

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D' ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Génie électrique**

Spécialité : **MATERIAUX ET DISPOSITIFS ELECTRONIQUES ET
PHOTOVOLTAIQUES**

Présenté par

Rima IOUELHADJEN

Thème

**Effet de la température sur les performances des
cellules solaires à base d'arséniure de gallium GaAs.**

Mémoire soutenu publiquement le 06/07/2017 devant le jury composé de :

M^{lle} Hatem Djedjiga

M.C.A, UMMTO, Présidente

M^{lle} Dalila HOCINE

M.C.A, UMMTO, Encadreur

M^{me} Ait abdelmalek Ghania

M.C.B, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

Mes remerciements vont, en premier lieu, à Allah le tout puissant qui m'a permis d'achever ce travail par sa miséricorde.

Je tiens à témoigner ma profonde gratitude et ma reconnaissance à Mlle D.Hocine, enseignante de la Faculté de Génie Electrique et Informatique à l'UMMTO qui a suivi mon travail avec beaucoup de rigueur et d'efficacité. Merci pour ces précieux conseils, sa disponibilité et son soutien.

Je remercie chaleureusement Mlle Samira. OUSSIDHOM, pour l'intention au logiciel AFORS-HET, pour ses explications et sa gentillesse, et de m'avoir aidé à accomplir ce travail

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail.

Un grand merci à tous ceux et celles ayant contribué de loin à l'aboutissement de ce modeste travail.

Enfin mes chaleureux remerciements sont adressés à mes chers parents.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents, pour tout ce qu'ils représentent pour moi, tous les sacrifices qu'ils font sans compter, ils ont toujours été présents pour moi. Merci de m'avoir donné les armes pour affronter la vie, que dieu me les garde ;

Mon frère Mouhamed , mes sœurs Hafida, Lilia, et Djazira ;

Mon fiancé Farid qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que dieu le garde pour moi ;

Mes amies qui me soutiennent, plus particulièrement : Rym, Sarra, Assia, Katia ,Ourdia, Nadia, et Dahbia ;

Tout ceux et celle qui me sent cher(e) s

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre 1 : Etude des propriétés de l'arsenic de gallium GaAs

Introduction	02
I- Structure cristalline d'Arséniure de Gallium (GaAs)	02
II- Propriétés électriques et physiques du GaAs	03
III- Propriétés optiques (absorption) du GaAs.....	04
IV-Structure de bandes d'énergie de GaAs.....	07
V- Procédés d'élaboration du GaAs	08
V-1 Elaboration massive.....	08
V-2 Elaboration du GaAs en couche mince.....	10
a) L'épitaxie en phase vapeur (VPE).....	10
b) Epitaxie par jets moléculaires (MBE)	11
VI-Avantages et Inconvénients	12
Conclusion.....	13

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

Introduction	14
I- Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	14
I-1 L'absorption de la lumière.....	15

I-2 Le rayonnement solaire partiellement absorbé par la Terre.....	15
I-3 Le spectre solaire	16
I-4 Masse d'air	17
I-5 Standardisation du spectre solaire	17
II- Matériaux semi-conducteurs	19
II-1 Semi-conducteurs intrinsèques.....	19
II-2 Semi-conducteurs extrinsèques.....	19
III- Les cellules solaires au Silicium.....	19
III-1 Le silicium.....	19
III-2 Propriétés photovoltaïques du silicium.....	19
III-3 Les différentes technologies du silicium.....	21
III-3-1 La cellule au silicium amorphe	21
➤ Avantages:.....	21
➤ Inconvénients:.....	21
III-3-2 La cellule au silicium monocristallin	22
➤ Avantages:.....	22
➤ Inconvénients:.....	22
III-3-3 La cellule au silicium multicristallin	23
➤ Avantages:.....	23
➤ Inconvénients:.....	23
VI- Dopage	24
VI-1 Dopage de type N	25

VI-2 Dopage de type P	26
V- Les cellules solaires à homojonction (conventionnelles)	26
V-1 L'effet photovoltaïque	26
V-2 Structure d'une cellule solaire conventionnelle	27
V-3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	27
V-4 Rappel sur la jonction PN	28
VI- Association des cellules photovoltaïques	30
VI-1 Association en série	30
VI-2 Association en parallèle	30
VI-3 Regroupement en série/parallèle	31
VII- Modélisation d'une cellule photovoltaïque	31
VII-1 Cellule photovoltaïque idéale	31
VII-2 Cellule photovoltaïque réelle	32
• Influence de la résistance série R_S	33
• Influence de la résistance parallèle R_{Sh} ou R_p	33
VIII- Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque	34
IX- Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire	35
a) Courant de court-circuit, I_{cc}	35
b) Tension de circuit ouvert V_{co}	36
c) Facteur de forme, FF	35
d) La puissance maximale P_{max}	37
e) Le rendement η	37
f) Le rendement quantique, EQE	38

Conclusion	38
 Chapitre 3 : Etude des cellules solaires à homojonction P-N en GaAs	
Introduction	39
I- Structure d'une cellule solaire homojonction GaAs	39
II- Fonctionnement d'une cellule solaire GaAs.....	39
II-1 Dopage et formation de la jonction P-N.....	39
II-2 La collecte des charges	40
II-3 Diagramme de bandes d'énergie de la cellule GaAs	41
III- Caractéristiques électriques d'une cellule solaire en GaAs	42
IV-Recombinaisons dans le GaAs.....	43
V-Les différents types de cellules solaires en GaAs	43
V-1 Les cellules simples	44
V-2 Les cellules multi-jonction (Tandem)	44
IV-Rendement des cellules solaires au GaAs	45
Conclusion	47

Chapitre 4 : Etude de l'effet de la température sur les performances des cellules solaires à base d'arséniure de gallium GaAs

Introduction	48
I- Présentation du logiciel AFORS-HET	48
I-1 Introduction à l'interface utilisateur AFORS-HET	48
I-2 Définition d'une structure	49
I-3 Analyse des résultats de simulation	53
I-3-1 Cellule sous illumination	55
I-3-2 Simulation d'une courbe I-V	56
II-Structure de la cellule simulée	57
III-Les paramètres de simulation	58
V. Résultats de simulation	59
V-1 Caractéristique courant/tension (I-V)	59
V-2 Influence de la température sur la caractéristique (J-V) de la cellule solaire GaAs	60
V-3 Effet de l'épaisseur de l'émetteur	62
V-4 Effet de l'épaisseur de la Base	64
V-5 Effet du dopage de l'émetteur	64
V-6 Effet du dopage de la base	66
Conclusion	67
Conclusion générale	68

Liste des figures :

Figure (I.1): Structure cristalline du GaAs.	2
Figure (I.2) : Représentation simplifiée des niveaux énergétiques des excitons. Les trois premiers niveaux excitoniques sont représentés.	5
Figure (I.3) : Schéma du spectre d'absorption d'un semi-conducteur massif à basse température. Le continuum et le premier niveau excitonique sont représentés	5
Figure (I.4) : spectres d'absorption du GaAs massif obtenus à différentes température.....	6
Figure (I.5): Structure de la bande d'énergie	7
Figure(I.6) : Structures de bandes schématiques d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect	8
Figure (I.7) : Dispositif expérimental de la méthode Czochralski.....	9
Figure (I.8) : Cristal de GaAs obtenu grâce à la méthode Czochralski.....	10
Figure (I.9): Technique MBE pour différents composés à base de GaAs	11
Figure (II-1) : spectre solaire haute résolution.	16
Figure (II-2) : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère	17
Figure (II.3) : Principaux spectres solaires utilisés dans le domaine photovoltaïque	18
Figure (II-4) : Structure de bande de Silicium.	20
Figure (II-5) : cellule solaire au silicium amorphe	22
Figure (II-6): Cellule au silicium monocristallin	22
Figure (II-7) : Cellule au silicium multicristallin.	23
Figure (II-8) : répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque	24
Figure (II-9) : a) la libération d'un électron par le phosphore. b) Schéma des bandes	25
Figure (II-10) : a) libération d'un trou par le bore .b) schéma des bandes	26
Figure (II-11) : composants d'une cellule photovoltaïque.	27
Figure (II-12) : Cellule solaire sous éclairnement.	28
Figure (II-13) : Origines des courants opposés circulant dans la jonction PN en court-circuit	29
Figure (II-14) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_S cellules Identiques.....	30
Figure (II-15) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_P cellules identiques	30
Figure (II-16) : Caractéristique résultante d'un groupement en série/parallèle.	31
Figure (II-17) : Modèle de cellule photovoltaïque idéale	31
Figure (II-18) : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.	32

Figure (II-19): Caractéristiques I-V d'une cellule solaire sous différents éclairagements.	34
Figure (II-20) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire.	34
Figure (II-21) : différents régimes selon la puissance d'éclairagement.	36
Figure (III-1) : structure de la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n).	38
Figure (III-2) : Cellule solaire p-n en GaAs.....	40
Figure (III-3) : diagramme des bandes d'énergies de la cellule GaAs.....	41
Figure (III-4): Structure de la cellule solaire GaAs(p) /GaAs(n) avec fenêtre AlGaAs(p) ...	43
Figure (III-5): Domaine spectral couvert par une cellule tandem GaAs/GaSb	44
Figure (III-6) : Evolution du rendement des cellules solaires en GaAs.....	46
Figure (IV-1) : La fenêtre principale AFORS-HET avec toutes les options visibles (après la définition d'une structure et activation du mode de calcul DC).	49
Figure (IV-2) : La fenêtre principale AFORS-HET et la fenêtre « Define Structure ».	50
Figure (IV-3) : Pour chaque couche, les paramètres optiques et électriques du matériau peuvent être définis dans la fenêtre « Layer ».	51
Figure (IV-4) : Des couches électriques et optiques peuvent être ajoutées et que des conditions aux limites et d'interface doivent être définies	51
Figure (IV-5) : En plus des paramètres du matériau, les distributions des défauts peuvent être définies.	52
Figure (IV-6) : L'ordre de la couche peut être réorganisé, ainsi que la sauvegarde de la structure et le calcul de la cellule.....	53
Figure (IV-7) : La fenêtre « résultats » montre les diagrammes de bandes, les densités des porteurs et du courant ainsi que la recombinaison et la génération	54
Figure (IV-8) : Plusieurs outils permettant d'analyser les données en détails.	54
Figure (IV-9) : Dans la fenêtre « Results »,	54
Figure (IV-10) : Le mode de calcul DC permet la sélection d'illumination constante et le courant ou la tension constante.	55
Figure (IV-11): Étapes pour configurer la simulation d'une courbe I-V.	56
Figure (IV-12) : La mise en place de la simulation d'une courbe I-V sous illumination.....	57
Figure (IV-13) : Structure de la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n) simulée.....	57
Figure (IV-14) : Caractéristique J(V), de la cellule à homojonction p/n à base de GaAs	59

Figure (IV-15) : Caractéristiques J-V des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) sous différentes températures.	61
Figure (IV- 16) : Rendement de la cellule p/n en GaAs en fonction de la température	62
Figure (IV-17) : Variation du rendement de la cellule solaire p /n en GaAs avec la variation de l'épaisseur de l'émetteur	63
Figure (IV-18) : Variation du rendement de la cellule solaire p /n en GaAs avec la variation de l'épaisseur de la base.	64

Liste des tableaux :

Tableau (I.1) : Caractéristiques du GaAs.	3
Tableau (III-1) : Amélioration du rendement des cellules solaires en GaAs.....	45
Tableau (IV-1) : Les Paramètres de simulation de la cellule solaire à homojonction P-N en GaAs.....	58
Tableau (IV-2) : Paramètres électriques de la cellule solaire p/n à base de GaAs à T=25°C.	
Tableau (IV-3) : Paramètres photovoltaïques des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) en fonction de la température.....	61
Tableau (IV-5) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n au GaAs en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.	61
Tableau (IV-5) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n au GaAs en fonction de l'épaisseur de l'émetteur	63
Tableau (IV-7) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n en GaAs en fonction de l'épaisseur de la base.	64
Tableau (IV-9) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n en GaAs en fonction de la variation de la concentration de dopage de l'émetteur	66
Tableau (VI-11) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n en GaAs pour différentes concentrations N_A de la base.	67

INTRODUCTION GENERALE

L'importance de l'énergie dans notre société est devenue évidente au cours des dernières années. Parmi les différentes énergies alternatives, l'énergie solaire a la propriété très souhaitable d'être essentiellement illimitée et propre.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une source d'énergie renouvelable capable de produire de l'électricité en grandes quantités sur le long terme sans émettre de gaz à effet de serre. Plusieurs avancées technologiques sont effectuées ces dernières années pour réduire le prix du watt crête du module et augmenter son rendement. Aux cours de ces dernières années, des améliorations considérables concernant les performances des cellules solaires ont permis d'aboutir à des rendements de conversion photovoltaïque respectivement de 24.8 % et de 23 % pour des cellules solaires à base d'arsenic de gallium et de silicium, sous la condition d'éclairement d'un soleil [1].

En effet, le GaAs est un matériau très prometteur pour des applications PV grâce à largeur de sa bande interdite $E_g = 1.42$ eV qui est proche de la valeur nécessaire à la conversion de la plus grande gamme du rayonnement solaire.

Les rendements des cellules solaires sont mesurés dans les conditions standard (STC): une irradiance normale de 1000 W/m² et une température de cellule de 25°C . Or, les cellules solaires sont exposées aux rayonnements solaires susceptibles de les chauffer (notamment sous rayonnements de fortes intensités) impliquant une élévation de la température de la cellule au-delà de 25°C . L'étude l'impact de la température sur leurs performances, notamment le rendement, est donc une nécessité.

L'objectif de ce travail est l'étude des effets de la température sur les performances photovoltaïques des cellules solaires à base de GaAs (sans concentration). Pour cela, nous étudions, par simulation numérique, le comportement des cellules solaires p/n en GaAs à température ambiante (25°C). Nous étudions ensuite les effets dus à l'élévation de la température sur les caractéristiques électriques de ces cellules solaires. Notre étude sera complétée par l'analyse, par simulation, de l'effet de la variation des paramètres structuraux (épaisseurs des couches et leurs dopages) sur les performances photovoltaïques des cellules solaires en GaAs, dans le but d'atteindre les plus hauts rendements possibles.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, nous étudions les propriétés structurales et optoélectroniques du matériau GaAs. Nous décrivons ensuite ses techniques d'élaboration.

Le deuxième chapitre explique le principe de la conversion photovoltaïque, le fonctionnement des cellules solaires conventionnelles ainsi que les différentes filières technologiques.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude des cellules solaires à homojonction P-N en GaAs. Nous présentons leur structure de bandes d'énergie en expliquant leur fonctionnement. Nous présentons également les différentes architectures de cellules solaires en GaAs et leur rendement.

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats de simulation des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) à température ambiante. Nous étudions ensuite les effets de l'augmentation de la température de fonctionnement des cellules sur leurs performances photovoltaïques. L'analyse des résultats de simulation nous permettra aussi de définir les paramètres les plus influents sur les performances de ces cellules dans le but d'optimiser leurs structures pour aboutir à un meilleur rendement.

Nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

Introduction

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

I- Structure cristalline d'Arséniure de Gallium (GaAs)

L'arséniure de gallium (GaAs) est un matériau à gap direct, composé de deux semi-conducteurs de la colonne III et V, de tableau périodique. Il est utilisé dans un large domaine d'application en électronique (LEDs infrarouges, Laser, Fibre optique et cellules solaires...etc). La figure (I.1) montre la structure tétraédrique à base du GaAs dans laquelle chaque atome de "Ga" a quatre plus proches voisins de "As", et celui-ci a comme plus proches voisins quatre atomes de "Ga". Les atomes occupent les sites cristallographiques ci-après (Fig.I.1). Les atomes du type III en : $(0, 0,0)$; $(0,1/2,1/2)$; $(1/2, 0,1/2)$; $(1/2,1/2,0)$, et les atomes du type V en : $(1/4,1/4,1/4)$; $(1/4,3/4,1/4)$; $(3/4,1/4,1/4)$; $(1/4,3/4,3/4)$.

Chaque atome est entouré de quatre atomes de l'autre espèce, placés aux sommets d'un tétraèdre. Cette figure montre également l'interpénétration des deux sous-réseaux semblables au réseau de diamant avec une constante de réseau $a_0 = 5.6533 \text{ \AA}$ [1].

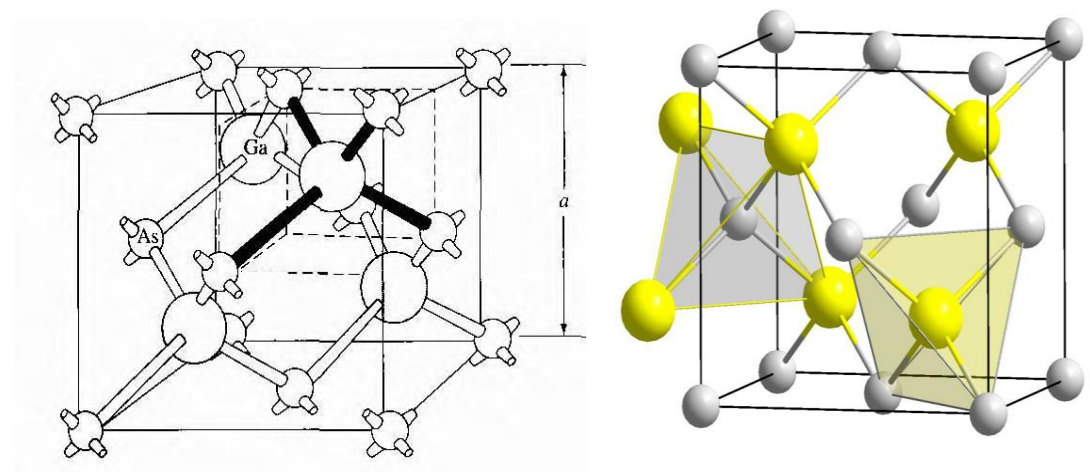


Figure (I.1): Structure cristalline du GaAs

II- Propriétés électriques et physiques du GaAs

Les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à la température ambiante (300 K) sont regroupées dans le tableau suivant [2]:

Propriétés du GaAs à 300K°	Valeur
Structure cristalline	Zinc blende
Poids atomique	144,63 g/mole
Structure de la bande interdite	Directe
Largeur de bande interdite	$E_g = 1,424 \text{ eV}$
Permittivité ϵ	11,6 pF/cm
Conductivité thermique A°	0.45 w/cm.k
Mobilité des électrons μ_n	$8500 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Mobilité des trous μ_h	$400 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Vitesse maximal des électrons	$2 \cdot 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
Champ électrique de saturation	10 k.v/cm
Densité d	5.32 g/cm ³
Densité atomique	$4.5 \cdot 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$
Masse moléculaire M_n	144.64
Température de fusion T_f°	1238°C
Affinité électronique χ	4.07 eV
Chaleur spécifique C	0.35 J/g K
Constante diélectrique ϵ_r	12.5

Tableau (I.1) : Caractéristiques du GaAs.

III- Propriétés optiques (absorption) du GaAs

Le coefficient d'absorption du matériau massif à gap direct GaAs peut s'écrire [3]:

$$\alpha = \alpha_{\text{exciton}} + \alpha_{\text{continuum}} \quad (\text{I.1})$$

$\alpha_{\text{continuum}}$ représente l'absorption entre la bande de valence et la bande de conduction. α_{exciton} représente l'absorption des états excitoniques. Ils résultent de l'interaction coulombienne entre un électron et un trou. A basse température, ce système peut être décrit simplement par un modèle hydrogénoïde, c'est à dire un électron de masse m_e et de charge $-e$, et un trou de masse m_h et de charge $+e$. Les états d'énergie E_n de cette pseudo-particule induisent des niveaux discrets dont l'énergie est inférieure à l'énergie du gap du semi-conducteur [3]:

$$E_n = \frac{E_l}{n^2} \quad n= 1, 2, 3, \dots \quad (\text{I.2})$$

E_l : l'énergie de liaison de l'exciton 3D

$$E_l = \frac{m_r}{m_0} \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon^2} R_y \quad (\text{I.3})$$

Avec

$$m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h} \quad (\text{I.4})$$

m_r est la masse réduite du système, m_0 la masse de l'électron libre, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ la permittivité absolue du matériau et R_y l'énergie d'ionisation de l'état s de l'atome d'hydrogène ($R_y = 13,6$ eV).

Les énergies permises s'écrivent :

$$E = E_G + \frac{\hbar^2 k^2}{2M} - E_n \quad (\text{I.5})$$

avec :

$$M = m_e + m_h. \quad (\text{I.6})$$

On peut représenter de façon simplifiée les niveaux d'énergie de l'exciton (Figure I.2).

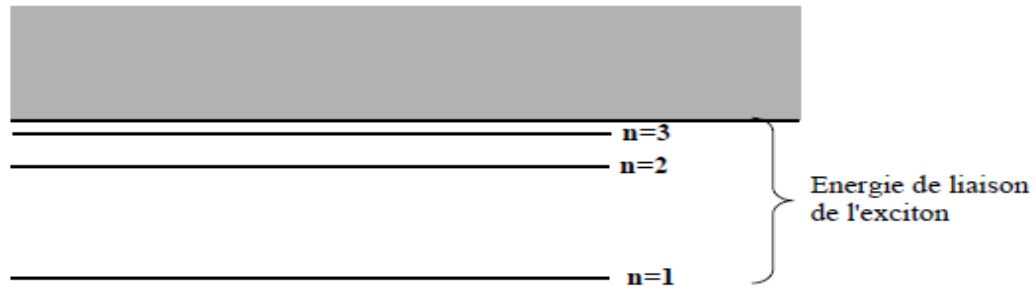


Figure (I.2) : Représentation simplifiée des niveaux énergétiques des excitons.

Les trois premiers niveaux excitoniques sont représentés [3].

