

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Khettout Bouchra

Faid Chaima

Intitulé

**ETUDE ET SIMULATION D'UNE CELLULE
SOLAIRE HETEROJONCTION
A BASE DE GaAs**

Soutenu devant le jury composé de:

OUDIRA Houcine	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
TABBAKH Mostefa	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
HARHOUZ Ahlam	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 / 2022

REMERCIEMENTS

« *Au nom d'Allah le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux* »

Nous remercions **Allah**, le tout puissant de nous avoir Pour nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce mémoire. Symbole de notre accomplissement scientifique.

Nous adressons nos sincères remerciements à Monsieur **Tabbakh Mostefa**, notre encadreur, pour ses conseils et ses recommandations tous le long de la rédaction et des recherches de ce manuscrit.

Nous sommes très reconnaissantes aux membres du jury, le professeur Mr. **OUDIRA Houcine**, et Melle. **HARHOUZ Ahlam**, qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail. Nous les remercions pour le temps et l'attention qu'ils ont consacrée à la lecture de notre manuscrit et pour les nombreuses améliorations qu'ils y ont apportées.

Nous plus sincères remerciements à tous nos enseignants de la spécialité micro-électronique chacun par son nom.

Nos vifs remerciements à nos collègues du département d'électronique et plus spécialement ceux de la spécialité **micro-électronique** de l'université de Mohamed Boudiaf de M'sila promotion **2022**.

Pour finir, nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Bouchra & CHAIMA

Dédicace

A mes très chers parents.

A mes frères et sœurs

*A toute Ma famille **Khettout**,*

A tous Mes camarades

A tous ceux que je connais et qui me sont chers

Je dédie ce travail.

KHETTOUT Bouchra

Dédicace

A mes très chers parents.

A mes frères et sœurs

*A toute Ma famille **Faid**,*

A tous Mes camarades

A tous ceux que je connais et qui me sont chers

Je dédie ce travail.

FAID Chaima

Dédicace

A mes très chers parents.

A mes frères et sœurs

*A toute Ma famille **Khattout**,*

A tous Mes camarades

A tous ceux que je connais et qui me sont chers

Je dédie ce travail.

KHATIOUT Bouchra

Dédicace

A mes très chers parents.

A mes frères et sœurs

*A toute Ma famille **Faid**,*

A tous Mes camarades

A tous ceux que je connais et qui me sont chers

Je dédie ce travail.

FAID Chaima

RESUME

Les cellules solaires à base de GaAs jouent un rôle primordial dans l'application spatiale et terrestre à concentration, dans ce travail notre but est de déterminer l'influence de certains paramètres de ces cellules (épaisseur et concentration du dopage) sur les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert , Courant de court-circuit, Facteur de forme et le rendement de conversion par simulation numérique on utilisant logiciel de simulation des cellules solaires SCAPS

Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure GaAs/ZnO/ZnO:Al pour une épaisseur de 2200nm et un dopage ND de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche tampon et épaisseur de 5000nm et un dopage NA de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche absorbante.

Mots clés : photovoltaïque, cellule solaire, GaAs, hétérojonction, SCAPS.

ملخص

تلعب الخلايا الشمسية القائمة على GaAs دورًا رئيسيًا في تطبيقات الفضاء والأرض المركزة ، في هذا العمل هدفنا هو تحديد تأثير معاملات معينة- لهذه الخلايا (سمك وتركيز المنشطات) على الأداء الكهروضوئي: جهد الدائرة المفتوحة ، قصير تيار الدائرة وعامل الشكل وكفاءة التحويل عن طريق المحاكاة العددية باستخدام برنامج SCAPS سمحت لنا هذه الدراسة بتحسين الكفاءة الكهربائية للهيكل GaAs / ZnO / ZnO: Al لسمك 2200 nm و ND doping $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ للطبقة العازلة وسماعة 5000 nm و NA doping $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ للطبقة الماصة.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية ، الخلايا الشمسية ، حمض الغاليوم ، متعدد ، SPSCA

ABSTRACT

GaAs-based solar cells play a key role in concentrated space and terrestrial applications; in this work our goal is to determine the influence of certain parameters of these cells (thickness and concentration of doping) on photovoltaic performance: Open circuit voltage, short circuit current, form factor and conversion efficiency by numerical simulation using SCAPS software

This study allowed us to optimize the electrical efficiency of the structure GaAs/ZnO/ZnO:Al for a thickness of 2200nm and an ND doping of $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ for the buffer layer and a thickness of 5000nm and an NA doping of $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ for the absorbing layer.

Keywords: photovoltaic, solar cell, GaAs, single junction, SCAPS.

Liste des symboles :

GaAs : l'arséniure de Galium.

EPIA : L'Association Européenne de l'Industrie Photovoltaïque.

AM : La masse d'air.

a-Si : silicium amorphe.

CdTe : tellure de cadmium.

CIGS : arséniure de cuivre-indium-gallium

ZnO : l'Oxide de Zinc

HgS : le Sulfite de Mercure

E_g : la bande interdite

PV : photovoltaïque

I_{ph} : Le photo-courant (A).

RS : Résistance série (Ω).

I-V : courant-tension

Voc : la tension en circuit ouvert

ISC : Courant de court-circuit

FF : Facteur de forme

η : Rendement de conversion (%)

P_m : Puissance maximale délivrée par une cellule solaire ($mW.cm^{-2}$).

P_i : la puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

EQE : efficacité quantique externe

λ : la longueur du faisceau incident (en nm)

h : Constante de Planck

q : Charge de l'électron (cb)

BSF : Le champ électrique à surface arrière

OMVPE : épitaxie organométallique en phase vapeur

α : Coefficient d'absorption (cm^{-1})

El: l'énergie de liaison de l'exciton

m_r : la masse réduite du système

m_0 : la masse de l'électron libre

ϵ_0 : la permittivité Absolue du matériau

R_y : l'énergie d'ionisation de l'état s de l'atome d'hydrogène

SCAPS : Solar Cell Capacitance Simulator

ELIS : Systèmes Electroniques et Informatiques

DC : Courant Continu (Direct Current)

AC : Courant alternative

ND : Concentration des atomes donneurs (cm^{-3})

NA : Concentration des atomes accepteurs (cm^{-3})

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Principales caractéristiques des cellules solaires.	10
Tableau II.1 : Alliage de quelques matériaux III-V et II-VI.	18
Tableau II.2 : Énergie de gap de quelque matériau.	21
Tableau III.1 : Indice de réfraction de quelques matériaux.	33
Tableau III.2 : caractéristiques du GaAs.	37
Tableau IV.1 : Propriétés des couches p-GaAs, n-ZnO et le ZnO: Al.	48

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Mécanisme d'absorption d'un photon dans un semi-conducteur : $h\nu > E_g$.	5
Figure I.2 : Génération et mouvement des porteurs libres dans une cellule solaire à jonction PN .	5
Figure I.3 : Répartition mondiale de l'énergie solaire 2008.	6
Figure I.4 : Les meilleurs rendements des cellules de recherche de 1975 à 2014.	6
Figure I.5 : Croissance annuelle du marché mondial du photovoltaïque (Gigawatts).	7
Figure I.6 : Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre.	8
Figure I.7 : the radiation spectrum for AM0 and AM1.5G.	9
Figure I.8 : La structure d'une cellule à simple jonction.	11
Figure I.9 : La structure d'une cellule tandem (double jonction).	12
Figure I.10 : La structure d'une cellule triple jonction avec un diagramme des bandes d'énergie équivalent.	13
Figure II.1 : Classification des matériaux par leur conductivité	17

Figure II.2: Tableau périodique partielle	18
Figure II.3 : Modèle de bande.	19
Figure II.4 : La structure atomique d'un silicium.	20
Figure II.5 : Diagramme de bande d'énergie pour.	21
Figure II.6 : Structure d'une jonction PN (à gauche), son diagramme de bandes (à droite).	22
Figure II.7: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.	23
Figure II.8: caractéristique I (V) d'une cellule solaire à AM1.5.	24
Figure II.9: courbe caractéristique courant-tension I-V d'une cellule solaire en en courant de court-circuit.	25
Figure III.1 : Composition d'une cellule photovoltaïque.	30
Figure III.2: couche antireflet d'une cellule photovoltaïque.	32
Figure III.3 : Coefficient d'absorption du c-Si, a-Si et du GaAs.	34
Figure III.4 : structure conventionnel d'une cellule solaire GaAs.	34
Figure III.5: Structure cristalline du GaAs.	36
Figure III.6 : Structure de bande de GaAs.	36
Figure III.7: Structure de bande schématique d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect.	37
Figure III.8 : Représentation simplifiée des niveaux énergétiques des excitons.	38
Figure III.9 : structure de la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n).	39
Figure III.10 : Structure de la cellule solaire GaAs(p) /GaAs(n) avec fenêtre AlGaAs(p).	39
Figure IV.1 : Panneau de démarrage de SCAPS.	44
Figure IV.2 : panneau pour la construction de la cellule solaire.	45

Figure IV.3 : Panneau pour remplir les paramètres des différentes couches de la cellule solaire.	45
Figure IV.4 : Panneau permettant de déclarer le coefficient d'absorption.	46
Figure IV.5 : Structure de la cellule solaire à base de GaAs étudié sur SCAPS.	47
Figure IV.6 : Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur : a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (V_{oc}), et d- le courant de court-circuit (J_{sc}) de la cellule GaAs/ZnO/ZnO: Al.	49
Figure IV.7 : Influence de la variation de la densité de dopage de la couche absorbante sur les performances : a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (V_{oc}), et d- le courant de court-circuit (J_{sc}) de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al.	50
Figure IV.8 : Influence de la variation de l'épaisseur de la couche tampon sur les performances de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al : a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (V_{oc}), et d- le courant de court-circuit (J_{sc}).	51
Figure IV.9 : Influence de la variation de la densité de dopage de la couche tompon sur les performances : a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (V_{oc}), et d- le courant de court-circuit (J_{sc}) de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al.	53

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL	1
BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE	
I.1.INTRODUCTION	4
I.2.PRINCIPE DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE	4
I.3.L'ENERGIE SOLAIRE	6
I.4.RADIATION SOLAIRE	7
I.5.LES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	9
I.5.1.CELLULES SOLAIRES DE PREMIERE GENERATION	10
I.5.2.CELLULES SOLAIRES DE DEUXIEME GENERATION	11
I.5.3. CELLULES SOLAIRES DE TROISIEME GENERATION	11
I.6.LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :	11
I.6.1.LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A SIMPLE JONCTION	11
I.6.2.LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A DOUBLE JONCTION OU TANDEM	12
I.6.3.LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE TRIPLE ET MULTI JONCTION	12
I.6.4.LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES EN COUCHES MINCES A BASE DES COMPOSES BINAIRES	13
I.7.CONCLUSION	14
BIBLIOGRAPHIE	15

CHAPITRE II : LES SEMI-CONDUCTEURS.

II.1.INTRODUCTION	17
II.2.CLASSIFICATION DES MATERIAUX	17
II.3.LA STRUCTURE ATOMIQUE D'UN SEMI-CONDUCTEUR	19
II.3.1.LA BANDE D'ENERGIE	20
II.3.2.JONCTION PN	22
II.4. CIRCUIT ELECTRIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE REELE	23
II.5. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE	24
II.5.1. COURANT DE COURT-CIRCUIT I_{SC}	25
II.5.2. TENSION DE CIRCUIT OUVERT V_{OC}	26
II.5.3.FACTEUR DE FORME FF	26
II.5.4.RENDEMENT DE CONVERSION η	27
II.5.5. EFFICACITE QUANTIQUE	27
II.6.CONCLUSION	27
BIBLIOGRAPHIE	28

CHAPITRE III : CELLULE SOLAIRE A BASE DE GaAs.

III.1.INTRODUCTION	30
III.2.ARCHITECTURE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	30
III.3.CELLULE SOLAIRE A BASE DE GaAs	33
III.4.L'ARSENIC DE GALLIUM (GaAs)	34
III.5. LES PROPRIETES DES GaAs	35

III.5.1.STRUCTURE CRISTALLINE:	35
III.5.2.STRUCTURE DE BANDE D'ENERGIE DE GaAs	36
III.5.3.PROPRIETES ELECTRIQUES ET PHYSIQUES DU GaAs	37
III.5.4.PROPRIETES OPTIQUES (ABSORPTION) DU GaAs	38
III.5.5.STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE HOMOJONCTION GaAs	39
III.6.LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES SOLAIRES EN GaAs	39
III.6.1. LES CELLULES SIMPLES	39
III.6.2.LES CELLULES MULTI-JONCTION (TANDEM)	40
III.7. CONCLUSION	40
BIBLIOGRAPHIE	41

CHAPITRE IV : RESULTAT ET DISCUSSION

IV.1.INTRODUCTION	42
IV.2.SIMULATEUR SCAPS	42
IV.3.NOTIONS DE BASE DU LOGICIEL SCAPS	42
IV.3.1.DEFINIR LA STRUCTURE D'UNE CELLULE	44
IV.3.2.LE COEFFICIENT D'ABSORPTION	46
IV.4.STRUCTURE DE LA CELLULE GAAS	47
IV.5.ETUDE DE LA CELLULE SOLAIRE A BASE DE GaAs	48
IV.5.1. EFFET DE L'EPAISSEUR DE LA COUCHE ABSORBANTE	48
IV.5. 2. EFFET DE LA DENSITE DE DOPAGE NA DE LA COUCHE ABSORBANTE	50
IV.5.3. EFFET DE L'EPAISSEUR DE LA COUCHE TAMPON	51

IV.5.4. EFFET DE LA DENSITE DE DOPAGE NA DE LA COUCHE TAMPON	52
IV.6.CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE	54
CONCLUSION GENERALE	55

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine de l'énergie photovoltaïque est l'un des meilleures options pour répondre aux besoins croissants du monde en énergie propre et durable. Cette technologie est basée sur la conversion de l'irradiation solaire en énergie électrique par l'intermédiaire des matériaux semi-conducteurs. Cet effet photovoltaïque a été observé pour la première fois par Alexandre-Edmund Becquerel en 1839. La planification stratégique majeure de la technologie photovoltaïque est basée sur le choix des matériaux et essentiellement le choix sur la base de leurs propriétés physiques et chimiques pour un maximum de rendement de conversion. En effet, le silicium (Si) et l'arsénique de gallium (GaAs) répondent largement aux exigences et sont considérés comme des matériaux idéaux pour les cellules solaires [1, 2].

Longuement, l'industrie photovoltaïque a utilisé le silicium cristallin dans une large gamme dans les cellules à simple jonction P-N. Le silicium est un semi-conducteur non toxique, très abondant sur terre et assure la stabilité des cellules et des modules à long terme. En revanche, d'autres importants critères jouent également un grand rôle non seulement le rendement de conversion mais aussi les aspects économiques et écologiques. En outre, cette technologie de silicium est très coûteuse due au taux élevé de cristallinité et de la matière première requise (plus de 100 μm d'épaisseur), ceci est directement relié aux limites de cet élément, à savoir un coefficient d'absorption faible, un gap indirect qui nécessite un phonon pour assurer la transition inter-bandes [1, 2].

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 % pour de cellule solaires à base d'arsenic de gallium, sous la condition d'éclairement d'un soleil. Et leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [3, 4].

Les cellules solaires à base de GaAs sont au centre des efforts de développement considérable en raison de leur efficacité de conversion élevée et le potentiel d'amélioration dans la performance. Les cellules solaires à base de GaAs ont la plus grande efficacité mesurée (~ 25.7 % au spectre AM1.5) de n'importe quel dispositif photovoltaïque à seule jonction. Les cellules solaires à base de GaAs ont atteint des rendements élevés, en partie parce que le gap d'énergie de GaAs est proche de la valeur idéale de 1.5 eV qui en résulte dans une efficacité maximale de conversion photovoltaïque en utilisant une cellule solaire à seule jonction. D'autres augmentations d'efficacité sont possibles en utilisant des jonctions superposées (tandem, triple, quadruple) et / ou un éclairage concentré.

INTRODUCTION GENERALE

Les performances de la cellule peuvent être améliorées par l'optimisation des paramètres physiques internes pour assurer un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension au circuit ouvert élevés. L'amélioration du rendement des cellules photovoltaïques exige l'amélioration des procédures (mécanismes) de production des cellules et en particulier le bon choix des matériaux et de la structure de la cellule. Une réponse essentielle pour limiter les pertes et améliorer le rendement des cellules photovoltaïques est connu du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants (hétérojonctions) [5].

L'objectif principal de ce travail de recherche est de modéliser et d'optimiser (par simulation) une cellule solaire à base des matériaux hétérojonction CdS/GaAs afin de minimiser l'épaisseur et donc d'améliorer la performance pour avoir un bon compromis entre le cout et la structure. Pour cela, notre mémoire est divisé en quatre parties. Nous allons décrire dans ce qui suit le contenu des quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur l'énergie solaire et les différents phénomènes en relation avec le photovoltaïque. Un aperçu sur les différentes générations des cellules solaires est décrit.

Le second chapitre, met en évidence les semi-conducteurs, la classification des matériaux, et les notions de physiques relatifs à la compréhension d'un matériau semi-conducteur. La fin du chapitre est consacrée aux caractéristiques électriques des cellules solaires.

Le troisième chapitre, consacré à la description des cellules solaires à base de GaAs, leur structure, les différentes propriétés d'un matériau GaAs, et les différentes type de cellules.

Le quatrième et dernier chapitre décrit le logiciel de simulation 1D SCAPS et la structure CdS/GaAs étudiée: Une description détaillée des conditions et des différentes structures des cellules étudiées et les résultats essentiels aboutis de cette étude.

INTRODUCTION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE DE L'INTRODUCTION GENERALE

- [1] GHEZALI Nawel, KEBAILI Soraya, ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS TERNAIRES, Master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj, 2019.
- [2] ABDERREZEK MAHFOUD, Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, Doctorat en Sciences, UNIVERSITE SETIF -1, 2015
- [3] Hfayed Massika, Simulation numérique d'une Cellule solaire (p/n) en GaAs, Master, Université Med Khider, Biskra.2014.
- [4] BALI AMINA, Etude comparative entre les cellules solaire de type p+-AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs, Master, UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER-BISKRA, 2013.
- [5] CHETTOUH Salah, HATOUT Salah, Etude du rendement de cellule solaire hétérojonction à base InGaP/GaAs par simulation, Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2019.

