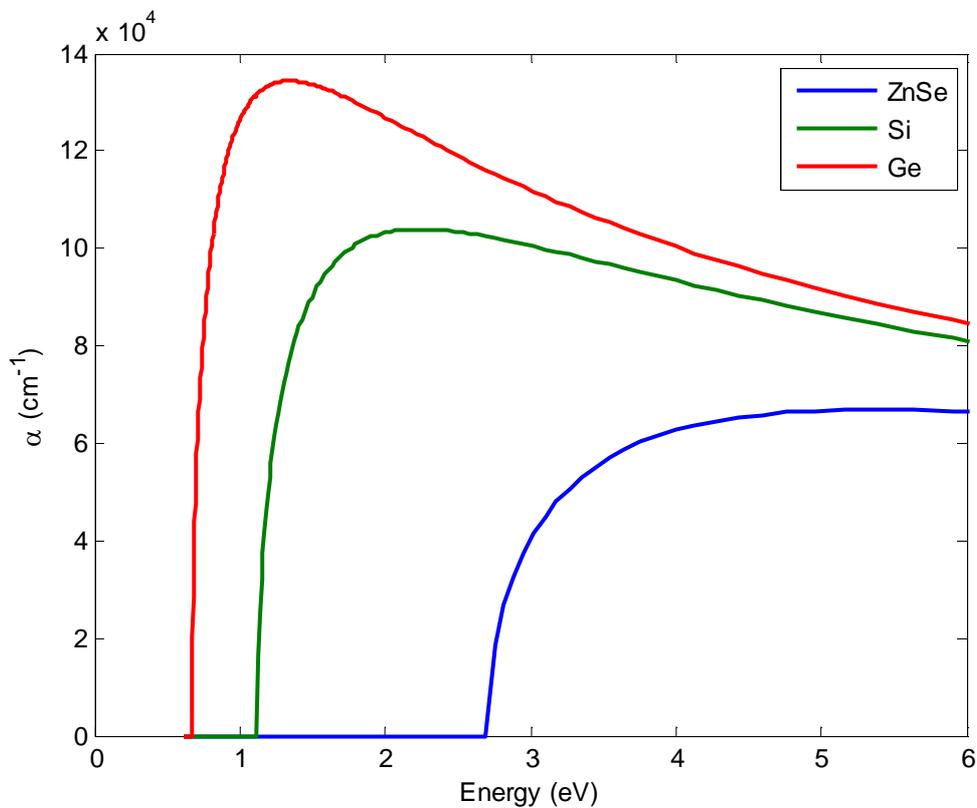


Figure III. : Variation du coefficient d'absorption en fonction de E_g (ev).

En peut remarque dans la (figure III.4) l'absorption de photon de germanium augment parce que l'énergie de photon devient égale à 0.7 (ev).

Les photons d'énergie supérieure ou égale à 1.12 (ev) sont absorbés par le Si et 2.7 absorbé par le ZnSe.

Nous constatons que l'absorption augmente avec l'augmentation de l'énergie, ce qui peut être expliqué par la quantité de photons absorbés.

III.2.3 Génération de porteurs

La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé [61]. Dans un semi-conducteur homogène, l'intensité de radiation incidente diminue dans le matériau en vertu d'une loi exponentielle avec la largeur d'appauvrissement w .

$$g = \alpha \times F \times (1 - R_f) \times \exp(-\alpha \times W) \quad \text{Carries /cm}$$

F : Flux des photons

$$w = \sqrt{\frac{2 \times \epsilon_0 \times \epsilon_r \times V_B}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} \quad \text{Cm} \quad \text{(III.3)}$$

ϵ_0 : Constante diélectrique de l'espace libre ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$).

ϵ_r : Constante diélectrique de matériau semi-conducteur.

La figure : III-5 (a) illustre la génération aux longueurs d'onde.

