

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

Faculté de Technologie
Département d'Electronique

N° : ME/2022



FILIÈRE : Electronique
OPTION : Microélectronique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

CHELALI Nour El Houda et SOUIDI Nadjat

THÈME

Développement des performances des cellules solaires

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BOURAS Mounir	Université M ^{ed} Boudiaf -M'sila	Président
Dr. HADJAB Moufdi	Université M ^{ed} Boudiaf -M'sila	Rapporteur
Mme. BOUZIDI Amina	Université M ^{ed} Boudiaf -M'sila	Co-Rapporteur
Dr. BENNACER Hamza	Université M ^{ed} Boudiaf -M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022





Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné
la vie, qui*

*S'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite,
à ma mère ...*

*A mon père, qui a été mon ombre durant
toutes les années*

*D'étude, qui a veillé à me donner l'aide, à
m'encourager et à*

Me protéger, que dieu les garde et les protège.

A mes frères et mes soeurs

A mon mari

A l'instituteur primaire

A mes très chers amis

A tous ceux qui m'aiment

A tous ceux que j'aime

Je Dédie ce travail

A toutes les personnes qui sont chères à mon cœur



N. Chelali



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :
À mes très chers parents pour leurs
patience et leurs aides durant
toutes ces longues années.
À mes sœurs : Rbaiha, Khaira, Fraiha,
Mbarka, Awatif
À mes frères: Ali, Salah, Djamel, Aziz, Ahmed
À toute ma famille et paternelle maternelle
À tous mes amies sortou Nour El Houda
A tous mes enseignants qui ont contribué à ma
formation jusqu'à ce jour
À toute ma promotion « 2021/2022 »



N. Souidi

REMERCIEMENTS

❖ *Nous remercions Allah tout puissant d'avoir me donner la force et le Courage d'établir ce modeste travail. Je tiens à remercier particulièrement notre encadrants Mme. Bouzidi Amina et Dr. Moufdi Hadjab, qu'ont approuvé de superviser mon humble travail, qui a fourni des conseils judicieux et ainsi son exigence de rigueur. Ses compétences et ses bonnes directives m'ont aidé à achever ce mémoire de*

Master.

❖ *Nous tenons également à remercier les membres du jury Dr. Bouras Mounir et Dr. Hamza Bennacer de l'université MOHAMED Boudiaf de M'sila, qi ont accepté d'examiner et de juger ce modeste travail.*

Nous tenons également à remercier tous mes enseignants de département de

Electronique.

❖ *Enfin, Nous remercions tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*



Dédicaces.....	I
Remerciements.....	III
Table des matières	IV
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des symboles et des abréviations.....	VI
Introduction Générale.....	01

Chapitre I : Les cellules solaires

I.1. Introduction	05
I.2. L'énergie photovoltaïque	05
I.3. Différent types de dopage.....	05
I.3.1 Le dopage de type n (négatif).....	05
I.3.2 Le dopage de type p (positif).....	06
I.4. La Jonction p-n.....	06
I.5. Structure cellules photovoltaïques.....	07
I.6. Les différents types de cellules photovoltaïques	08
I.6.1 Les cellules solaires au silicium	08
I.6.1.1. La cellule photovoltaïque monocristalline	08
I.6.1.2. La cellule solaire poly cristallin.....	09
I.6.1.3. La cellule solaire amorphe.....	09
I.6.2. Les cellules solaires à couche mince.....	10
I.6.2.1. La cellule solaire à base de chalcopyrite (CIGS)	10
I.6.2.2. La cellule solaire à base de tellure de cadmium (CdTe)	10
I.6.3. La cellule solaire à base de (CZTS).....	11
I.6.4. La cellule solaire pérovskite.....	11
I.6.5. Les cellules photovoltaïque multi-jonction.....	12
I.6.6. Les cellules solaires organiques.....	12
I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	13
I.8. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	14
I.8.1. Cellule photovoltaïque idéal.....	14
I.8.2. Cellule photovoltaïque réel.....	15
I.9. Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire.....	16
I.9.1. Courant de court-circuit (V_{oc})	16

I.9.2. Tension de circuit ouvert (J_{SC})	17
I.9.3. Puissance maximale (P_{max}).....	17
I.9.4. Facteur de forme (FF)	17
I.9.5. Rendement de conversion (η)	17
I.10. Les avantages et les inconvénients de la cellule photovoltaïque.....	17
I.10.1. Les avantages.....	17
I.10.2. Les inconvénients.....	18
I.11. Les applications.....	18
I.11.1. Contée du réseau.....	18
I.11.2. Intégration sur le bâti	19
I.11.3. Systèmes de pompage.....	19
I.11.4. L'engin spatial.....	20
I.12. Conclusions.....	21
Références.....	22

Chapitre II : Généralités sur CdTe et CdS

II.1. Introduction.....	25
II.2. Propriétés fondamentales du CdTe.....	25
II.2.1. Structure cristalline du CdTe.....	25
II.2.1.1. La structure Quartzite.....	26
II.2.1.2 La structure sphalérite.....	26
II.2.2. La structure de bande.....	27
II.2.2.1. Bandes d'énergie.....	27
II.2.2.2. La structure de bande de CdTe.....	28
II.2.3. Diagramme de phase.....	30
II.2.3.1. Diagramme de phase composition-température.....	30
II.2.3.2. Le diagramme de phase pression-température.....	32
II.2.4. Propriétés optiques et électriques.....	31
II.2.4.1. Semi-conducteur à gap direct.....	31
II.2.4.2. Semi-conducteur à gap indirect.....	31
II.3. Propriétés fondamentales du CdS.....	32
II.3.1. Semi-conducteur CdS.....	32
II.3.2. Structure cristalline de CdS.....	32
II.3.3. Propriétés du CdS.....	34