CHAPITRE

I

I.1. INTRODUCTION

Le mot "photovoltaïque" indique immédiatement le lien entre la lumière et l'électricité. La principale propriété d'un matériau photovoltaïque est de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique. Cette conversion a lieu en raison de l'effet photovoltaïque - un phénomène physique dans un semi-conducteur.

Afin de comprendre le processus de conversion énergétique solaire, nous devons auparavant donner des définitions générales en relation avec le photovoltaïque. Dans ce chapitre nous allons étudier ses généralités. Expliquer le processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électriques, ensuite définir les termes relatifs à l'énergie solaire et pour finir donner un aperçu sur les différentes générations des cellules solaires et leurs principes.

I.2. PRINCIPE DE LA CONVERSION DE L'ENERGIE SOLAIRE

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique repose sur le principe de l'effet photovoltaïque. Lorsque des matériaux semi-conducteurs sont exposés à la lumière, certains des photons du rayon lumineux sont absorbés par le cristal semi-conducteur, ce qui provoque un nombre important d'électrons libres dans le cristal. C'est la raison fondamentale de la production d'électricité par effet photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est l'unité de base du système où l'effet photovoltaïque est utilisé pour produire de l'électricité à partir de l'énergie lumineuse. Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus largement utilisé pour construire la cellule photovoltaïque. L'atome de silicium a quatre électrons de valence. Dans un cristal solide, chaque atome de silicium partage chacun de ses quatre électrons de valence avec un autre atome de silicium le plus proche, créant ainsi des liaisons covalentes entre eux. De cette manière, le cristal de silicium obtient une structure de réseau tétraédrique. Alors que les rayons lumineux frappent n'importe quel matériau, une partie de la lumière est réfléchi, une partie est transmise à travers les matériaux et le reste est absorbé par les matériaux [1, 2].

La même chose se produit lorsque la lumière éclaire la surface du silicium. Si l'intensité de la lumière incidente est suffisamment élevée, un nombre suffisant de photons sont absorbés par le semi-conducteur et ces photons, à leur tour, excitent certains des électrons des liaisons covalentes. Ces électrons excités reçoivent alors suffisamment d'énergie pour migrer de la bande de valence vers la bande de conduction. Lorsque l'énergie du photon $h\nu$ est supérieure à la largeur de bande interdite E_g du matériau semi-conducteur, le photon absorbé transfère son énergie à un électron dans la bande de valence qui est promu dans la bande de conduction, tel que représenté sur la figure I.1 L'électron excité laisse un état inoccupé dans la bande de valence. Cet état est modélisé par un

trou, une particule fictive porteuse d'une charge positive : l'absorption du photon génère une paire électron-trou [2, 3].

Comme le niveau d'énergie de ces électrons se situe dans la bande de conduction, ils partent de la liaison covalente en laissant un trou dans la liaison derrière chaque électron retiré. Ceux-ci sont appelés électrons libres et se déplacent de manière aléatoire à l'intérieur de la structure cristalline du silicium. Ces électrons libres et ces trous ont un rôle vital dans la création d'électricité dans la cellule photovoltaïque. Ces électrons et trous sont donc appelés respectivement électrons et trous générés par la lumière. Ces électrons et ces trous générés par la lumière ne peuvent pas produire d'électricité dans le cristal de silicium seul. Il devrait y avoir un mécanisme supplémentaire pour le faire, c'est l'objectif d'une jonction p-n [1 – 3].

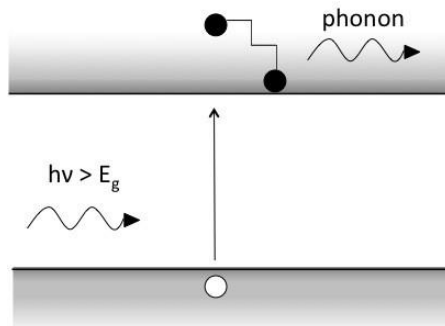


Figure I.1 : Mécanisme d'absorption d'un photon dans un semi-conducteur : $h\nu > E_g$ [3].

Le noyau d'une cellule solaire est la jonction p-n semi-conductrice. Une fois la lumière du soleil absorbée, une paire électron-trou est créée et séparée par la jonction produisant un flux de courant et une tension aux bornes des contacts. Les contacts métalliques sur les bords de la jonction p-n permettent la dissipation de puissance lorsqu'une charge est directement connectée. La figure I.2 présente le mouvement des porteurs libres dans une cellule solaire à base d'une jonction PN [3, 4].

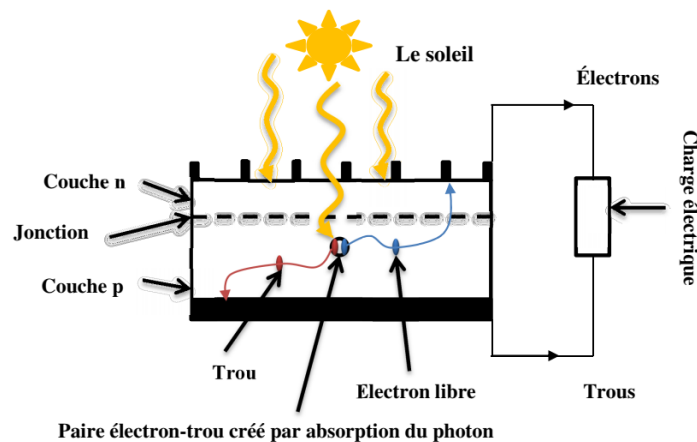


Figure I.2 : Génération et mouvement des porteurs libres dans une cellule solaire à jonction PN [4].

I.3. L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire, est disponible dans la plupart des régions du monde, comme le montre Figure I.3. Elle est gratuite et pratiquement illimitée, ce qui en fait une source idéal d'énergie. La puissance de la lumière solaire qui atteint la surface de la terre en un an est plus de 10000 fois les besoins énergétiques annuels du monde. La figure I.3 démontre les efforts des scientifiques dans le monde au cours des 40 dernières années, il y a de nombreux recherche sur les technologies solaires, y compris les couches minces, les cellules de jonction, cellules organiques, cellules à puits quantiques, cellules sensibilisées aux colorants et également de nouveaux types de des matériaux ou des technologies émergent chaque année.

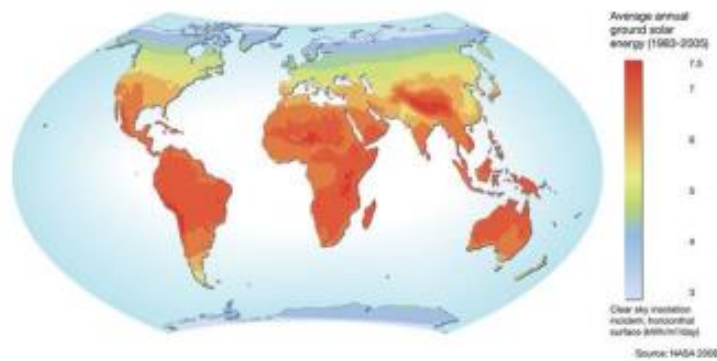


Figure I.3: Répartition mondiale de l'énergie solaire 2008 [5].

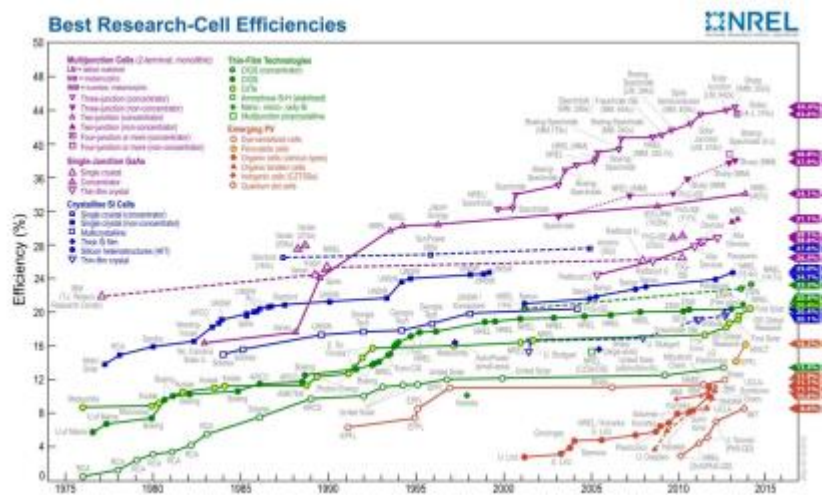


Figure I.4: Les meilleurs rendements des cellules de recherche de 1975 à 2014.

Le développement des cellules solaires GaAs à jonction unique a été rapide au cours des 10 dernières années pour atteindre un rendement de 28,8 %. Les cellules solaires à base de GaAs sont

très efficaces, cependant, trop chers pour des applications de grandes consommations, en raison du coût élevé de fabrication et la disponibilité des matériaux rares (In, Ga) [5].

Afin d'améliorer l'efficacité il est impératif de réduire le coût de fabrication. Pour cela la filière de couche mince est une solution très envisageable permettant de réduire l'utilisation de matériaux. Le matériau GaAs possède une bande interdite directe et un coefficient d'absorption idéal, pour son intégration dans la fabrication des cellules solaires à couches minces [5]

L'Association Européenne de l'Industrie Photovoltaïque (EPIA), prévoit que la puissance installée sera de 1800GW pour 2030, avec une production représentant 14 % de la consommation mondiale d'électricité, elle prévoit que le photovoltaïque permettra d'alimenter plus de 4,5 milliards d'habitat. La majeure partie (3,2 milliards) concernera les populations dans les pays en développement où le photovoltaïque constitue un mode de plus en plus économique de production d'électricité dans les zones éloignées des réseaux [6].

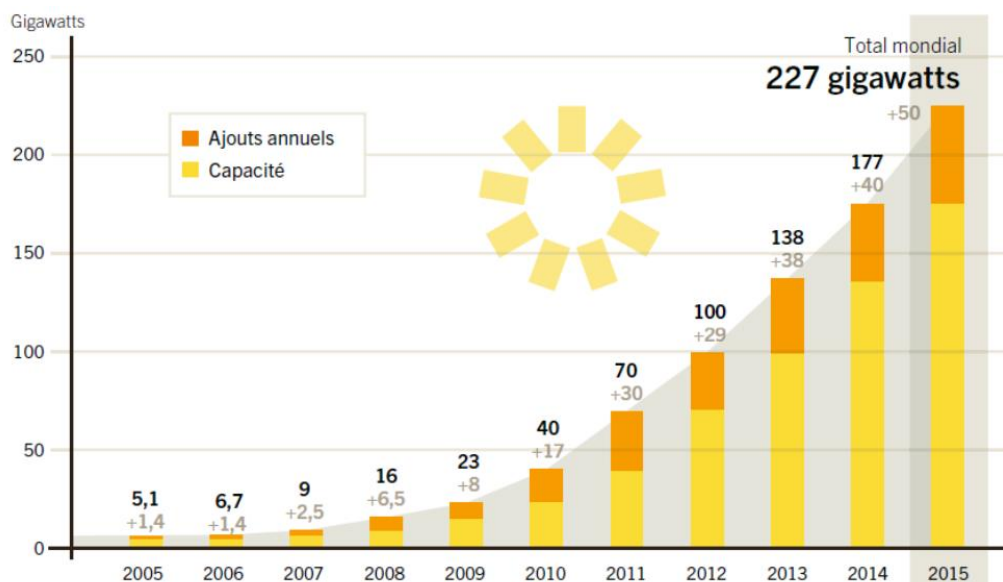


Figure I.5 : Croissance annuelle du marché mondial du photovoltaïque (Gigawatts) [6].

I.4. RADIATION SOLAIRE :

Le rayonnement solaire est comparable à celui d'un corps noir à 5800 °K. La lumière du soleil traverse l'atmosphère, mais les processus de diffusion et d'absorption l'atténuent. Le spectre irradiants solaire couvre une large gamme d'énergies (ou longueurs d'onde).

La masse d'air (AM) est la longueur du trajet parcouru par la lumière dans l'atmosphère et est utile pour quantifier la réduction de la puissance de la lumière lorsqu'elle est absorbée par l'atmosphère. Pour tenir compte de la longueur effective parcourue à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct, on introduit la notion de masse d'air (AM x)

(Figure I.6). Elle correspond à la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. La masse d'air est exprimée comme un multiple du parcours traversé en un point au niveau de la mer, le soleil étant au zénith [7].

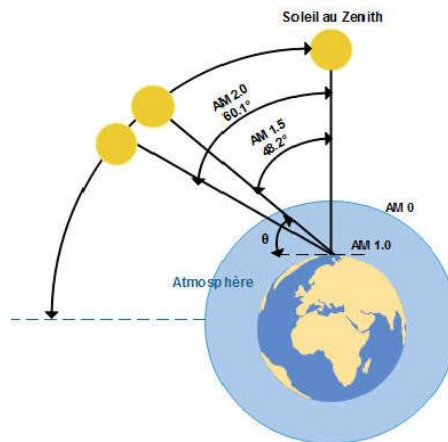


Figure I.6: Schéma descriptif de l'incidence solaire sur la terre.

En chaque point, la valeur de la masse d'air est donnée par l'équation I-1 :

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta}$$

Où l'angle θ est l'élévation solaire, l'angle exprime en radian, entre le rayonnement solaire et le plan horizontal. Le spectre solaire AM0 est la distribution spectrale et l'intensité de la lumière solaire en dehors de l'atmosphère terrestre. Pour un ciel clair, le soleil sera au Zénith, on obtient un rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Le rayonnement solaire arrivant sur la terre avec une inclinaison d'un angle de 48° est de 1000 W/m^2 (soit 100 mW/cm^2) avec une masse d'air AM 1.5. De la Figure I.1, on peut déduire que l'éclairement est maximal entre 450 et 700 nm, Le spectre solaire AM 1.5 se compose de 3 à 4 % de lumière ultraviolette ($\lambda < 390 \text{ nm}$), de 45 % de lumière visible ($390 < \lambda < 750 \text{ nm}$), de 52 % de lumière infrarouge qui se divise en deux sous-gammes (IR Proche ($750 < \lambda < 1400 \text{ nm}$) = 38 %) et (IR Lointain ($\lambda > 1400 \text{ nm}$) = 14%) [7, 8].

L'efficacité des cellules solaires est sensible à la fois à l'intensité et au spectre de l'incident léger. Pour prédire les performances des cellules solaires dans l'espace, la distribution spectrale de la lumière du soleil qui est utilisée juste au-dessus de l'atmosphère terrestre et qui est appelée rayonnement AM0 spectre dont l'intensité de rayonnement est d'environ $1,353 \text{ kW/m}^2$. Le spectre standard à la surface de la Terre est généralement appelé AM1.5G qui comprend les rayonnements diffus et l'intensité de rayonnement du spectre standard AM1.5G est normalisée à 1 kW/m^2 [8].

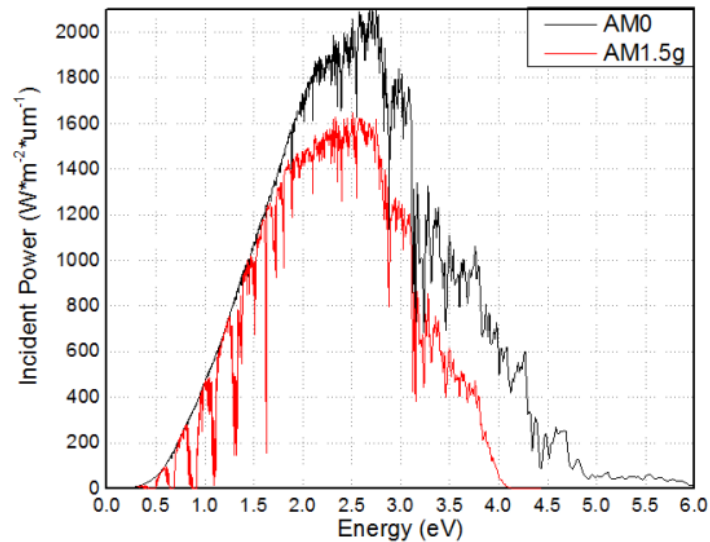


Figure I.7: the radiation spectrum for AM0 and AM1.5G [8].

Il y a quatre types de rayonnement:

Rayonnement direct : C'est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

Rayonnement diffus : C'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyromètre avec écran masquant le soleil.

Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol : Le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

Rayonnement global : La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un polarimètre sans écran [9].

I.5.LES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :

Le principe de fonctionnement décrit précédemment peut être appliqué pour des cellules solaires photovoltaïques à semi-conducteur très variées et généralement classées en trois catégories : première, seconde et troisième génération. On résume les principales caractéristiques de ces générations dans le tableau suivant [10, 11, 12, 13]:

	Première génération	Deuxième génération	Troisième génération
Particularités	Technologie mature	<ul style="list-style-type: none"> • Couches minces • Matériaux très absorbants • Possibilité de fabriquer des modules flexible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nouveaux concepts Cellules solaires avec des rendements visés supérieurs au rendement de Shockley-Queisser ou dans le but de diminuer le coût de fabrication
Matériaux utilisés	c-Si, Silicium multi cristallin massifs, hétérojonction avec c-Si massif/a-Si	<ul style="list-style-type: none"> • CdTe, CIS, CIGS, CZTS, a-Si, • matériaux organiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux semi-conducteurs III-V, couches minces, matériaux nanostructures...
Epaisseur typique	~ 200 μm	<ul style="list-style-type: none"> • < 10 μm 	<ul style="list-style-type: none"> • Large gamme d'épaisseur • Pour les ETA : < 150 nm
Efficacité record des cellules photovoltaïques	25 % [NREL14]	<ul style="list-style-type: none"> • 23 % [NREL14] 	<ul style="list-style-type: none"> • Multijonction : 46 % [Green15] • Nanofils : 13,8 % [Wallentin13]

Tableau I.1 : Principales caractéristiques des cellules solaires.