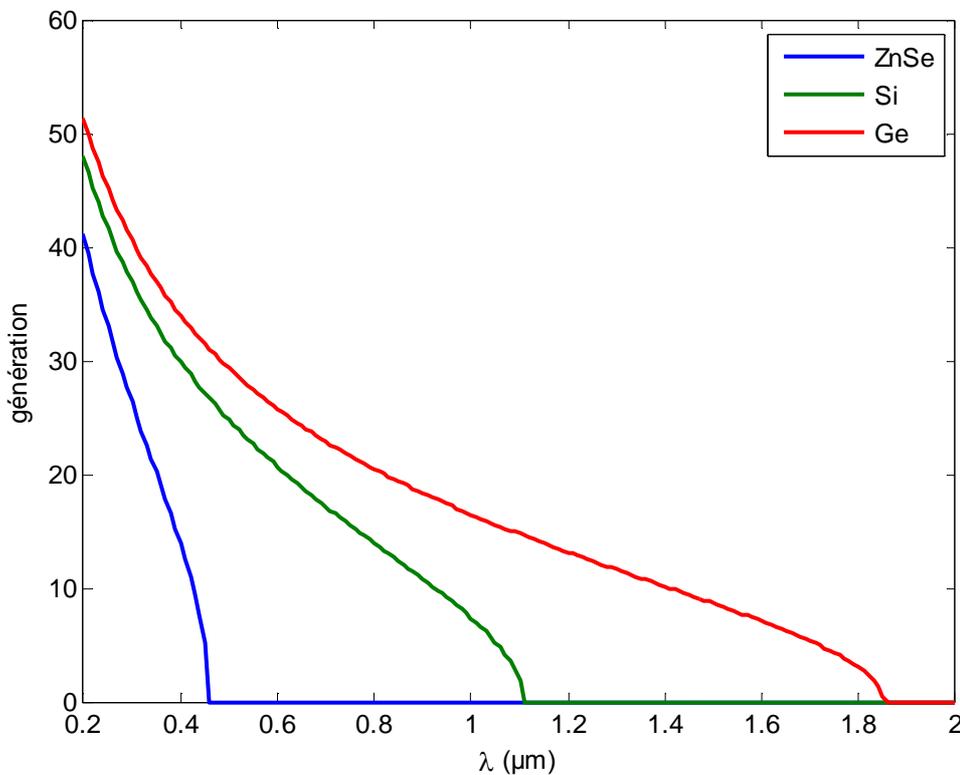


Figure III.5 : la variation de générateur des porteurs en fonction de la longueur d'onde

La (figure III.5) montre la variation de générateur des porteurs en fonction de la longueur d'onde. Pour le germanium les porteurs sont crée par les photons de longueur d'onde est inférieur ou égal à 1.87 (μm) avec 1.1 (μm) pour le Si et 0.45 (μm) pour le ZnSe.

La génération des porteurs augment lorsque la l'longueur d'onde diminue.

III.2.4 L'efficacité quantique externe

Elle est définie comme le rapport entre le nombre d'électrons effectivement collectés aux contacts et le nombre de photons atteignant la cellule. [62]

La (figure III.6) montre la variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde. L'efficacité quantique externe est donnée par la relation suivante [63] :

$$EQE(\lambda) = [1 - R(\lambda)] \times [1 - \exp(-aw)].$$

EQE(λ): efficacité Quantique Externe (%).

R(λ): Réflectivité de la cellule (%).