II.3.4. Propriétés physiques du sulfure de cadmium.....	35
II.3.5. Les propriétés optiques.....	35
II.3.6. Structure électrique de bandes.....	35
II.3.7. Applications des couches minces de CdS.....	35
II.4. La cellule CdTe / CdS.....	35
II.4.1. Propriétés des différentes couches.....	36
II.4.1.1. Le substrat.....	36
II.4.1.2. Le contact arrière.....	36
II.4.1.3. Couche absorbeur.....	37
II.4.1.4. La Couche tampon.....	37
II.4.1.5. La Couche fenêtre.....	37
II.4.1.6. Contact avant.....	38
II.5. Conclusion.....	39
Références.....	40

Chapitre III : Résultats de Simulation et Discussions

III.1. Introduction.....	43
III.2. Description du logiciel SCAPS.....	43
III.3. La structure et les paramètres de la cellule solaire.....	45
III.4. Résultats et discussion.....	47
III.4.1. Effets de l'épaisseur de la couche absorbeur CdTe.....	47
III.4.2. Effets de l'épaisseur de la couche tampon CdS.....	47
III.4.3. Effets de la concentration du dopant Na de la couche absorbeur CdTe.....	48
III.4.4. Effets de la concentration du dopant Nd de la couche tampon CdS.....	49
III.4.5. Effets de l'énergie de gap de la couche absorbeur CdTe.....	50
III.4.6. Effets de la température dans la cellule solaire.....	51
III.4.7. Cellule solaire CdTe /CdS	52
III.5. Conclusion.....	54
Références.....	55
Conclusion Générale	56
Résumé – Abstract – ملخص	

- Figure I.1.** Présentation schématique du silicium dopé n.
- Figure I.2.** Présentation schématique du silicium dopé p.
- Figure I.3.** Jonction p-n, séparation des charges photo générées.
- Figure I.4.** Cellules solaires photovoltaïques.
- Figure I.5.** Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire.
- Figure I.6.** Cellules en silicium monocristallin.
- Figure I.7.** Cellules solaires en silicium.
- Figure I.8.** Cellules en silicium amorphe.
- Figure I.9.** Cellules solaires CIGS.
- Figure I.10.** Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%.
- Figure I.11.** Cellule photovoltaïque multi-jonctions.
- Figure I.12.** Cellules solaires organiques.
- Figure I.13.** Le principe de la cellule photovoltaïque.
- Figure I.14.** Modèle de cellule photovoltaïque idéal.
- Figure I.15.** Modèle de cellule photovoltaïque réel.
- Figure I.16.** Courant de court-circuit.
- Figure I.17.** la cellule photovoltaïque Contée du réseau.
- Figure I.18.** Générateur photovoltaïque intégré sur le bâti.
- Figure I.19.** photovoltaïque sur Systèmes de pompage.
- Figure I.20.** photovoltaïque sur l'engin spatial.
- Figure II.1.** (a) structures sphalérite, (b) structure würtzite de CdTe observées dans les directions normales à $[011]$ et $[110]$
- Figure II.2.** Maille élémentaire de la structure de CdTe (Blende de Zinc)
- Figure II.3.** Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériau.
- Figure II.4.** Première zone de Brillouin d'un réseau blende de zinc.
- Figure II.5.** Structure de bande électronique de CdTe déterminée par la méthode du pseudo-potentiel empirique incluant le couplage spin-orbite.
- Figure II.6.** diagramme de phase composition-température de CdTe.
- Figure II.7.** Diagramme de phase pression-température de CdTe.
- Figure II.8.** Transitions électroniques entre les extrêmes des bandes de valence et de conduction : Gauche (semi-conducteur à gap direct, les transitions sont verticales radiatives). Droit) semi-conducteur à gap indirect, les transitions sont obliques (non radiatives).
- Figure II.9.** Maille Wurtzite et Maille blende
- Figure II.10.** Schéma simplifié d'une photopile en couches minces de type CIGS

Figure III.1. Fenêtre du logiciel SCAPS pour écrire les paramètres d'une cellule.

Figure III.2. Exemple de simulation d'une cellule CdTe/CdS/SnO_x dans SCAPS.

Figure III.3. Les schémas de la cellule introduit au simulateur à base de CdTe.

Figure III.4. Les caractéristiques Voc, Jsc, FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche CdTe.

Figure III.5. Les caractéristiques Voc, Jsc, FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

Figure III.6. Variation de la Voc et du J_{SC} et FF et Rendement en fonction de la concentration du dopant Na (CdTe).

Figure III.7. Variations de la Voc et du J_{SC} et FF et Rendement en fonction de la concentration du dopant Nd(CdS).

Figure III.8. Variation de la Voc et du J_{SC} et FF et Rendement en fonction de l'énergie de gap CdTe.

Figure III.9. Effet de la température sur les paramètres de sortie de la cellule.

Figure III.10. Caractéristique courant tension J(V) d'une cellule solaire éclairée.

Tableau II.1. Valeurs de quelques paramètres physiques de CdTe

Tableau III.1. Quelques propriétés physiques et chimiques des éléments CdTe, CdS et S_nO_x .

Tableau III.2. Les caractéristiques V_{oc} , J_{sc} , FF et η de la cellule solaire CdTe.

Tableau III.3. Différents travaux d'une cellule solaire CdTe.