Le spectre d'absorption de GaAs à basse température présente un continuum d'absorption ainsi que des raies d'absorption discrètes correspondant aux différents niveaux excitoniques (figure I.3)

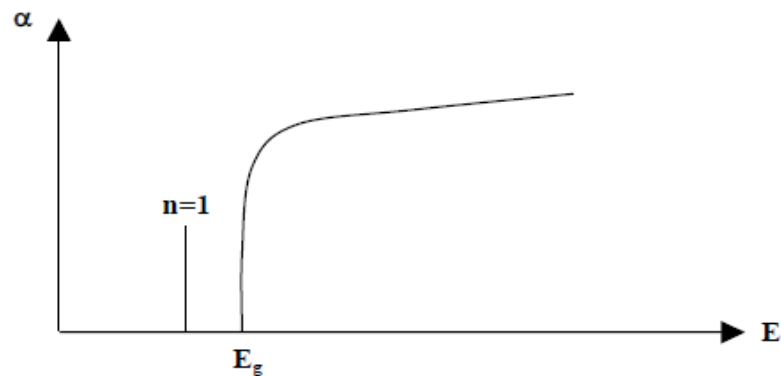


Figure (I.3) : Schéma du spectre d'absorption d'un semi-conducteur massif à basse température. Le continuum et le premier niveau excitonique sont représentés [3].

Le calcul de l'énergie de liaison du premier niveau excitonique dans le GaAs nous donne $E_1 \sim 4$ meV. Le rayon de Bohr de l'exciton est $a_0^* \sim 10$ nm [3].

Si on considère un semi-conducteur à température ambiante, l'agitation thermique des atomes suffit à la dissociation des excitons. Ces pseudo-particules ne sont pas stables dans le GaAs à température ambiante. Bien que l'on n'observe pas de raies sur le spectre d'absorption du semi-conducteur, les excitons jouent un rôle très important dans le spectre d'absorption du matériau et contribuent à la définition du seuil d'absorption E_g' [3].

En l'absence d'exciton, lorsque l'on éclaire un tel matériau avec une lumière polychromatique, seuls les photons d'énergie E supérieure à E_g seraient absorbés. De par l'existence des excitons, les photons d'énergie $E > E'_g$ sont absorbés et créent une paire de porteurs libres électron/trou. Les porteurs libres créés peuvent se déplacer dans le cristal jusqu'à ce qu'ils se recombinent. Le temps de recombinaison τ_r des porteurs libres dépend de la nature du matériau (dans le GaAs massif, τ_r est de l'ordre de quelques nanosecondes).

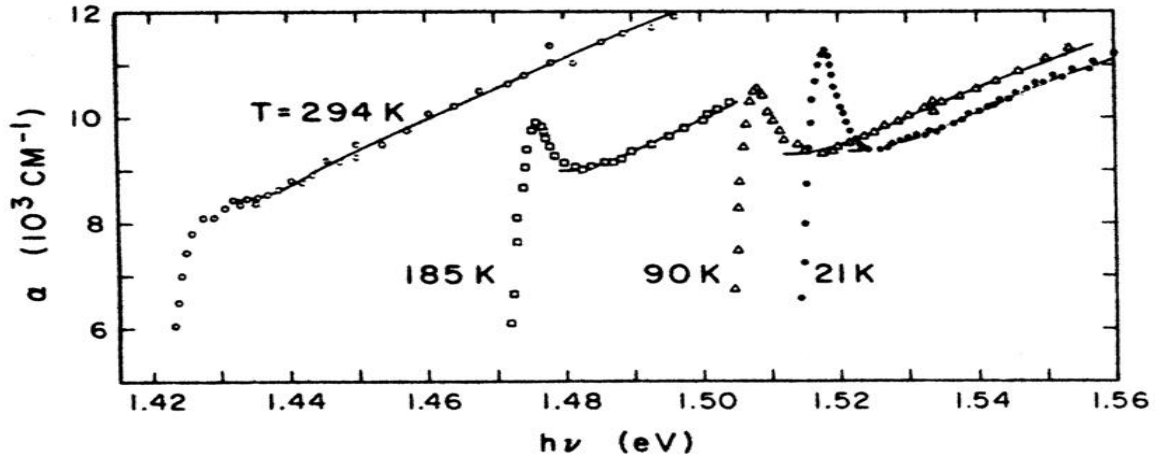


Figure (I.4) : spectres d'absorption du GaAs massif obtenus à différentes températures [3].

Quand la température augmente, le caractère excitonique de l'absorption est moins marqué.

La figure 1.4 représente des spectres expérimentaux d'absorption du GaAs massif obtenus pour plusieurs températures. L'intensité du pic excitonique diminue et sa largeur augmente quand la température augmente. A température ambiante, le pic est très large et témoigne de l'existence des excitons. Le spectre d'absorption présente une queue exponentielle d'absorption résiduelle (queue de Urbach) dans la zone de transparence [3].

Lorsque la bande de conduction contient des électrons, un photon incident peut être absorbé en leur communiquant de l'énergie. Cette absorption par les porteurs libres correspond à une transition intra-bande, qui nécessite donc une interaction avec un phonon pour la conservation du vecteur d'onde. Le coefficient d'absorption est proportionnel au carré de la longueur d'onde du rayonnement incident, et ce phénomène est donc plus important aux grandes longueurs d'onde (IR). Par ailleurs, dans le domaine de l'infrarouge lointain, les bandes d'absorption associées aux modes de vibration du réseau cristallin apparaissent. [4]

La largeur de la bande interdite étant fonction de la température, le seuil d'absorption en dépend également (fig I-4) On voit par ailleurs apparaître à basse température un pic au voisinage du seuil, qui correspond à l'absorption excitonique (les excitons sont des paires électron-trou non encore dissociées, l'énergie de liaison entre les deux particules introduisant un niveau légèrement inférieur au bas de la bande de conduction [5]

IV-Structure de bandes d'énergie de GaAs

Le GaAs est un semi-conducteur III-V, qui comprend aussi 8 électrons par cellule unité (3 provenant du "Ga" et 5 de "As"). Sa structure a un nombre égal de Ga et As distribués sur un réseau de type diamant. Il possède donc, comme le Si et le Ge, 8 bandes dérivées des orbitales SP_3 , dont 4 sont entièrement remplies. Sa structure de bande est donnée dans la figure (I.5). On remarque que dans ce cas le minimum de la bande de conduction est situé au centre de la zone de Brillouin. C'est un semi-conducteur à gap direct situé au point Γ . Si le minimum de la bande supérieure correspond au même vecteur d'onde que le maximum de la bande inférieure, on dit alors que la bande interdite est directe (gap direct), dans l'autre cas la bande interdite est indirecte voir figure (I.6) [6-7].

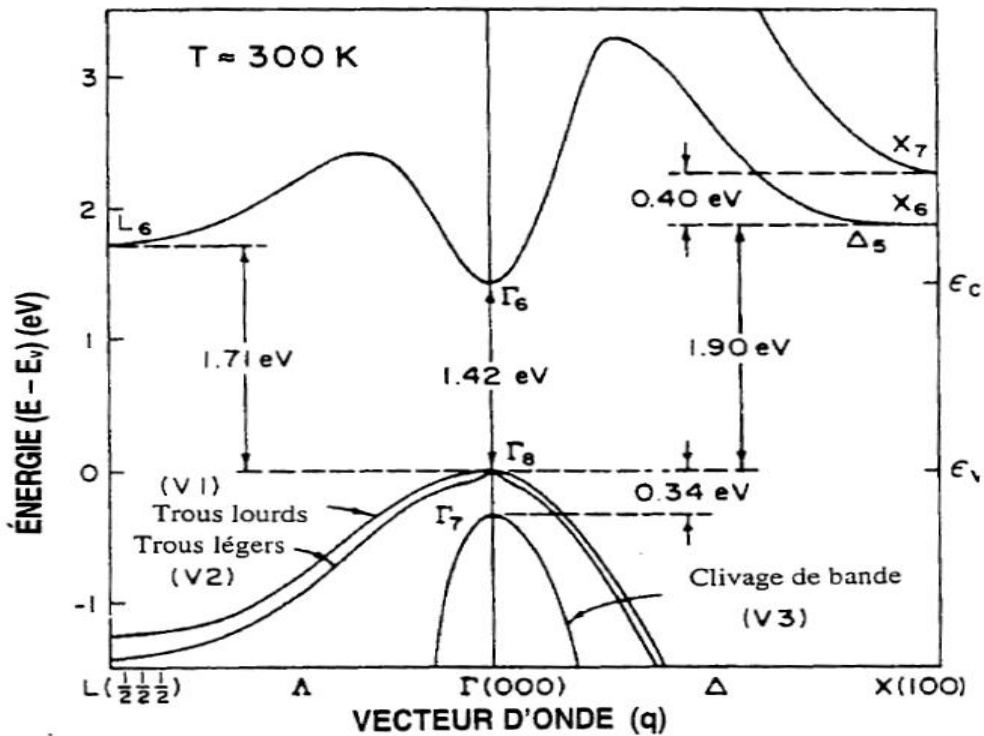
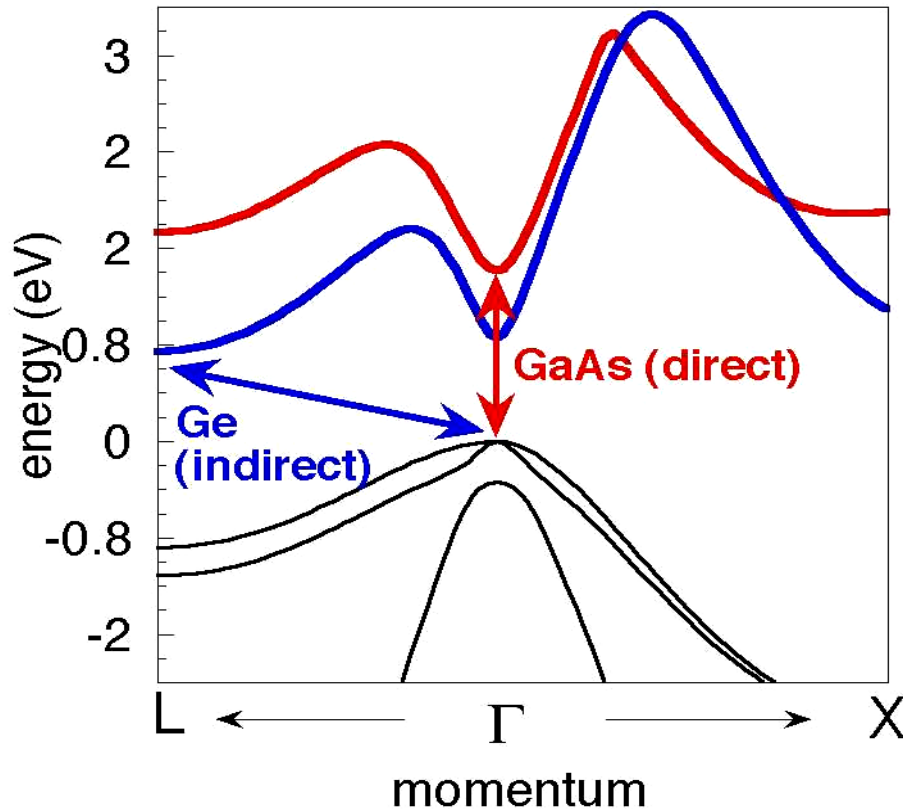


Figure (I.5): Structure de la bande d'énergie [2].



Figure(L.6) : Structures de bandes schématiques d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect.

V- Procédés d'élaboration du GaAs

V-1 Elaboration massive

Le problème c'est que de GaAs est un matériau composé de deux éléments qui ont des propriétés très différentes (température de fusion (T_f) et température de vaporisation (T_v)). La température de fusion T_f de Gallium est supérieure à celle de l'arsenic, donc, quand le Ga se fusionne, l'arsenic s'évapore. De plus l'As est un élément toxique. Donc des préparations très particulières sont nécessaires lors de la préparation du GaAs massif. [8]

Les méthodes de préparation de Si ne sont pas toujours applicables au GaAs. Seule la méthode Czochralski (CZ) peut être adaptée au GaAs et une autre méthode dite de Bridgman. Cependant, la méthode de la zone fondue FZ et la méthode Ruban ne sont pas utilisées à cause de la volatilité de l'arsenic [8]. Comme moyen préventif de l'évaporation de l'Arsenic, deux variations de la méthode CZ (Figure I.7) sont utilisées :

Chapitre 1 : Etude des propriétés de l'arsenic de gallium GaAs .

a) Le GaAs fondu est couvert par une étanchette dont la rotation est faite à l'intérieur par une force magnétique (ou bien une force mécanique).

b) Le GaAs fondu est creuset par un liquide inerte (B_2O_3).

C'est la méthode la plus utilisée (moins chère, absence du système magnétique). Cette méthode variation est souvent dite : LEC (liquide Encapsulated CZ)

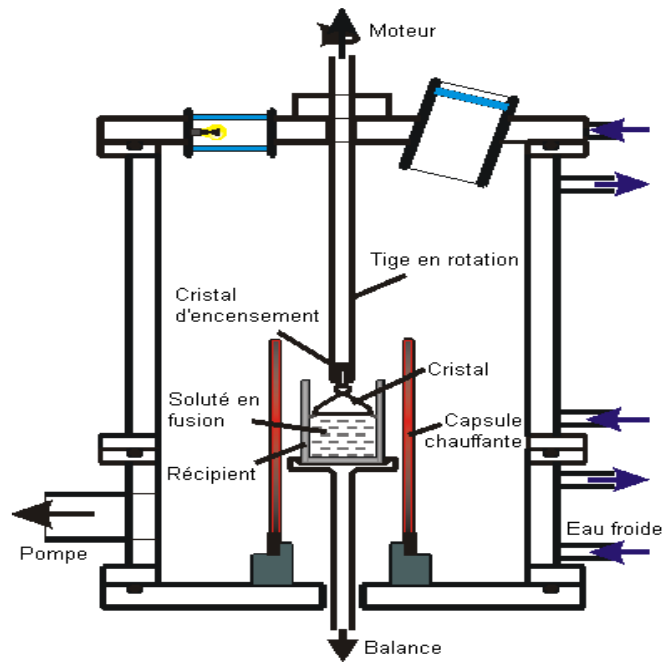


Figure (I.7) : Dispositif expérimental de la méthode Czochralski [9].



Figure (I.8) : Cristal de GaAs obtenu grâce à la méthode Czochralski[9].

V-2 Elaboration du GaAs en couche mince

Les techniques les plus utilisées pour l'élaboration de films minces de GaAs sont l'épitaxie en phase vapeur (VPE) et l'épitaxie par jets moléculaires (MBE) [10].

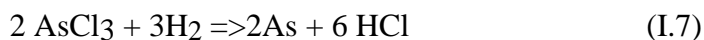
L'épitaxie est une technique de croissance orientée, l'un par rapport à l'autre, de deux cristaux possédant un certain nombre d'éléments de symétrie communs dans leurs réseaux cristallins. L'épitaxie est utilisée pour faire croître des couches minces. On utilise pour cela une surface parfaitement polie d'un monocristal, le substrat, sur lequel seront déposés d'autres atomes. Le substrat est choisi de façon à avoir des paramètres de maille proches de ceux du cristal que l'on veut obtenir [10].

a) L'épitaxie en phase vapeur (VPE) : Elle se divise en deux types selon la nature des sources de GaAs.

- **Méthode aux chlorures :**

Les sources de GaAs sont à base de chlorures : la source du 'Ga' est le monochlorure de gallium (GaCl) et la source du 'As' est le trichlorure d'arsenic (AsCl₃). Les réactions chimiques se déroulent en présence de l'hydrogène H₂ et l'acide chlorhydrique, HCl [6].

Le GaCl est introduit comme liquide dans un creuset, qui est porté à la phase vapeur, ensuite, on injecte les autres éléments, le H₂ et AsCl₃ (ainsi que les dopants si on souhaite avoir des couches dopées). Les réactions qui se déroulent sont : [11]



On obtient alors le GaAs par la réaction:



- **Méthode aux organométalliques**

Les sources de GaAs sont des organométalliques : la source du Ga est le triméthylgallium $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ et la source de As est le tri-hydrure d'arsenic AsH_3 . La réaction entre ces deux composés [11]:

Le dopage volontaire de type N des couches de GaAs se fait en introduisant dans la phase vapeur de l'un des éléments dopants suivants en quantités contrôlées:

- Le germane GeH_4 qui est une source de germanium.
- L'hydrogène sélénié (SeH_2) comme source de sélénium.
- Le tétraméthylétain ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Sn}$) comme source d'étain.

Sachant que le germanium et l'étain (éléments IV de la classification périodique) sont donneurs sur site gallium. Et le sélénium (élément VI de la classification périodique) est donneur sur site arsenic.

Le dopage de type P peut être obtenu en utilisant le zinc à partir du diéthylzinc ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Zn}$). Sachant que le zinc, étant un élément II de la classification périodique, est accepteur.

b) Epitaxie par jets moléculaires (MBE)

L'épitaxie par jet moléculaire est une technique de croissance de couches minces de GaAs réalisée sous ultravide (10^{-9} à 10^{-11} torr) en faisant interagir sur la surface d'un substrat chauffé à 600°C des flux atomiques ou moléculaires obtenus à partir de sources de haute pureté (Ga, As, dopants,..) avec lesquels une combinaison est effectuée pour la croissance du film (figure I.9). Après le chauffage des matériaux sources à des températures appropriées, des faisceaux moléculaires s'échappent à partir de l'orifice de chaque source pour atteindre le substrat. Afin d'assurer l'uniformité des couches croissantes le substrat subit un mouvement de rotation. En d'autres termes ceci permet d'avoir des structures avec des interfaces abruptes avec un bon contrôle de leurs épaisseurs [11].

Un faisceau de As_2 et un autre de Ga avec un rapport supérieur à 10 est nécessaire pour assurer le bon collage des atomes As avec ceux du Ga à la surface de croissance. Ceci

permet d'éviter la formation des liaisons Ga-Ga qui détruisent la structure cristalline et rendent la surface de croissance rude [12].

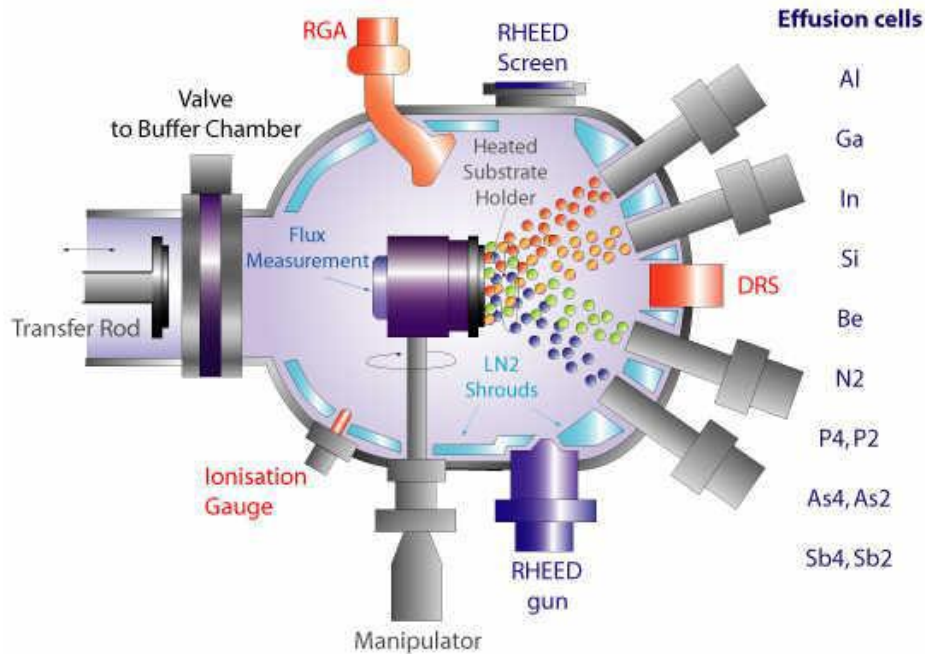


Figure (I.9): Technique MBE pour différents composés à base de GaAs[13].

VI-Avantages et Inconvénients

Le GaAs, dont les avantages par rapport au silicium résident en particulier dans la possibilité d'obtenir un matériau semi-isolant et aussi dans une mobilité électronique plus élevée (sept fois plus grande que celle du silicium [14]). Ces caractéristiques ont rendu ce matériau très prometteur pour répondre aux nouvelles exigences dans les domaines des hautes fréquences et de l'optoélectronique.

Dans le domaine des composants optoélectroniques, on utilise surtout les propriétés de sa structure de bande (gap direct) et celles de ses composés ternaires et quaternaires (GaAlAs, GaAsP, GaInAs et GaInAsP).

Un autre atout très important de ce matériau est la possibilité de l'obtenir sous forme semi-isolant, cet état de résistivité élevée est particulièrement favorable pour le développement d'une véritable technologie planaire de circuits intégrés sur GaAs.

Chapitre 1 : Etude des propriétés de l'arsenic de gallium GaAs .

Aussi la largeur de sa bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température.

L'inconvénient majeur du GaAs est son coût élevé. Par exemple, les circuits intégrés en arséniure de gallium sont beaucoup plus cher : le matériau ne s'obtient qu'en plaquettes de 3 à 4 pouces de diamètre (de 7,5 à 10 cm) au maximum, ce qui limite le nombre de circuits intégrés fabriqués, sa physicochimie se prête moins bien que le silicium aux associations de matériaux (semi-conducteurs, isolants, métaux) requis par les circuits intégrés, ce qui rend les méthodes de fabrication plus délicates et les rendements de fabrication plus faibles. Ces handicaps limitent l'arséniure de gallium aux utilisations où il est indispensable, à savoir lorsque l'on veut des circuits fonctionnant à des fréquences supérieures à 1 Gigahertz [15].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés optoélectroniques du matériau GaAs ainsi que ses principales méthodes d'élaboration.

Le GaAs est connu comme le matériau le plus adapté à la conversion photovoltaïque, grâce à sa bande interdite directe, de valeur 1.42eV, qui s'adapte bien avec le spectre solaire. La valeur de sa bande interdite est proche de la valeur idéal d'une cellule solaire mono-jonction (1.4eV pour le spectre solaire AM1.5G (1.6eV AM0)) [16].

Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 50 ans pour la fabrication de cellules photovoltaïques est le silicium cristallin (80% de la production mondiale). Ce dernier présente en effet de nombreux avantages (abondance sur terre, bas prix, non toxicité, dopage facile...). Les cellules produites industriellement atteignent des rendements de conversion de 15% en moyenne (modules à 11-12%). Au laboratoire, les meilleurs rendements atteints sont de l'ordre de 24% avec du silicium monocristallin [17].

I- Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K conduisant à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0,5 μm [18].

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [19]

Le rayonnement solaire moyen obtenu hors atmosphère terrestre est d'environ 1.36kW/m². A son entrée dans l'atmosphère, l'irradiance du soleil va être pondérée par divers facteurs présents à la surface de la terre : l'absorption par les différentes couches de l'atmosphère, les conditions climatiques, la longitude et l'altitude d'observation ainsi que la saison. Des gaz comme l'ozone (O₃) pour des longueurs d'onde inférieures à 0,3 μm , le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau (H₂O) pour les infrarouges au-dessus de 2 μm , absorbent les énergies proches de leur énergies de liaison, ce qui conduit à des «trous» dans le spectre solaire visible au sol.

I-1 L'absorption de la lumière

Le soleil émet en permanence, dans toute les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composées de « grains » de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière C ; il lui faut donc, en moyenne, 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour atteindre notre atmosphère [20].

Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer à travers les objets transparents pour notre œil et laissent passer la lumière visible. Il y a quatre types de rayonnements [20].

- Le **rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du soleil.
- Le **rayonnement diffus** est le rayonnement de toute la voûte céleste.
- Le **rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol.
- Le **rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus en un endroit.

Les théories ondulatoires (équations de Maxwell) ou corpusculaires de la lumière nous permettent d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux.

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie du photon correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation :

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (\text{II. 1})$$

ν : Fréquence de la radiation.

λ : Longueur d'onde de la radiation (en μm).

C : Vitesse de la lumière.

E_p : Énergie du photon (en eV).

h : Constante de Planck .

La notion de dualité Onde/Corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

I-2 Le rayonnement solaire partiellement absorbé par la Terre

Une partie du rayonnement émis parvient jusqu'à la terre, où des ondes sont réfléchies par l'ionosphère et l'atmosphère (les ondes décimétriques et certains rayons ultraviolets), tandis que d'autres arrivent à la surface des nuages, des océans ou des continents. Elles vont alors être plus ou

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

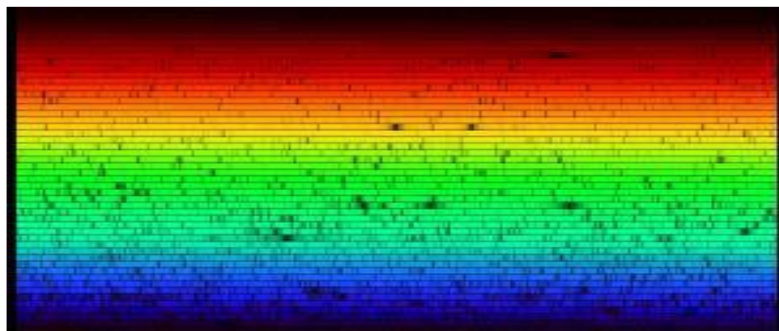
moins réfléchies selon l'albédo de la surface frappée. Celles qui ne le sont pas sont alors absorbées sous forme de chaleur ou exploitées par des organismes vivants, comme les végétaux pratiquant la photosynthèse [21].

I-3 Le spectre solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus des rayons cosmiques [21].

Le rayonnement solaire couvre un domaine très étendu de longueurs d'onde qu'on appelle le spectre solaire, Ce spectre comporte trois parties principales [22] :

- Ultraviolet (UV) de longueurs d'onde inférieure à $0.4 \mu\text{m}$.
- Visible de longueurs d'onde comprise entre $0.4 \mu\text{m}$ et $0.75 \mu\text{m}$.
- Infrarouge de longueur d'onde comprise entre $0.75 \mu\text{m}$ et $2.4 \mu\text{m}$.



Figure(II-1) : spectre solaire haute résolution [23]

Le rayonnement solaire se situe principalement dans la gamme des courtes longueurs d'onde c'est-à-dire les longueurs d'onde inférieures à $4 \mu\text{m}$ (9%). L'énergie solaire reste donc plus faible dans l'infrarouge. La figure II-2 illustre la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère. L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement de sorte que l'éclairement atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1.2\text{kW}/\text{m}^2$.

Les principaux facteurs impactant le spectre solaire sont :

- Les molécules gazeuses,
- La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère,
- Les aérosols,
- Le niveau de pollution.

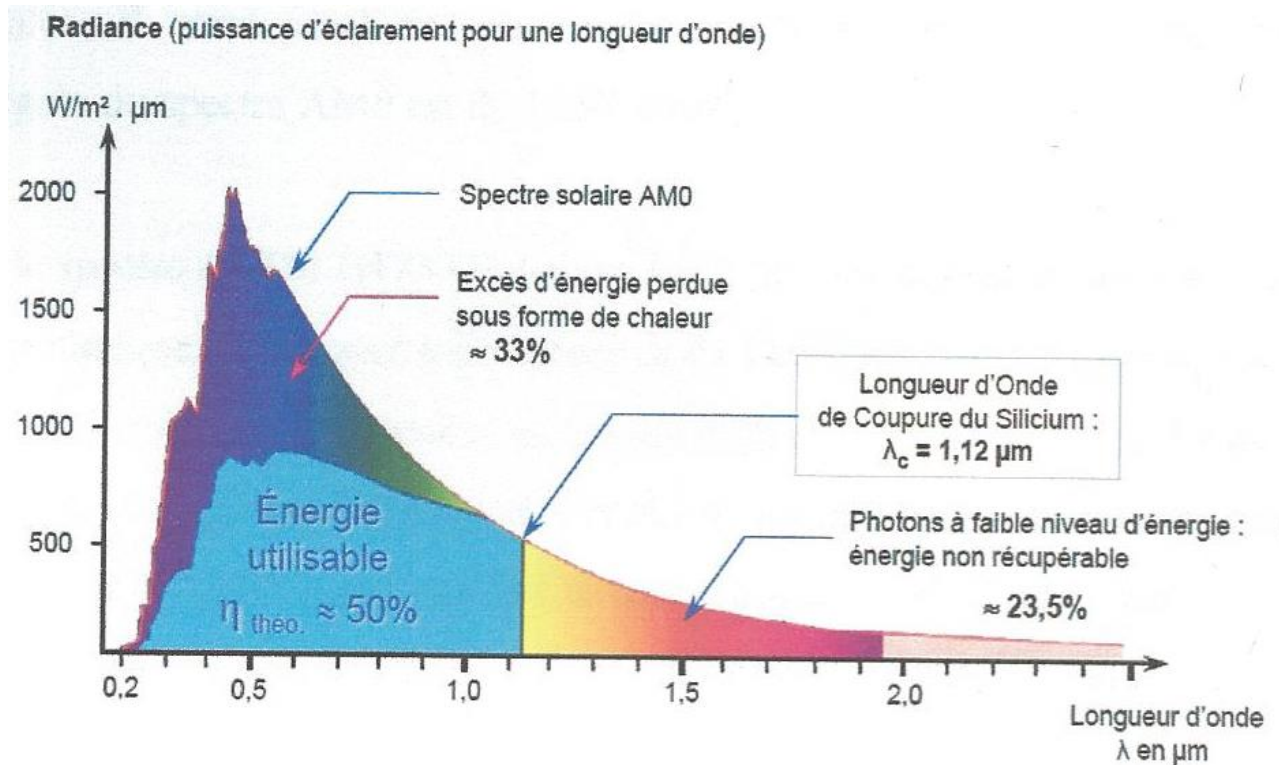


Figure (II-2) : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère [22]

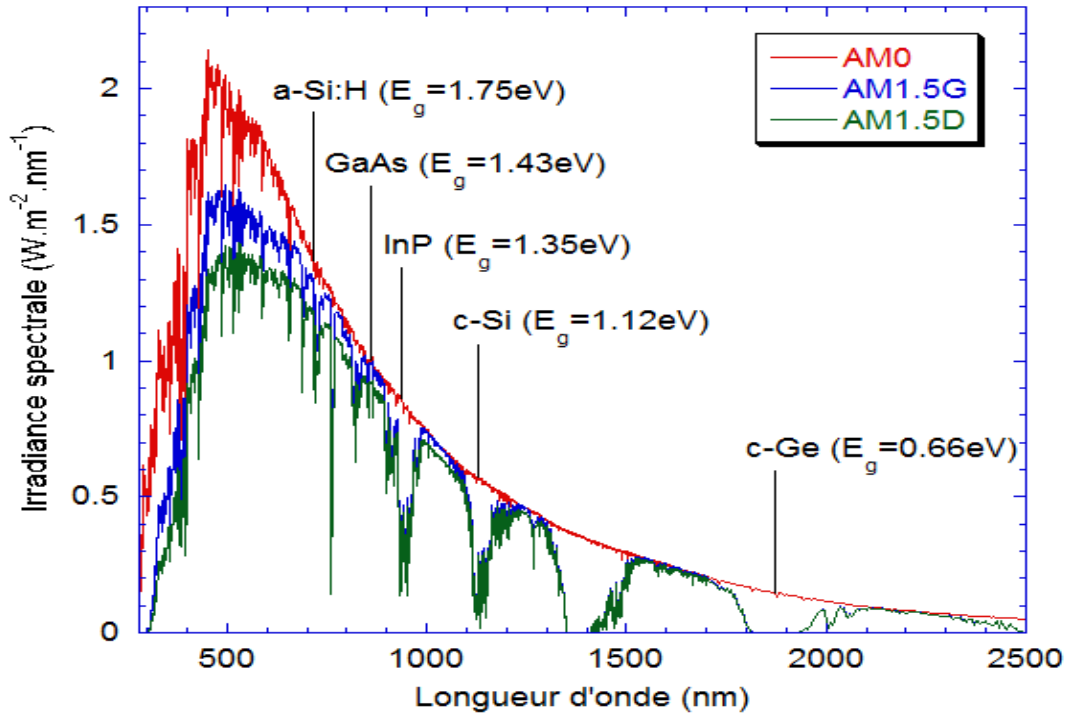
I-4 Masse d'air

Pour tenir compte de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident on introduit un coefficient appelé nombre de masse d'air AM (Air Mass en Anglais). Par définition, c'est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu. Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction d'angle θ du soleil par rapport au Zénith[22]. Elle est donnée par :

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{II. 2})$$

I-5 Standardisation du spectre solaire

Afin d'éviter toute confusion, la communauté scientifique a défini des spectres solaires (ou irradiance) de références, illustrés sur la Figure II.3 sur laquelle sont aussi indiqués les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés pour les applications photovoltaïques et leur énergies de gap. Ces spectres normés sont publiés par une institution américaine, l'American Society for Testing and Material (ASTM) [22].



Figure(II.3) : Principaux spectres solaires utilisés dans le domaine photovoltaïque.

Les trois spectres les plus utilisés sont définis comme suit [22] :

- AM0 : le spectre ASTM E- 490 est le spectre de référence pour le développement de cellules solaires spatiales. Il correspond au spectre mesurable en dehors de notre atmosphère. La puissance intégrée du spectre AM0 est de $1366 W/m^2$.
- AM1.5G : le spectre ASTM G173 Global ou AM1.5 correspond au spectre rencontré par les modules photovoltaïques classiques à la surface de la Terre. Représenté en bleu sur la figure II.3, il se distingue de l'AM0 par les bandes spectrales manquantes en raison de l'absorption par les éléments chimiques composant l'atmosphère terrestre. La puissance intégrée du spectre AM1.5G est de $1000 W/m^2$. Cette puissance est définie comme égale à un soleil. L'indice G pour « global » signifie que le spectre inclut tous les rayons du soleil, même ceux diffusés par l'atmosphère.
- AM1.5D : il est défini pour la même inclinaison des modules que le spectre AM1.5G, le spectre ASTM G173 Direct, AM1.5D, ne prend en compte que le rayonnement solaire direct. Il ne considère que les rayons avec une incidence normale par rapport à la Terre et ne tient pas compte du rayonnement diffus. La puissance intégrée de ce spectre est de $900 W/m^2$.

II- Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [24].

II-1 Semi-conducteurs intrinsèques

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparée par une bande interdite. Pour franchir cette bande, l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trous et d'électrons est égal.

II-2 Semi-conducteurs extrinsèques

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

III- Les cellules solaires au Silicium

III-1 Le silicium

Le Silicium est un matériau monoatomique qui cristallise dans la structure diamant. Il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées (cfc), imbriqués, décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale principale. La maille élémentaire contient deux atomes de silicium, occupant les positions (0,0,0) et (1/4,1/4,1/4). Chaque atome de silicium possède une coordination tétraédrique et établit des liaisons de valence avec ses quatre voisins [25].

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence. Il s'agit d'un semi-conducteur avec un gap indirect de 1.12 eV. Ses caractéristiques spécifiques ainsi que son abondance (sous forme de silice, deuxième élément de la croûte terrestre, 28%), en font l'élément par excellence de la microélectronique et du photovoltaïque.

III-2 Propriétés photovoltaïques du silicium

Le silicium offre de nombreux avantages. Présent en abondance dans la croûte terrestre (20%), c'est un matériau non toxique. Outre ses propriétés semi-conductrices, le silicium présente un oxyde naturel SiO₂ qui trouve de nombreuses applications en microélectronique.

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

Il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N). D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect $E_g = 1.12\text{eV}$ à 300 K, correspondant à une longueur d'onde $\lambda = 1107\text{ nm}$. Ainsi, une transition électronique entre les extrema des bandes de valence et de conduction est oblique : le vecteur d'onde de l'électron est modifié et il ne correspond donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire.

Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs. [26]

Le maximum de la bande de valence a lieu au vecteur d'onde (vecteur de BLOCH) $\vec{k} = \vec{0}$, où se rencontrent deux bandes dégénérées avec des courbures différentes. Les six minima de la bande de conduction dans la première zone de BRILLOUIN sont situés dans les directions [100]. La troisième bande, située à seulement 0,044 eV (figure II-4) en dessous du maximum de la bande de valence, peut être une source significative de porteurs à température ambiante ($k_B T = 0,025\text{ eV}$). [27]

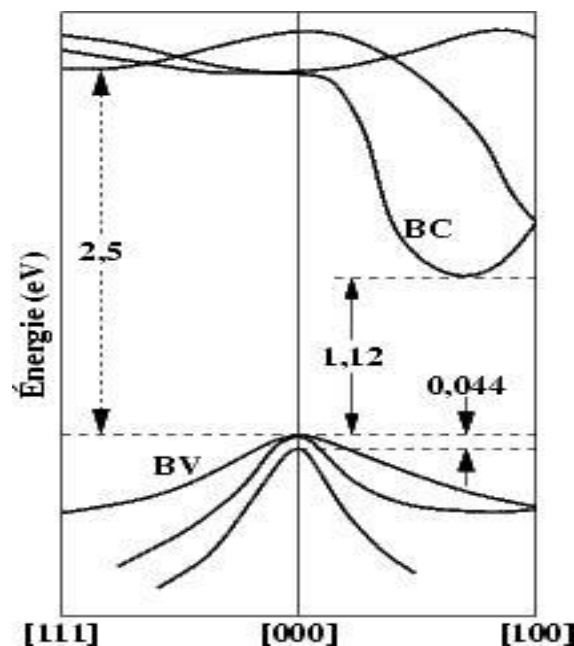


Figure (II-4) : Structure de bande de Silicium.

Ainsi, si l'on considère les coefficients d'absorption des matériaux semi-conducteurs, l'épaisseur de silicium nécessaire pour absorber 90% du spectre solaire doit être de 100 μm contre une épaisseur de

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

1 μ m pour l'arséniure de gallium [28]. Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quel que soit sa forme.

III-3 Les différentes technologies du silicium

L'énergie photovoltaïque est obtenue à l'aide des capteurs appelés cellules solaires ou photopiles. Il existe plusieurs technologies de cellules solaires, mais toutes sont composées de matériaux semi-conducteurs. Le principal matériau semi-conducteur utilisé est le silicium. Il existe trois technologies utilisant ce matériau [29] :

- la cellule au silicium amorphe.
- la cellule au silicium monocristallin.
- la cellule au silicium polycristallin.

III-3-1 La cellule au silicium amorphe

La cellule au silicium amorphe (figure II-5) est constituée du silicium hydrogéné (a-Si) ayant une structure atomique désordonnée, c'est à dire non-cristallisée. Ce matériau absorbe la lumière beaucoup plus que le silicium cristallin. Il fait partie de la technologie "couche mince" qui consiste à déposer sous vide sur un substrat (verre, métal, plastique, ...) une fine couche uniforme composée d'un et plus souvent de plusieurs matériaux réduits en poudre. Les cellules ont une couleur gris foncé. [29]

➤ **Avantages:**

- peut être appliquée sur une surface importante (4 voire 6 m²), et peut être ensuite découpée.
- peut être utilisée sur des modules roulés ou souples.
- peu sensible à l'échauffement autour de 60°C.
- fonctionne à un très faible niveau de luminosité (à partir de 20 lux).
- fabrication en principe moins onéreuse.

➤ **Inconvénients:**

- rendement bien inférieur à celui du silicium cristallin (entre 5% et 7% dans le commerce).
- industrialisation encore peu développée par rapport aux technologies cristallines.
- baisse de rendement dès les premières semaines d'exposition.



Figure (II-5) : cellule solaire au silicium amorphe

III-3-2 La cellule au silicium monocristallin :

La cellule au silicium monocristallin (mono c-Si) est constituée d'un silicium formé d'un seul cristal ordonné (figure II-6). Ce matériau est obtenu directement d'un germe ou recristallisé à haute température sous forme d'un lingot. Il est ensuite découpé en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. [29]

➤ **Avantages:**

- son rendement est très bon (15 à 20% dans le commerce, 25% en laboratoire).
- bon ratio W_c/m^2 ($\sim 150 W_c/m^2$) ce qui permet un gain de place si nécessaire.
- nombre de fabricants élevé.

➤ **Inconvénients:**

- fabrication plus délicate et donc plus coûteuse;
- rendement faible sous un faible éclairement (plage d'utilisation: 100 à 1000 W/m^2);
- sensible à l'échauffement, forte baisse de rendement autour de 60°C.



Figure (II-6):Cellule au silicium monocristallin

III-3-3 La cellule au silicium multicristallin

La cellule au silicium multicristallin (ou polycristallin) (mc-Si) est constituée de cristaux de 1mm à environ 2cm assemblés, appelés "grains". La multitude de cristaux se forme pendant le refroidissement du silicium dans la lingotière. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux (figure II-7). [29]

➤ **Avantages:**

- les cellules peuvent être de forme carrée permettant un meilleur taux de remplissage du module.
- bon rendement de conversion (12-16% dans le commerce, 20% en laboratoire).
- lingot moins cher à produire que le monocristallin.
- nombre de fabricants élevé.

➤ **Inconvénients:**

- rendement faible sous un faible éclairement (plage d'utilisation: 200 à 1000 W/m²);
- sensible à l'échauffement, forte baisse de rendement autour de 60°C.

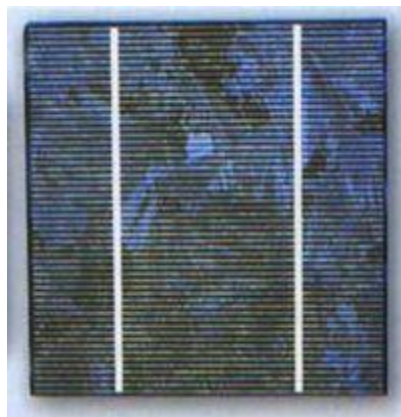


Figure (II-7) : Cellule au silicium multicristallin.

Aujourd'hui, plus de 99 % des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base (Figure II-8), les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium multicristallin et le silicium amorphe.

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

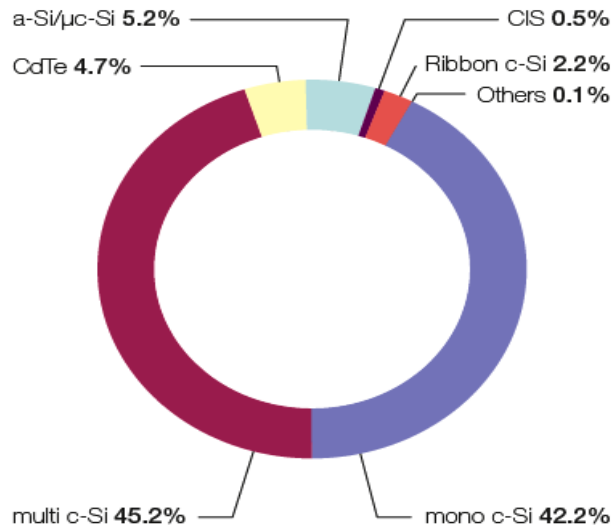


Figure (II-8) : répartition des différents matériaux sur le marché photovoltaïque.

VI- Dopage

Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé semi-conducteur extrinsèque.

Il existe trois méthodes de dopage [30]:

- le dopage par diffusion: il est réalisé dans un four à une température comprise entre 850°C et 1150 °C, afin de permettre la diffusion des espèces dopantes dans l'échantillon. Avec cette méthode, le dopant peut être de source solide, liquide ou gazeuse.
- le dopage par implantation ionique: il consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique, afin de leur conférer l'énergie nécessaire pour rentrer dans le matériau à doper. Le faisceau mono-énergétique et la chambre sous vide rendent possible une grande reproductibilité et des dopages localisés. Mais cette méthode présente un défaut: elle diminue la mobilité des porteurs de charges, grande qualité du silicium.
- le dopage par transmutation: il est réalisé dans un réacteur nucléaire expérimental. Avec cette méthode, le dopant est obtenu par capture de l'isotope ^{30}Si (présent à environ 3% dans le silicium) et création de l'isotope ^{31}Si qui décroît ensuite vers ^{31}P par radioactivité bêta-moins introduisant ainsi un atome de phosphore dans le réseau cristallin du silicium [30].

Il existe deux types de dopage: Le type N et le type P [24].

VI-2 Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents ayant 3 électrons périphériques (bore par exemple), ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Mais dès qu'une liaison est brisée, cette lacune est comblée par un électron en créant un trou. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque. On dit alors qu'il y a conduction par trous et le semi-conducteur est dit de type P.

Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (figure II-10b), la population des électrons libres de la B.C. est beaucoup plus faible que celle des trous libres dans B.V.