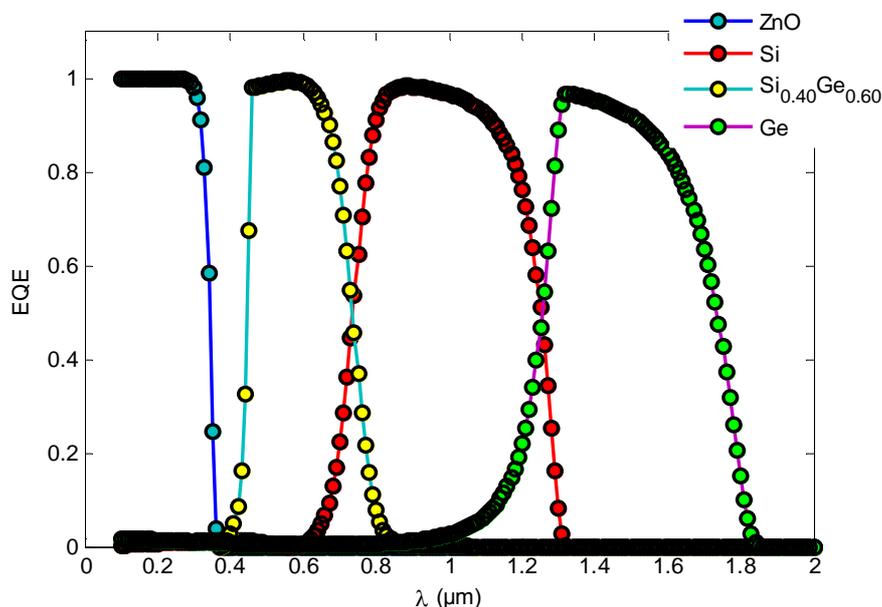


Figure III.6 La variation d'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde.

La Figure II-6 représente l'efficacité quantique externe de la couche active *SiGe* contraint sur un substrat de *Ge* ; on remarque que l'efficacité quantique externe augmente pour

chaque couche de matériaux lorsque les photons incidents sont absorbés entre l'intervalle de l'énergie de gap de chaque matériau qui donne un maximum de EQE égale à 1, l'excès des photons sera absorbé par rapport à l'énergie de gap, la somme des EQE de chaque zone donne l'efficacité quantique totale de la couche active. On remarque que cette couche a une efficacité proche de 100 %, puis elle se réduit rapidement au-delà de cette longueur qui est égale à $\lambda = 1.24/E_g$

III.2.5 Les caractéristiques courant tension

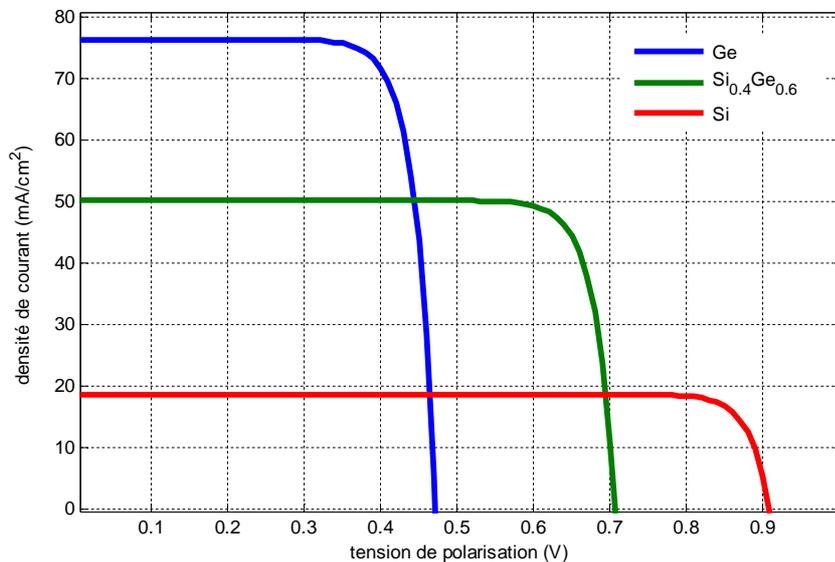


Figure (III.7): La Variation de densité de courant en fonction de tension de polarisation.

Sur la (figure III.7) sont représentées les caractéristiques courant-tension. On constate que le courant de court circuit J_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} varient en sens inverse, J_{cc} augmente .

On remarque qu'il y a une amélioration de la densité de courant avec l'augmentation de la tension de polarisation.