I_{ph}	Le photo-courant (mA)
R_s	La résistance série (Ω)
R_p	La résistance parallèle (Ω)
I_s	Courant de saturation (mA /cm ²)
I	Courant de la cellule (mA)
V	La tension électrique (V)
V_{th}	Le potentiel thermique
K	La constante de Boltzmann (J/K ou eV /K)
T	La température absolue (K)
q	La charge électrique d'un électron en valeur absolue (C)
η	Rendement de la cellule (%)
V_{oc}	Tension de court-circuit (V)
P_m	Puissance maximale (Watt/cm ²)
I_m	Curant du point du fonctionnement (mA /cm ²)
V_m	Tension du point du fonctionnement (Watt /mA)
FF	Le facteur de forme (%)
P	La zone p de la jonction (cm ⁻³)
N	La zone n de la jonction (cm ⁻³)
E_c	Energie du bas de la bande de conduction J ou eV
E_v	Energie du haut de la bande de valence J ou eV
E_g	L`énergie de bande interdite (eV)
N_d	Dopage de l'absorbeur CdTe (cm ⁻³)
N_a	Dopage de la couche tampon CdS (cm ⁻³)
PV	Photovoltaïque
GPV	Un générateur photovoltaïque
PPM	Un point de puissance maximale
CdTe	Tellurure de cadmium
CdS	Sulfure de cadmium
SnOx	Oxyde d'étain
GaAs	L'arséniure de gallium
I -V	Les caractéristiques courant-tension
C-V	La capacitance en fonction de la tension
C-f	La capacitance en fonction de la fréquence
Q-E	Le rendement quantique (Réponse spectrale) (%)
SCAPS 1-D	Le logiciel 1 Dimension Solar Cell Capacitance Simulator
AM 1.5	Spectre de la lumière solaire
Mo	Molybdène

Introduction générale

Introduction générale

Le photovoltaïque est le processus de conversion de la lumière solaire directement en électricité à l'aide de cellules solaires [1]. Aujourd'hui, il s'agit d'une alternative renouvelable en croissance rapide et de plus en plus importante à la production d'électricité à partir de combustibles fossiles classiques, mais par rapport aux autres avec les premiers dispositifs photovoltaïques pratiques démontrés dans les années 1950. La recherche et le développement du photovoltaïque ont reçu leur premier coup de pouce majeur de l'industrie spatiale dans les années 1960 qui a nécessité une alimentation électrique séparée du "réseau" pour les applications satellitaires. Ces cellules solaires spatiales étaient plusieurs milliers de fois plus chères qu'elles ne le sont aujourd'hui et le besoin perçu d'une méthode de production d'électricité en dehors du réseau électrique était encore à une décennie, mais les cellules solaires sont devenues une variation scientifique intéressante au développement rapide de transistors de silicium avec plusieurs marchés de niche potentiellement spécialisés. Il a fallu la crise du pétrole des années 1970 pour attirer l'attention du monde entier sur l'opportunité de recourir à des sources d'énergie alternatives pour l'utilisation terrestre, ce qui a favorisé l'étude du photovoltaïque comme moyen de production d'énergie terrestre. Bien que la crise du pétrole ait été de courte durée et que l'incitation financière au développement des cellules solaires ait diminué, les cellules solaires sont entrées dans l'arène en tant que technologie génératrice d'énergie. Leur application et leur avantage dans la zone d'alimentation "à distance" ont été rapidement reconnus et ont incité le développement de l'industrie photovoltaïque terrestre. Des applications transportables à petite échelle (comme des calculatrices et des montres) ont été utilisées et les applications à distance ont commencé à bénéficier de l'énergie photovoltaïque. Dans les années 1980, la recherche sur les cellules solaires au silicium a porté ses fruits et les cellules solaires ont commencé à accroître leur efficacité. En 1985, et aujourd'hui, les cellules solaires sont reconnues non seulement comme un moyen de fournir de l'électricité et une meilleure qualité de vie à ceux qui n'ont pas accès au réseau, mais aussi comme un moyen d'alimenter le réseau.

Dans ce présent mémoire, nous donnons un Vue d'ensemble sur les cellules solaires, leur principe de fonctionnement, différents types et propriétés électriques et nous décrivons la structure d'une cellule solaire à base de CdTe, le rôle et les caractéristiques des différentes couches constituant la cellule. Ensuite nous avons utilisé une simulation numérique pour étudier les caractéristiques de la cellule solaire SnOx/CdS/CdTe en utilisant le logiciel de simulation

SCAPS-1D Nous avons étudié l'effet de Température de l'épaisseur des différentes couches (la couche tampon et la couche absorbante), Na_CdTe et Nd_CdS sur le courant de court-circuit JSC, la tension de circuit ouvert V_{OC} , le rendement η . Ensuite, l'effet de l'énergie de la bande interdite du CdTe sur les différents paramètres de la cellule. L'objectif de ce présent mémoire est de faire une modélisation de l'effet des épaisseurs, dopage et énergie du gap sur les caractéristiques électriques d'une cellule solaire à base de CdTe en vue d'optimiser par simulation en utilisant le logiciel SCAPS- 1D pour simuler les caractéristiques physiques (densité de courant de court-circuit JSC, tension de circuit ouvert Voc, Facteur de forme FF, Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée (η)).

Le mémoire comprend trois chapitres, dans le premier chapitre, nous présenterons quelques notions de base sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque, le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitants. Puis nous aborderons l'influence de ces paramètres sur la caractéristique des cellules photovoltaïques.