I.5.1. Cellules solaires de première génération :

Les cellules solaires traditionnelles en Si monocristallin, GaAs, Si polycristallin, etc. entrent dans cette catégorie. Plus de 80% des panneaux solaires installés aujourd'hui sont de première génération. Les énormes fluctuations du coût des matières premières et l'efficacité de la cellule approchant sa limite maximale théorique, comme indiqué par Shockley et al. [12, 13], ont poussé les chercheurs d'aujourd'hui à se concentrer sur les deux autres générations.

I.5.2. Cellules solaires de deuxième génération :

Les coûts de production élevés des cellules solaires de première génération ont poussé les chercheurs à se concentrer sur les cellules solaires de deuxième génération. Ces cellules de deuxième génération utilisent des matériaux photovoltaïques faciles à cultiver et moins purs. a-Si (silicium amorphe), CdTe (tellure de cadmium), CIGS (arséniure de cuivre-indium-gallium) en font partie.

I.5.3. Cellules solaires de troisième génération :

Les cellules solaires capables d'atteindre une efficacité supérieure à la limite d'efficacité de Shockley-Queisser sont classées dans la catégorie des cellules solaires de troisième génération. Les points quantiques, les cellules tandem à jonctions multiples, le solaire thermique, les cellules solaires à synthèse de colorant, les technologies photovoltaïques organiques, etc. peuvent être classées dans la troisième génération. La plupart des technologies de cellules solaires de troisième génération ne sont pas encore commercialement viables. Mais des recherches approfondies peuvent entraîner une augmentation substantielle de l'efficacité et une baisse des coûts de production [13].

I.6. LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES :

I.6.1. La cellule photovoltaïque à simple jonction :

La cellule au silicium amorphe dite à simple jonction délivre le rendement le plus faible parmi les technologies au silicium amorphe, de 5 à 9%, mais aussi les prix le plus intéressants, de l'ordre de 1EUR/W. Par ailleurs, elle constitue l'assemblage le plus simple qui soit capable de donner un matériau photovoltaïque : l'empilement d'une couche ultrafine ($0,008\mu\text{m}$) dopée positivement (P), d'une couche non dopée ou couche intrinsèque (i) ($0,5$ à $1\mu\text{m}$) et d'une couche dopée négativement (n) ($0,02\mu\text{m}$). Par conséquent, l'empilement s'appelle jonction p-i-n (Figure I.8). Ce type de module est fabriqué par la plupart des constructeurs de la filière amorphe.

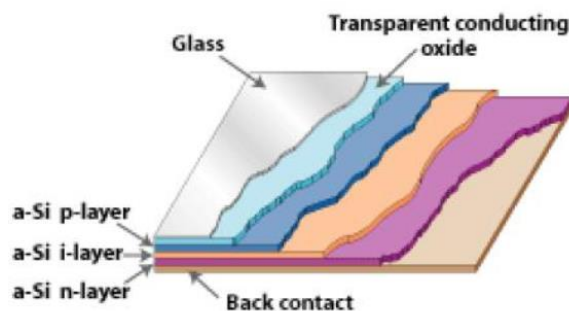


Figure I.8 : La structure d'une cellule à simple jonction.

I.6.2. La cellule photovoltaïque à double jonction ou Tandem :

Il existe plusieurs types de cellule à double jonction, appelées aussi cellule tandem, elles ont un rendement meilleur que les jonctions simples, pouvant aller jusqu'à 10, voire 12%. Pour le prix, il n'y a presque pas de différence avec la technologie simple jonction. Ainsi, les panneaux doubles jonctions les moins chères coûteront environ 1EUR/W. Le principe de base ici est la combinaison des propriétés optiques de deux semi-conducteurs différents. Un exemple courant est l'assemblage silicium cristallin sur silicium amorphe. La bande cristalline va absorber la lumière la plus intense, mais laissera passer le rayonnement diffus. Celui-ci sera récupéré par la deuxième couche qui, elle est adaptée à ce type de rayonnement.

Le terme tandem pourra également désigner des triples assemblages, ou d'autres types de double jonction. L'idée reste toutefois la même : conjuguer les propriétés de différents types de semi-conducteurs dans le but de capter au final, plus de lumière (Le but est d'augmenter l'absorption de la lumière en faisant des jonctions multiples avec des matériaux à gap décroissant qui vont chacun absorber une partie du spectre solaire) (Figure I.9). Au même titre que pour la filière simple jonction, ces modules sont fabriqués par la plupart des constructeurs du secteur touchant au silicium couches minces.

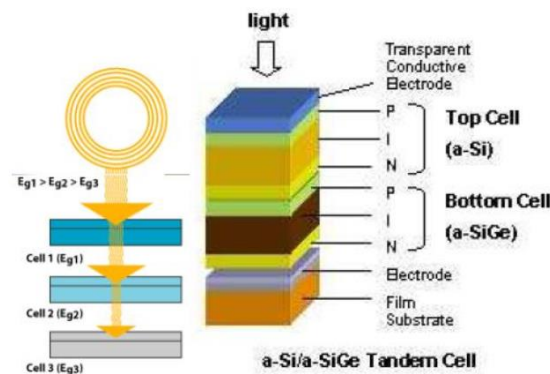


Figure I.9 : La structure d'une cellule tandem (double jonction).

I.6.3. La cellule photovoltaïque triple ET multi jonction :

La triple ou multi jonction (plus de trois couches), obéit au même principe que les modules photovoltaïques tandem : différents alliages semi-conducteurs sont assemblés pour capter un plus large spectre lumineux. Le rendement en est amélioré : variant de 6 à 13%. Mais le prix aussi est plus élevé, entre 2 et 3 EUR/W environ en 2009. Le prix du laminé triple jonction dépend fortement du degré d'imperméabilité. Ainsi, le coût du module varie beaucoup en fonction de l'étanchéité choisie par le client.

Le record de performance de 13% stabilisés est détenu par Unisolar qui développe la technologie depuis 1990. Le constructeur américain propose des modèles constitués de trois alliages en couches minces : une première tranche de silicium amorphe est couplée avec deux couches de silicium –germanium à teneur d’hydrogène variable. L’effet obtenu est tel que la première bande captera plus de lumière bleue, la seconde aura l’avantage d’influence dans le vert et enfin, la dernière couche absorbera la lumière rouge (Figure). Cette disposition des couches par couleur permet à la technologie triple jonction de produire autant d’électricité que les panneaux cristallins, malgré le fait que ces derniers ont un bien meilleur rendement.

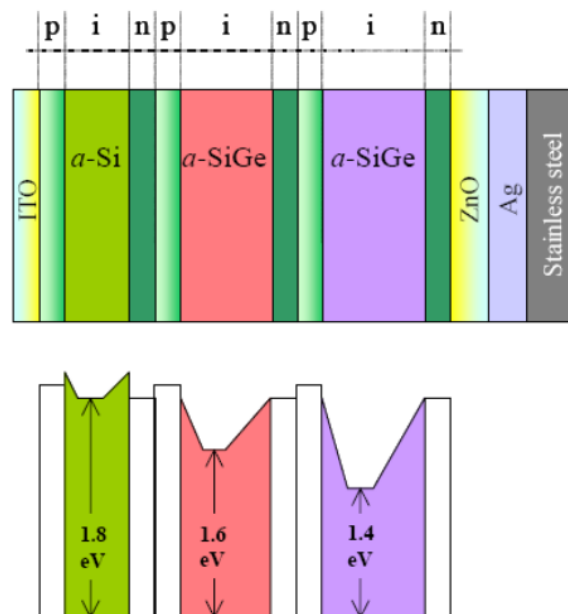


Figure I.10 : La structure d’une cellule triple jonction avec un diagramme des bandes d’énergie équivalent.

I.6.4. Les cellules photovoltaïques en couches minces à base des composés binaires :

Parmi tous les composés binaires possibles, tous n'ont pas le même intérêt potentiel. L'étude de leurs propriétés, et en particulier de la structure de bandes montre que les éléments les plus légers donnent des composés dont laquelle la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée.

Les composés contenant du Bore, de l'aluminium ou de l'azote entrent dans cette catégorie ; ils sont en général peu d'intérêt pour l'électronique rapide, qui demande des semi-conducteurs à forte mobilité de porteurs comme l'optoélectronique où une structure de bande directe est nécessaire pour que les transitions optiques soient efficaces. A l'autre extrémité, les éléments lourds comme le

thallium ou le bismuth donnent des composés à base de Galium (GaAs, GaSb) ou d'indium (InP, InAs, InSb) dont les propriétés sont les plus intéressantes.

Un semi-conducteur III-V est un semi-conducteur composite fabriqué à partir d'un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique des éléments (bore, aluminium, gallium, indium,...) et d'un ou plusieurs éléments de la colonne V ou pnicogènes (azote, phosphore, arsenic, antimoine,...), ces matériaux sont utilisés principalement dans les cellules photovoltaïques dont l'AIN, le GaN et InN possèdent respectivement des énergies de bande interdites de 6,2 Ev, 3,4 Ev, et ~0,7 Ev.

I.7. CONCLUSION

L'énergie solaire est une source inépuisable, sa disponibilité à travers le monde permet son exploitation et permet de la déclarer comme énergie non polluante et renouvelable. Le processus d'exploitation passe par l'effet photovoltaïque, qui a été expliqué dans ce chapitre. Ajouter à cela nous avons donné les définitions relatives au rayonnement solaire et la dernière partie du chapitre a été consacrée aux différentes générations et technologies des semi-conducteurs utilisées dans les cellules solaires.

Le chapitre suivant sera consacré aux semi-conducteurs pour permettre une meilleure maîtrise de leur concept et leurs intérêts.

I.8. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE I

- [1] Raphaël Fillon. Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe. Electronique. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. ffNNT : 2016GREAI049ff. fftel-01563500ff
- [2] HALOUI HAFSIA, Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces, DOCTORAT EN SCIENCES, UNIVERSITE D'OUM EL BOUAGHI, 2017.
- [3] BALI AMINA, Etude comparative entre les cellules solaire de type p+-AlGaAs/ p-GaAs /n-GaAs et une autre de type n+-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs, Mémoire de magistère, UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER-BISKRA, 2013.
- [4] ABDERREZEK MAHFOUD, Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement, Doctorat en Sciences, UNIVERSITE SETIF -1, 2015.
- [5] G. Phipps, C. Mikolajczak and Terry Guckes, "Indium and Gallium: long-term supply", *Renewable Energy Focus*, Vol. 9, pp. 56, 58-59, Jul.-Aug., 2008.
- [6] AlphousseyniSagna. Etude et élaboration par Close-SpacedVapor Transport (CSVV), d'absorbteurs Cu₂ZnSnS₄ en couches minces polycristallines destinées à la réalisation de photopiles à faible coût. Matériaux. Université de Perpignan; Université Cheikh AntaDiop (Dakar), 2016. Français. ffNNT : 2016PERP0035ff. fftel-01482920ff.
- [7] Chaomin Zhang, High Efficiency GaAs-based Solar Cells Simulation and Fabrication, Thesis, ARIZONA STATE UNIVERSITY, 2014.
- [8] KANOUN Ahmed-Ali, Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques, DOCTORAT EN SCIENCES, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, 2019.
- [9] K. Belabdi, H. Ait Ouarab mémoire de fin d'études master Spécialité : électrotechnique industrielle thème : Eude du processus de dégradation d'une cellule photovoltaïque. Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2015.
- [10] JérômeMichallon. Étude et optimisation de l'absorption optique et du transport électronique dans les cellules photovoltaïques à base de nanofils. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. ffNNT : 2015GREAT012ff. fftel-01171003ff

[11] Abdoulwahab Adaine. Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2018. Français. ffNNT : 2018LORR0085ff. fftel-01870260ff

[12] BENMIR Abdelkader, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couche mince à hétérojonction : CdS/CIGS et CdS/CZTS, Doctorat ès Sciences, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017.

[13] Saeed Mahmud Ullah, Simulation of CZTS thin film solar cell for different buffer layers varying different electrical parameters for high efficiency performance, project report, Dept. of Electrical & Electronic Engineering, University of Dhaka, 2011

CHAPITRE

II

II.1. INTRODUCTION

L'élément principal du processus de production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire est le semi-conducteur. Un matériau pouvant soit être conducteur soit isolant. Sa structure, sa bande d'énergie, ses propriétés physiques lui permettent l'absorption de l'énergie solaire et la production de l'énergie électrique.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser au matériau semi-conducteur d'un point de vue général afin de mieux comprendre son fonctionnement et les paramètres lui permettant d'être l'élément principal dans la cellule solaire. Pour finir, nous nous intéressons aux caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire ainsi qu'aux paramètres permettant d'évaluer les performances de la dite cellule, on peut citer : le rendement, la tension circuit ouvert, le courant de court-circuit et l'efficacité quantique.

II.2. CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Les matériaux sont classés selon leur conductivité électrique, en trois catégories ; conducteurs, isolants ou semi-conducteurs. Les cellules solaires sont construites à base des matériaux semi-conducteurs. Cependant, ces matériaux peuvent agir en tant qu'isolants ou conducteurs. La conductivité σ est considérée comme un paramètre important dans le processus d'identification de la nature conductrice ou non d'un matériau. Les facteurs permettant de confirmer la conduction électrique sont la structure atomique et l'énergie de bande interdite. La classification des matériaux est illustrée dans la figure 1. Le matériau semi-conducteur est un matériau entre le conducteur et l'isolant dont la résistivité varie de 10^{-8} à $10^3 \Omega\text{cm}$ (ou plus) [1, 2, 3]

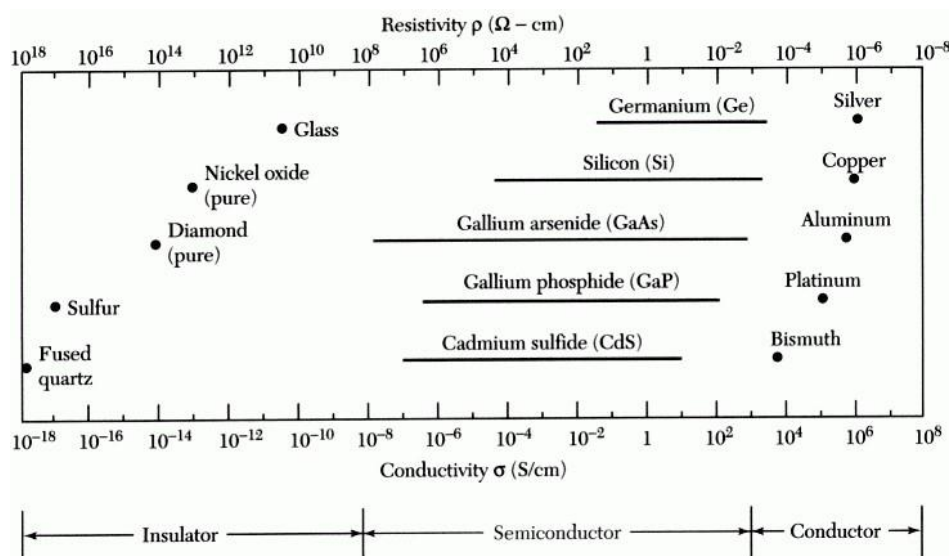


Figure II.1: Classification des matériaux par leur conductivité [1].

Les Semi-conducteurs peuvent se trouver en deux formes simple ou composé. Le silicium (Si) et le Germanium (Ge) sont deux exemples des semi-conducteurs simples. Ces deux semi-conducteurs appartiennent au groupe IV du tableau de Mendeleïev comme le montre la figure 2. Les techniques d'élaboration des semi-conducteurs permettent de la combinaison entre plusieurs éléments du groupe III ou V avec des éléments différents de groupes différents. Il en résulte des semi-conducteurs composé tel que le phosphure de Gallium d'Indium ($In_{1-x}Ga_xP$) et l'arsénite nitrogène d'Indium de Gallium ($In_{1-x}Ga_xN_{1-y}As_y$). Le x et y spécifie la fraction molaire des composés [2, 3].

	3A	13	4A	14	5A	15	6A	16
	5	B	6	C	7	N	8	O
		10.811 Boron		12.0107 Carbon		14.0067 Nitrogen		15.9994 Oxygen
		13	Al	14	Si	15	P	16
		26.9815 Aluminum		28.0855 Silicon		30.9738 Phosphorus		32.065 Sulfur
2B	12							
30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34
	65.409 Zinc		69.723 Gallium		72.64 Germanium		74.9216 Arsenic	
48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52
	112.411 Cadmium		114.818 Indium		118.710 Tin		121.760 Antimony	
80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84
	200.59 Mercury		204.383 Thallium		207.2 Lead		208.9804 Bismuth	
								84
								Po
								[209] Polonium

Figure II.2: Tableau périodique partielle [1].

Les constructeurs de cellules solaires fabriquent des matériaux semi-conducteurs à partir des éléments de groupe II- V, nous pouvons citer l'Oxide de Zinc(ZnO), le tellure de Cadmium(CdTe) et le Sulfite de Mercure(HgS).

Colonne	Semi-conducteur
IV	Ge, Si
Binaire III-V ternaire Quaternaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb.
	$Al_xGa_{1-x}As$, $GaAs_yP_{1-y}$
	$Al_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$
Binaire II-VI Ternaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	$Cd_xHg_{1-x}Te$

Tableau II.1 : Alliage de quelques matériaux III-V et II-VI [1].

II.3. LA STRUCTURE ATOMIQUE D'UN SEMI-CONDUCTEUR

Les éléments du tableau périodique sont arrangés selon leur nombre de protons, neutrons, et électrons. Basant sur la théorie de Niels Bohr, les électrons d'un atome gravitent autour de noyau. La plus proche orbite a un maximum de deux électrons, alors que toutes les autres orbites ont un maximum de huit électrons. Les orbites qui sont plus proches de noyau sont remplies premièrement. Les éléments du groupe IV, comme le germanium (Ge) par exemple a quatre électrons dans la couche extérieure, ou celle de valence de leur atome.