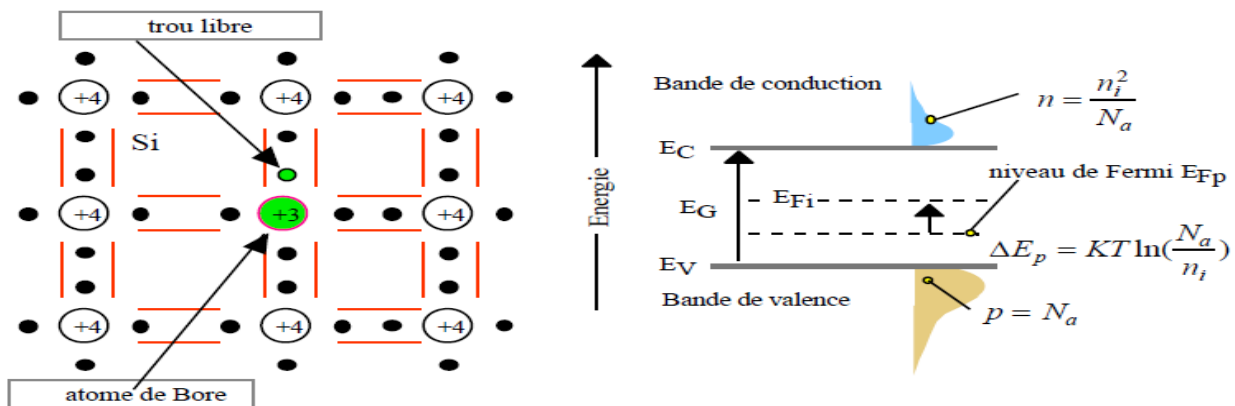


Figure (II-10) : a) libération d'un trou par le bore b) schéma des bandes

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si N_A est la concentration par cm^3 des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer : $p = N_A$ trous libres. [24]

Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.

Le niveau indicateur de Fermi E_{Fp} se déplace du niveau intrinsèque E_{Fi} vers la bande de valence de telle manière que :

$$\Delta E_p = KT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$\text{avec : } \Delta E_p = E_{Fp} - E_V \quad (\text{II.7})$$

V- Les cellules solaires à homojonction (conventionnelles)

V-1 L'effet photovoltaïque

Le terme photovoltaïque vient des grecs « photos » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien « VOLTA » connu pour ses travaux sur l'électricité[31].

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

L'effet photovoltaïque est le phénomène qui associe les mécanismes d'absorption des radiations solaires et l'action d'un champ électrique qui produit une barrière de potentiel dans une jonction. Le rôle de ce champ est de séparer les porteurs générés avant qu'ils ne se recombinent. Ce phénomène a été mis en évidence, pour la première fois, par le physicien Français Alexandre Edmond Becquerel qui découvrit en 1839, que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand ils sont exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photovoltaïque en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique. En 1954, D. M. Chapin, C. S. Fuller et G. L. Pearson fabriquèrent la première cellule solaire au Silicium, de rendement 6%, dans les laboratoires Bell. Depuis cette date, une recherche intensive a été dirigée vers les différentes méthodes et les matériaux utilisés, dans le but d'augmenter le rendement de la cellule.[32]

V-2 Structure d'une cellule solaire conventionnelle

La cellule solaire est un dispositif électronique qui permet la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique (figure II-11) continue capable d'alimenter un circuit externe. La cellule solaire à homojonction à base de silicium est formée de plusieurs couches [24]. Une grille collectrice avant, une couche de Si dopée N, une couche de Si dopée P et une couche conductrice.

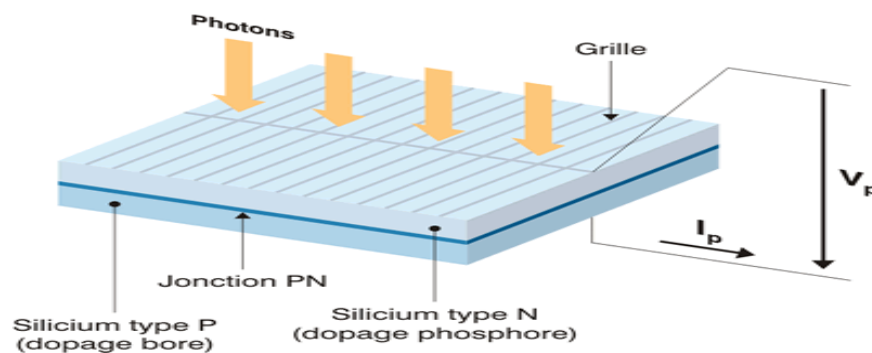


Figure (II-11) : composants d'une cellule photovoltaïque.

V-3 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Le phénomène physique qui se traduit à l'intérieur d'une cellule solaire c'est l'effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière (figure II-12). La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [33].

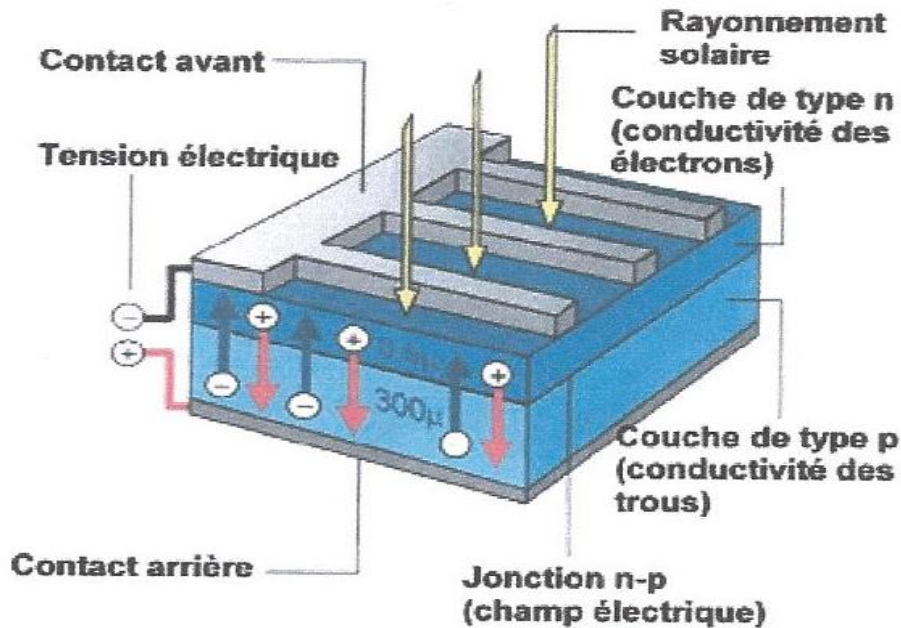


Figure (II-12) : Cellule solaire sous éclairage.

La conversion photovoltaïque est essentiellement basée sur trois étapes essentielles :

1. La génération de paires électron-trou dans le semi-conducteur en raison d'une absorption optique du photon (l'énergie du photon doit être supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau utilisé).
2. La séparation de la paire électron-trou dans le semi-conducteur sans recombinaison.
3. La collecte des charges libérées par les électrodes de la cellule solaire.

V-4 Rappel sur la jonction PN

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur (figure II-13). La différence des densités de donneurs et d'accepteurs,

$N_d - N_a$ passe d'une valeur négative dans la région de type p à une valeur positive dans la région de type n.

Quand deux semi-conducteurs de type p et de type n sont mis en contact (au sens métallurgique du terme), les trous, majoritaires dans la région de type p, diffusent vers la région de type n. Il en est de même pour les électrons, dans l'autre sens. La diffusion des porteurs libres de part et d'autre de la jonction fait apparaître une charge d'espace résultant de la présence des donneurs et

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

accepteurs ionisés, dont les charges ne sont plus intégralement compensées par celles des porteurs libres.[34]

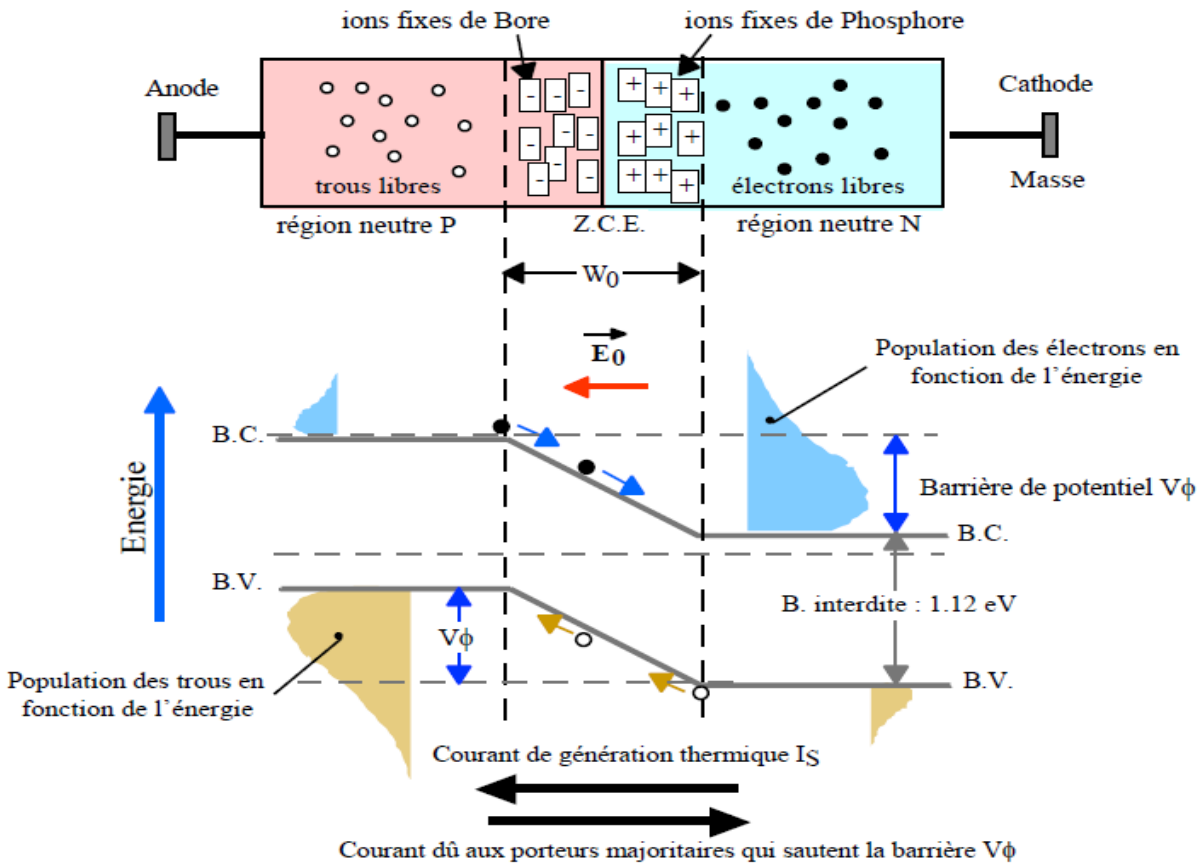


Figure (II-13) : origines des courants opposés circulant dans la jonction PN en court-circuit.

Lorsqu'on illumine une jonction PN, les paires (électron-trou) qui sont créés dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparés par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînés dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.

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

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.

- dans la zone de charge d'espace, les paires électrons / trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [35].

VI- Association des cellules photovoltaïques

VI-1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure II-14 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques [36].

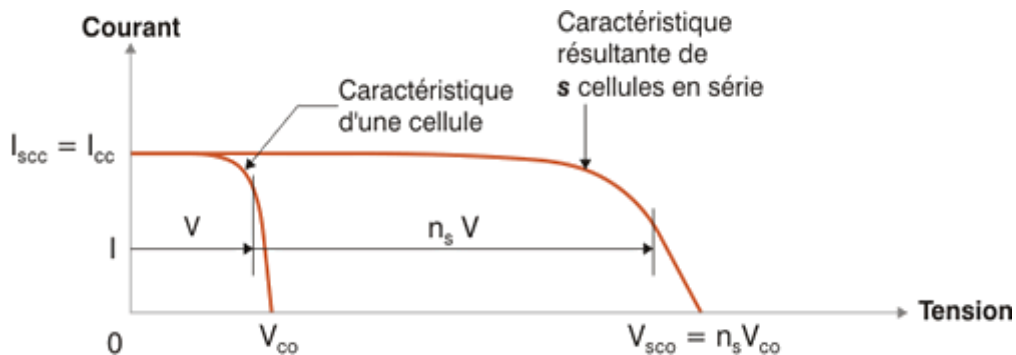


Figure (II-14) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

VI-2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [26]. La figure II-15 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

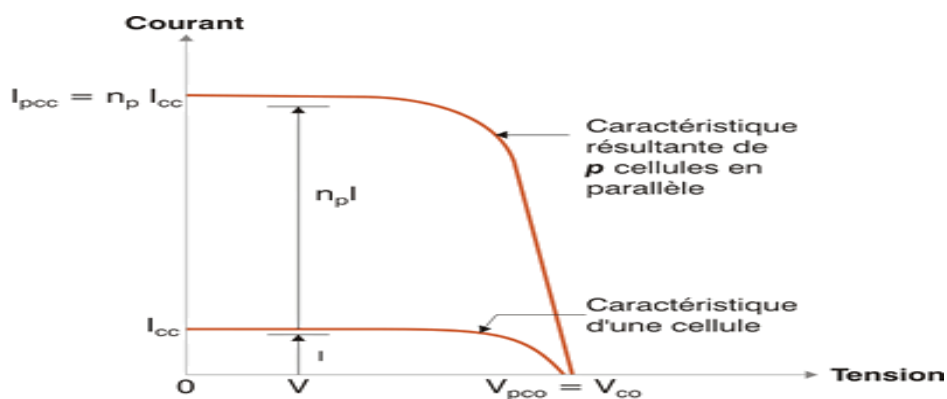


Figure (II-15) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques.

VI-3 Regroupement en série/parallèle

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous (figure II.16), ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [16].

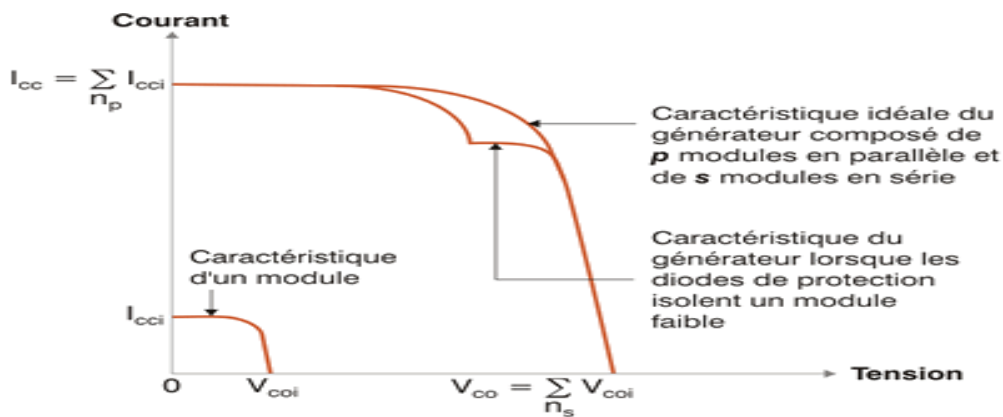


Figure (II-16) : Caractéristique résultante d'un groupement en série/parallèle

VII- Modélisation d'une cellule photovoltaïque

VII-1 Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure(II.17) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

D'après la loi des nœuds: $I = I_{ph} - I_d$ (II.8)

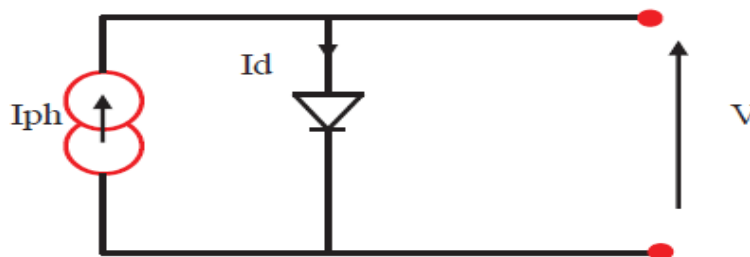


Figure (II-17) : Modèle de cellule photovoltaïque idéale.

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode : $V = V_d$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation I_d :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

Avec:

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : La tension aux bornes de la diode.

$V_T = \frac{kT}{q}$: Potentiel thermodynamique.

Donc la relation (II.8) devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_d}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

VII-2 Cellule photovoltaïque réelle

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_{set} les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p [37]. La figure II-18 présente le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.

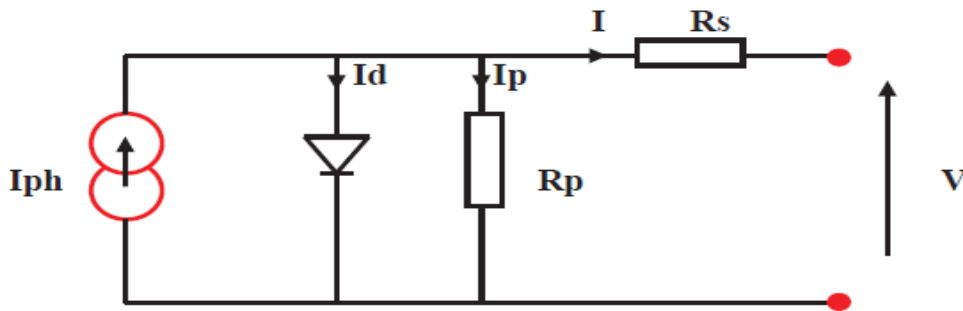


Figure (II-18) : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.

Donc on a :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II.11})$$

$$I_p = \left(\frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (\text{II.12})$$

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{V_T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.13})$$

Donc la relation (II.11) devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + I R_s}{n V_T} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I R_s}{R_p} \right) \quad (\text{II.14})$$

Avec:

I : Le courant fourni par la cellule.

$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right)$ Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode(A).

R_s :La résistance série (Ω).

R_p : La résistance parallèle (Ω).

k : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K).

q :charge d'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

n : Le facteur d'idéalité de la diode (égal à 1 si la diode est idéale, égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison).

T : La température de cellule en kelvin (K).

V_T : La tension thermique $V_t = \frac{kT}{q}$ ($J C^{-1}$).

- **Influence de la résistance série R_s**

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule, de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion [38].

- **Influence de la résistance parallèle R_{sh} ou R_p**

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. Cette résistance modélise les courants de fuite dans la cellule.

L'existence de fissures et de défauts de structures complexes devient le siège de phénomènes physiques assimilables aussi à une résistance parallèle R_{sh} . L'ordre de grandeur de la résistance

parallèle pour une cellule au Si : $R_p = 102 \text{ à } 104 \ \Omega$. Elle augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle [38].

VIII- Caractéristique courant – tension d’une cellule photovoltaïque

Une cellule solaire photovoltaïque est une jonction PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère un courant électrique. Les caractéristiques électriques de la cellule pour différents éclairagements sont données sur la figure II-19 [22].

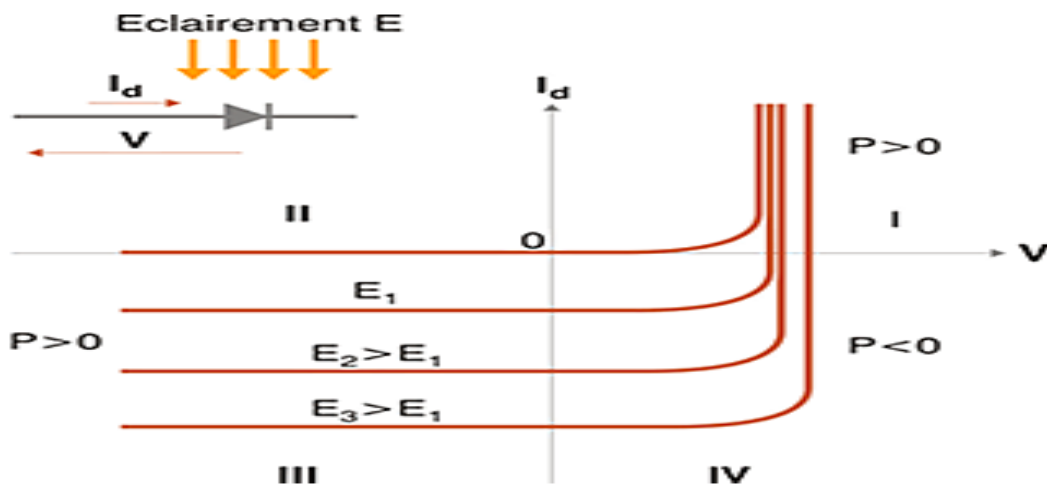


Figure (II-19): Caractéristiques I-V d’une cellule solaire sous différents éclairagements.

Le quadrant IV correspond à un fonctionnement en récepteur en polarisation inverse (sens bloqué d’une jonction PN). Classiquement, on utilise pour une cellule photovoltaïque plutôt une convention générateur (on inverse la convention sur le signe du courant de la figure (II-19), on obtient alors la caractéristique donnée par la figure (II-20))

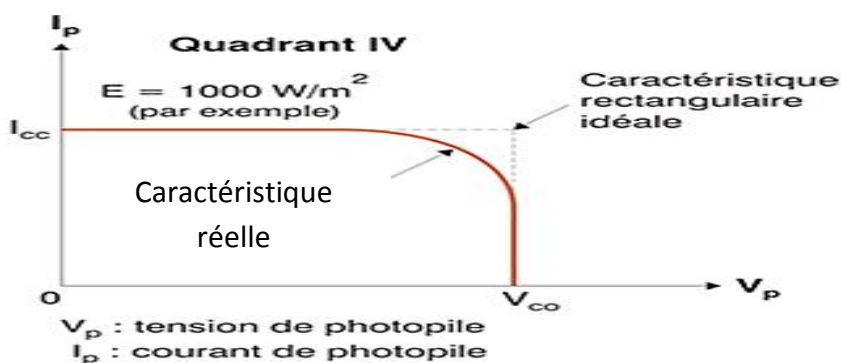


Figure (II-20) : Caractéristique I-V d’une cellule solaire.