Le deuxième chapitre a été consacré à la description des matériaux utilisés pour la conception et la simulation de la cellule solaire tels que : le CdS et le CdTe..

Au dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus dans cette étude et leurs interprétations.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale résume l'essentiels de nos résultats.

Chapitre I

Les cellules solaires

I.1 Introduction

Les cellules photovoltaïques sont l'un des meilleurs moyens de générer des électrons en utilisant des cellules solaires pour convertir l'énergie solaire en électrons. L'effet des cellules photovoltaïques est dû à la stimulation des électrons de photons de lumière pour passer d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie plus élevé et obtenir ainsi le courant électrique. L'effet des cellules photovoltaïques a été observé pour la première fois par Alexander-Edmond Baker en 1839.

I.2 L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM).

I.3 Différent types de dopage

I.3.1 Le dopage de type n (négatif)

Il consiste à introduire des atomes étrangers dans la structure cristalline d'un semi-conducteur qui ont des électrons en excès (chargés négativement) et ont une liberté de mouvement dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si) dans un matériau de type n, le profil de concentration des électrons libres.

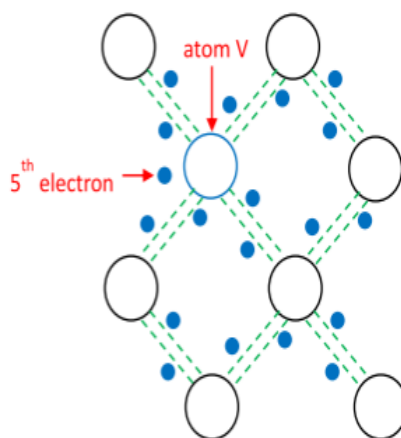


Fig I.1 Présentation schématique du silicium dopé n [2].

I.3.2 Le dopage de type p (positif)

Les atomes qui s'insèrent dans le réseau cristallin créent un trou sont les atomes utilisés. Le bore (b) est le dopant p le plus utilisé du silicium. Lorsque deux activateurs différents (type n et type p) sont effectués des deux côtés de la cellule et après recombinaison de charges libres (électrons et trous), le résultat est, un champ électrique statique produit par la présence d'un positif et d'un négatif constant.

Dans le courant de la cellule photovoltaïque, ces charges électriques résultant de l'absorption du rayonnement peuvent contribuer [3].

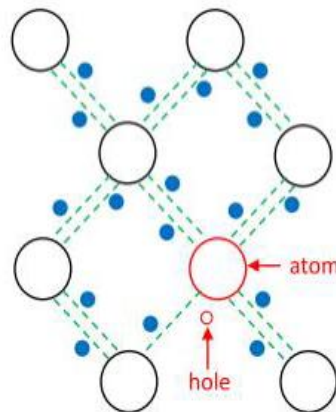


Fig I.2 Présentation schématique du silicium dopé p [2].

I.4 La Jonction p-n

La différenciation du dopage entraîne brusquement une jonction p-n et l'émergence d'une zone de cristal, passant du dopage p au dopage n. Lorsque la région dopée p entre en contact avec la région n, les trous et les électrons sont involontairement distribués aux deux extrémités de la jonction, résultant en un espace de pénétration dans lequel la concentration de porteurs libres est pratiquement inexistante. Par contre, on voit qu'il y a un conducteur, qui est un semi-conducteur dopé donc la jonction rend difficile la pénétration du courant à l'extérieur [3].

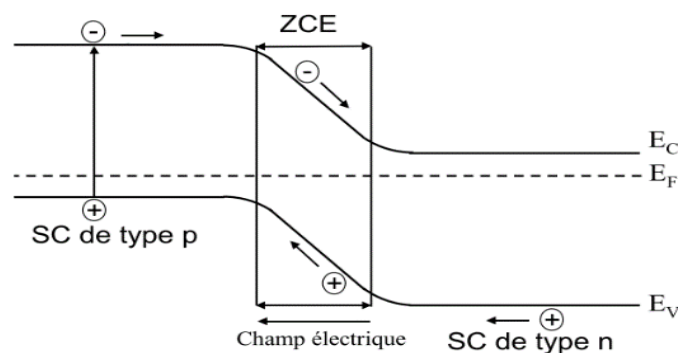


Fig. I. 3 Jonction p n, séparation des charges photo générées.

I.5 Structure cellules photovoltaïques

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [1]. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. Sa structure est illustrée dans la **figure I.3** ci-dessous. Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe.



Fig I.4 .Cellules solaires photovoltaïques [1].

La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur ; où la jonction P-N représente le cœur de la cellule photovoltaïque ; elle représente le vrai générateur dans le dispositif.

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photogénèses, pour ça; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n [4].

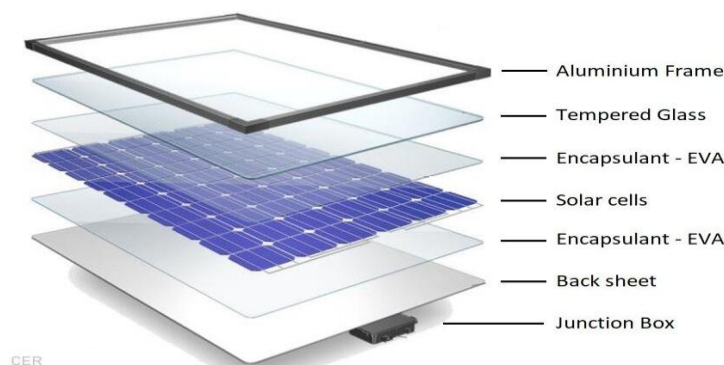


Fig I.5 : Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire [5].