III.2.6 La puissance

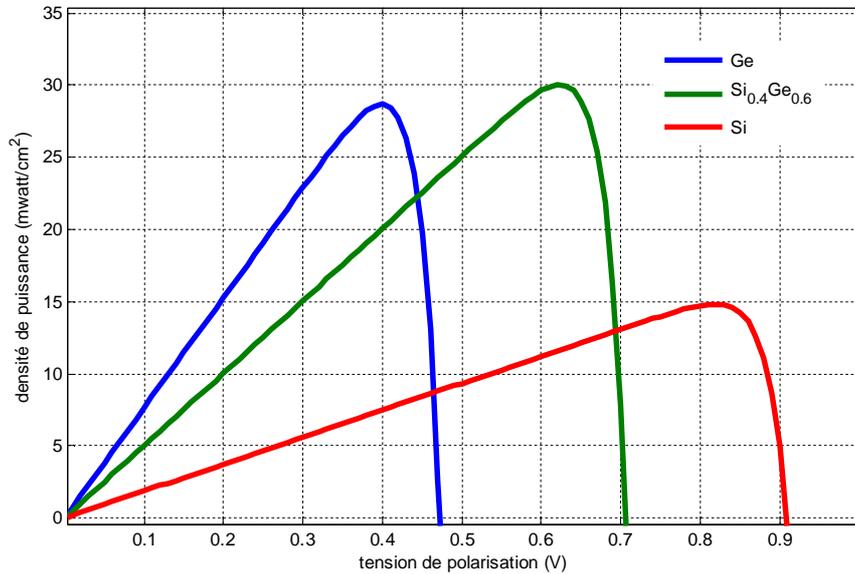


Figure III. 8 : La variation de la densité de puissance en fonction de la tension de polarisation (V)

La figure III.8 montre l'évolution de puissance de sortie en fonction de la tension. Nous avons déterminé la puissance des trois couches Ge, SiGe et Si. On constate que la puissance maximale de la structure à base de l'alliage GeSi est plus importante que les deux autres structures c'est -à-dire le Ge et le Si. A partir de cette étude on peut améliorer la puissance maximale d'une cellule solaire à base des trois matériaux.

III.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et de déduire la caractéristique courant-tension

D'après la simulation constituant notre cellule multi-jonction nous avons constaté que :

- donne un coefficient d'absorption important.



Conclusion générale

L'importante croissance des semi-conducteurs au niveau mondial est liée au fait que ces matériaux forment la base de la révolution technologique de ces quarante dernières années dans le domaine de l'électronique qui, au sens large représente le marché mondial le plus important à l'heure actuelle en même temps que celui qui bénéficie de la croissance la plus rapide. Les matériaux semi-conducteurs interviennent principalement en microélectronique.

L'activité de recherche concernant la microélectronique, est importante et porte sur la recherche de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés.

Le spectre solaire est un spectre très large pour être exploité par un seul semi-conducteur, des vastes recherches sont fait afin de trouver des matériaux à moins coût et avec des rendements maximale pour les différents technologies des cellules photovoltaïque [64].

Ce travail porte sur l'étude et la modélisation d'une cellule solaire à base de ZnO/ZnSe/Si/Ge, de l'étude des matériaux de base, aux caractérisations électriques de la cellule solaire. 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, sa caractérisation à travers la détermination du l'absorption maximale du rayonnement solaire [65].

Dans un premier chapitre, nous avons présenté quelque notion sur le semi-conducteur, le principe de fonctionnement des cellules solaires, et son application dans le domaine photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre nous avons de fait l'étude fondamentale des semi-conducteurs et l'étude des paramètres physiques de l'alliage $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ et de connaitre leurs

propriétés, pour bien savoir comment utiliser ces propriétés pour améliorer le rendement des structures à semi-conducteurs.

- Dans le troisième chapitre nous avons simulé et étudié chaque paramètre caractérisant de la cellule solaire pour aboutir à la fin au rendement de notre cellule multi-jonctions à base de ZnO/ZnSe/Si/Ge.