IX- Paramètres photovoltaïques d'une cellule solaire

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire [38]. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V) :

- Le courant de court-circuit I_{cc} (obtenu pour $V=0$) ;
- La tension en circuit ouvert V_{co} (obtenu pour $I=0$) ;
- Le facteur de forme FF ;
- Le rendement de conversion d'énergie η ;
- La réponse spectrale RS .

a) Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la température et de la mobilité des porteurs.

b) Tension de circuit ouvert V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [38].

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$\frac{KT}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique.

T: est la température en Kelvin.

K: la constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

I_{ph} : le courant photonique.

I_s : le courant de saturation.

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement figure (II-21).

- Régime des faibles flux lumineux: dans ce cas, on peut écrire:

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II. 16)$$

D'où
$$V_{CO} \approx \frac{KT}{q} \left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (II. 17)$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi

$V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$, en posant $R_0 = \frac{KT}{qI_s}$, R_0 est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$, soit:

$$\frac{I_{ph}}{I_s} > 1$$

D'où :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (II. 18)$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

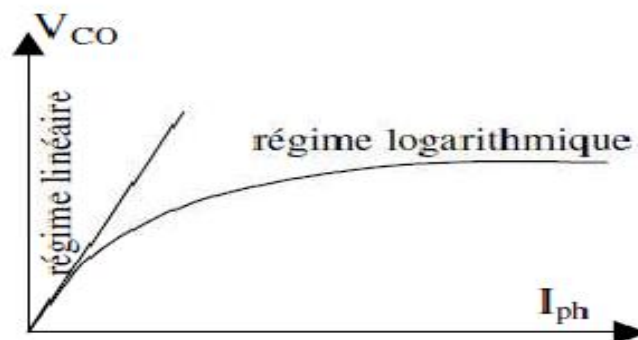


Figure (II-21) : différents régimes selon la puissance d'éclairement.

Chapitre 2 : Les cellules solaires conventionnelles au silicium

Il est important de remarquer que cette tension augmente avec le log de I_{ph} , donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $\frac{KT}{q}$. En effet, le courant de saturation I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{KT}{q}$ donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes.

c) Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [38]. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II. 19})$$

d) La puissance maximale P_{max}

Suivant la formule $P = VI$ pour que P soit maximal, il faut être dans les conditions où le produit VI est maximal, c'est le point de charge idéal de la photopile.

e) Le rendement η

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in}

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF I_{cc} V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II. 20})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

f) Le rendement quantique, EQE

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, *IQE* (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, *EQE* (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit [39]:

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{hc}{e\lambda} \quad (II. 21)$$

Où $\varphi(\lambda)$ est le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E l'énergie du photon (avec $E(\lambda) = hc/\lambda$, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde). Le rapport $I_{cc}(\lambda)/\varphi(\lambda)$ est appelé « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée $SR(\lambda)$. Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit [39] :

$$EQE(\lambda) = SR(\lambda) \cdot \frac{hc}{e\lambda} \quad (II. 22)$$

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency). En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient

$$IPCE(\lambda) = 1.24 \frac{I_{cc}}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad (II. 23)$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le rayonnement solaire, comme source d'énergie utile au PV. Nous avons expliqué le principe de la conversion photovoltaïque. Aussi, nous avons présenté la structure d'une cellule solaire, son fonctionnement et sa modélisation électrique. Nous avons présenté également les différentes filières PV à base de silicium.

Introduction

Durant les dernières années, les cellules solaires à base des matériaux III-V ont été largement utilisées, plus particulièrement dans les applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace [40].

I- Structure d'une cellule solaire homojonction GaAs

La cellule solaire homojonction à base de l'arsenic de gallium est formée de plusieurs couches (figure III-1):

- Une grille collectrice avant (contacte avant : sérigraphie d'une grille Ag) ;
- Une couche de GaAs dopée N ;
- Une couche de GaAs dopée P ;
- Une couche conductrice (Contacte arrière : sérigraphie pleine plaque Al)

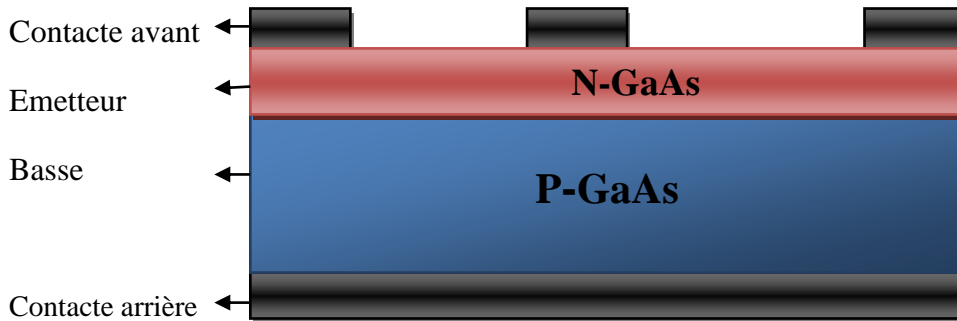


Figure (III-1) : structure de la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n).

II- Fonctionnement d'une cellule solaire GaAs

II-1 Dopage et formation de la jonction P-N

La cellule solaire doit être une jonction P-N (ou N-P). Celle-ci assure que les porteurs photogénérés (électrons et trous), ne se recombinent pas et seront collectés.

La partie (P) de la cellule, obtenue par un dopage de type (P), a comme porteurs majoritaires les trous, alors que la partie (N) a comme porteurs majoritaires les électrons. Pour le GaAs, on

obtient un dopage de type P par l'introduction de l'un des éléments [41]; S, Se, Te, Sn, Si, C, Ge, lors du processus d'élaboration pour les techniques à couches minces. Alors, que pour les techniques de production massive, le dopage s'effectue après l'obtention des wafers du GaAs (par diffusion). Le dopage de type (N) est obtenu par l'introduction de l'un des éléments [2]; Zn, Be, Mg, Cd, Si, C, Ge. On note que le Si, C et le Ge agissent comme dopants de type n ou p, selon que les sites occupés par ces atomes, sont ceux qui ont été occupés par le Ga ou par l'As. Pour ce type de dopage, la méthode appropriée est la technique MBE [41].

A l'équilibre thermodynamique, le produit des deux concentrations est constant et est décrit par la loi d'action de masse : $n_0 p_0 = n_i^2$. (III.1)

Où n_0 et p_0 sont les concentrations à l'équilibre thermodynamique des électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence, respectivement. n_i est la concentration intrinsèque du semi-conducteur, et dépend de la bande interdite et la température [42] :

$$n_i = A T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (\text{III. 2})$$

Où E_g est la largeur de la bande interdite (énergie de gap) en Joule, k est la constante de Boltzmann ($\approx 1,381 \cdot 10^{-23}$ Joules/K), et T est la température en Kelvin (K).

Quand la jonction PN est formée, les trous qui sont majoritaires dans la région **P** diffusent vers la région **N** où ils sont minoritaires, et vice versa pour les électrons. Dans la région **P**, ils restent des atomes accepteurs non compensés avec une charge négative, et dans la région **N** des atomes donneurs avec une charge positive. Cette polarisation interne crée un champ électrique interne qui s'oppose à la diffusion des porteurs. Par conséquent, au niveau de la jonction se crée une région dépeuplée des porteurs libres qu'on appelle, la région de déplétion.

II-2 La collecte des charges

Quand la jonction (P-N) est exposée à la lumière, les photons incidents créent des porteurs dans les zones P et N dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région de leur création:

Dans la zone P ou N, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Les paires électron-trou générées près de la zone de charge

d'espace auront la plus grande probabilité d'être collectées. On aura donc un courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires (électron/ trou) créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique, les électrons vont aller à la région N, les trous à la région P, on aura un photocourant de génération. Ces deux courants circulent dans des sens opposés [43].

La figure (III-2) représente une jonction (PN) d'une cellule à base de GaAs éclairée montrant le bord de bande de conduction et de valence E_C et E_V à travers la jonction. Les paires d'électrons-trous sont séparées par le champ électrique de la zone de charge d'espace et génèrent une photo-tension V_{PV} . Les zones grises indiquent les états occupés.

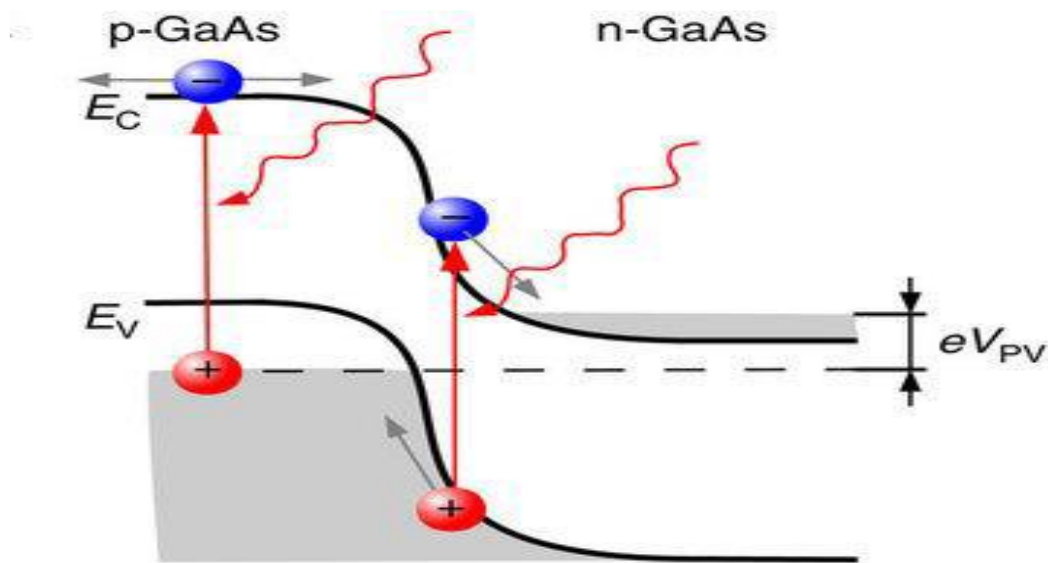


Figure (III-2) : Cellule solaire p-n en GaAs[42].

II-3 Diagramme de bandes d'énergie de la cellule GaAs

Le diagramme des bandes d'énergie d'une cellule photovoltaïque à homojonction au GaAs sous éclairage est présenté sur la figure III-3. Ce diagramme a été généré avec le logiciel de modélisation « PC1D », E_C est la bande de conduction minimale, E_V est la bande de

valence maximale, e est la charge élémentaire, et $\Delta\mu$ est la différence de potentiel chimique des électrons et des trous photogénérés [44].

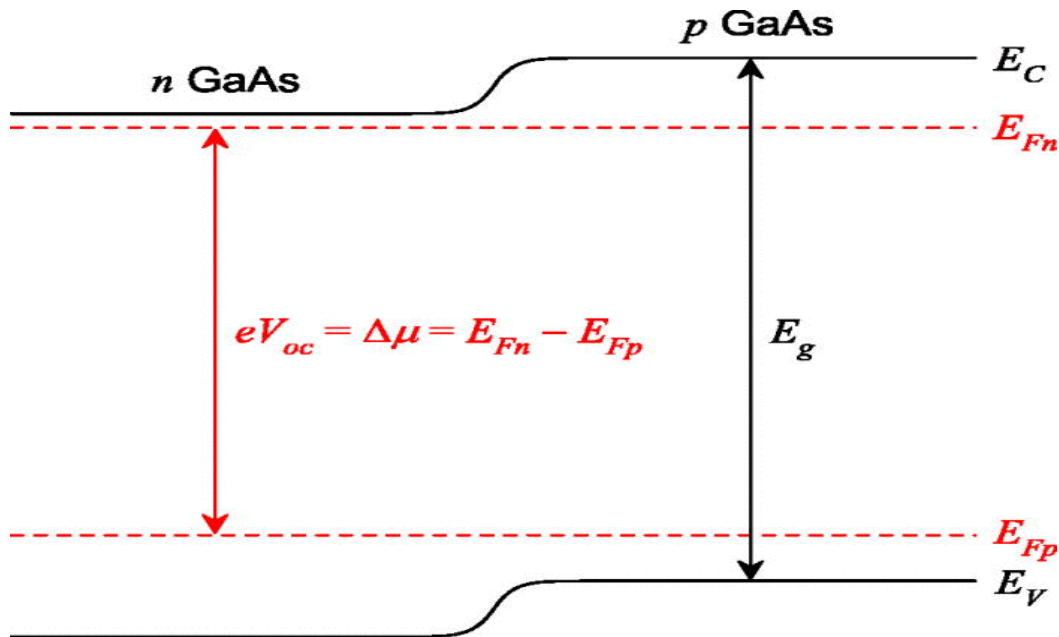


Figure (III-3) : diagramme des bandes d'énergie de la cellule GaAs [44].

III- Caractéristiques électriques d'une cellule solaire en GaAs

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$J = J_{ph} - J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$J_s = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \cdot J_s \propto n_i^2 \quad (\text{III.4})$$

J : est la densité de courant fourni par la cellule.

J_s : est la densité de courant de saturation.

J_{ph} : est la densité de photocourant.

N_A, N_D : sont les dopages des régions p et n , respectivement.

L_n, L_p : sont les longueurs de diffusion dans les régions de type n et de type p .

IV- Recombinaisons dans le GaAs

La surface du semi-conducteur présente de nombreux défauts. Les traitements qu'elle subit lors du polissage et de l'attaque chimique, l'oxyde natif qui, dans le milieu ambiant, croît en quelques minutes sur plusieurs dizaines d'angströms (Å) perturbent profondément la structure cristalline au voisinage de la surface.

Quand on éclaire le matériau uniformément, la recombinaison superficielle provoque une concentration en porteurs excédentaires moins importante en surface que dans le volume. Afin de pallier à ce déséquilibre, les porteurs générés diffusent vers la surface, donnant naissance à un courant de diffusion. Dans le cas d'un matériau de type N par exemple [45] :

$$D_p \frac{\partial \Delta_p}{\partial x} = S \Delta_p \quad (\text{III. 5})$$

S : vitesse de recombinaison en surface (cm.s^{-1}).

Dans le cas d'une densité élevée de centres en surface, et en l'absence de zone de charge d'espace superficielle, on écrit :

$$S = \sigma_p N_{st} v_{th} \quad (\text{III. 6})$$

N_{st} : densité superficielle en centres recombinants.

σ_p : section efficace de capture du centre.

Dans l'arséniure de gallium, S est plus élevé de 10^4 à 10^7 cm.s^{-1} . Avec ce matériau à bande interdite directe, la génération des paires électron-trou se localise sur quelques microns de profondeur. Cette recombinaison superficielle se révèle encore plus gênante qu'avec le silicium [6].

V- Les différents types de cellules solaires en GaAs

V-1 Les cellules simples

La structure adaptée, figure (III.3), est composée essentiellement d'une cellule PN à base de GaAs, sur laquelle est déposée une couche fenêtre AlGaAs de type P. Entre le substrat et la cellule on a inséré une couche BSF (Back Surface Field) dopée N^+ , qui a pour rôle la création

d'un champ électrique retardé en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule [46].

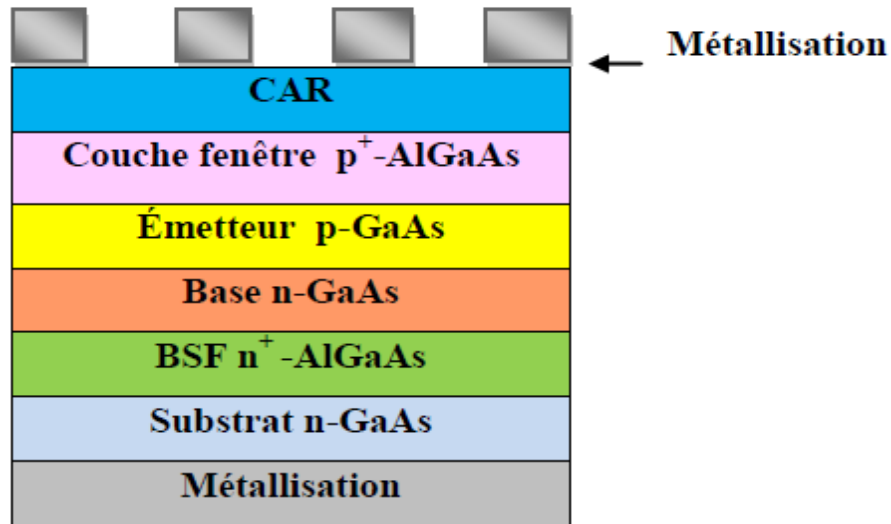


Figure (III-4): Structure de la cellule solaire GaAs(p) /GaAs(n) avec fenêtre AlGaAs(p) [46]

V-2 Les cellules multi-jonction (Tandem)

Les cellules multi-jonction sont composées d'un grand nombre de semi-conducteurs ou dite constituées de plusieurs couches minces (GaAs, Ge, GaInP₂...) possédant chacun un spectre limité. En choisissant des matériaux dont les longueurs d'onde limites sont les plus proches possibles les unes des autres, l'ensemble des cellules absorbe un spectre le plus complet possible (figure III-5) donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50% [6]. Par exemple les cellules à multijonctions GaAs/GaSb sont fabriquées de façon monolithique par MBE (Molecular Beam Epitaxy) ou par assemblage mécanique d'homojonction. Ce type de cellules, du fait de la très bonne complémentarité des gaps des matériaux (0,725eV pour GaSb et 1,42 eV pour le GaAs), constitue une alternative crédible et originale aux cellules existantes pour une utilisation sous flux solaire fortement concentré. De plus du fait des matériaux utilisés et de la simplicité des structures (cellules avec seulement deux jonctions) le management thermique semble à priori plus facile qu'avec des cellules plus complexes de type GaInP/GaInAs.

La fabrication de telles structures reste cependant, à ce jour, un vrai défi scientifique du fait du très fort désaccord paramétrique entre les différents matériaux (6% entre GaAs et GaSb)

ce qui complique l'épitaxie, ce point contribue cependant au réel intérêt scientifique du sujet proposé. Le gros défaut de ces cellules est leur coût de fabrication, car aucune production industrielle n'a encore pu être mise en place [46].

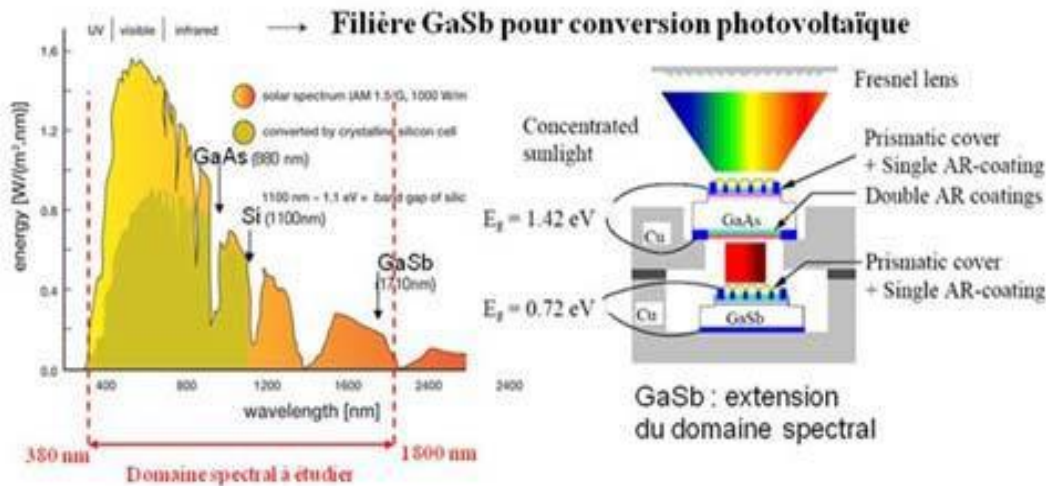


Figure (III-5): Domaine spectral couvert par une cellule tandem GaAs/GaSb[46].

VI- Rendement des cellules solaires au GaAs

Les premières cellules solaires en GaAs, fabriquées par Jenny et al en 1956 étaient sous forme de homojonction p-n avec un rendement de conversion de 3 à 6% seulement. En 1970 Alferov et Adreev élaborent une cellule solaire à hétérostructure en GaAs avec un rendement de 10% [47].

Le développement des cellules solaires de GaAs a été rapide au cours des 30 dernières années. Au début des années 1980, les premières cellules solaires en GaAs étaient déjà meilleure rendement que les cellules solaires de Si. Des rendements voisins de 22 % sous un soleil (AMI) et 25 % sous 178 soleils ont été mesurés dans deux laboratoires différents [48]. D'autres cellules au GaAs ont fonctionné à des taux de concentration atteignant 1 000 soleils et davantage, quelques-unes dépassent même 19 % de rendement sous 1700 soleil [48].

De 1990 à 2007, le rendement obtenu par les cellules solaires de GaAs est resté constant à 25,1%, puis G.J. Bauhuis et al [48] ont obtenu un rendement de 26,1% en utilisant une technique de décollage épitaxie (ELO) qui a séparé la structure de la cellule solaire de son substrat. En 2008 (ELO) peut produire des cellules solaires à base de GaAs de haute qualité.

Le processus (ELO) utilise une croissance épitaxiale inverse et une gravure sélective d'une couche de libération qui supprime le substrat. Une couche métallique agissant en tant que réflecteur est généralement déposée sur la couche BSF qui peut être utilisée pour améliorer le recyclage des photons. La technique (ELO) est réalisée par la forte sélectivité par gravure des alliages $Al_xGa_{1-x}As$ dans l'acide. Après la gravure de la couche de libération, le substrat hôte peut être réutilisé, ce qui peut réduire le coût de fabrication avec des cellules solaires GaAs de haute qualité [47].

En 2010, le record du rendement a atteint 26,4% par Fraunhofer ISE, et plus tard, en maximisant l'effet de recyclage des photons, 28,8% a été obtenu en 2012 Par Alta Devices[47].

En 2016, la société américaine Alta Devices, spécialisée dans le PV pour des applications de haut de gamme, dévoile un rendement de conversion de 31,6% obtenu en laboratoire pour ses cellules solaires en technologie GaAs à double jonction sans concentration. Pour réaliser la cellule solaire à double jonction avec le nouveau record de 31,6%, la société a fait croître sur la couche GaAs une deuxième couche d'InGaP, un composé qui est capable d'absorber encore plus efficacement les photons et de générer plus d'électricité qu'un dispositif à simple jonction[49].