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépendant fortement de la réflectivité (elle est définie comme le rapport entre le flux réfléchi et le flux incident [6] de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte de rayonnement incident. Afin de minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est traitée pour forcer le rayonnement à pénétrer dans le semi-conducteur ; couramment par une couche anti-réfléchissante obtenue par dépôt d'une couche d'oxyde sur le semi-conducteur. L'effet d'interférence obtenu au sein de couche d'oxyde permet de piéger le rayonnement incident [4].

Pour optimiser les pertes dues à la réflexion, il existe une autre préparation de la surface réceptrice du semi-conducteur : la texturation ; opération consiste à créer des pyramides de quelques microns de hauteur modifiant la planéité de la surface en introduisant un relief. Ce dernier, tout en augmente la surface, induit des réflexions multiples sur les facettes le constituant, pigeant ainsi un maximum du rayonnement incident et limiter la réflectivité de la surface [4]. La texturation de surface peut se faire par [7] voie chimique, par voie mécanique, par gravure plasma ou par utilisation de silicium poreux.

I.6 Les différents types de cellules photovoltaïques

Sur le plan technologique ; plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

I.6.1 Les cellules solaires au silicium

I.6.1.1 La cellule solaire monocristalline

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple [8].

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [6] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.



Fig I.6 Cellules en silicium monocristallin.

I.6.1.2 La cellule solaire poly cristallin

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [9].



Fig I.7 cellules solaires en silicium [10].

I.6.1.3 La cellule solaire amorphe

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polys cristallins. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie [6] entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée).



Fig I.8 Cellules en silicium amorphe.

I.6.2 Les cellules solaires à couche mince

I.6.2. 1 La cellule solaire à base de chalcopyrite (CIGS)

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau semi-conducteur fait d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est disposé en couche très fine sur un support.



Fig I.9 cellules solaires CIGS [10].

I.6.2. 2 La cellule solaire à base de tellure de cadmium (CdTe)

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé lui aussi à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, c'est du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.



Fig I.10 Modules verre-verre au Telluride de Cadmium, efficacité de 9 à 11%.

I.6.3 La cellule solaire à base de (CZTS)

Ce sont des matériaux non toxiques et disponibles en grande quantité sur la surface de la Terre. Ces cellules sont composées de pellicules fines qui absorbent l'énergie solaire sur leur support (verre, plastique, etc.). Le rendement est toutefois moyen, tandis qu'on ne peut pas encore définir sa durée de vie, ni le coût de ces panneaux solaires.

I.6.4 La cellule solaire pérovskite

Une cellule photovoltaïque à pérovskite est un type de cellule photovoltaïque dont la couche active est constituée d'un matériau de formule générale ABX_3 à structure pérovskite dans laquelle A est un cation, généralement de méthylammonium $CH_3NH_3^+$ (MA), de formamidinium $CH(NH_2)^{2+}$ ou de césium Cs^+ , B est un cation d'étain Sn^{2+} ou de plomb Pb^{2+} , et X est un anion halogénure tel que chlorure Cl^- , bromure Br^- ou iodure I^- .

Le rendement des cellules photovoltaïques utilisant ces matériaux est en constante augmentation depuis la fin des années 2000. Elle est passée de 3,8 % en 2009 à 25,2 % en 2019⁴, et 29.1 % pour le tandem de pérovskite et de silicium [11], soit une efficacité supérieure aux cellules photovoltaïques à jonction p-n en silicium. Les cellules à pérovskites sont donc à ce jour la technologie solaire ayant connu le développement le plus rapide de l'histoire [12].

I.6.5 Les cellules photovoltaïques multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion [13].

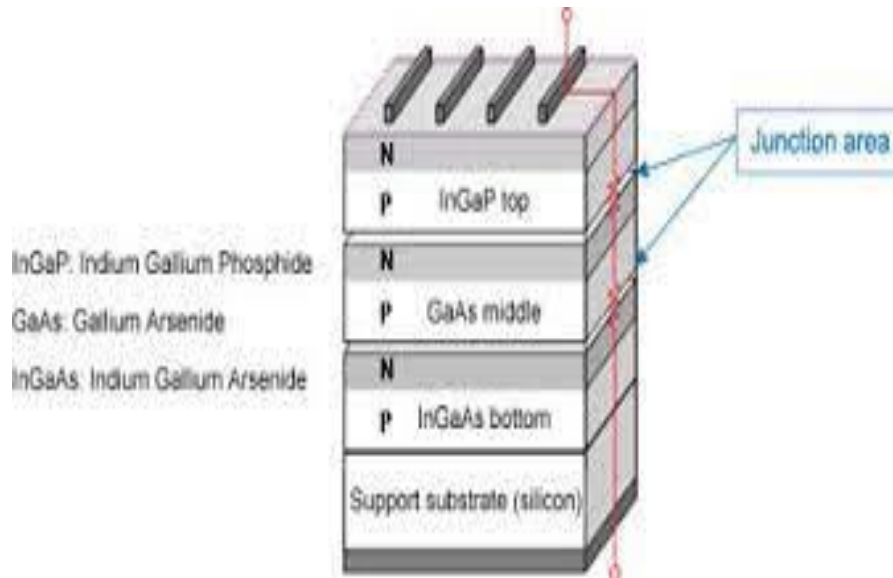


Fig I.11 Cellule photovoltaïque multi-jonctions.

I.6.6 Les cellules solaires organiques

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [14].