Bibliographie

- [01] Bailly, I., "Cellules Photovoltaïques Organiques", l'Université Bordeaux, 2010.
- [02] Bouraoui, A., "Elaboration et Caractérisation des Couches minces CuInSe_2 par Electrodeposition" 'Université Mentouri, Constantin (08/10/2009).
- [03] Bordel, D., "Développement de Nouveaux Substrats", Ecole Centrale de Lyon, (18 décembre 2007).
- [04] EL OUCHDI Ahmed Amine « Caractérisation du phénomène de transport électronique dans les matériaux composés ternaires Application au matériau $\text{GaIn}_{1-x}\text{Sb}_x$ » Université Abou Bakr Belkaid- TLEMCEM.
- [05] A. Abdelali : « Rôle du rayonnement dans l'élaboration et l'étude nanoagrégats semi-conducteur de ZnS », mémoire de magister, université de Mentouri Constantine.
- [06] Bouraoui, A., "Elaboration et Caractérisation des Couches minces CuInSe_2 par Electrodeposition" 'Université Mentouri, Constantin (08/10/2009).
- [07] Energie solaire photovoltaïque.doc << B. Flèche - D. Delagnes >>.
- [08] : P. Baranki, V. Klotchkov, I. Potykévitch, ²Electronique des semi-conducteurs ². 2^{ème} partie, Edition de Moscou (1978).
- [09] : Vincent HUARD, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble 1 (2000).
- [10]: P. Nunes et al/ Vacuum, 64 (2002) 281-285
- [11]: Z. Fanet al/ Université de Californie, 2005
- [12]: S.E. Park et al/ Journal of the Korean Physical Society, 54 (2009) 1283-1287
- [13]: S. Ilican et al/ Journal of optoelectronics and advanced Materials, 10 (2008) 2592-2598
- [14]: S. Franz et al/ Journal of Electronic Materials, 6(1977) 107-123
- [15]: O. Malik et al/ Journal of non Crystalline solids, 354(2008) 2472-2477.
- [16]: W.J. Shen et al/ Journal of Physics.D: Applied Physics, 39 (2006) 269-273
- [17]: S.A. Studenikin et al/ Journal of Applied Physics, 83 4 (1998) 2104-2109
- [18]: S. Suh et al/ Journal of Materials Science Letters, 20(2001) 115-118

- [19]:A. Moustaghfir/ Thèse, Université Blaise Pascal/ 2004
- [20]:S. Larcheri et al/ Superlattices and Microstructures, 39(2006) 267-274
- [21] "Properties of strained and relaxed Silicon-Germanium", Edited by E. Kasper, IEE Inspec, emis datareviews series N°12, 1995.
- [22] K. Köksal, B. Gönül, M. Oduncuoğlu : «Critical Layer Thickness of GaIn(n)As(sb) qws on GaAs and InP Substrates for (001) and (111) Orientations», The European Physical Journal B , Volume 69, Issue 2, 2009, pp 211-218.
- [23] BOUKARAA Imene : «Etude et simulation d'une structure à base de $B_xGa_{1-x}N/AL_xGa_{1-x}N$ POUR APPLICATION PHOTOVOLTAIQUE, Blida, USDB ,2012.
- [24] <http://ipn2.epfl.ch/LNM/cours/solide/pres/9.pdf>
- [25] J. P. Bismukes, L. Ekstrom and R. J. Paff, "Lattice Parameter and Density in Germanium-Silicon Alloys", in Journal of Physical Chemistry, Vol. 68, N°10, pp. 3021-3027, October 1964.
- [26] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta, Progress in Photovoltaic's: Research and Applications, 16-61, 2008
- [27] R. Braunstein, A. R. Moore and Frank Herman, "Intinsic Optical Absorption in Germanium-Silicon Alloys", in Physical Review, Vol. 109, N°3, pp. 695-710, February 1958.
- [28] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.
- [29] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Germanium>
- [30] V. GORGE, 'Caractérisation de matériaux et tzst de composants des cellules solaires à base des nitrures des éléments III-V', Thèse de doctorat, université paris-sud 11, 2012. (s.d).
- [31] P. Kiréev, « La Physique des semi-conducteurs », Edition Mir, Moscou (1975).
- [32] faruk kurker, "microfabrication based design and simulation of hétérojunction olar cell", MSc Thesis. INAS, çukurova university, ADANA, 2010.
- [33] Color wavelength table, www.usbyte.com/common/approximate_wavelength.htm, 02/05/2007, cosuleté le 15/04/2012.
- [34] [35] P. Michalopoulos, "Anovel approach for the development and optimization of state—of- the-art photovoltaic devices using Silvaco", Master's thesis, Naval postgraduate School, Monterey, California, 2002.