Dans la Figure II.3, les atomes de semi-conducteurs partagent leurs quatre électrons de la bande de valence pour remplir cette couche extérieure avec le maximum nombre des électrons.

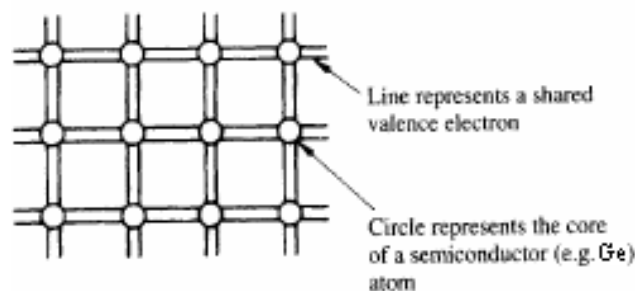


Figure II.3 : Modèle de bande.

Chaque atome est capable de partager leurs électrons de la couche extérieure avec quatre atomes. Chaque paire d'électrons partagée permet de former une liaison covalente. Donc les atomes tendent à remplir leurs couches de valence pour atteindre la stabilité atomique. Par exemple les éléments de groupe III du tableau périodique ont trois électrons libres dans leur couche extérieure. La combinaison de ces éléments sera avec des éléments de groupe V. Ces derniers reçoivent des électrons pour remplir leur couche extérieure. Par conséquent un semi-conducteur composé est produit à travers les liaisons covalentes.

Le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque. Le nombre atomique de l'atome Si est 14, cela signifie qu'il y a 14 électrons en orbite autour du noyau. Dans la configuration de l'état fondamental, un atome de Si a quatre électrons de valence. Ces valence les électrons sont les plus importants car ils forment les liaisons avec d'autres atomes de Si. Deux atomes de silicium sont liés lorsqu'ils partagent l'électron de valence de l'autre. C'est ce qu'on appelle liaison covalente formée par deux électrons. Puisque l'atome de Si a quatre électrons de valence, il peut être lié de manière covalente à quatre autres atomes de Si. Sous la forme cristalline, chaque atome de Si est covalent lié à quatre atomes de Si voisins. Toutes les liaisons ont la même longueur et les angles entre les liens sont égaux. Le nombre de liaisons qu'un atome a avec son

voisins dans la structure atomique est appelé le numéro de coordination ou la coordination. Ainsi, dans le silicium monocristallin, le nombre de coordination pour tous les atomes de Si est de quatre, on peut aussi dire que les atomes de Si sont quadruples coordonnés. Une cellule unitaire peut être définie, à partir de laquelle le réseau cristallin peut être reproduit en dupliquant la cellule unitaire et en empilant les doublons les uns à côté des autres. Un tel arrangement atomique régulier est décrit comme une structure d'ordre à longue portée. Quand les atomes de silicium sont liés, les électrons de l'orbite extérieure forment des liaisons covalentes. Par conséquent, le silicium forme des liaisons avec d'autres atomes de silicium [2].

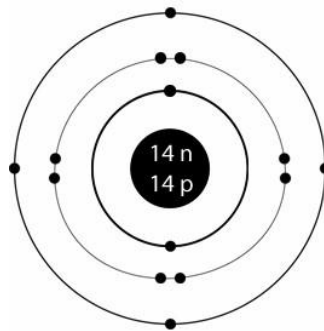


Figure II.4 : La structure atomique d'un silicium [1].

II.3.1. La bande d'énergie :

Les semi-conducteurs sont une classe spéciale de matériaux, dont la conductance n'est pas permanente, mais dépend plutôt de l'énergie disponible pour activer les électrons dans le réseau cristallin. Le silicium cristallin est un matériau semi-conducteur largement utilisé dans le photovoltaïque [2]. Il devient conducteur lorsque l'énergie des photons absorbés par la surface du cristal est suffisante pour élever l'état électronique de la bande de valence à la bande de conduction. Cette quantité d'énergie requise pour exciter un électron est définie comme la bande interdite. La bande interdite est une propriété intrinsèque des semi-conducteurs et a finalement une influence directe sur la tension de la cellule photovoltaïque [4, 5]. Le schéma suivant (Figure II.5) fournit une démonstration du concept de bande interdite.

Sur cette image, nous pouvons visualiser la différence entre différentes classes de matériaux : conducteurs (métaux), semi-conducteurs et isolants. Les bandes de valence et de conduction dans un métal se chevauchent, il ne faut donc pas d'énergie significative pour libérer les électrons. Ils sont disponibles pour la conduction dès que le gradient de potentiel est fourni. Dans les isolants, l'écart entre les bandes de valence et de conduction est très grand, il faut donc tellement d'énergie

pour libérer les électrons qu'il peut endommager le matériau lui-même. Pour les semi-conducteurs, la situation se situe quelque part entre les deux. La bande interdite est suffisamment grande pour empêcher la conduction spontanée et assurer la séparation des charges, et suffisamment petite pour être compensée par l'énergie des photons [3, 4, 5].

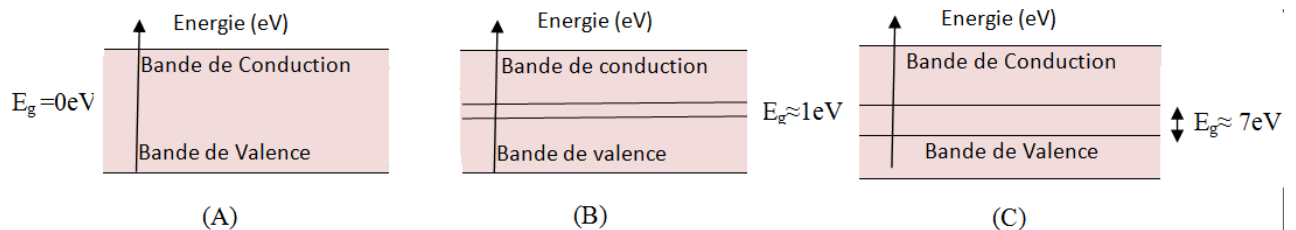


Figure II.5 : Diagramme de bande d'énergie pour [1].

(A) : un conducteur, (B) : semi-conducteur, (C) : isolant.

Les énergies de bande interdite de plusieurs matériaux différents sont répertoriées dans le tableau II.2 ci-dessous. Certains de ces matériaux sont plus adaptés aux applications photovoltaïques que d'autres. L'adéquation des matériaux aux applications photovoltaïques serait déterminée par la proximité de l'énergie des photons avec la bande interdite du matériau et si l'énergie des photons est suffisante pour couvrir la bande interdite.

Matériel		Energie de Gap (Band Gap (eV))
Si	Silicon	1.11
Ge	Germanium	0.67
CdTe	Cadmium telluride	1.5
Cu ₂ O	Copper oxide	2.1
Cu ₃ N	Copper nitride	1.75
GaP	Gallium phosphide	2.26
GaAs	Gallium arsenide	1.43
PbS	Lead sulfide	0.37
Si ₃ N ₄	Siliconnitride	5
C	Diamond	5.5
SiO ₂	Silica	9

Tableau II.2: Énergie de gap de quelque matériau [4].

II.3.2. Jonction PN :

Un semi-conducteur est un matériau présentant une bande interdite (E_g) de quelques eV entre la bande de valence et la bande de conduction, avec le niveau de Fermi dans la bande interdite. La position du niveau de Fermi est fonction de la concentration des porteurs de charges, le semi-conducteur est de type N lorsque les électrons sont les porteurs de charge majoritaires, dans ce cas, le niveau de Fermi se situe près de la bande de conduction. Il est de type P lorsque ce sont les trous, dans ce cas le niveau de Fermi est proche de la bande de valence [3].

Quand deux semi-conducteurs de type P et de type N sont mis en contact, un flux d'électrons et des trous diffuse respectivement vers la zone P et N, pour uniformiser la distribution des concentrations des porteurs dans la structure.

Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement.

Une zone de déplétion appelée aussi "zone de charge d'espace" (ZCE) est formée de chaque côté de l'interface. Un champ électrique est créé dans la zone de déplétion, dirigée de la région de type N vers la région de type P. Ce champ va créer une barrière de potentiel, qui va empêcher les porteurs électrons et trous de diffuser respectivement vers la région P et la région N. [4, 5].

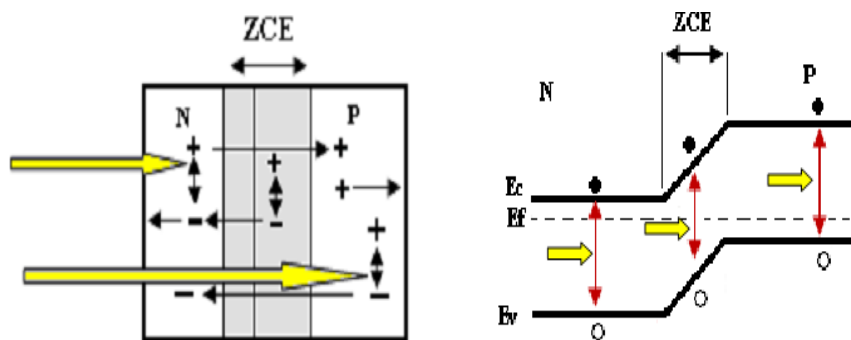


Figure II.6 : Structure d'une jonction PN (à gauche), son diagramme de bandes (à droite) [5].

Les jonctions constituées par la mise en contact de deux régions différemment dopées d'un même semi-conducteur, sont appelées "homojonctions". Par contre, les jonctions réalisées par la juxtaposition de deux matériaux différents sont appelées "hétérojonctions" [5].

II.4. CIRCUIT ELECTRIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE REELE

Des modèles réaliste tenant compte des limitations des cellules (pertes engendrées par la résistivité des couches et la présence de courants de fuite), ont été introduits incluent une résistance série R_s et parallèle R_{sh} pour calculer le courant fourni à la résistance charge. Ce modèle est représenté par le schéma électrique de la figure II.7 [6].

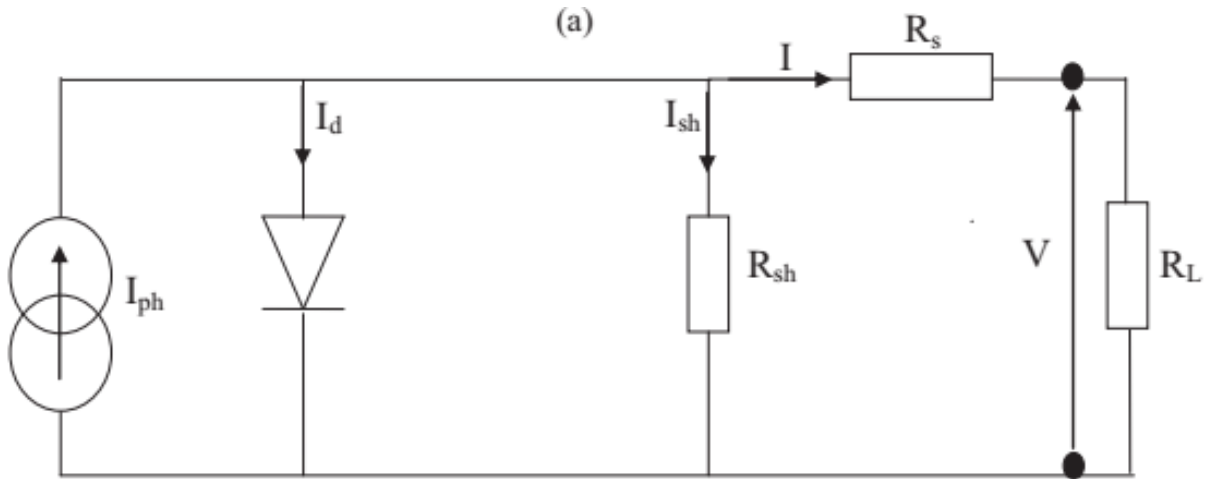


Figure II.7: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle.

La résistance en série prend en compte l'impédance des électrodes et des matériaux, celle-ci influe sur la tension V aux bornes de la cellule photovoltaïque et devient différente de celle aux bornes de la jonction [7].

La deuxième résistance shunt, R_{sh} modélise le courant de fuite résultant des pertes de surface et des pertes dues au défaut dans le matériau aux bornes de la jonction PN [8], en conséquence le courant I_{ph} sera dérivé et ne pourra être délivré à la charge.

L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque dans le cas réel s'écrit [7] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} ; \tag{II.2}$$

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V+R_s I}{Q U}} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} ; \tag{II.3}$$

$$I = I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{a k T}\right) - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} ; \tag{II.4}$$

En conclusion, dans le cas réel, il est impératif de minimiser la valeur de R_s et faire en sorte que R_{sh} ne soit pas trop faible.

II.5. CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE

L'évolution du courant en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque représente la caractéristique IV de la cellule étudiée. La caractéristique IV évolue en fonction de paramètres bien définie, tel que l'ensoleillement ou/et la température de surface. L'ensoleillement ou l'éclairement d'une cellule est une condition essentielle pour obtenir la caractéristique IV. La courbe de la figure II.8 représente la caractéristique courant-tension représentant l'ensemble des configurations électrique d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire on déduit les paramètres électriques propres de la cellule solaire :

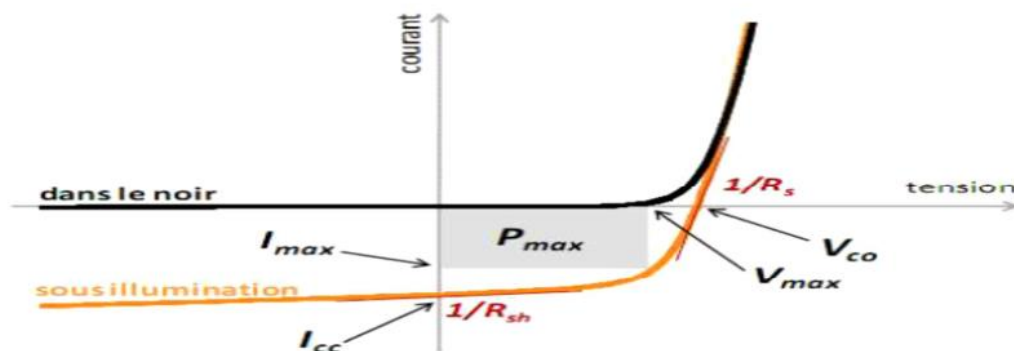


Figure II.8: caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire à AM1.5.

Une courbe courant-tension ($I-V$) montre les combinaisons possibles de courant et de tension de sortie d'un dispositif photovoltaïque (PV). Un appareil PV, tel qu'un module solaire, produit son courant maximal lorsqu'il n'y a pas de résistance dans le circuit, c'est-à-dire lorsqu'il y a un court-circuit entre ses bornes positive et négative. Ce courant maximal est appelé courant de court-circuit et est abrégé I_{sc} . Lorsque le module est court-circuité, la tension dans le circuit est nulle. Inversement, la tension maximale se produit lorsqu'il y a une coupure dans le circuit. C'est ce qu'on appelle la tension en circuit ouvert (V_{oc}).

La puissance disponible à partir d'un dispositif photovoltaïque à n'importe quel point de la courbe est simplement le produit du courant et de la tension à ce point et est exprimée en watts. Au point de courant de court-circuit, la puissance de sortie est nulle, car la tension est nulle. Au point de tension en circuit ouvert, la puissance de sortie est également nulle, mais cette fois c'est parce que le courant est nul.

II.5.1. Courant de court-circuit I_{SC}

Le courant de court-circuit est le courant traversant la cellule solaire lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle (c'est-à-dire lorsque la cellule solaire est court-circuitée). Habituellement écrit comme I_{SC} , le courant de court-circuit est indiqué sur la courbe IV ci-dessous.

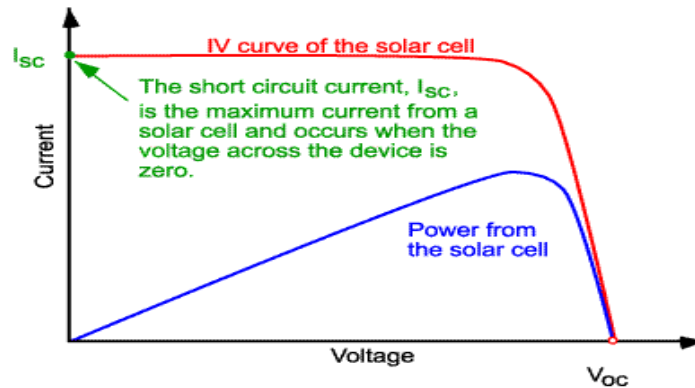


Figure II.9: courbe caractéristique courant-tension I-V d'une cellule solaire en en courant de court-circuit.

Le courant de court-circuit est la valeur maximum pouvant être extraite à partir de la cellule solaire. Le courant de court-circuit dépend d'un certain nombre de facteurs qui sont décrits ci-dessous :

- La surface de la cellule solaire: Pour supprimer la dépendance de la surface de la cellule solaire, il est plus courant de lister la densité de courant de court-circuit (J_{sc} en mA/cm^2) plutôt que le courant de court-circuit.
- Le nombre de photons (c'est-à-dire la puissance de la source lumineuse incidente) : I_{sc} d'une cellule solaire dépend directement de l'intensité lumineuse.
- Le spectre de la lumière incidente: Pour la plupart des mesures de cellules solaires, le spectre est normalisé sur le spectre AM1.5.
- Les propriétés optiques: absorption et réflexion de la cellule solaire et
- La probabilité de collection de la cellule solaire: Elle dépend principalement de la passivation de surface et de la durée de vie des porteurs minoritaires dans le socle.

Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On peut écrire:

$$I_{sc} = I(V=0) ; \quad (\text{II.5})$$

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant photovoltaïque I_{ph} .

II.5.2. Tension de circuit ouvert V_{oc}

La tension en circuit ouvert, V_{oc} , est la tension maximale disponible à partir d'une cellule solaire, et cela se produit à un courant nul. La tension en circuit ouvert correspond à la quantité de polarisation directe sur la cellule solaire due à la polarisation de la jonction de la cellule solaire avec le courant généré par la lumière. La valeur de la tension de circuit ouvert varie en fonction du type de cellule solaire (jonction PN, jonction schottky), de la nature des matériaux de la couche active et des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule [9].