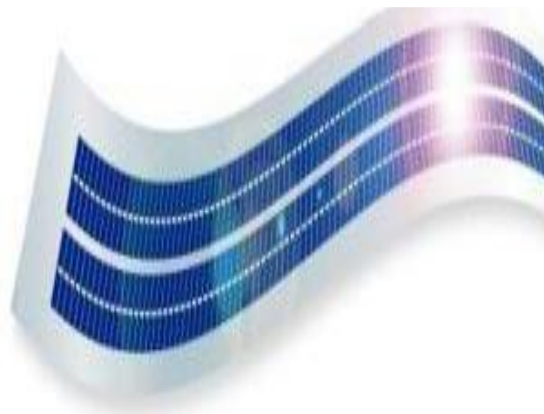


Fig I.12 cellules solaires organiques [10].

I.7 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque (cellule solaire ou encore photopile) est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs que, percutés par les photons. La **fig.I.13** montre le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [15] avec les principales régions dans lesquelles les photons incidents peuvent créer des porteurs libres.

Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant la région de leur création. Dans les zones électriquement neutres (p) et (n), les porteurs minoritaires générés par les photons diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique E vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs de charges contribuent donc au courant de la cellule photovoltaïque par leurs diffusions, cette composante est appelée courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p, donnant naissance à un courant de génération.

Il convient donc de noter que la conversion de l'énergie solaire en électricité est possible si et seulement si trois phénomènes physiques de base ont lieu quasi simultanément :

- L'absorption d'un maximum de photons possible,
- La transformation de l'énergie ainsi absorbée en charges électriques libres,
- La collecte, sans perte, de ces derniers vers un circuit électrique extérieur.

Le premier phénomène est l'absorption optique de photons par un matériau semi-conducteur approprié dans la partie la plus intense du spectre solaire [14] **Fig.I.13**. Si l'on prend un semi-conducteur à grand gap, l'absorption sera limitée aux petites longueurs d'onde, dans l'ultra-violet, alors que la partie la plus importante du spectre solaire se situe dans le visible et le proche infrarouge. Pour absorber un maximum de photons, il faudrait donc un semi-conducteur possédant un petit gap. Mais alors la tension de sortie, proportionnelle au gap et donc la puissance de la photopile ($P = I V$), seraient trop faibles pour exploiter cette pile. La valeur optimale du gap du matériau utilisé comme absorbeur se situe vers 1,5 eV.

Le second, c'est la séparation rapide des électrons et des trous avant leur recombinaison. Quant au troisième, c'est l'entraînement des électrons et des trous vers les électrodes collectrices (collecte des porteurs).

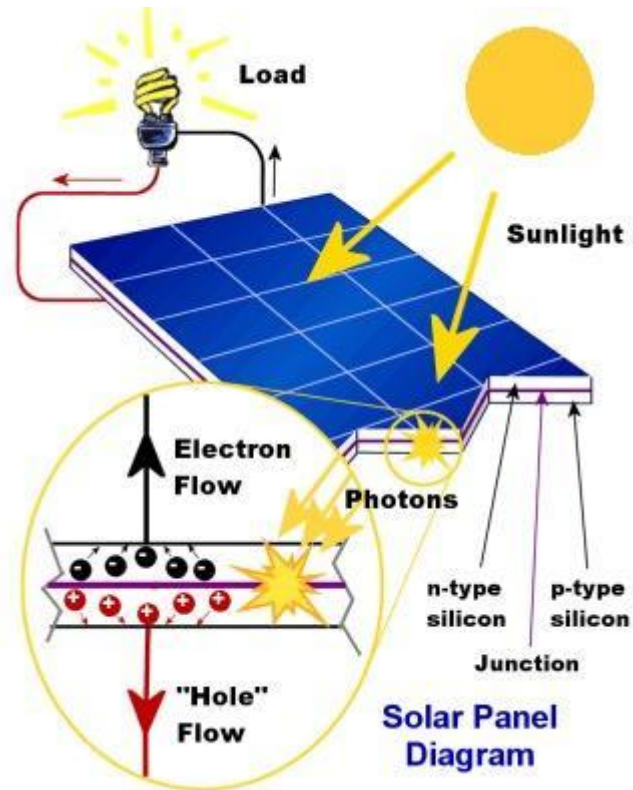


Fig I.13 Le principe de la cellule photovoltaïque.

I.8 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

I.8.1 Cellule photovoltaïque idéal

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la figure : I.4 Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente en parallèle avec une diode.

$$I = I_{PH} - I_D \tag{1}$$

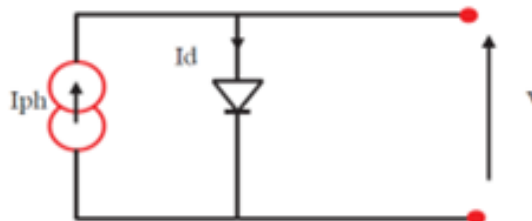


Fig I. 14 modèle de cellule photovoltaïque idéal [10].

$$V = V_d \tag{2}$$

$$I_d = I_0 \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

Donc la relation (1) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (4)$$

I.8. 2 Cellule photovoltaïque réel

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la **fig.I.15** inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt [1, 2], le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante [3, 4, 5] dans cette équation :

$$I = I_{PH} - I_0 \left(\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{aKT}\right) - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (5)$$

I_{PH} : est le photo-courant d'une cellule

I₀ : est le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule

q : désignent respectivement la charge de l'électron

A : facteur d'idéalité de la diode

K : Constante de Boltzmann

T : la température de la cellule

V : est la tension aux bornes de la cellule,

I : est le courant de la cellule

R_s : sont les résistances série et shunt de la cellule.