Année	Rendement η (%)
1956	5
1970	10
1980	22
2000	25
2008	26.1
2010	26.4
2012	28.8
2016	31.6

Tableau (III-1) : Amélioration du rendement des cellules solaires en GaAs [47,48,49].

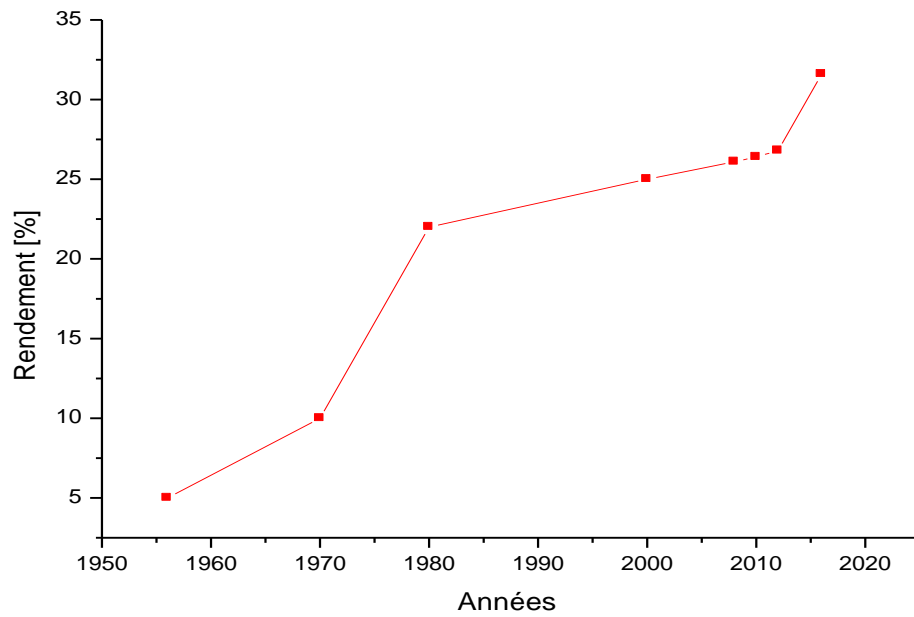


Figure (III-6) : Evolution du rendement des cellules solaires en GaAs

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la cellule en GaAs et son diagramme de bandes d'énergie en expliquant son fonctionnement. Nous avons présenté également les différentes architectures de cellules solaires au GaAs ainsi que leurs rendements de conversion publiés dans la littérature.

Introduction

Durant les dernières années, à cause des coûts élevés de l'expérimentation (technique de fabrication des cellules), les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Il existe principalement quatre types de simulations, nous citons à titre d'exemple les simulateurs fonctionnels, les simulateurs électriques ou analogiques, les simulateurs technologiques et ceux de composants ou dispositifs comme : AFORS HET, PC1D, SILVACO...etc

Pour réaliser ce projet nous avons opté pour un simulateur des dispositifs AFORS-HET.

Nous présentons dans ce chapitre, une simulation des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) à température ambiante en étudiant l'impact de la variation des paramètres structuraux (épaisseurs des couches et leur dopage) sur les performances de ces cellules. Nous étudions ensuite par simulation l'effet de l'augmentation de la température sur les caractéristiques électriques des cellules solaires à base de GaAs.

I- Présentation du logiciel AFORS-HET

Le logiciel AFORS-HET (en Anglais : "Automate FOR simulation of HETerostructures") est un programme de simulation à une dimension développé par le laboratoire Allemand HZB (Helmoltz-Zentrum Berlin). Ce programme permet de simuler des hétérostructures multicouches ainsi que certaines techniques de caractérisations usuelles utilisées dans le domaine du PV (I(V), RS...).

I-1 Introduction à l'interface utilisateur AFORS-HET

Pour donner une idée de la vaste portée AFORS-HET, version 2.4.1, un bref aperçu de la fenêtre principale AFORS-HET est présenté sur la figure (IV-1). On voit la fenêtre principale lorsque le mode de calcul le plus avancé est activé. Dans cette disposition, toute la gamme des options de simulation est visible.

Pour commencer à travailler avec le programme, une structure doit d'abord être définie. Le bouton pour ouvrir la fenêtre « Define structure » se trouve dans la partie gauche de la fenêtre principale. Toujours sur le côté gauche, les paramètres numériques peuvent être trouvés derrière le bouton « settings » et le mode de calcul peut être réglé, par exemple, à l'état d'équilibre (DC) ou transitoire.

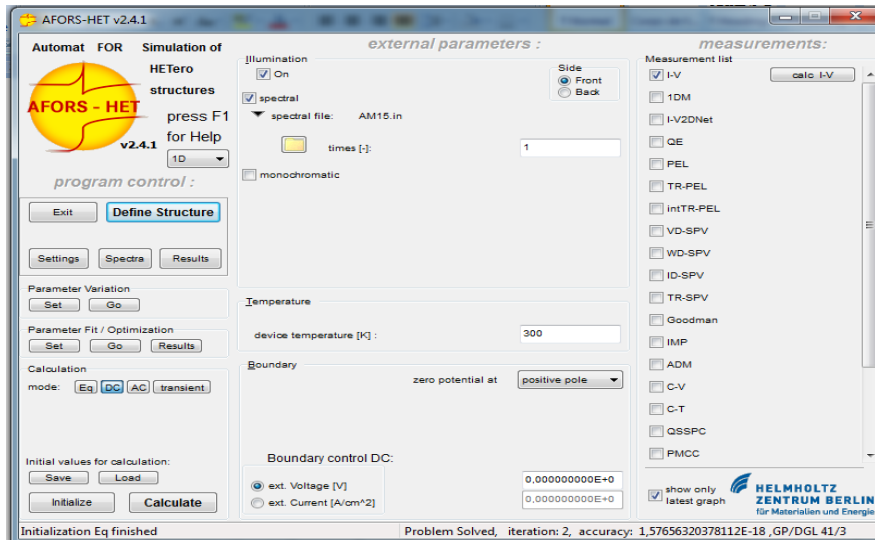


Figure (IV-1) : La fenêtre principale AFORS-HET avec toutes les options visibles (après la définition d'une structure et activation du mode de calcul DC).

Après avoir défini la structure, et que la simulation aura été exécutée, un calcul dans des conditions différentes peut alors être démarré. Le bouton « calculate », permet de régler et commencer un ensemble des calculs avec un seul paramètre de variation dans la section « Parameter Variation ». Il est également possible de commencer un ajustement aux données mesurées dans la section « Parameters Fit / Optimization » où la structure peut être optimisée. Dans la section centrale de la fenêtre principale, les paramètres externes: éclairage, température et tension ou courant peuvent être définis (es). Dans la section d'éclairage un spectre ou un fichier peut être chargé. De même, un éclairage monochromatique d'une certaine longueur d'onde et flux des photons peut être défini. Pour tous les paramètres externes, la dépendance du temps peut être spécifiée si les modes de calcul AC ou transitoires sont activés. La partie droite de la fenêtre principale, permet de configurer et de lancer la simulation d'une variété des cellules solaires et techniques de caractérisation des matériaux, ainsi que des mesures typiques comme la courbe I-V et le rendement quantique (QE).

II-2 Définition d'une structure

Lors de la configuration d'une simulation avec AFORS-HET, la première étape est la définition de la structure, ceci est effectué en cliquant sur le bouton correspondant dans la fenêtre principale d'AFORS-HET (Fig. (IV-2)).

Sur le côté gauche de la fenêtre « Define Structure » on peut définir les différentes couches

optiques et électriques et leurs conditions d'interfaces et aux limites, quant au côté droit, le circuit externe de la cellule solaire peut être spécifié.

On commence avec la définition d'une couche semiconductrice en cliquant sur la rubrique « Layer 1 », qui permettra d'ouvrir une fenêtre « Layer » (Fig. (IV-3)).

Ensuite en choisissant le modèle « standard », la couche doit être définie par son type, sa densité de dopage et son épaisseur. Pour le calcul optique, les données n , k peuvent être chargées à partir des exemples de fichiers pour les différents matériaux dans le dossier « Spectra » de l'installation AFORS-HET. Enfin, on donne un nom approprié à la couche et le choix est confirmé en cliquant sur le bouton « OK ».

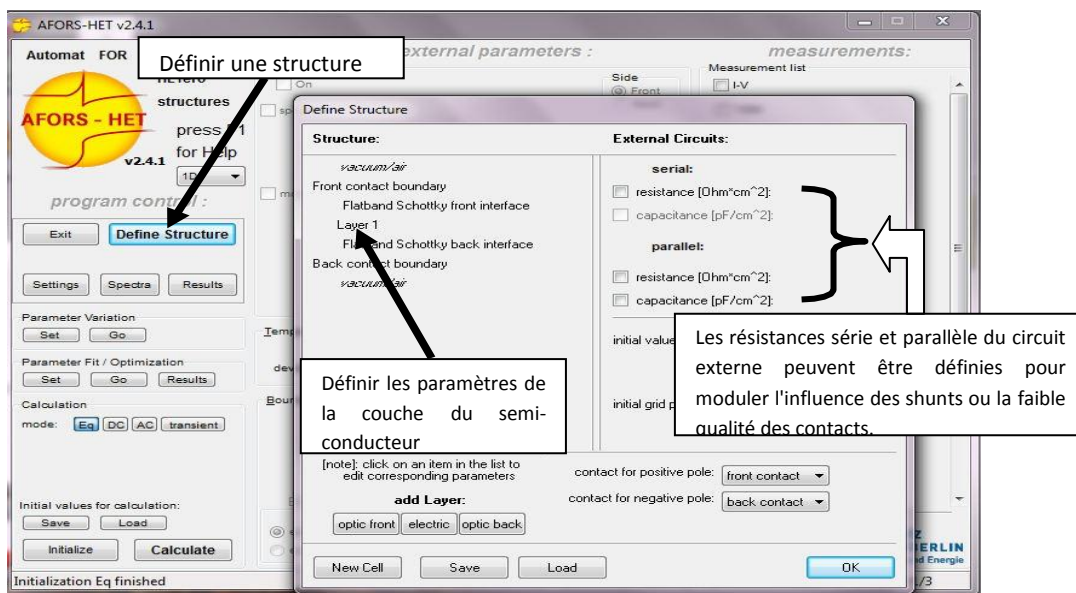


Figure (IV-2) : La fenêtre principale AFORS-HET et la fenêtre « Define Structure ».

Retour à la fenêtre « Define Structure » (Fig. (IV-4)), une autre couche électrique peut être ajoutée. Cette couche est définie comme étant de type p (Fig. (IV-5)) de sorte qu'une jonction p/n qui fonctionne comme une cellule solaire, peut être obtenue. En plus des paramètres du matériau, des défauts profonds peuvent être définis pour modéliser la qualité de la plaquette (Fig. (IV-6)). Enfin, la structure peut être enregistrée, simulée et analysée (Fig. (IV-7)).

Chapitre 4 : Etude de l'effet de la température sur les performances des cellules solaires à base d'arséniure de gallium GaAs

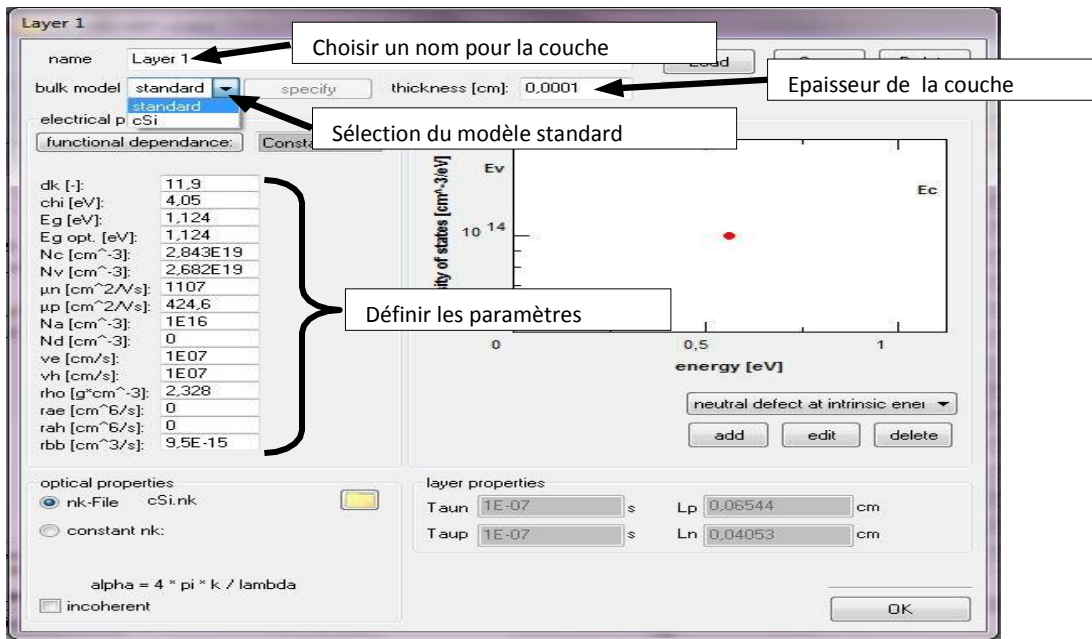


Figure (IV-3) : Pour chaque couche, les paramètres optiques et électriques du matériau peuvent être définis dans la fenêtre « Layer ».

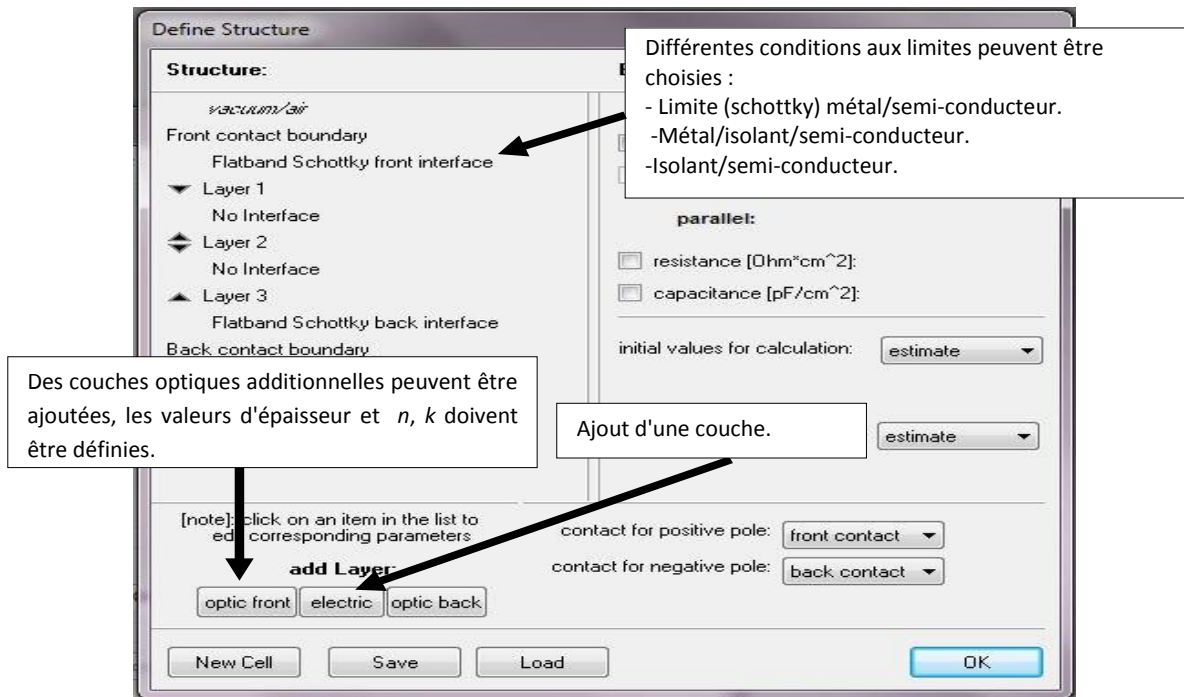


Figure (IV-4) : Des couches électriques et optiques peuvent être ajoutées et que des conditions aux limites et d'interface doivent être définies.

Chapitre 4 : Etude de l'effet de la température sur les performances des cellules solaires à base d'arséniure de gallium GaAs

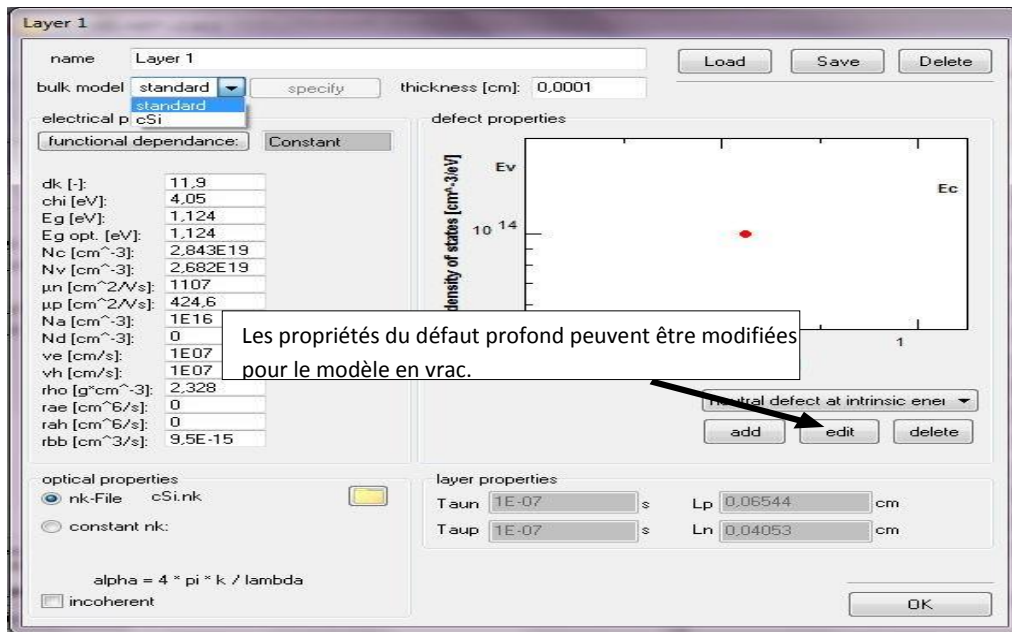


Figure (IV-5) : En plus des paramètres du matériau, les distributions des défauts peuvent être définies.

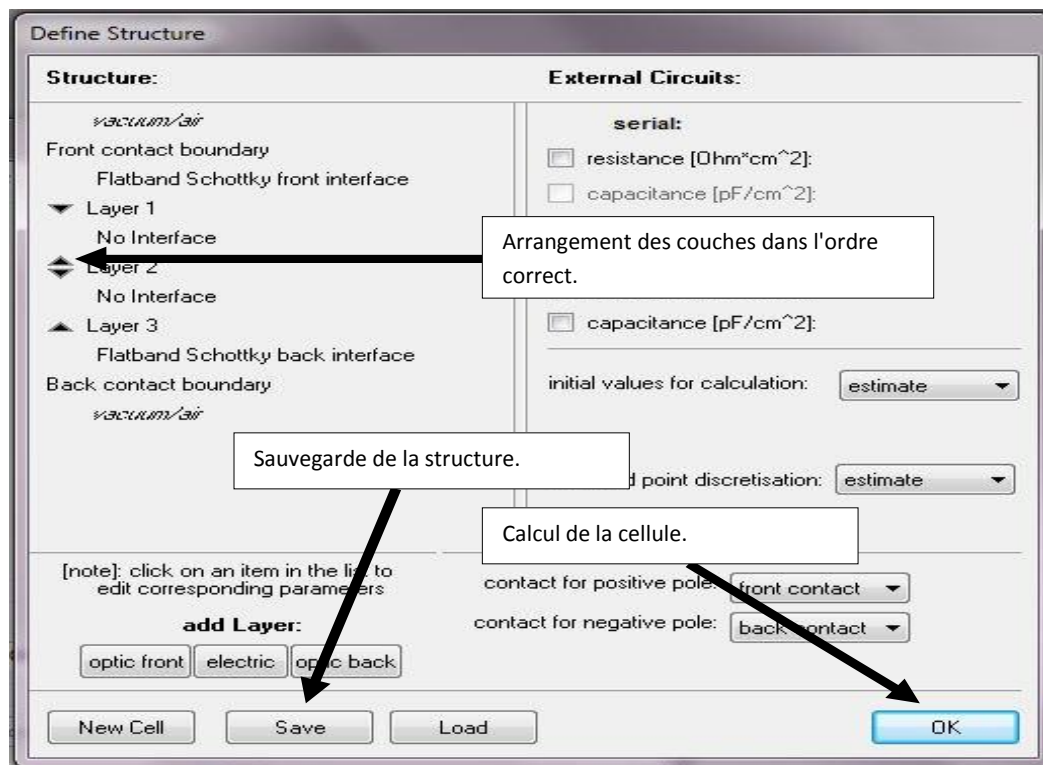


Figure (IV-6) : L'ordre de la couche peut être réorganisé, ainsi que la sauvegarde de la structure et le calcul de la cellule.

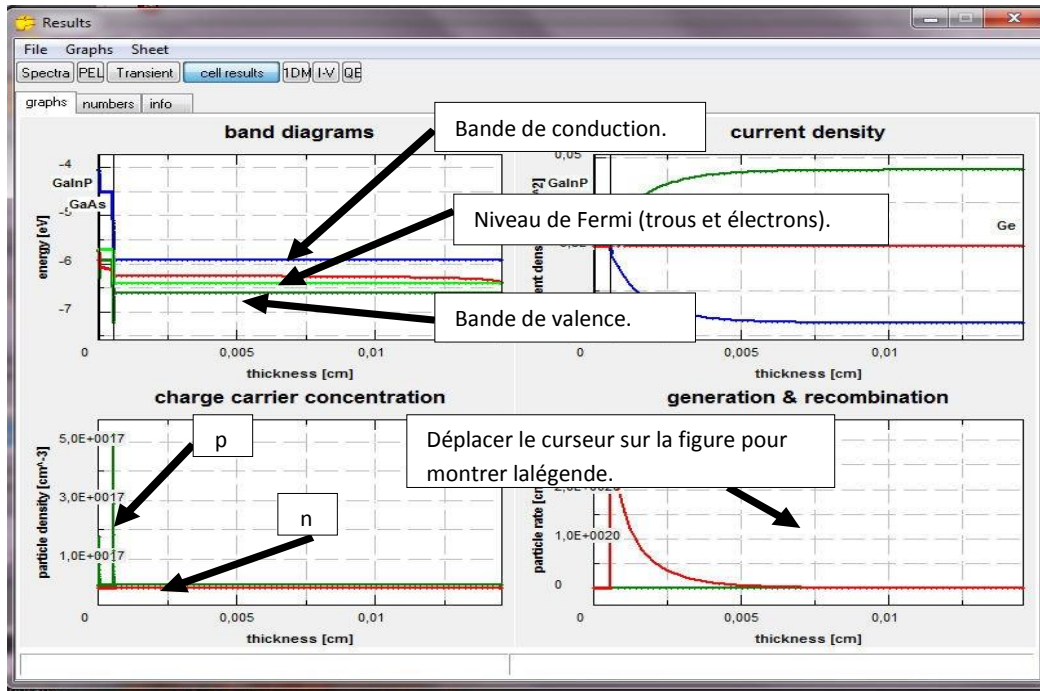


Figure (IV-7) : La fenêtre « résultats » montre les diagrammes de bandes, les densités des porteurs et du courant ainsi que la recombinaison et la génération.