On peut facilement avoir l'expression de V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s} - 1\right); \quad (II.6)$$

Avec :

- I_{sc} : courant de court-circuit, courant lorsque $V = 0$.
- I_s : courant de saturation
- K : constante de Boltzmann (1,381.10-23 Joule/Kelvin).
- T : Température de la jonction p-n des cellules.
- q : Charge d'électron (1,602.10-19 C).

II.5.3. Facteur de forme FF

Le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert sont respectivement le courant et la tension maximum d'une cellule solaire. Cependant, à ces deux points de fonctionnement, la puissance de la cellule solaire est nulle. Le "facteur de forme", plus communément appelé par son abréviation "FF", est un paramètre qui, associé à V_{oc} et I_{sc} , détermine la puissance maximale d'une cellule solaire. Le FF est défini comme le rapport de la puissance maximale de la cellule solaire au produit de V_{oc} et I_{sc} [10, 11, 12]. Graphiquement, le FF est une mesure de "l'équerrage" de la cellule solaire et est également l'aire du plus grand rectangle qui s'adaptera à la courbe courant-tension. C'est le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule PV, définie par le produit de V_{oc} et I_{sc} .

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}; \quad (II.7)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, est exprimé en pourcentage (%). Graphiquement, il représente la surface plus ou moins rectangulaire de la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire. Si visuellement la surface est un carré le facteur de forme serait égale à 1. Cependant, le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85 [13,14].

II.5.4. Rendement de conversion η

L'efficacité est définie comme le rapport entre l'énergie produite par la cellule solaire et l'énergie fournie par le soleil. En plus de refléter les performances de la cellule solaire elle-même, l'efficacité dépend du spectre et de l'intensité de la lumière solaire incidente et de la température de la cellule solaire. Par conséquent, les conditions dans lesquelles l'efficacité est mesurée doivent être soigneusement contrôlées afin de comparer les performances d'un appareil à l'autre. Il suffit de connaître sa valeur pour évaluer les performances de la cellule. Il consiste dans le rapport entre la puissance maximale et le rayonnement incident. Le rendement peut être optimisé en optimisant les valeurs du facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [14].

$$\eta = P_m / P_i ; \quad (\text{II.8})$$

Où : est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol.

II.5.5. Efficacité quantique

L'efficacité quantique appelé efficacité quantique externe (**IPCE ou EQE**) est le rapport du nombre de d'électrons collectés sur le nombre de photons incidents sur une surface sensible à la lumière (photo réactive). Elle permet de caractériser la cellule photovoltaïque et de définir sa sensibilité [7-14]. Le calcul de l'efficacité quantique se fait dans des conditions de court-circuit et pour chaque la longueur d'onde selon la formule suivante :

$$IPCE = \frac{I_{sc}}{P_i \lambda} \cdot \frac{hc}{q} = \frac{1240 \cdot I_{sc}}{P_i \lambda} ; \quad (\text{II.9})$$

Où :

λ Est la longueur du faisceau incident (en nm),

I_{sc} la densité du courant de court-circuit de la cellule (mA.m⁻²),

P_i la puissance incidente (W.m⁻²).

II.6. CONCLUSION

Le semi-conducteur est le matériau idéal pour la conversion photovoltaïque. L'étude faite dans ce chapitre permet une meilleure compréhension de ce matériau et quels sont les paramètres d'évaluation d'une cellule solaire pour connaître ses performances. Dans le prochain chapitre, nous allons nous intéresser à la cellule couche mince à base du matériau semi-conducteur GaAs.

II.7. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE II

- [1] DJAAFAR Fatiha, Etude et Modélisation des Performances des Cellules Photovoltaïques à Multi Couches à Base des Semi-conducteurs Inorganiques. Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2018.
- [2] CherouanaAbdelbaki, Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin, Magister, UNIVERSITE CONSTANTINE 1, 2013.
- [3] BOUANANI BOUALEM, Simulation et Optimisation des Cellules Solaires Monolithiques à Double Hétérojonction, à Base de CIGS, Utilisant le Logiciel Atlas-Silvaco. DOCTEUR EN SCIENCES, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2020.
- [4] Raphaël Fillon. Etude des propriétés électroniques de couches minces de CZTSSe. Electronique. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. ffNNT : 2016GREAI049ff. fftel-01563500ff
- [5] HALOUI HAFSIA, Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces, DOCTORAT EN SCIENCES, UNIVERSITE D'OUM EL BOUAGHI, 2017.
- [6] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.
- [7] BENMIR Abdelkader, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque en couche mince à hétérojonction : CdS/CIGS et CdS/CZTS, Doctrat en science, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA. 27-Apr-2017.
- [8] Kanoun, A. (2019). Etude Théorique Et Prédictive Des Nouveaux Matériaux Pour Conception Des Cellules Solaires Et Applications Photovoltaïques.Thèse de Doctorat, Université Abou BekrBelkaid - Tlemcen.
- [9] AbdoulwahabAdaine. Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2018. Français.
- [10] M. Oukachmih, Thèse de Doctorat, Laboratoire de Génie Electrique, Université de Paul Sabatier, Toulouse France (2003).
- [11] GHEZALI Nawel, KEBAILI Soraya, ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES MATERIAUX SEMI-CONDUCTEURS TERNAIRES, Master Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arridj. 2019.

- [12] Z. Pinter, Thèse de doctorat L'institut national des sciences appliquées de Lyon, France (2002).
- [13] LabdelliBoutaleb, Recherche de nouveaux matériaux semi-conducteurs ternaires basés sur les III-V tel que l'InxGal-xP pour des applications en électronique et en conversion photovoltaïque, DOCTORAT, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbas, 2019.
- [14] NOURI Achouak, BOUALLEM Zineb," Etude de l'effet de la couche mince CdZnS dans la cellule solaire CZTS ", Mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA, 2016/2017.

CHAPITRE

III

III.1. INTRODUCTION

Les couches minces à base de matériau GaAs représentent après le silicium une grande part du marché, spécialement dans le domaine spatiale. Le GaAs peut être un semi-conducteur de type P ou N selon le dopage. Ce qui fait de lui un matériau intéressant pour l'étude et l'analyse.

Dans ce troisième chapitre nous allons nous intéresser à la découverte du matériau GaAs, de sa structure et différentes propriétés ainsi des différentes combinaisons possible pour obtenir une cellule solaire à base de GaAs.

III.2. ARCHITECTURE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Les premières cellules étaient constituées seulement d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Mais leur architecture a ensuite évolué. En effet, trois grandes avancées technologiques ont permis l'augmentation de leur rendement. Il s'agit de la texturation de surface, l'usage d'une couche antireflet et le champ de contact arrière [1].

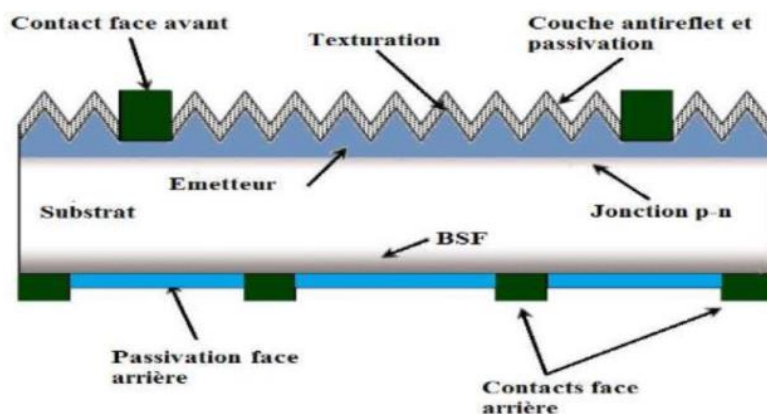


Figure III.1 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

III.2.1 Les contacts :

Les contacts métalliques sont placés sur la face avant et sur la face arrière de la cellule solaire. Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky ». Le contact supérieur couvre la surface de cellule solaire d'un pourcentage de 2–8%. Ce contact a un rôle de minimiser l'ombrage et éviter la recombinaison. Alors que le contact inférieur couvre la partie inférieure de la surface de la cellule.

Les contacts ont un rôle de collecter des porteurs majoritaires et minoritaires et de prévenir la recombinaison et permettre aux rayons lumineux de pénétrer à l'intérieur de la cellule solaire. [1]

Le choix de type de métal a un rôle important dans la collecte de maximum de courant. En

plus les contacts métalliques donnant des contacts ohmiques, sont choisis afin d'avoir des résistances de contact plus faibles [1] car la forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme ainsi que le rendement. Parmi les métaux utilisés pour les contacts ohmiques des cellules solaires sont : Li, Na, K, Fe, Ni, Al, Cu, Ag, Au, Pt [1].

III.2.2 La couche fenêtre :

La couche fenêtre est une couche conductrice. Elle permet aux électrons de circuler vers les contacts électriques sans augmenter la résistance des cellules en série. Pour que les rayons lumineux puissent pénétrer (dans les couches de la cellule solaire photovoltaïque, il faut utiliser des matériaux semi-conducteurs dont l'énergie de gap est importante pour être transparent à la lumière. La couche fenêtre doit avoir une fraction molaire moins élevée pour diminuer le problème d'oxydation [1] comme le Silicium et le Sélénium [1].

III.2.3 Emetteur et base :

Les couches émetteur et base sont des couches fines à base de semi-conducteur. La région de type n dans une cellule n-p est nommée émetteur. La région de type p- est nommée la base" (Bates 7) [1]. Pour minimiser l'absorption dans l'émetteur, il faut que leur épaisseur doive être très fine par rapport à l'épaisseur de la base pour assurer la collecte des porteurs [1].

Le dopage de l'émetteur doit être de l'ordre de 10^{18} cm^{-3} alors que celui de la base doit être plus faible. Le dopage de la base a un rôle important dans l'augmentation du rendement de la cellule solaire. Le faible dopage augmente la durée de la vie des porteurs minoritaires, par contre il augmente le courant de l'obscurité et donc diminue la performance de la cellule.

III.2.4 La surface arrière BSF :

Le champ électrique à surface arrière BSF (Back Surface Field) est une couche mince fortement dopée. Elle est localisée sur la face arrière de la cellule solaire et permet de passiver la face arrière de la cellule. Elle est dopée (p^+ ou n^+) avec le même type de dopage que le substrat [1]. Et donc une barrière de potentiel est créée à cause de la différence de la concentration de dopage entre la couche BSF et le substrat [1].

Le BSF a deux contributions à la structure de la cellule. D'une part, l'ajout de la couche BSF permet de partager la tension entre les jonctions n-p et p-p+, cela diminue le courant de l'obscurité dans la cellule. D'autre part le champ électrique intégré dans la jonction p-p+ reflète les porteurs minoritaires, par conséquent elle permet d'augmenter la tension de court-circuit de la cellule solaire, de minimiser les recombinaisons et donc collecter des porteurs majoritaires. Plusieurs travaux de

recherches se sont intéressés à l'étude de l'effet de l'épaisseur de la couche BSF pour des raisons commerciales [1].

Les semi-conducteurs sélectionnés pour la réalisation de cette couche doivent avoir.

- Un paramètre de maille proche du paramètre de maille de la base.
- Un gap élevé, supérieur à celui de la base.
- un dopage élevé, de l'ordre de 10^{18} cm^{-3}
- Une bonne transparence aux photons destinés à la cellule inférieure (Bottomcell), si cette couche est appliquée dans une structure Tandem.

III.2.5 Couche antireflet :

Pour réduire la réflexion de la lumière à moins de 5% sur la face avant de la surface de la cellule solaire, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti Reflective Coating CAR) [16]. L'opération de réfléchir des rayons lumineux de la couche anti-réfléchissante est basé sur le principe d'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Pour des cellules photovoltaïques à haut rendement, il est préférable d'utiliser une double couche antireflet (avec deux diélectriques différents) [1].

Donc, sans la couche antireflet, la cellule solaire reflète jusqu'à 33% de la lumière incidente arrivant sur la surface de cellule solaire. [1]

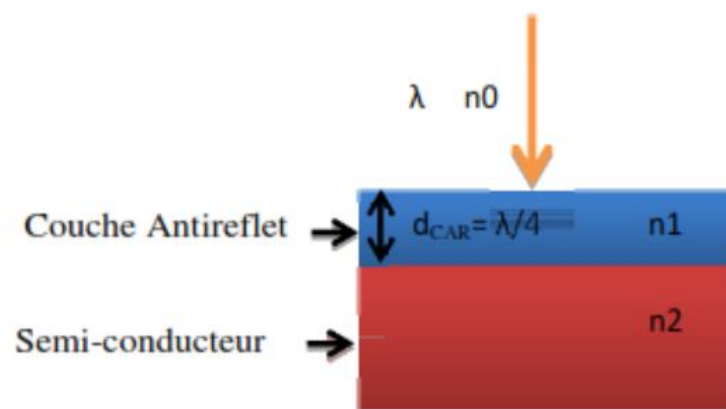


Figure III.2: couche antireflet d'une cellule photovoltaïque.

Les matériaux utilisés pour la fabrication de la couche anti reflets doivent être soumis aux conditions suivantes :

- Réflexion minimale de la lumière ; Elle permet une réflexion minimale de la lumière.
- Etre transparent pour la gamme de lumière absorbée par les sous-cellules solaires en tandem.
- Etre adhérent au contact.

Le tableau ci-après montre les matériaux utilisés comme des couches antireflets et leurs indices de réfraction [1]

Matériau	N
MgF ₂	1.38
CeF ₃	1.65
ZrO ₂	2.10
TiO ₂	2.62
Al ₂ O ₃	1.76
ZnS	2.36

Tableau III.1 : Indice de réfraction de quelques matériaux.

III.3. CELLULE SOLAIRE A BASE DE GaAS

Basé sur le fait que la lumière du soleil peut être efficacement absorbée en quelques micromètres, GaAs est un excellent matériau candidat pour les cellules solaires minces. La structure conventionnelle des cellules solaires GaAs est illustrée sur la Figure III.3. La couche fenêtre est un matériau à large bande interdite, comme l'AlGaAs, qui est utilisé pour traiter les photons à haute énergie, permettant aux photons à faible énergie de traverser. Une autre fonction de la couche fenêtre est de réduire la recombinaison de surface [2].

Au-dessus de la couche de fenêtre, une couche de protection fortement dopée est généralement développée pour protéger la fenêtre couche et agit comme une couche de contact. La couche émettrice et la couche de base sont soit n-p soit p-n couches de GaAs dopé pour former des couches d'absorption. A la face arrière des cellules solaires, un BSF, ou la couche de champ de

surface arrière qui est également un matériau à large bande interdite est une région fortement dopée formant une barrière potentielle au flux de porteurs minoritaires vers la surface arrière [2].

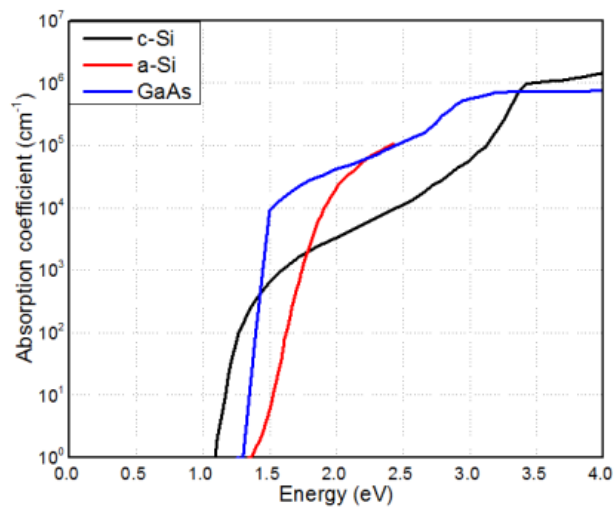


Figure III.3 : Coefficient d'absorption du c-Si, a-Si et du GaAs [2].

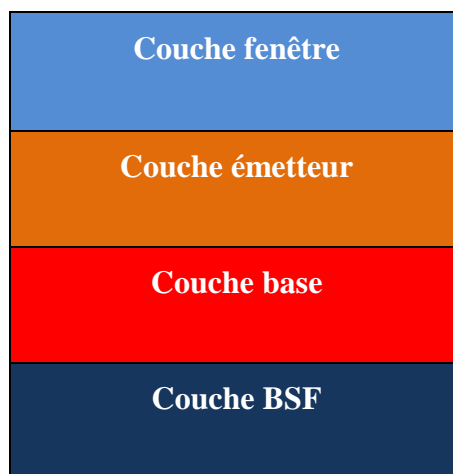


Figure III.4 : Structure conventionnel d'une cellule solaire GaAs.

III.4. L'ARSENIC DE GALLIUM (GaAs) :

L'arsenic de gallium (GaAs) est un matériau favorable pour la conversion photovoltaïque grâce à ses propriétés. Il possède une bande interdite de 1,42 eV et une longueur de diffusion des porteurs minoritaires de l'ordre de 2-3 μ m., proche de la valeur donnant le rendement maximal des cellules solaires. L'efficacité des cellules GaAs a été démontrées dans plusieurs recherches, cependant les meilleurs résultats ont été obtenus dans le domaine de la recherche spatiale du point de vue du rendement et des applications de grandes surfaces. Le GaAs est un semi-conducteur est obtenu à partir de deux matériaux qui sont le gallium (Ga) et l'arsénique (As). Le gallium est un

élément chimique métallique d'atomique 31. L'arsenic, est un élément semi-métallique solide, extrêmement toxique, de numéro atomique 33. Il appartient au groupe 15 de la classification périodique. L'arsenic n'est pas rare, mais il est toxique.

L'avancée importante a été la capacité de faire croître les couches de GaAs par épitaxie organométallique en phase vapeur (OMVPE) dans des réacteurs à grande échelle de production qui accueillait une surface de 1500 cm² de substrats de GaAs par cycle et donnaient des couches très uniformes sur de grandes surfaces. Dans une autre avancée, les substrats de GaAs ont été remplacés par des substrats de Ge, qui ont un espacement de réseau atomique très similaire à celui de GaAs, conduisant à la croissance de couches épitaxiales de GaAs de haute qualité. Les substrats Ge coûtent moins cher et sont plus résistants mécaniquement, ce qui permet la fabrication de cellules GaAs/Ge fines et de grande surface. L'amélioration des performances a entraîné une réduction significative de la surface et du poids du générateur solaire, rendant les cellules GaAs / Ge rentables pour le système PV, même si elles peuvent coûter 5 à 10 fois plus que les cellules Si. Ces avantages du système ont entraîné une acceptation rapide, en particulier pour les satellites de communication commerciaux et les satellites de défense.