R_p : sont les résistances série et shunt de la cellule.

Le model photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p .

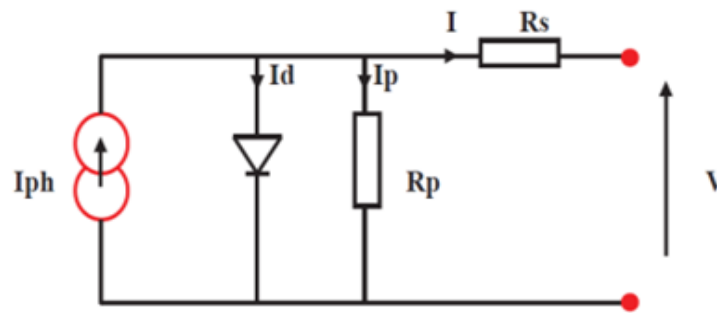


Fig I.15. modèle de cellule photovoltaïque réel [10].

$$I_p = \left(\frac{v+R_s}{I R_p} \right) \tag{5}$$

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{(v+R_s.I) V_t}{V_t} \right) - 1 \right) \tag{6}$$

Donc (4) sera :

$$I_0 \left(\exp \left(\frac{(v+R_s)}{I V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{(v+R_s)}{I R_p} \right) \tag{7}$$

I.9 Les différentes caractéristiques d’une cellule solaire

Sur le plan technologique ; plusieurs caractéristiques de cellules solaires sont distinguées :

I.9.1 Courant de court-circuit (V_{oc})

Est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement et en court-circuitant les bornes de la cellule (sans application de tension). Il croit linéairement avec l’intensité d’illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d’onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

$V=0 ; I=I_{SC}=I_{PH}$

En schéma

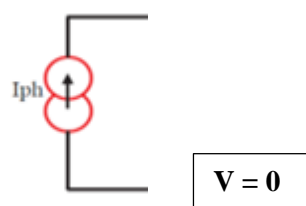


Fig I.16 Courant de court-circuit.

I.9.2 Tension de circuit ouvert (J_{sc})

Est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans la cellule. Le Tension de circuit ouvert est définie par la relation suivante :

$$V_{OC} = m \cdot V_t \cdot \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 \right) \quad (8)$$

I.9.3 Puissance maximale (P_{max})

La puissance délivrée par une cellule solaire est maximum quand le produit $I \cdot V$ est maximum.

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (9)$$

I.9.4 Facteur de forme (FF)

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{OC} \cdot I_{sc}} \quad (10)$$

I.9.5 Rendement de conversion (η)

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [16].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (11)$$

I.10 Les avantages et les inconvénients de la cellule photovoltaïque

I.10.1 Les avantages

L'utilisation des cellules solaires a de nombreuses touches positives, y compris :

- L'énergie solaire est une source sûre pour l'environnement et ne provoque aucune forme de pollution atmosphérique.
- C'est une source non polluante, et elle n'est exécutée que dans la cour de l'univers.

- Opérer en silence et ne faire aucun bruit.
- Vous n'avez pas besoin d'entretien.
- Production d'électricité près des consommateurs.

I.10.2 Les inconvénients

Il y a aussi certaines lacunes, notamment :

- Le manque de disponibilité du Soleil tout au long de la journée, et sa présence ou son absence change avec le changement des chapitres d'année rendant cette source instable pour beaucoup.
- Il ne peut pas produire d'énergie la nuit.
- Les panneaux solaires doivent être constamment nettoyés, et la poussière ou les objets qui cachent les panneaux de verre doivent être enlevés des rayons du soleil.
- Tu as besoin de beaucoup d'espace.
- Besoin de stockage d'énergie.

I.11 Les applications

I.11.1 Contée du réseau

Centrale de production d'énergie photovoltaïque Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, il y a un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées depuis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais elles sont encore au stade pilote. Seules les centrales photovoltaïques de moyenne et faible puissances (0,1 à 0,5 MW) semblent avoir une rentabilité économique. Elles seront vraisemblablement destinées à compléter le réseau en différents points critiques.



Fig.17 la cellule photovoltaïque Contée du réseau.

I.11.2 Intégration sur le bâti

L'intégration sur le bâti consiste à installer le générateur photovoltaïque sur la couverture de la toiture.



Fig.18 Générateur photovoltaïque intégré sur le bâti.

I.11.3 Systèmes de pompage

Le PV est également utilisé pour alimenter des installations de pompage pour l'irrigation, l'eau potable dans les zones rurales et l'eau du bétail, ou le dessalement de l'eau par les systèmes.

Les systèmes de pompage photovoltaïques (comme ceux alimentés par l'énergie éolienne) sont très utiles lorsqu'il n'est pas possible d'accéder au réseau électrique général ou qu'il s'agit d'un prix prohibitif. Leur coût est généralement moins élevé en raison de leurs coûts d'exploitation et de maintenance plus faibles et leur impact sur l'environnement est inférieur à celui des systèmes de pompage alimentés par des moteurs à combustion interne, qui sont également moins fiables.

Les pompes utilisées peuvent être du courant alternatif (AC) ou du courant continu (DC). Normalement, les moteurs à courant continu sont utilisés pour les petites et moyennes applications jusqu'à 3 kW de puissance, tandis que pour les applications plus importantes, les moteurs à courant alternatif sont couplés à un onduleur qui transforme le courant continu des panneaux photovoltaïques pour son utilisation. Cela permet de dimensionner des systèmes de 0,15 kW à plus de 55 kW de puissance, qui peuvent être utilisés pour alimenter des systèmes d'irrigation complexes ou un stockage d'eau [17].