I-3 Analyse des résultats de simulation

En cliquant sur le bouton « OK » dans la fenêtre « Define Structure », il y aura le lancement automatique de la simulation pour les conditions d'équilibre et ainsi s'affiche la fenêtre « Results » (Fig. (IV-7)). Typiquement, les graphiques de diagrammes de bande, la densité des porteurs, les densités du courant et les recombinaison/génération sont affichés. Les résultats pour toutes les quantités calculées peuvent être enregistrés dans un tableau (menu « File »). En cliquant sur l'un des graphiques, une nouvelle fenêtre s'ouvre (Fig. (IV-8)) ainsi les données peuvent être analysées plus en détails. Il est par exemple possible de mesurer des distances et de réaliser des intégrations numériques.

Les données peuvent être affichées comme une figure ou un tableau et on peut facilement basculer entre les deux visualisations (Fig. (IV-9)). En outre, les résultats des calculs optiques peuvent être affichés si les calculs sous éclairage ont déjà été effectués.

Chapitre 4 : Etude de l'effet de la température sur les performances des cellules solaires à base d'arséniure de gallium GaAs

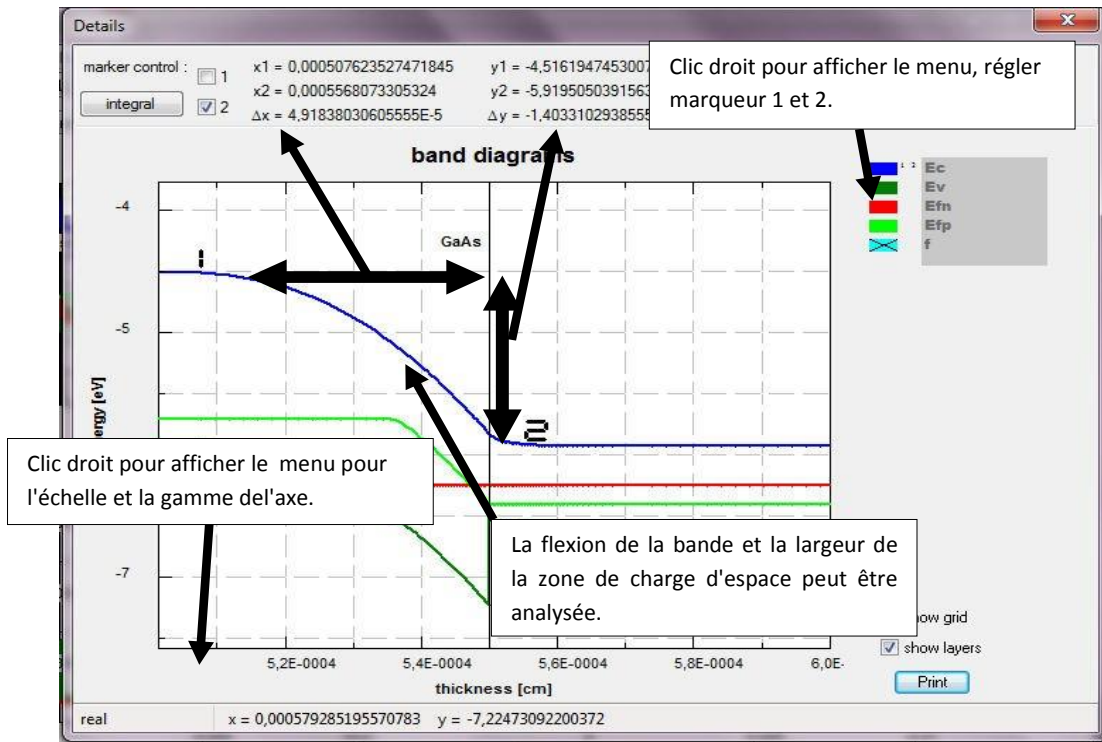


Figure (IV-8) : Plusieurs outils permettant d'analyser les données en détails.

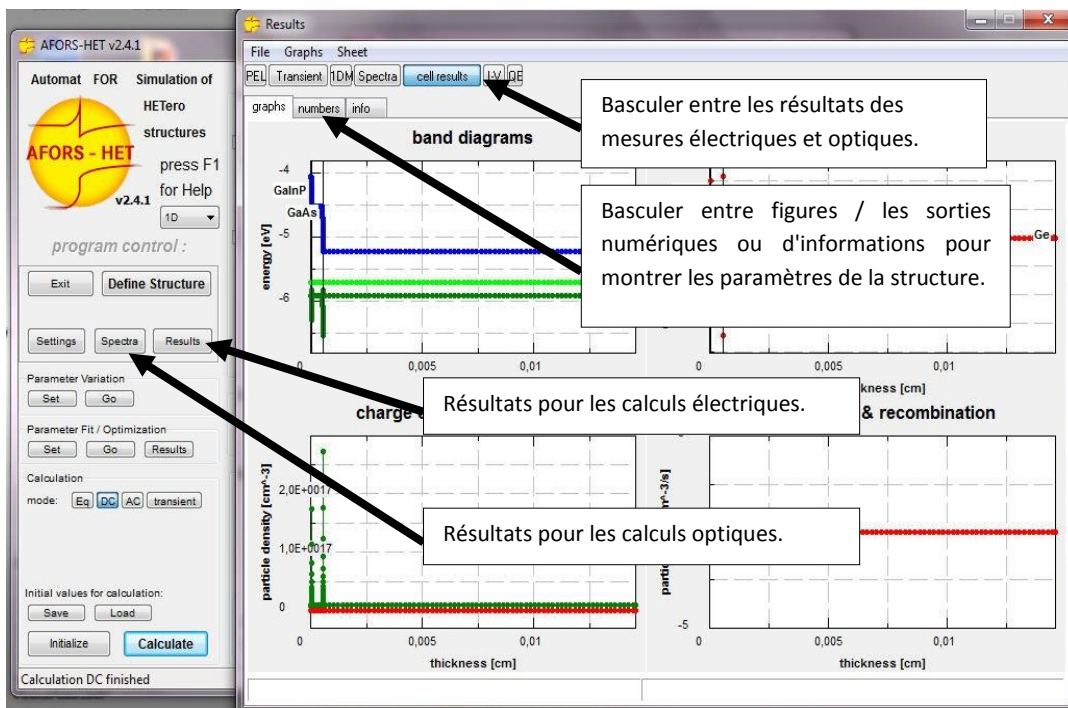


Figure (IV-9) : Dans la fenêtre « Results »,

il est possible de basculer entre les résultats du calcul électrique et optique et de montrer les résultats d'une mesure simulée. En outre, les données peuvent être affichées comme une figure ou un tableau.

I-3-1 Cellule sous illumination

Pour calculer la cellule solaire sous illumination, le monde de calcul DC doit être activé. il est donc possible d'effectuer des calculs dans des conditions de non-équilibre ainsi que de sélectionner l'éclairage extérieur constant et le courant ou la tension constante (Fig.(IV-10)).

Il existe différentes possibilités pour simuler une cellule sous illumination. On peut soit choisir illumination « monochromatique » et de définir un flux de photons et une longueur d'onde ou choisir illumination « spectral » et de changer un fichier « spectral file » ou un fichier de génération « generation file » (fichiers d'exemples peuvent être trouvés dans le dossier « Spectra » de l'installation AFORS-HET).

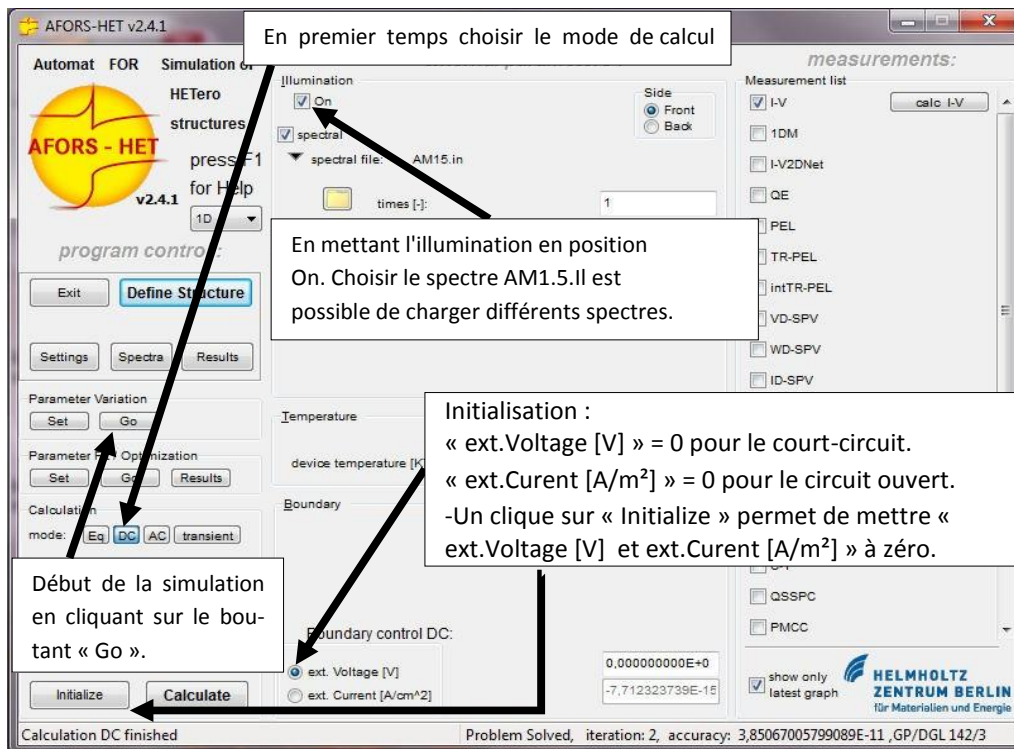


Figure (IV-10) : Le mode de calcul DC permet la sélection d'illumination constante et le courant ou la tension constante.

I-3-2 Simulation d'une courbe I-V

AFORS-HET est capable de simuler différents types de mesures, comme on peut le voir sur le côté droit de la fenêtre principale. Pour mettre en place des mesures par exemple d'une courbe *I-V*, on doit suivre les étapes représentées sur la figure(IV-11).

Cliquer sur le bouton « calc IV » permet de lancer la simulation et les résultats seront ainsi illustrés. Ceux-ci peuvent donc être analysés et sauvegardés. Sur la figure (IV-12), Il est expliqué comment simuler une courbe *I-V* sous éclairage.

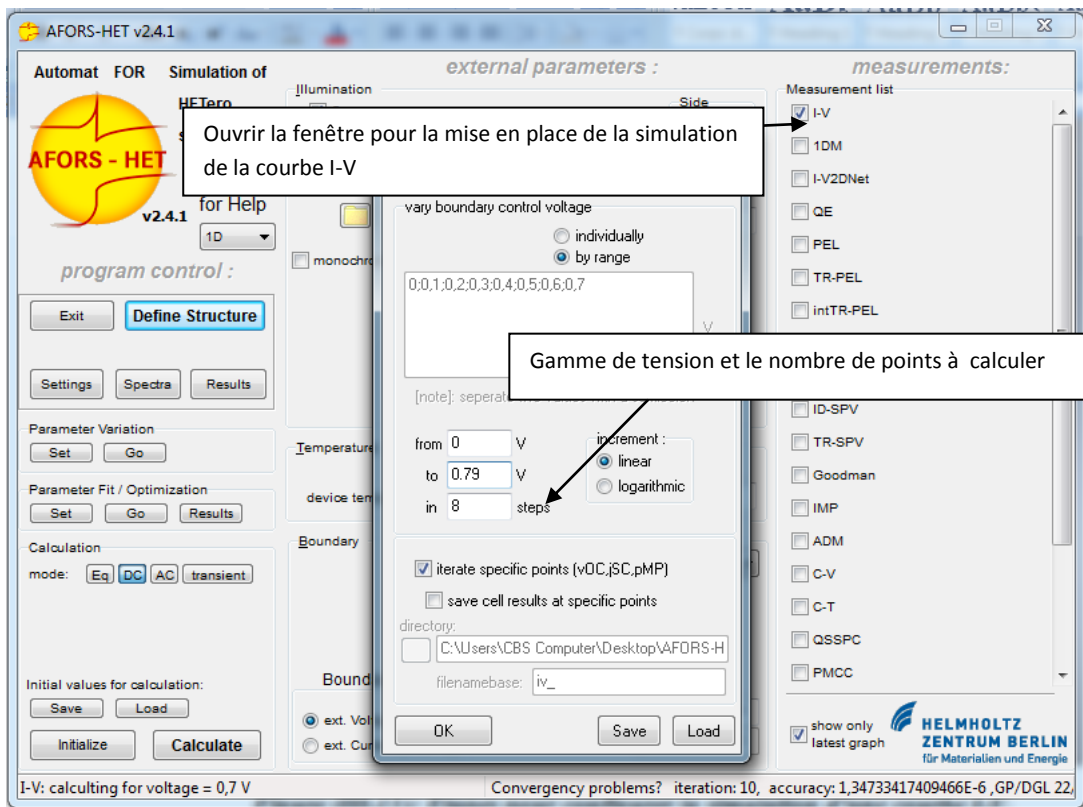


Figure (IV-11): Étapes pour configurer la simulation d'une courbe I-V.

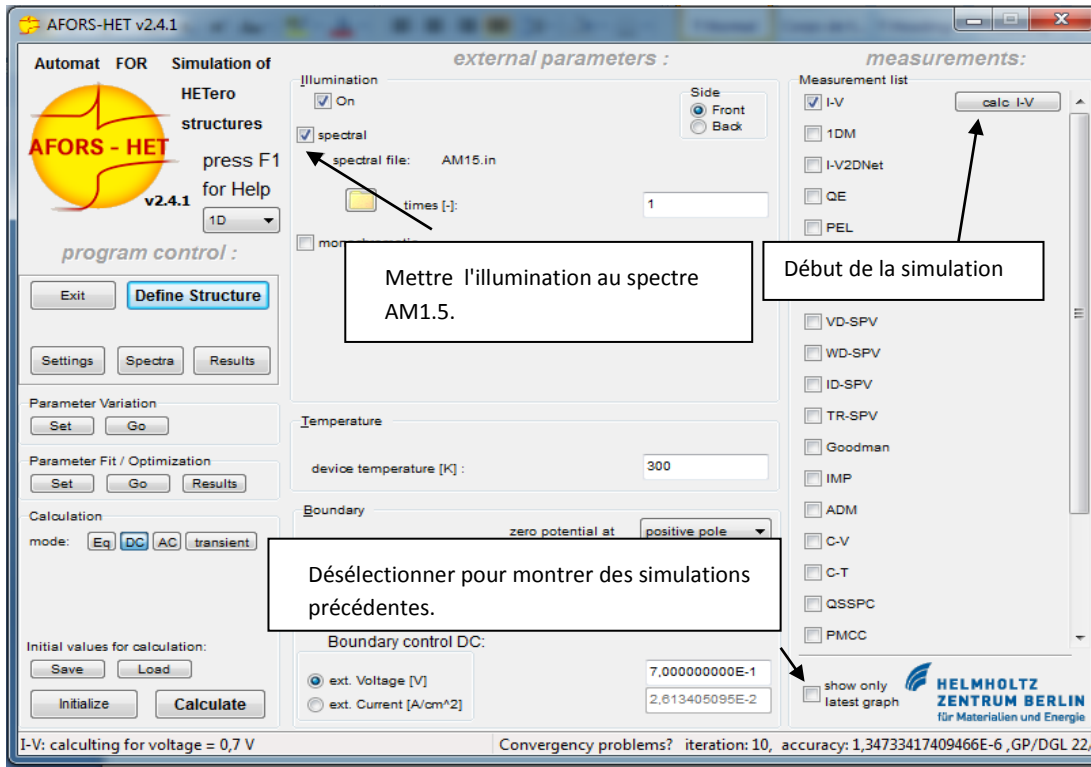


Figure (IV-12) : La mise en place de la simulation d'une courbe I-V sous illumination.

II-Structure de la cellule simulée

La figure (IV-13) représente la structure de la cellule solaire utilisée pendant la simulation. Cette structure a été étudiée sous un spectre solaire AM1.5 avec $P=1000\text{W/m}^2$ et une température de 25°C . Les mesures ont été prises dans le cas d'une résistance parallèle infiniment grande et d'une résistance série nulle.

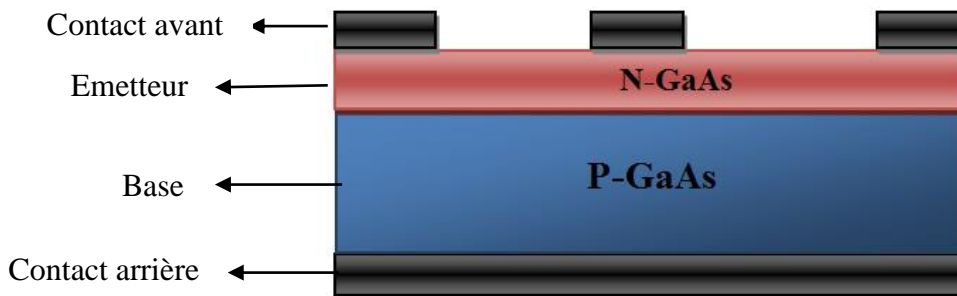


Figure (IV- 13) :Structure de la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n) simulée.

III-Les paramètres de simulation

Les paramètres d'entrées de la cellule solaire à homojonction P-N en GaAs sont donnés dans le tableau suivant, la gamme de la température étudiée est de $25^{\circ}\text{C} \leq T \leq 55^{\circ}\text{C}$ sous un spectre AM1.5.

Paramètres de simulation	GaAs
Epaisseur (μm)	Emetteur: 0.2 μm . Base : 50 μm
Gap (eV)	1.425
Mobilité des électrons μ_n ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	8500
Mobilité des trous μ_h ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	400
N_C (cm^{-3})	$2,2 \cdot 10^{19}$
N_V (cm^{-3})	$1,8 \cdot 10^{17}$
Dopage (cm^{-3})	Base : $N_A = 5 \cdot 10^{17}$, Emetteur : $N_D = 5 \cdot 10^{18}$
Affinité électronique χ (eV)	4.07
Constante diélectrique	12.5

Tableau (IV-1) : Les Paramètres de simulation de la cellule solaire à homojonction P-N en GaAs[51].

V. Résultats de simulation

V-1 Caractéristique courant/tension (I-V)

La figure (IV-14) représente les caractéristiques courant -tension de la cellule solaire à homojonction GaAs(p)/GaAs(n), à $T=298.15\text{K}$ (25°). Les paramètres électriques correspondants sont représentés dans le tableau IV-2. D'après ces résultats, la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n) présente une tension de circuit ouvert élevée de 0.78 V induisant un rendement de conversion important $\eta = 18.19\%$ qui est conforme à celui publié dans la littérature [51].

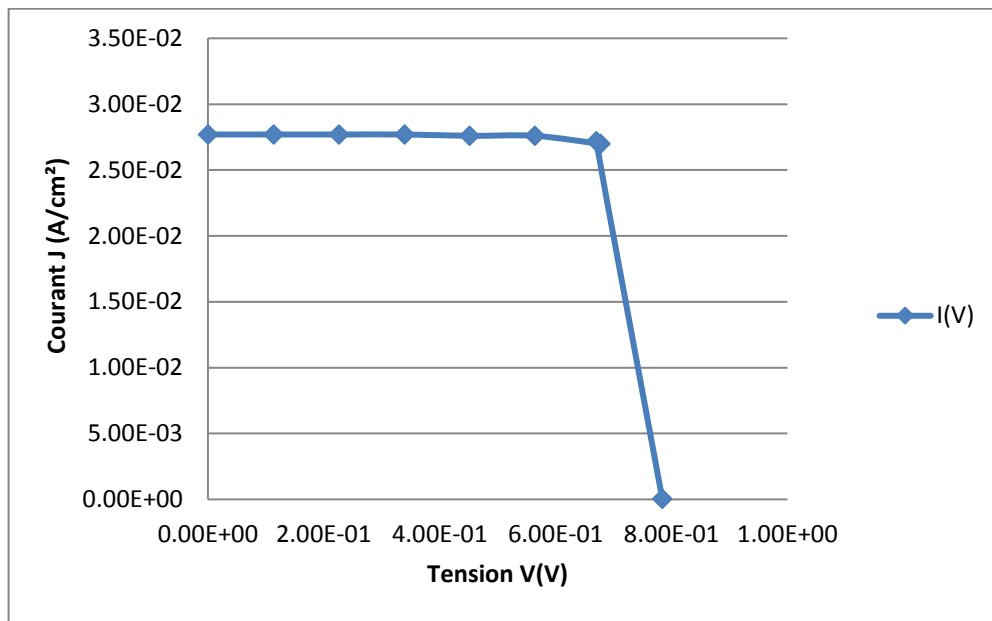


Figure (IV-14) : Caractéristique J(V), de la cellule à homojonction p/n à base de GaAs.

Performances PV	$V_{co}(mV)$	$J_{cc} (mA/cm^2)$	FF(%)	$\eta(\%)$
Cellule GaAs	783	27.72	83.73	18.19

Tableau (IV-2) : Paramètres électriques de la cellule solaire p/n à base de GaAs à $T=25^\circ\text{C}$.