- [36] H.Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 2ème édition, Masson 1990.
- [37] M.GOUDJIL, Etude et réalisation des dépôts par CVD de ZnO transparent sur silicium. Application photovoltaïque. Mémoire de Magister, UMMTO, (2008).
- [38] M. OUDAH, Etude du silicium poreux destiné aux cellules solaires. Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, (2009).
- [39] A. Luque, S. Hegendus, "Handbook of photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons, 2003.
- [40] A. Luque, S. Hegendus, " handbook of photovoltaic science and engineering", 2003.
- [41] M. Green, D. E merry, Y. Hishikawa, "Solar cell efficiency todes", version 37, Progressin PV, Vol 19, No 1, 2011, p. 84.
- [42] A. Kergommeaux, "Synthèse de nouveaux type de nanocristaux semi-conducteurs pour application en cellules solaires ", Thèse doctorat, Université Grenoble, 2012
- [43] . Burnett, "The basic physics and design of III-V multijunction solar cells", 2002.
- [44] M. Yamaguchi, "Present status of R & D super-high-efficiency III-V compound solar cells in Japan", 17 th Photovoltaic European Conference, 2001.
- [45] 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 BekrBelkaid-Tlemcen Faculté Des Sciences, Thèse De Magister Juillet 2006.
- [46] 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.
- [47] <http://membres.lycos.fr/procession/electronique/smcd06.pdf>
- [48] Bourouislmen:«étude et simulation d'une structure a base de GaInNaS/GaAs pour le photovoltaïque», université de Blida, 2011.
- [49] L. Khaled Sofiane : « Etude et simulation des structures à base de GaInAsP et AlGaInAs pour le photovoltaïque », mémoire de magister, Université de Blida, 2012.
- [50] [51] K. Otsubo, Y. Nishijima, T. Uchida, H. Shoji, K. Nakajima, H. Ishikawa, Jpn, J. Appl. Phys 38, L312–L314 (1999).
- [52] K. Otsubo, Y. Nishijima, T. Uchida, H. Shoji, K. Nakajima, H. Ishikawa, Jpn, J.

Appl. Phys 38, L312–L314 (1999).

[53] Malika Madani « réalisation des couche antireflets dans les cellule solaire a couche mince» Université Abou-BakrBelkaid de Tlemcen (2006).

[54] 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.

[55] K. Koksai, 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.

[56] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.

[57] Garnier, J., "Elaboration de Couches Minces d'Oxydes Transparents et Conducteurs par Spray CVD assiste par Radiation Infrarouge pour applicationsPhotovoltaïques ", Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris,(2décembre 2009).

[58]: NICHIPORUK OLEKSIY: «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités», Institut national des sciences appliquées de LYON, 2005.

[59]: [60] Loïc BAILLY, ' CELLULES PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES SOUPLES A GRANDE SUFACE', L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2010.

[61] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat de l'université de toulouse ; 2009 pp18-33

[62] H.Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Paris, 1996.ISBN: 2-225-85124-7.

[63] : [64] JérômeFaist : 'introduction à la physique des semi-conducteur', 'institut de physique ', université de Neuchatch, mai 2001.

[65] A.Chovet, P Masson : « physique des semi-conducteurs », école polytechnique paris tech, 2004-2005.