III.5. LES PROPRIETES DU GaAS

III.5.1. Structure cristalline:

L'arséniure de gallium possède une structure cristalline de type blende (comme le diamant). Si l'on considère que les atomes de gallium suivent une structure de type cubique face centrée, les atomes d'arsenic occupent quant à eux 4 des 8 sites tétraédriques de cette maille (et vice-versa).

C'est un matériau semi-conducteur utilisé en particulier pour réaliser des composants micro-ondes et des composants optoélectronique, diodes électroluminescentes infrarouges ou des cellules photovoltaïques. Le GaAs est un semi-conducteur dit « III-V » car le gallium et l'arsenic sont respectivement dans les colonnes III et V dans le tableau de classification périodique des éléments, et présentent donc 3 et 5 électrons de valence [3].

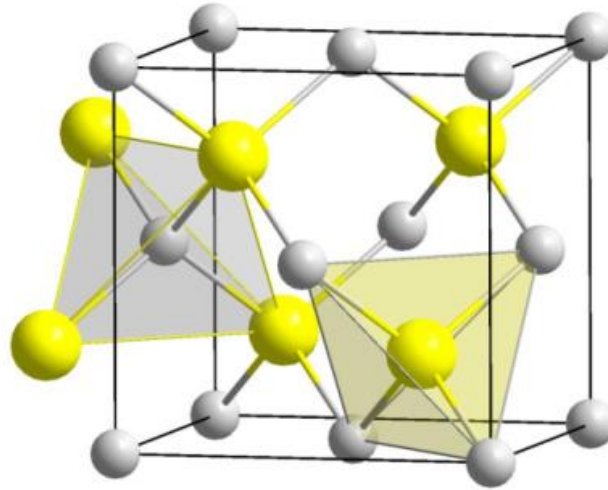


Figure III.5: Structure cristalline du GaAs [3].

III.5.2. Structure de bande 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.2). 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 maximum de la bande inférieure alors on dit que la bande interdite est directe (gap direct), dans l'autre cas la bande interdite est indirecte voir figure (III.7) [3].

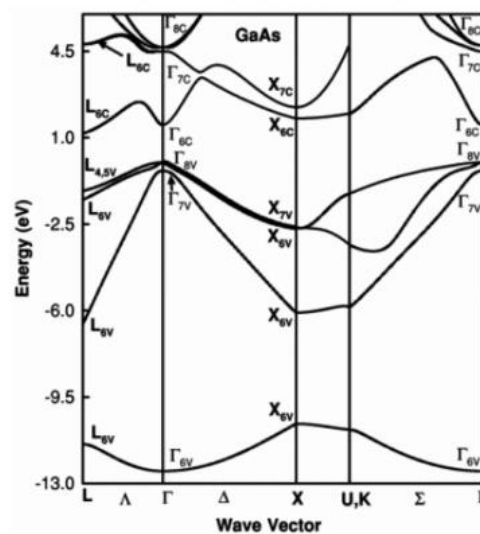


Figure III.6 : Structure de bande de GaAs [3].

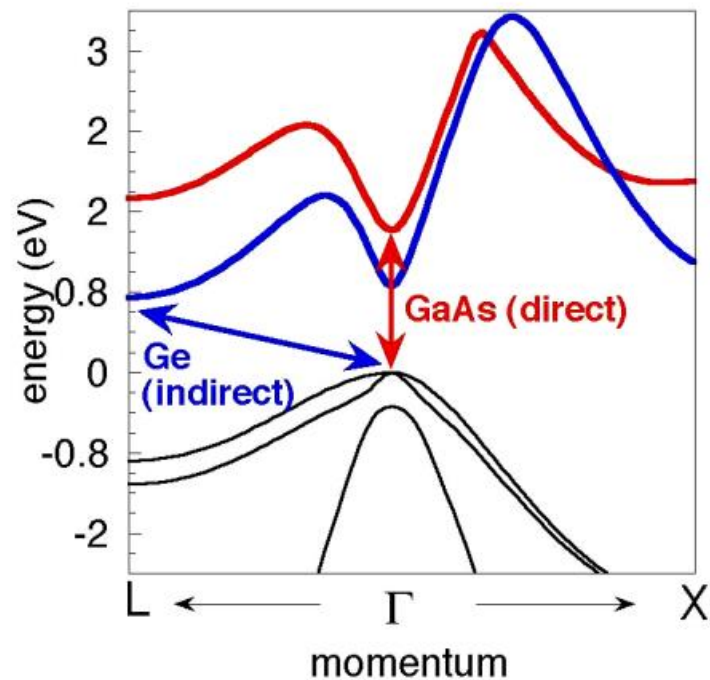


Figure III.7: Structure de bande schématique d'un semi-conducteur à gap direct et gap indirect [3].

III.5.3. Propriétés électriques et physiques du GaAs:

Les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de gallium à la température ambiante (300K°) sont regroupées dans le tableau suivant [4] :

Paramètres	Valeurs
Structure cristalline	Zinc blinde
Poids atomique	144,63 g/mole
Structure de la bande interdit	Directe
Largeur de bande interdit	$E_g = 1,424 \text{ eV}$
Permittivité	11,6 pF/cm
Mobilité des électrons	$\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Mobilité des trous	$400 \text{ cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Vitesse de saturation	$2.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$
Champ de claquage	$> 5.10 \text{ 6V/cm}$

Tableau III.2 : Caractéristiques du GaAs [4].

III.5.4. Propriétés optiques (absorption) du GaAs:

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

$$\alpha = \alpha_{\text{exciton}} + \alpha_{\text{continuum}}$$

$\alpha_{\text{continuum}}$ 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[5] :

$$E_n = \frac{E_l}{n^2} \quad n= 1, 2, 3, \dots$$

E_l : l'énergie de liaison de l'exciton

$$E_l = \frac{m_r}{m_0} \frac{\epsilon_0^2}{\epsilon^2} R_y \quad \text{III.1}$$

Avec $m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h} \quad \text{III.2}$

Est la masse réduite du système, m_0 la masse de l'électron libre, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ la permittivité Absolue du matériau et R_y l'énergie d'ionisation de l'état s de l'atome d'hydrogène ($R_y = 13,6 \text{ EV}$) [5].

Les énergies permises s'écrivent :

$$E = E_G + \frac{h^2 K^2}{2M} - E_n \quad \text{III.3}$$

Avec : $M = m_e + m_h$

On peut représenter de façon simplifiée les niveaux d'énergie de l'exciton (Figure III.8).

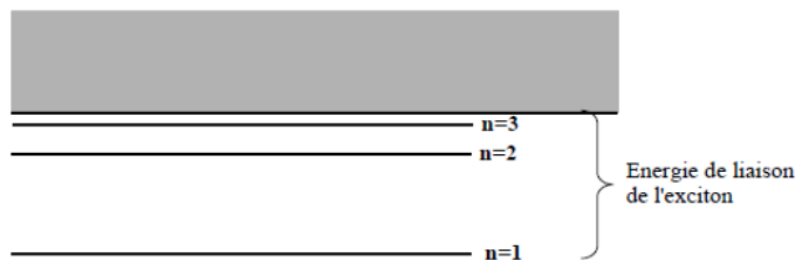


Figure III.8 : Représentation simplifiée des niveaux énergétiques des excitons.

III.5.5. Structure d'une cellule solaire homojonction GaAs:

La cellule solaire homojonction à base de l'arsenic de gallium est formée de plusieurs Couches [5,6].

- 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) [5].

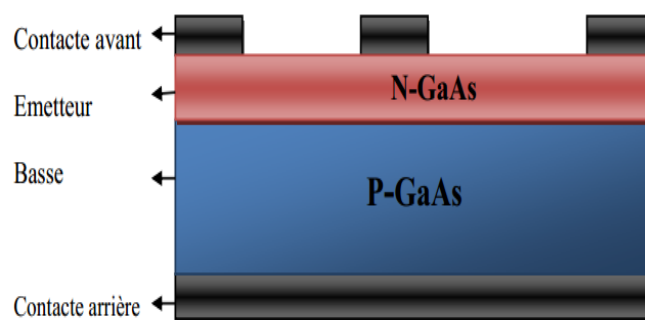


Figure III.9 : Structure de la cellule solaire GaAs (p)/GaAs (n).

III.6. LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES SOLAIRES EN GaAs

III.6.1. Les cellules simples :

La structure adaptée, figure (III.10), est composée essentiellement d'une cellule PN à base De GaAs, sur laquelle est déposée une couche fenêtre AlGaAs de typeP. 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[6].

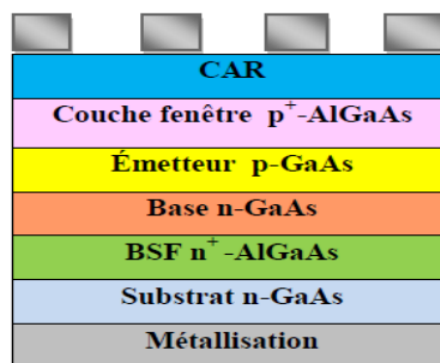


Figure III.10 : Structure de la cellule solaire GaAs(p)/GaAs(n) avec fenêtre AlGaAs(p).

III.6.2. 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 donnant à l'ensemble un rendement très élevé pouvant atteindre 50% .Par exemple les cellules à multi jonctions GaAs/GaSb sont fabriquées de façon monolithique Par MBE (Molecular Beam Epitaxy) ou par assemblage mécanique d'homojonction [6].

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'épitanie, 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[5, 7].

III.7. CONCLUSION

Au début du chapitre nous avons donné la structure générale d'une cellule solaire, ensuite nous avons décrit la cellule solaire à base de GaAs, sa structure, ses différents types et les paramètres photovoltaïques ainsi que les différentes architectures des cellules solaires à base de GaAs.

III.8. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE III

- [1] S. CHETTOUH, S. HATOUT, Etude du rendement de cellule solaire hétérojonction à base InGaP/GaAs par simulation, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj BouArreridj, 2019.
- [2] Abdoulwahab Adaine. Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Lorraine, 2018. Français. ffNNT : 2018LORR0085ff. fftel-01870260ff
- [3] Hfayed Massika, Simulation numérique d'une Cellule solaire (p/n) en GaAs, Master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [4] : Mr ZIANE AbdErrezzaq, THESE Présenté pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES Dans le cadre de l'école doctorale " Matériaux et Composants "(Option : Composants et systèmes) Thème : Caractérisation et modélisation des structures métal/ matériaux GaAs nitrurés par la technique capacité tension C-V et de conductances-tension G-V en fonction de la fréquence Soutenu le 04/12/2018 Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès.
- [5] : Mr Mezari Abdessamedlyes, Mehrazioussama, mémoire de fin d'études de master option : Nanophysique Thème : étude et simulation des nanostructures InGaAs/si pour Nano systèmes photovoltaïque.
- [6] : Mr KANOUN Ahmed-Ali, Pour l'obtention du diplôme de : DOCTORAT EN SCIENCES Spécialité : Science des Matériaux Sur le thème Etude théorique et prédictive des nouveaux matériaux pour conception des cellules solaires et applications photovoltaïques Soutenu publiquement le 06/07/2019 à université Tlemcen.
- [7] : Mr BOUSSAID MOHAMMED, mémoire de Magister Option : Physique Electronique le Thème: Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïque Année Universitaire 2011-2012 à université Abou-Bakr Belkaïd – tlemcen.

CHAPITRE

IV

IV.1. INTRODUCTION

La cellule solaire étudiée est une jonction p-n en GaAs. Les paramètres d'entrée de cette cellule sont les épaisseurs, le dopage des deux régions p et n, le gap d'énergie du GaAs, les densités effectives des électrons et des trous, la température ambiante, les mobilités, les vitesses thermiques des électrons et des trous, ainsi que les conditions aux limites et le spectre du soleil.

Dans ce travail, une cellule solaire à hétérojonction à base de GaAs est décrite et entièrement simulée à l'aide de l'outil de simulation "SCAPS" qui a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction en couches minces. L'effet des épaisseurs et du dopage des deux régions (absorbeur/tampon) est étudié pour trouver la cellule optimum à base de GaAs.

IV.2. SIMULATEUR SCAPS

Le Programme SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) a été développé à ELIS (Systèmes Electroniques et Informatiques) à l'Université de Gand, Belgique pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires. Il prend en compte la présence de plusieurs couches dans la cellule (jusqu'à 7 couches) ; le phénomène de recombinaison à l'interface des couches, Il peut traiter le problème de la recombinaison et la centres de génération-recombinaison dans les états profonds dans le volume des couches et calculer les caractéristique I (V), mais aussi la réponse spectrale et les mesures de capacité C(V) et C(f) [1 - 5].

Le fonctionnement électrique d'un composant semi-conducteur est décrit par les trois équations de physique relatifs au semi-conducteur : équation de Poisson et équations de continuité des électrons et des trous. Le logiciel SCAPS, utilise la technique de la méthode des différences finies pour résoudre le Poisson et les équations de continuité qui sont soumises à des conditions aux limites appropriées et sous diverses conditions : équilibre, DC, AC, Recombinaisons d'Illumination (Radiative, Auger et ShockleyRead-Hall) [1 - 5].

IV.3. NOTIONS DE BASE DU LOGICIEL SCAPS

SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure IV.1. Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de les recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche) .Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, et occupe environ 50 Mo d'espace disque.

Le logiciel peut être téléchargé gratuitement. Il faut rapporter à la connaissance de à Marc Burgelman le téléchargé d'une version de SCAPS (le nom et le nom et l'adresse d'institution, et le nom du promoteur pour les étudiants).

SCAPS est développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe₂ et de CdTe. Cependant, Plusieurs version ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules amorphes (a-Si et de Si micro-morphe).

Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conducteurs .
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées (en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule) : Par exemple , χ , ε , NC , NV , V_{thn} , V_{thp} , μ_n , μ_p , N_A , N_D , tous les pièges (défauts) N_t .
- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct) , la SRH Auger.
- les niveaux de défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.

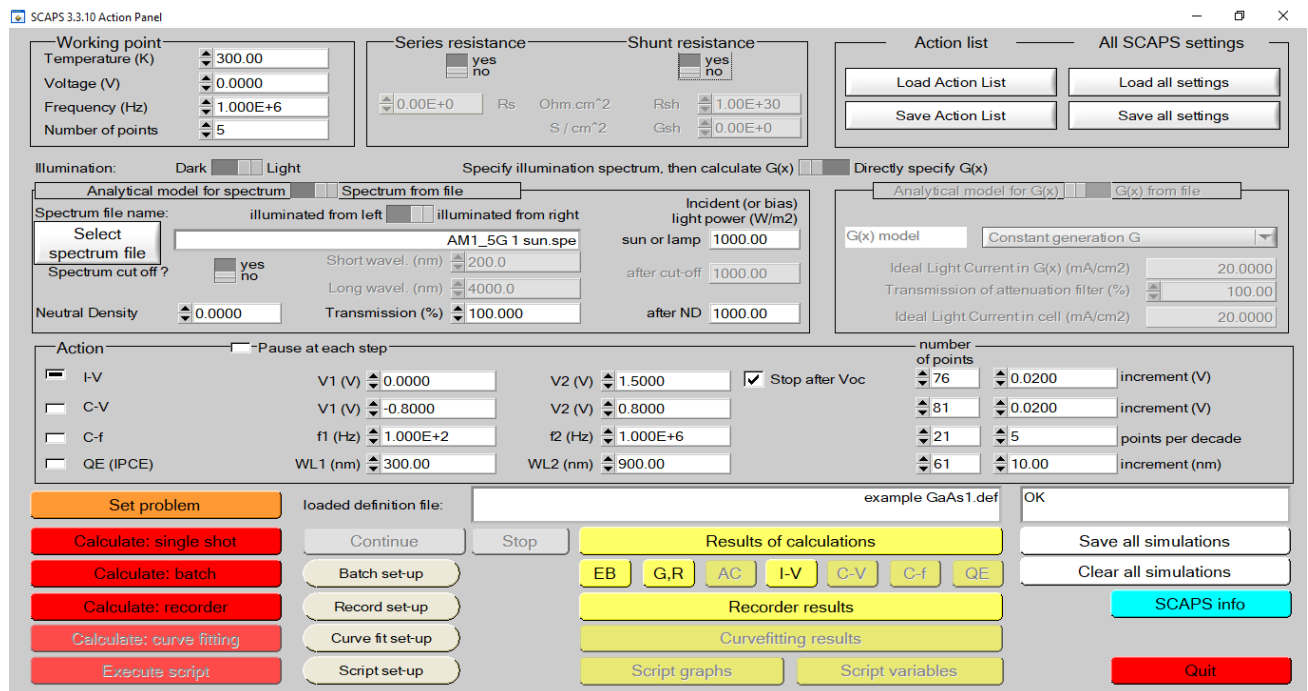


Figure IV.1 : Panneau de démarrage de SCAPS.

Il y a des panneaux dédiés pour les actions de base :

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le(s) calcul(s).
6. Afficher les courbes de simulation.

IV.3.1. Définir la structure d'une cellule :

Cette partie permet à l'utilisateur de définir les différentes couches de sa cellule solaire. Chaque couche est indépendante et possède ses propres caractéristiques physique, électrique, optique et défauts.