V-2 Influence de la température sur la caractéristique (J-V) de la cellule solaire GaAs

La figure IV-15 illustre l'impact de l'élévation de la température sur les caractéristiques courant-tension des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n). Les paramètres photovoltaïques correspondants sont donnés dans le tableau IV-3.

Les courbes de la figure IV-15 montrent que la meilleure caractéristique J-V est obtenue à température ambiante de 25°C. Au-delà de cette valeur, nous observons une dégradation de la caractéristique électrique de la cellule lorsque la température augmente (figure IV-15). Les résultats montrent une décroissance linéaire de la V_{co} et du facteur de forme FF avec la température. Nous observons aussi une légère croissance du courant de court-circuit dont l'effet sur la caractéristique J-V reste négligeable.

La cause principale de la dégradation des caractéristiques électriques est la diminution de la V_{co} lorsque la température augmente engendrant par conséquent une baisse du rendement de conversion (Figure IV-16). Cette diminution de la V_{co} s'explique par l'augmentation de la densité du courant de saturation J_S proportionnel à n_i^2 qui augmente rapidement avec la température, comme le montrent les équations (IV.1), (IV.2) et (IV.3) :

$$J_S = q \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{D_p}{L_p \cdot N_D} + \frac{D_n}{L_n \cdot N_A} \right) \text{(IV.1)}$$

$$n_i^2 = A T^3 \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) \text{(IV.2)}$$

A : constante spécifique du matériau et indépendante de la température.

n_i : concentration intrinsèque.

T : température en K.

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_S} \right) \text{(IV.3)}$$

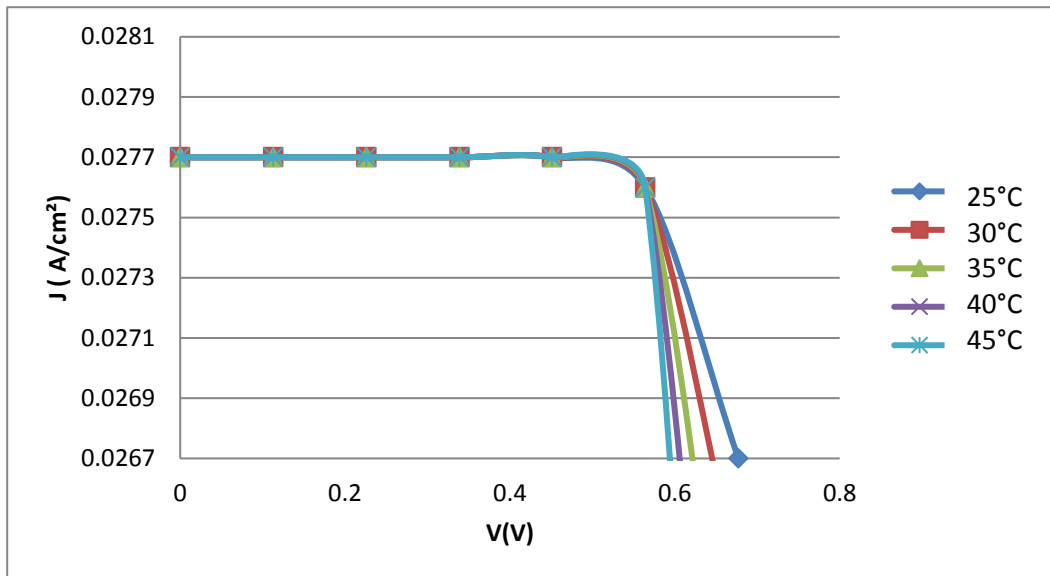


Figure (IV-15) : Caractéristiques J-V des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) sous différentes températures.

T (K)	T (°C)	V _{co} (mV)	J _{cc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
298.15	25	783.8	27.72	83.73	18.19
303.15	30	773.22	27,74	84,18	18,05
308.15	35	762,7	27,75	84,16	17,81
313.15	40	750,3	27,77	83,77	17,45
318.15	45	739.7	27,78	83,49	17.16
323.15	50	729,2	27,79	82,23	16,67
328.15	55	716,8	27,81	77,01	15,34

Tableau (IV-3) : Paramètres photovoltaïques des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) en fonction de la température.

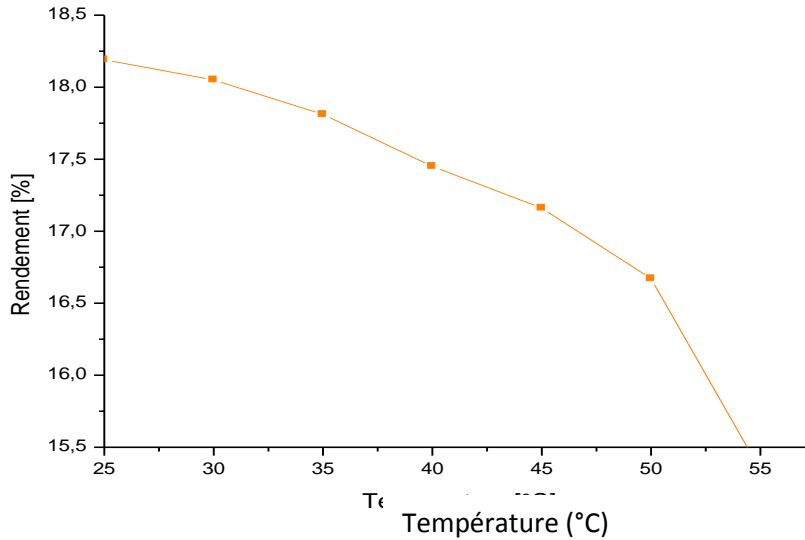


Figure (IV- 16) : Rendement de la cellule p/n en GaAs en fonction de la température.

V-3 Effet de l'épaisseur de l'émetteur

Le tableau IV-4 résume les paramètres photovoltaïques des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) obtenus en variant l'épaisseur de l'émetteur de 0.2 à 2.5 μm . Le dopage de l'émetteur, l'épaisseur du Base et le dopage de la Base sont maintenus constants comme indiqués dans le tableau (IV-4). D'après les résultats de simulation, nous remarquons que le meilleur rendement est obtenu pour une épaisseur de la couche d'émetteur de 0.2 μm . Au-delà de cette valeur, nous observons une décroissance de V_{co} , J_{cc} et FF induisant une baisse du rendement (figure IV-17).

Région	Epaisseurs (μm)	Dopage (cm^{-3})
Emetteur	0.2- 2.5	$5 \cdot 10^{15}$
Base	50	$7 \cdot 10^{19}$

Tableau (VI-4)

Epaisseur de l'émetteur (μm)	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF(%)	η (%)
0.2	766.1	16.2	84.34	12.51
0.5	764.4	15.50	84.44	10.28
1	760.4	13.72	84.39	8.81
1.5	759.1	12.59	84.29	8.05
2	757.4	11.85	84.26	7.56
2.5	755.6	11.39	84.28	7.2

Tableau (IV-5) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n au GaAs en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

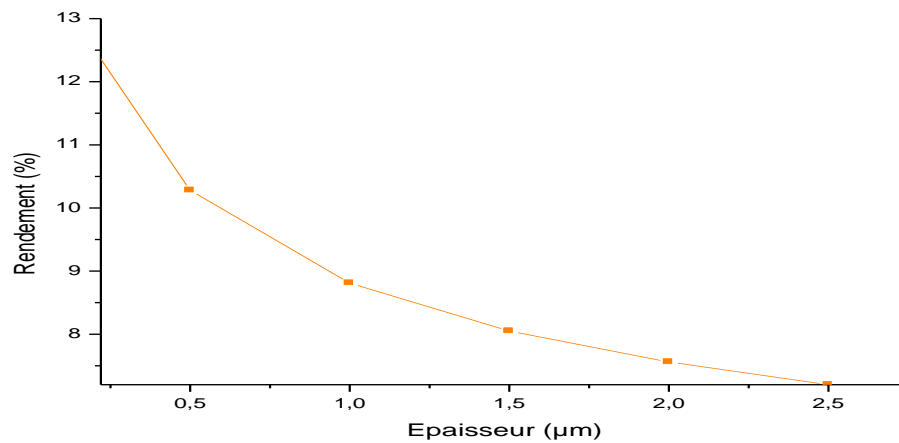


Figure (IV-17) : Variation du rendement de la cellule solaire p/n en GaAs avec la variation de l'épaisseur de l'émetteur.

V-4 Effet de l'épaisseur de la Base

L'épaisseur de la base a été variée entre 100 à 250 μm afin d'étudier son influence sur les paramètres PV des cellules solaires p/n au GaAs (Tableau IV-7). Le dopage de l'émetteur et son épaisseur ainsi que le dopage de la base sont fixés aux valeurs indiquées dans le tableau (IV-6). La figure IV-18 montre une croissance du rendement de conversion des cellules avec l'augmentation de l'épaisseur de la base qui peut être expliquée par une augmentation de l'absorption des photons induisant une augmentation des paires électrons-trous photogénérés.

Région	Epaisseurs (μm)	Dopage (cm^{-3})
Emetteur	0.6	$5 \cdot 10^{15}$
Base	100-250	$7 \cdot 10^{19}$

Tableau (IV-6)

Epaisseur de la base (μm)	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF(%)	η (%)
100	780.3	27.73	83.88	18.15
150	782.2	28.19	83.83	18.48
200	782.1	28.22	83.82	18.50
250	782	28.22	83.80	18.51

Tableau (IV-7) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n en GaAs en fonction de l'épaisseur de la base.

Chapitre 4 : Etude de l'effet de la température sur les performances des cellules solaires à base d'arséniure de gallium GaAs

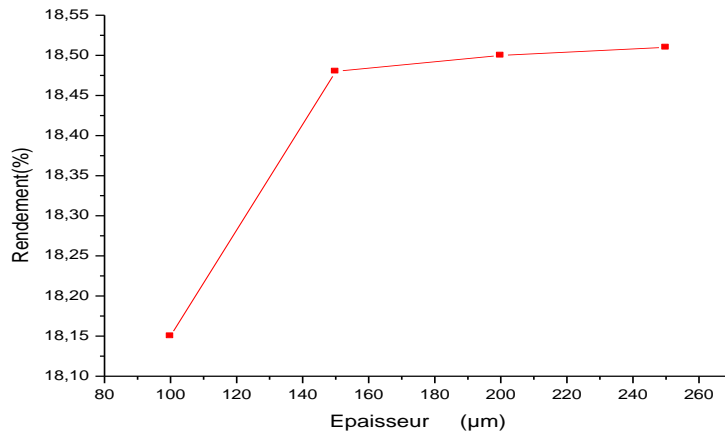


Figure (IV-18) : Variation du rendement de la cellule solaire p/n en GaAs avec la variation de l'épaisseur de la base.

V-5 Effet du dopage de l'émetteur

Les paramètres photovoltaïques des cellules solaires p/n en GaAs pour différentes concentrations de dopage N_D de l'émetteur sont regroupés dans le tableau IV-9. L'épaisseur de la base et son dopage ainsi que l'épaisseur de l'émetteur sont indiqués dans le tableau IV-8. D'après ces résultats, le rendement le plus élevé de 18.25% est obtenu pour un émetteur dopé à une concentration $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Région	Epaisseurs (μm)	Dopage (cm^{-3})
Emetteur	0.6	$10^{16} - 10^{19}$
Base	50	7.10^{19}

Tableau (IV-8)

Dopage de l'émetteur N_d (cm^{-3})	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF(%)	η (%)
10^{16}	750.3	28.05	84.04	17.69
10^{17}	775	27.98	83.91	18.2
10^{18}	778.5	27.91	83.98	18.25
10^{19}	780.3	27.79	83.87	18.18

Tableau (IV-9) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n en GaAs en fonction de la variation de la concentration de dopage de l'émetteur.

V-6 Effet du dopage de la base:

Le tableau IV-11 présente les paramètres électriques des cellules solaires p-GaAs/n-GaAs pour différentes concentrations de dopage N_A de la base. On utilise un émetteur de 0.6 μm et une Base de 50 μm comme indiqué dans le tableau (IV-10). D'après ces résultats, un meilleur rendement estimé à 18.30% est obtenu pour un dopage de la base avec une concentration $N_A = 7 \cdot 10^{17} cm^{-3}$.

Région	Epaisseur (μm)	Dopage cm^{-3}
Emetteur	0.6	$5 \cdot 10^{15}$
Base	50	$7 \cdot 10^{16} - 7 \cdot 10^{19}$

Tableau (IV-10)

Dopage de la base (cm^{-3})	V_{co} (mV)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF(%)	η (%)
7.10^{16}	776	27.92	83.87	18.23
7.10^{17}	783.8	27.92	83.62	18.30
7.10^{18}	783.8	27.80	83.73	18.24
7.10^{19}	783.8	27.72	83.73	18.19

Tableau (VI-11) : Paramètres de sortie de la cellule solaire p/n en GaAs pour différentes concentrations N_A de la base.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) à température ambiante (25°C) en utilisant la simulation numérique qui aboutit à un rendement de 18.2% qui est conforme à celui publié dans la littérature [51].

Nous avons observé une dégradation des caractéristiques J-V des cellules solaires p/n au GaAs et une décroissance de leur tension de circuit ouvert induisant une baisse de leur rendement de conversion lorsque la température augmente au-delà de 25°C .

Selon les résultats de simulation, les paramètres structuraux rendant le rendement optimum sont résumés dans le tableau suivant.

Epaisseur de l'émetteur n-GaAs	Epaisseur de la base p-GaAs	Dopage de l'émetteur N_D	Dopage de la base N_A
0.2 μm	50 μm	10^{18} cm^{-3}	$7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement des cellules solaires GaAs(p)/GaAs(n) à température ambiante (25°) en utilisant la simulation numérique. Le rendement que nous avons obtenu est de 18.2% qui est conforme à celui publié dans la littérature [51].

Sachant que les cellules solaires sont exposées aux rayonnements solaires susceptibles de les chauffer (notamment sous rayonnements de fortes intensités) impliquant une élévation de la température de la cellule au-delà de 25°C, nous avons analysé par simulation les performances photovoltaïques des cellules GaAs pour différentes températures de fonctionnement. Nous avons observé une dégradation des caractéristiques J-V des cellules solaires au GaAs et une décroissance de leur tension de circuit ouvert induisant une baisse de leur rendement de conversion lorsque la température augmente au-delà de 25°C.

Notre étude confirme aussi la possibilité d'améliorer encore le rendement de conversion des cellules solaires à base de GaAs par une optimisation des épaisseurs et dopage des couches (émetteur et base).

Vu les potentialités des cellules solaires en GaAs notamment en termes d'amélioration du rendement, leur développement du point de vue expérimental est une perspective très intéressante.

Bibliographie

- [1] Donald A. Neamen, Mc Graw-Hill, "Semiconductor physics and devices basic principles", Third Edition, 2003
- [2] L. Sellaami « effet de l'irradiation par des particules alpha sur l'arséniure de gallium » université de Sherbrooke. Sherbrooke (Québec), Canada Septembre 1999
- [3] S. Sanchez « Etude des processus optiques non-linéaires cohérents des semi-conducteurs nanostructures en microcavité », thèse de doctorat université de Toulouse .
- [4] S. Lava physique des semiconducteurs III-V, Institut d'Electronique Fondamentale, CNRS (URA 022), Bat. 220., University Paris Sud, F-91405 Orsay Cedex, France.
- [5] Kittel, C Théorie quantique de solide , Dunod (1967)
- [6] Singh, Semiconductor Devices: Basic Principles, John-Wiley, university of Michigan 2001.
- [7] B. Eguer, "Energie solaire photovoltaïque ", vol.1, 1993. Ellipses
- [8] J.M. Romàn, "State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications", Advanced Photovoltaic Cell Design, EN548, 2004.
- [9] <http://thepoussin.free.fr>
- [10] D.B. Jackrel, "INGAAs and GAINNAS (SB) 1064 NM Photodetectors and solar cells on GaAs Substrates", PH.D, Stanford University, December 2005.
- [11] H.C. Casey, B.I. Miller, and Pinkas, "Variation of minority-carrier diffusion length with carrier concentration in GaAs liquid-phase epitaxial layers," J.Appl.Phys.Vol.44,p.1281,1973.
- [12] J.A. Carlin, « Investigation and development of high quality GaAs-ON-Si for space photovoltaïque Using a graded GeSi Buffer, PH.D thesis, the ohio state University, 2001.
- [13] www.pinterest.com
- [14] Benbouza Mohamed Salah « Conception assistée par ordinateur des circuits intégrés MESFET GaAs », Thèse de Doctorat, Université de Batna.
- [15]: Rachid KHLIL « Étude d'un gaz bidimensionnel d'électrons dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs par des mesures courant-tension et bruit basses fréquences en température » Thèse de Doctorat, Université de Reims, (16 mai 2005).
- [16]: M. Gren « solar Cells : operating Principles, Technology, and system application » Chap.1 Prentic-Hall, Englewood Cliffs, NJ , 1-12, 1982
- [17]: Adaika Marwa : « etude par simulation numérique de l'effet des couches sur-dopées côté contacts avant et arrière sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire n / p en silicium », Thèse de Master, 2012, Université Mohammed Khider de Biskra

[18] HONSBURG C., BOWDEN S. Photovoltaics: Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney (Aus) : Univ. of New South Wales, 1998.

[19] Flèche ,D.Delagnes. « production d'énergie :énergie Solaire photovoltaïque » STIELT, Juin 07

[20]P.Bessemoulin,J.Oliviéri, « le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette »,La Météorologie 8^e série , n^o 3,septembre 2000.

[21] www.futura-sciences.com

[22] thèse de doctorat en science .F.BANDOU Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différente technologie .université MOULOUD MAMMERI 2015/2016

[23] N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF.

[24] cour physique des semi conducteurs master 1.

[25]Thèse B-kaghouché .doctorat en science électronique .Université de Constantin1

[26] mémoire de magister Yazid Alli «optimisation des cellules solaires conventionnelles base de silicium de type N » université de Tlemcen

[27] C. A. HOGARTH (éd.) – Materials used in semiconductor devices, Interscience Publishers, New York, 1965

[28] Mémoire de Magister spécialité Energies renouvelables. Optimisation des cellules solaires conventionnelles à base de silicium de type N. université abou bakr belkaid tlemcen

[29] <http://fr.solarpedia.net/>

[30] A-ABAIDIA , A-DAHMAN. Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si:H(n)/c-Si(p). Spécialité : Matériaux électrotechnique. université de Ouargla

[31] Beiser A. Physique Appliquée : Cours et Problèmes. McGrawHill, série Schaum.

[32] H. BELGHITRI et H. ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, université abou-bakr belkaid de tlemcen faculte de sciences 2009.

[33] A. labouret et M. villosz préface de jean louisbal 'Energie solaire photovoltaïque', livre 4 édition,2008. La figure (1.3) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

[34] livre Henry Mathieu et Herve Fanet « physique des semi-conducteurs et des composants électroniques » 6^e édition

[35] Nichiporuk Oleksiy : «simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques a contacts arrières interdigités», Thèse de Doctorat, 2005, Ecole Doctorale : Electronique, Electrotechnique et Automatique . L'institut national des sciences appliquées de Lyon

- [36] Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Septembre 2006, Réalisation de Technique MPPT numérique, par Alain Bilbao Learreta, Université Virgile
- [37] A. T.SINGO ' Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome' Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010
- [38] R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.
- [39] Mémoire de magister en électronique Helali kamelia , Modélisation d'une cellule photovoltaïque, Etude comparative .Université Mouloud Mammeri
- [40] Optimizing the Efficiency of Solar Cells based on GaAs .Sadek Khellaf and Abdelhamid Ounissi <Electronics department, University of Batna, Algeria> :_Etude analytique d'une cellule solaire à hétérojonction p+ (GaAs)/n (Al_xGa_{1-x}As)/N (Al_{0.4}Ga_{0.6}As) H. Ben Slimane et A. Helmaoui .Laboratoire de Physique des Dispositifs à Semi-conducteurs Centre Universitaire de Béchar, B.P. 417, Béchar, Algérie
- [41] J.M.Romàn, "State-of-the-art of III-V Solar Cell Fabrication Technologies, Device Designs and Applications", Advanced Photovoltaic Cell Design, EN548, 2004.
- [42] Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas cout et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V.TH ESE DE DOCTORAT De l'Université Paris-Saclay préparé à L'Université Paris-Sud X' Ecole doctorale n°575 EOBE : Electrical, Optical, Bio -physics and Engineering Spécialité de doctorat: "Génie 'Electrique"
- [44] Demonstration of the spin solar cell and spin photodiode effect (B.Endres, M.Cioga, M.Schmid, M.Utz, D.Bougeard, D.Weiss, G.Bayreuther . & C.H .Back)
- [45] Can quantum coherent solar cells break detailed balance Alexander P. Kirk School of Electrical, Computer and Energy Engineering, Arizona State University, Tempe, Arizona 85287, USA
- [46] BEZZIOU FATMA <Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à homojonction (GaAs) et à hétérojonction (Ga_{0.3}Al_{0.7}As/GaAs) par le logiciel TCAD-SILVACO. thèse Master Université Mohamed Khider Biskra, Faculté des sciences et de la Technologie .Département de Génie Electrique .Filière : Electronique
- [47] S.P. Tobin, S.M. Vernon, S.J. Wojtczuk, C. Bajgar, M.M. Stutlacon, and T.M. Dixon, "advances in high-efficiency. GaAs. Solar cells", Presented at Twenty-first IEEE Photovoltaic Specialist Conference may 1990.
- [48] High Efficiency GaAs-based Solar Cells Simulation and Fabrication by Chaomin Zhang A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. ARIZONA STATE UNIVERSITY May 2014
- [49]-Cellules solaires au GaAlAs/GaAs à faible et fort niveaux de courant. Optimisation détaillée du rendement de conversion J.E. Bourée, F. Therez Submitted on 1 Jan 1980
- [50]: [Alta devices, http://www.lechodusolaire.fr](http://www.lechodusolaire.fr)

[51] :S. Khelifi et A. Belghachi, " Le rôle de la couche fenêtre dans les performances d'une cellule solaire GaAs", Rev. Energ. Ren. Vol.7 (2004) 13 – 21.