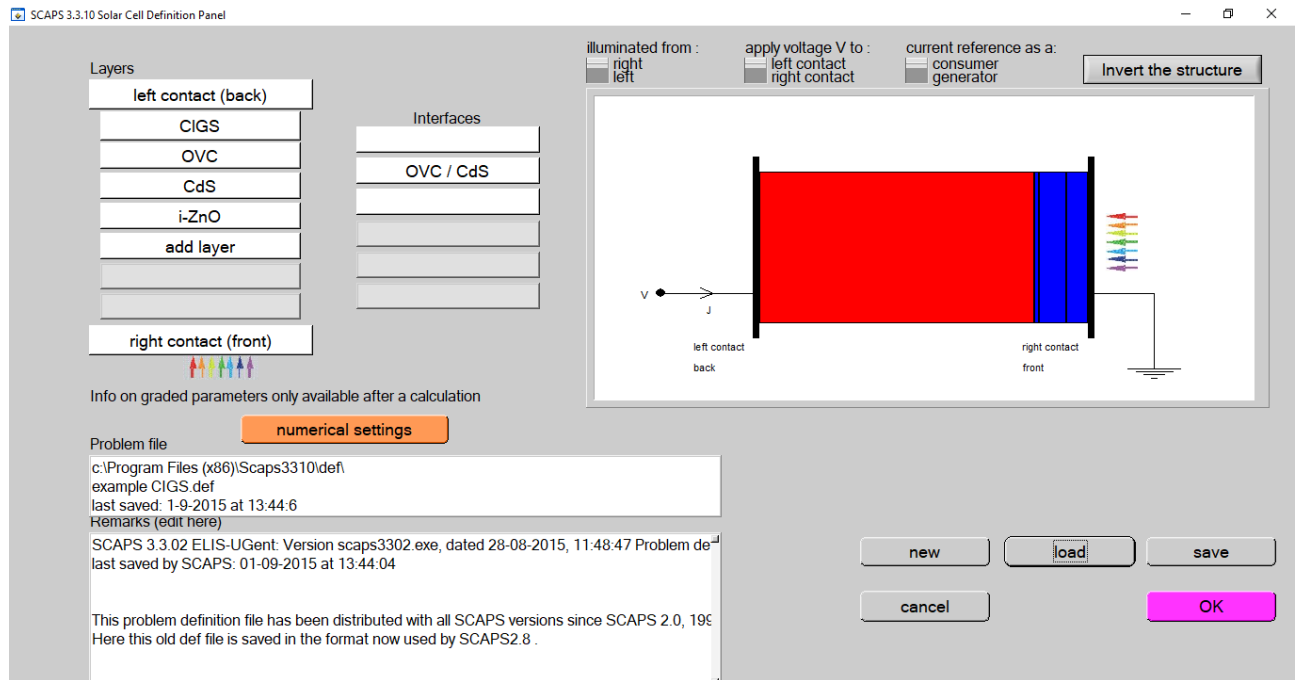


Figure IV.2 : panneau pour la construction de la cellule solaire

Pour ajouter une couche il suffit de cliquer sur l'icône « add layer » et une nouvelle fenêtre permettant de remplir les paramètres apparait.

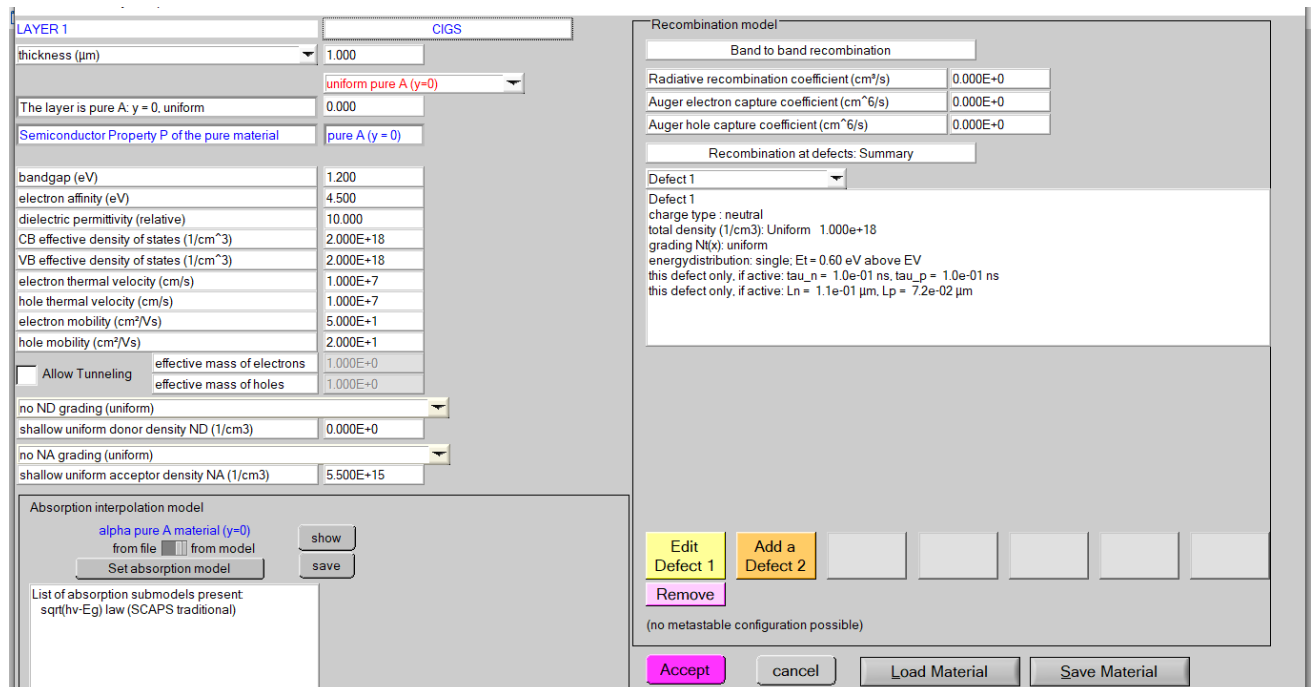
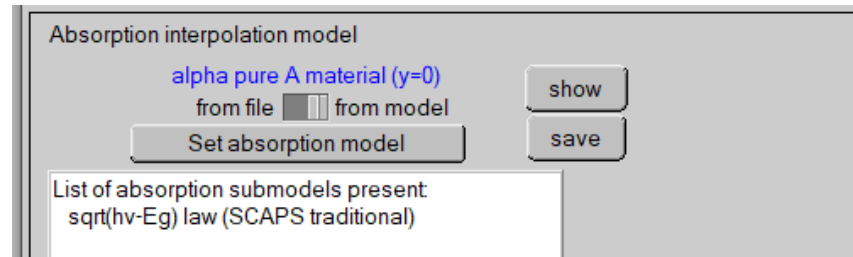


Figure IV.3 : Panneau pour remplir les paramètres des différentes couches de la cellule solaire

IV.3.2. Le coefficient d'absorption :

Les coefficients d'absorption d'un matériau peuvent soit être déclarer selon l'équation de l'absorption



Soit par fichier proposé par le logiciel SCAPS. Il permet aussi de définir le coefficient d'absorption de plusieurs manières manuelle.

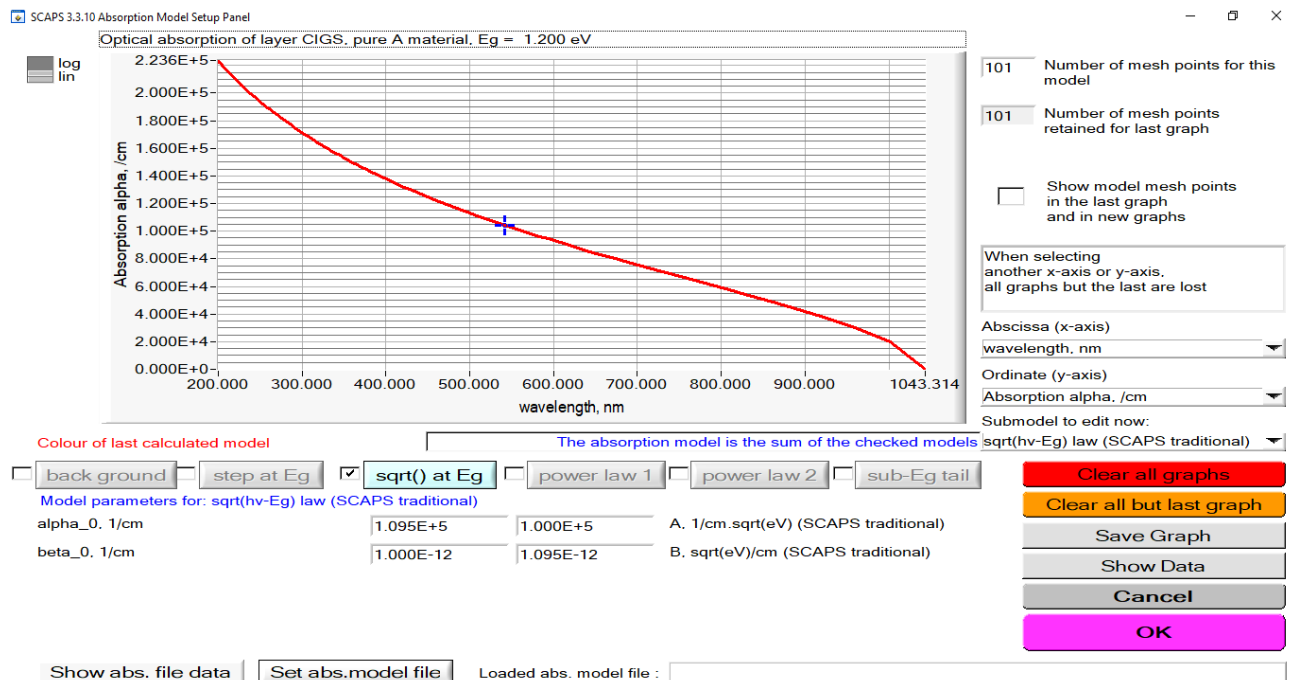


Figure IV.4 : Panneau permettant de déclarer le coefficient d'absorption.

IV.4. STRUCTURE DE LA CELLULE GaAs

Afin d'optimiser l'efficacité de la cellule solaire n-ZnO/GaAs, nous étudierons l'effet de la variation des propriétés (épaisseur et dopage) sur les performances (rendement, courant court-circuit, tension de circuit ouvert et facteur de forme) de la cellule solaire à hétérojonction à base de GaAs.

La structure de la cellule solaire n-ZnO/GaAs est représentée sur la figure IV.1. Le GaAs est dopé pour obtenir une couche absorbante de type p. La couche tampon est élaborée à partir du matériau ZnO dopé pour obtenir un dopage de type N. Aussi la couche antireflet est obtenue à partir du matériau ZnO : Al.

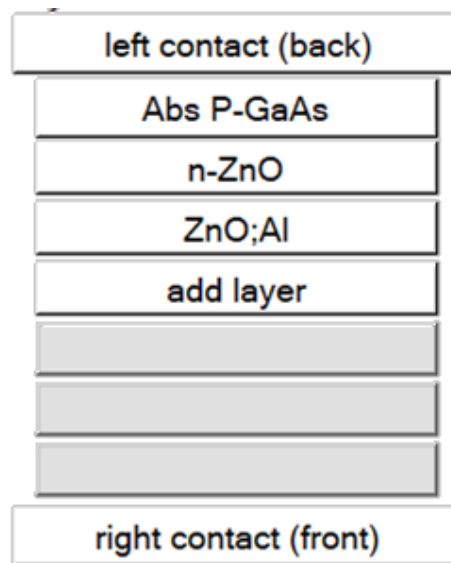


Figure IV.5 : Structure de la cellule solaire à base de GaAs étudié sur SCAPS.

L'étude de la cellule n-ZnO/GaAs implique la variation de plusieurs paramètres dans la structure de la cellule sous un rayonnement standard AM 1.5G et une température ambiante (300°K). C'est ainsi qu'on varie les épaisseurs de la couche absorbante et de la couche tampon de 1 à 20 μm et de 20 à 500 nm, respectivement. On fait varier la concentration de dopage pour les deux couches (absorbante et tampon) de $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La variation des paramètres de la cellule solaire n-ZnO/GaAs sont sélectionnés à partir des publications des recherches scientifiques. Les principaux paramètres utilisés lors de notre étude par simulation sont listés dans le tableau 1 [1, 6, 7, 8].

	ZnO: Al	n-ZnO	p-GaAs
Epaisseur (μm)	0.8	Variable 0.1–1	Variable 1-200
Band de gap (eV)	3.3	3.93	1.424
Constante diélectrique	4.4	8.49	13.2
Affinité électronique (eV)	9	3.8	4.07
Nc (cm⁻³)	2.2×10^{18}	4.42×10^{18}	4×10^{17}
Nv (cm⁻³)	1.8×10^{19}	1.76×10^{19}	9×10^{18}
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	10^7	10^7	10^7
Vitesse thermique des trous (cm/s)	10^7	10^7	10^7
Mobilité d'électron (cm²/V.s)	100	16	3197 - 8800
Mobilité des trous (cm²/V.s)	25	4	232 - 400
ND (cm⁻³)	—	—	5×10^{15}
NA (cm⁻³)	10^{18}	$10^{17}-10^{19}$	—

Tableau IV.1 : Propriétés des couches p-GaAs, n-ZnO et le ZnO: Al [1, 6, 7, 8].

IV.5. ETUDE DE LA CELLULE SOLAIRE A BASE DE GaAs

IV.5.1. Effet de l'épaisseur de la couche absorbante :

Afin d'obtenir le meilleur rendement possible de la cellule solaire, il est souhaitable d'optimiser l'épaisseur. Pour cela on fait varier l'épaisseur de l'absorbeur à base du matériau GaAs de 1000nm à 20000nm, en fonction des matériaux de la couche tampon avec la même épaisseur, soit 80nm, pour le matériau ZnO.

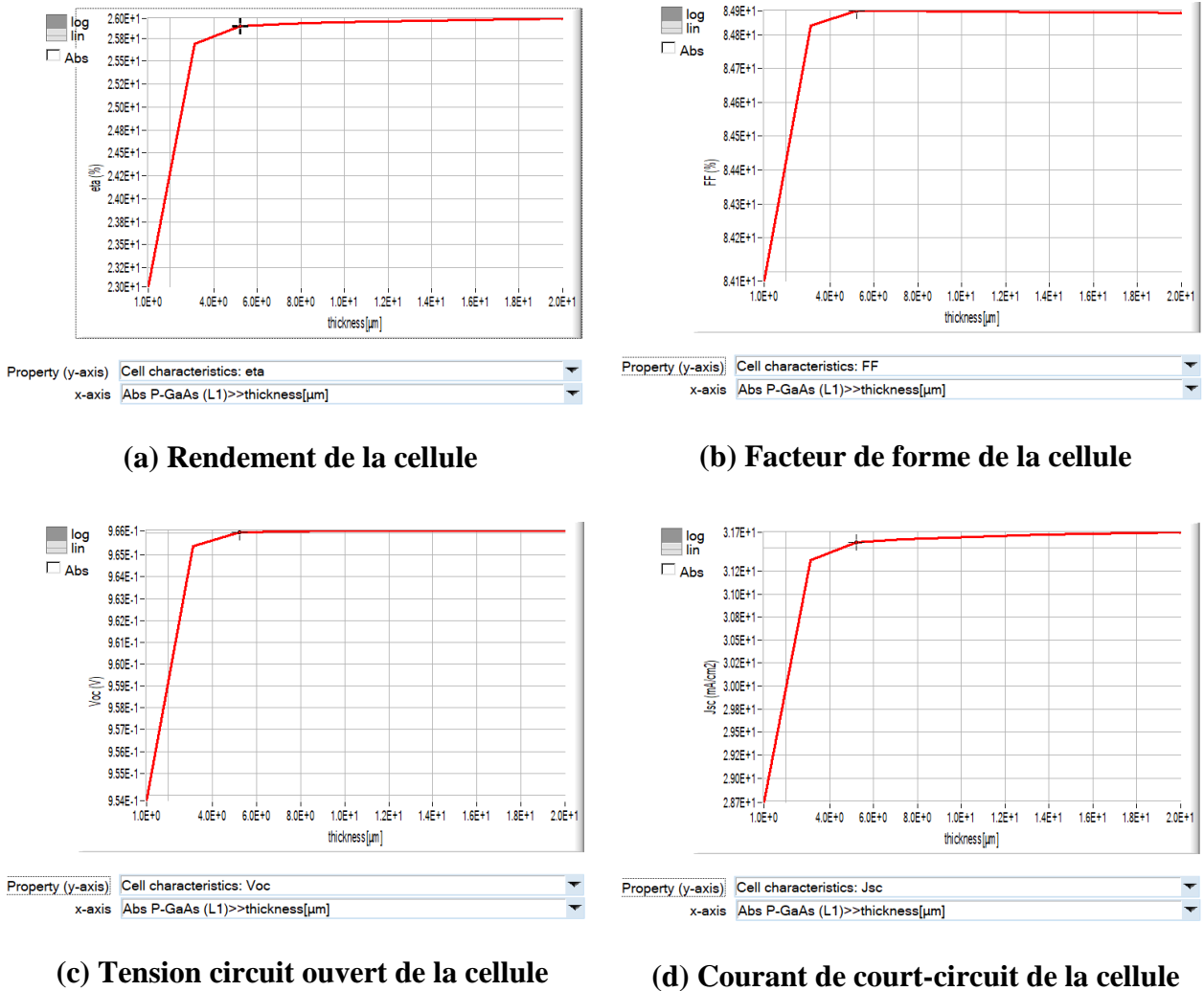


Figure IV.6 : Effet de l'épaisseur de la couche absorbante sur

a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (V_{oc}), et d- le courant de court-circuit (J_{sc}) de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al

L'analyse des différentes courbes des performances de la cellule solaire, permet de conclure que le rendement de la cellule augmente rapidement au début avec l'augmentation de l'épaisseur. Cette croissance rapide diminue après l'épaisseur de 4000nm pour se stabiliser vers les 5200nm avec un rendement de 25.9%. Cependant nous pouvons observer que les autres caractéristiques de la cellule subissent la même croissance pour atteindre une tension de circuit ouvert de 0.66, un courant de court-circuit de 31.4 et un facteur de forme de 84.85%.

IV.5 .2.Effet de la densité de dopage NA de la couche absorbante :

Afin d'étudier l'influence du dopage de la couche absorbante sur les performances de notre cellule, nous avons fait varier la densité de dopage NA de 1×10^{15} à $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

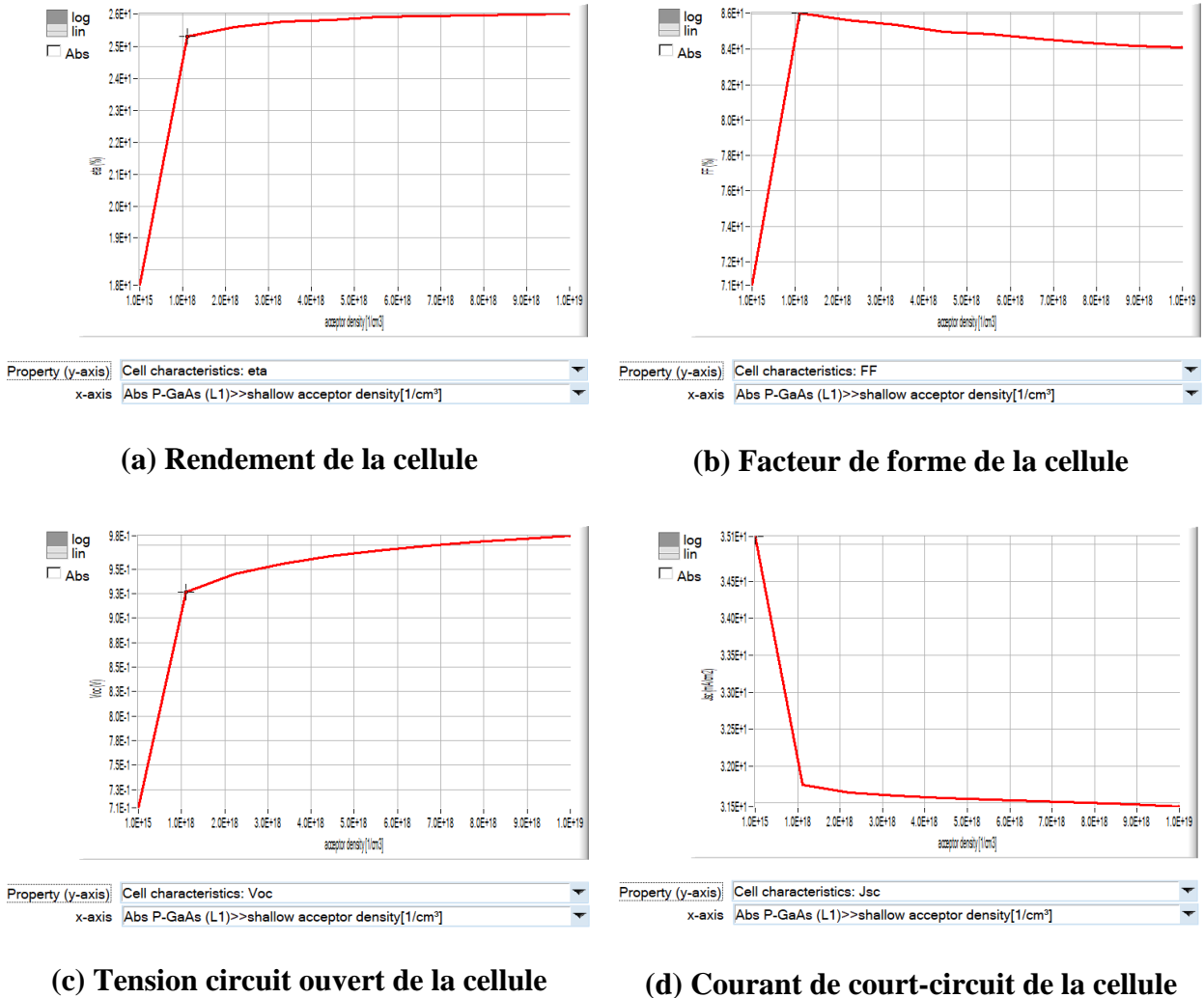


Figure IV.7 : Influence de la variation de la densité de dopage sur les performances : a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (V_{oc}), et d- le courant de court-circuit (J_{sc}) de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al

La variation de la densité de dopage influe sur la cellule différemment à l'influence de l'épaisseur. Dans ce cas on enregistre une augmentation de la tension de circuit ouvert et diminution du courant de court-circuit, ce phénomène est dû à la densité des porteurs qui est plus élevées et qui contribue au processus de recombinaison et en conséquence réduire la probabilité de collecte d'électrons générés par des photons et l'efficacité quantique des photons à grande longueur d'onde

sera également réduite. Les photons de grande longueur d'onde seront absorbés profondément dans la couche GaAs, par conséquent, l'efficacité collectée des électrons qui y sont créés dépend davantage de l'effet de diffusion. Il apparaît qu'un dopage inférieur à $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ permettrait une optimisation des performances de la cellule solaire à base de GaAs.

IV.5.3. Effet de l'épaisseur de la couche tampon :

Dans cette partie de la simulation, nous étudions l'influence de l'épaisseur de la couche tampon sur les performances de d'une cellule solaire à base de GaAs. L'épaisseur de la couche tampon est variée de 100 à 5000 nm.

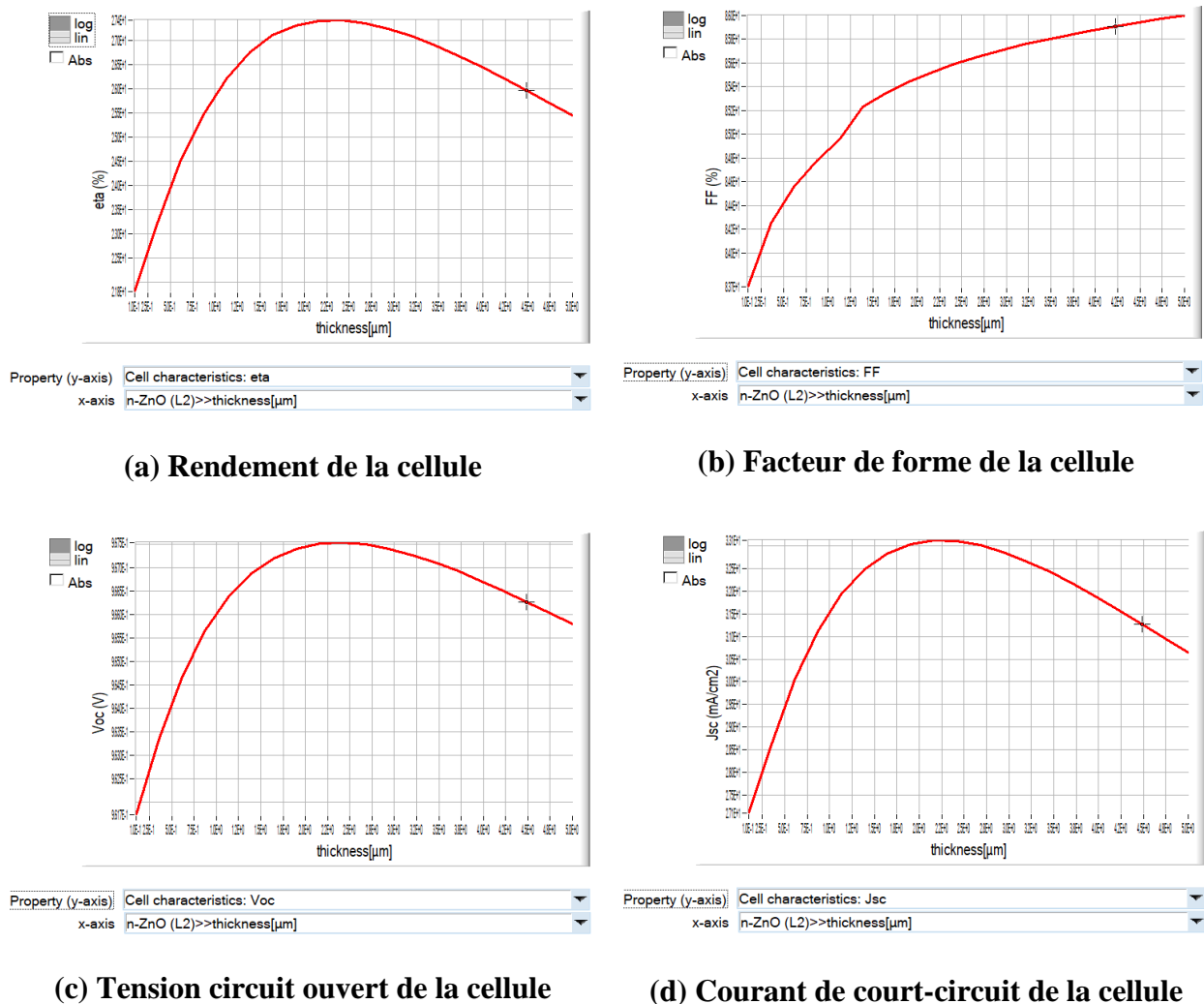


Figure IV.8 : Influence de la variation de l'épaisseur de la couche tampon sur les performances de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al

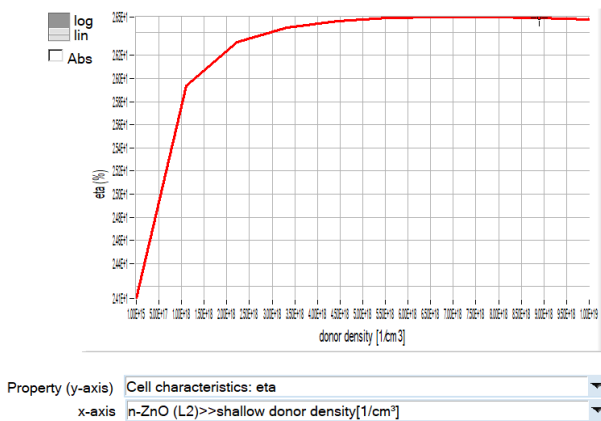
a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (Voc), et d- le courant de court-circuit (Jsc)

L'étude des différentes courbes permet de remarquer que le rendement de la cellule solaire possède une courbe en cloche. En effet, au début de la variation de l'épaisseur de la couche tampon le rendement augment en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la couche tampon et cela s'explique par l'augmentation des paires électrons-trous dans la cellule solaire. Ce phénomène explique le courant et la tension possèdent tous les deux la même forme de la courbe du rendement. Pour atteindre un maximum de 27.4% de rendement avec une épaisseur de 2200nm et un courant de court-circuit de 33 (mA/cm²) et une tension de circuit ouvert de 0.965 V. le facteur de forme atteint 85.6%.

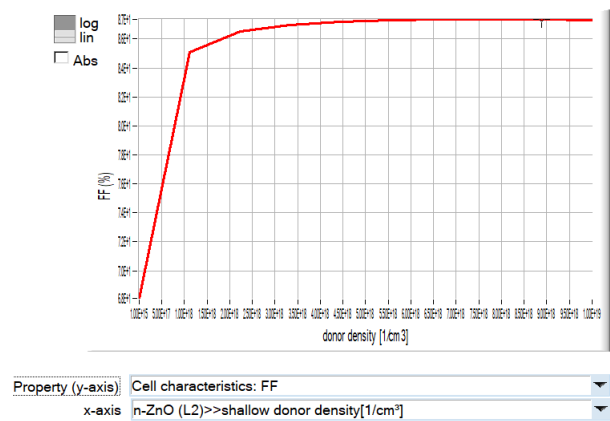
Le phénomène de cloche est dû au fait qu'après une certaine épaisseur le phénomène de recombinaison devient plus important et empêche le déploiement à large distance des électrons-trous. Cela est dû au fait que les absorbeurs à gap large n'absorbent pas les photons à grandes longueurs d'onde, ce qui implique une faible quantité de paires électrons-trous photo-générés, donc une faible quantité de porteurs libres, ce qui réduit les valeurs du Jsc.

IV.5.4. Effet de la densité de dopage ND de la couche tampon :

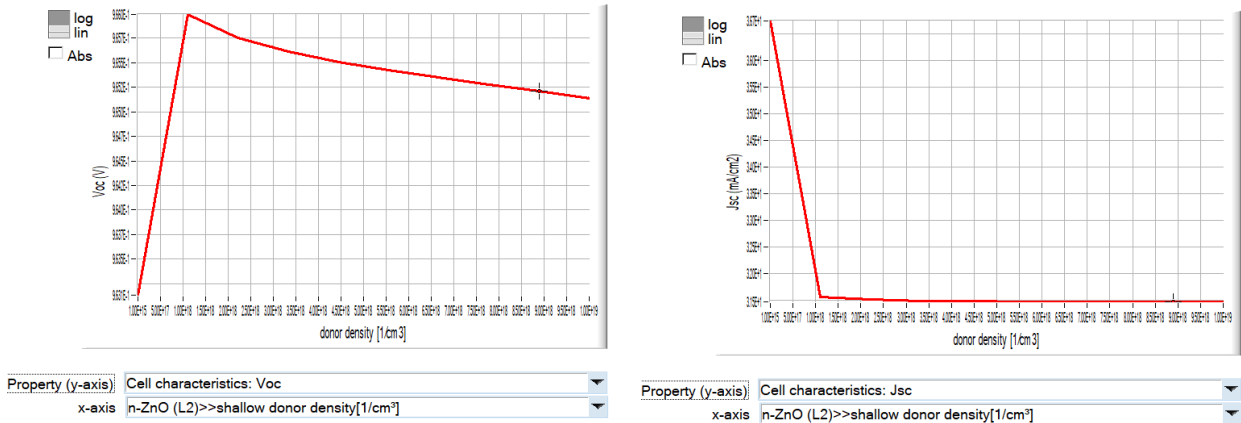
Afin d'étudier l'influence du dopage de la couche tampon sur les performances de notre cellule, nous avons fait varier la densité de dopage ND de 1×10¹⁵ à 1×10¹⁹ cm⁻³.



(a) Rendement de la cellule



(b) Facteur de forme de la cellule



(c) Tension circuit ouvert de la cellule

(d) Courant de court-circuit de la cellule

Figure IV.10 : Influence de la variation de la densité de dopage sur les performances :

a- le rendement (η), b- le facteur de forme(FF), c-tension circuit ouvert (Voc), et d- le courant de court-circuit (Jsc) de la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al

Nous remarquons que l’effet de la densité de dopage de la couche tampon réagit de la même manière que lorsque nous avons étudié l’influence du dopage de la couche absorbante sur la cellule GaAs/ZnO/ZnO:Al. C’est-à-dire une diminution du courant et une augmentation de la tension.

IV.6. CONCLUSION

L’étude des performances d’une cellule solaire est très importante, pour cela il existe plusieurs logiciels permettant de calculer et simuler ces différentes études. Nous avons choisi le logiciel de simulation SCAPS pour ses diverses citations dans les publications scientifiques.

Dans ce chapitre nous avons étudié l’impact de la variation des paramètres épaisseur et dopage sur la structure hétérojonction du type GaAs/ZnO/ZnO:Al, dans le but de connaître la structure optimale qui donnera le meilleur rendement électrique.

A cet effet, nous avons simulé les paramètres de sortie d’une cellule solaire à base de GaAs. Cette étude nous a permis d’optimiser le rendement électrique de la structure GaAs/ZnO/ZnO:Al pour une épaisseur de 2200nm et un dopage ND de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche tampon et épaisseur de 5000nm et un dopage NA de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche absorbante.

IV.7. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE IV

- [1] H. BOURBABA, S. KADRI, K. DJERMANE, OPTIMIZATION OF THE PERFORMANCE OF GaAs SOLAR CELLS: EFFECT OF THE WINDOW LAYER, *Journal of Ovonic Research*, Vol. 15, No. 3, May - June 2019, p. 151 – 156.
- [2] SCAPS-1D User Manuel, SCAPS Version 2.3, December, (2001).
- [3] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, *Thin Solid Films* 362-361, 527 (2000).
- [4] D. N. Keener, D. C. Marvin, D. J. Brinker, H. B. Curtis, P. M. Price, Progress toward technology transition of GaInP₂/GaAs/Ge multijunction solar cells *Proc. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (Anaheim) (Piscataway, NJ: IEEE)*, p. 787(1997).
- [5] Hiromasa Fujii, Kasidit Toprasertpong, Hassanet Sodabanlu, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano, *J. Appl. Phys.* 116, 203101 (2014).
- [6] Shah, Deb & Kc, Devendra & Parajuli, D. & Akhtar, M. Shaheer & Kim, Chong & Yang, O-Bong. (2022). A computational study of carrier lifetime, doping concentration, and thickness of window layer for GaAs solar cell based on Al₂O₃ antireflection layer. *Solar Energy*. 234. 330-337. 10.1016/j.solener.2022.02.006.
- [7] Xin Jin, and Naiyun Tang, ZnO as an anti-reflective layer for GaAs based heterojunction solar cell, *Mater. Res. Express* 8 (2021) 016412, Xin Jin and Naiyun Tang 2021 *Mater. Res. Express* 8 016412. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abde58>
- [8] Wei Zhang, and Naiyun Tang, Comparative study of ZnMgO/GaAs and ZnMgO/Si solar cells, *Materials Research Express*, Volume 7, Number 10 2020 *Mater. Res. Express* 7 105903.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Les cellules solaires hétérojonction ont un grand potentiel pour être la technologie verte par excellence dans le futur. Cependant, leur coût de fabrication plus élevé doit être compensé par des rendements de conversion bien supérieurs.

En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction, l'analyse et l'interprétation des résultats. Le logiciel SCAPS compte parmi les outils de simulation les plus développés dans l'étude des cellules solaires.

Nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction CdS/GaAs. En variant l'épaisseur de la couche absorbante, ensuite celle de la couche tampon, aussi nous avons étudié l'influence de la variation de la concentration de dopage accepteur et donneur à l'aide du logiciel SCAPS et visualisé les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert, Courant de court-circuit, Facteur de forme et le rendement de conversion. Cette étude nous a permis d'optimiser le rendement électrique de la structure GaAs/ZnO/ZnO:Al pour une épaisseur de 2200nm et un dopage ND de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche tampon et épaisseur de 5000nm et un dopage NA de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ pour la couche absorbante.