Fig.19 Photovoltaïque sur Systèmes de pompage.

I.11.4 L'engin spatial

Les panneaux solaires sur les engins spatiaux sont généralement la seule source d'énergie pour faire fonctionner les capteurs, le chauffage et le refroidissement actifs et les communications. Une batterie stocke cette énergie pour l'utiliser lorsque les panneaux solaires sont dans l'ombre. Dans certains cas, l'électricité est également utilisée pour la propulsion d'engins spatiaux – la propulsion électrique. Les engins spatiaux ont été l'une des premières applications du photovoltaïque, à commencer par les cellules solaires au silicium utilisées sur le satellite Vanguard 1 lancé par les États-Unis en 1958. Depuis, l'énergie solaire a été utilisée dans des missions allant de MESSENGER à Mercury. Loin dans le système solaire comme la sonde Juno à Jupiter. Le plus grand système d'énergie solaire utilisé dans l'espace est le système électrique de la station spatiale internationale. Pour augmenter la puissance générée par kilogramme, les panneaux solaires types des engins spatiaux utilisent des cellules solaires multi-jonctions rectangulaires à haute efficacité, à coût élevé et à faible encombrement, constituées d'arséniure de gallium (GaAs) et d'autres matériaux semi-conducteurs.



Fig.20 photovoltaïque sur l'engin spatial.

I.12 Conclusion

Ce premier chapitre est consacré à la production d'électricité par conversion de la lumière du soleil à l'aide de cellules solaires, le but était de donner au lecteur un minimum de connaissances des principes de la conversion photovoltaïque, incluant des notions relatives à l'énergie transmise par le soleil, ainsi que quelques éléments de physique des semi-conducteurs et des principaux mécanismes de transport des charges électriques. Les caractéristiques électriques fondamentales (tension, courant et rendement de conversion) du dispositif photovoltaïque.

Références

- [1] S. Beghdadi, "étude des performances d'une cellule solaire de type Cu (In, Ga) Se₂(CIGS)" mémoire de master, université Abou Beker Belkaid Tlemcen, (2016)
- [2] N. Richet, "Présentation et fonctionnement des cellules solaires standard en silicium massif. In" Les cellules photovoltaïques en silicium: théorie et fabrication" .EDP Sciences, (2021) 5-82.
- [3] W. Guebouri, H. Hamlaoui, "Simulation de cellule solaire MASnBr₃ à base de programme SCAPS), (2021) 8-9.
- [4] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque, physique et technologie de la conversion photovoltaïque, 1ère édition, ELLIPES, Paris, (1993).
- [5] Y. Veschetti, "Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince", Thèse de doctorat, discipline: physique des semi-conducteurs, université Louis Pasteur (Strasbourg I), (2005).
- [6] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, (2006).
- [7] S. Quoizola, "Épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mes poreux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût", Thèse de doctorat, école doctorale : électronique, électrotechnique et automatisme, spécialité : dispositifs de l'électronique intégrée, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, (2003).
- [8] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiersenergie> energie-renouvelable/les-differents-types-de-cellules-photovoltaïques, (dernier accès 15/04/2022) .
- [9] T. Zimmer. "Type de cellules photovoltaïques", Université de Bordeaux, France, 7- 8.
- [10] A. Oubouchou, "étude et simulation d'une cellule solaire à base couches minces". Mémoire de master, université Saad Dahlab De Blida, (2019) 22-24.
- [11] M. Goufi, B. Hamdouni, M. Bouhouche, "Etude et Simulation D'une Cellule Photovoltaïque à Pérovskite", (2021).
- [12] S. Collavini, F. Sebastian. Völker, J. L. Delgado, " Under standing the Out standing Power Conversion Efficiency of Pérovskite-Base Solaire Celler ", Angewandte Chemie International Edition, Wiley-Blackwell, 54 (15 juillet 2015).
- [13] https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaïques.

[14] A. Ricaud, "Photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières", matériaux et procédés, presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, (1997) .

[15] D. Youness, "Modélisation VHDL-AMS d'une cellule photovoltaïque", Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies, (2021).

[16] H. Maati, K. Bahlouli. "Etude des performances d'une cellule photovoltaïque à base D'InGaN", mémoire de Master, Université De Saïda Dr Moulay Tahar, (2018) 36-37.

[17] K. Amokrane, "Etude des performances des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable", Université de Bejaia-Abderrahmane Mira, (2008).

Chapitre II

Généralités sur CdTe et CdS

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais la cellule photovoltaïque fabriquée avec des semi-conducteurs sensibles aux longueurs d'ondes du rayonnement solaire. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM) Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit J_{sc} et la tension de circuit ouvert V_{oc} . La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. Il est plus ou moins éloigné du point de puissance maximale PPM, caractérisé par le courant et la tension optimaux [1,2] La puissance de sortie du (GPV) dépend de plusieurs facteurs climatiques, tels que l'ensoleillement et la température. Cependant, une poursuite en temps réel du point optimal de fonctionnement (MPP : Maximum Power Point) est nécessaire pour optimiser le rendement des cellules PV [3].

II.2 Propriétés fondamentales du CdTe

Le rendement d'une cellule solaire à base de CdTe dépend fortement des propriétés du matériau absorbeur. Comme dans le cas d'autres semi-conducteurs, la structure cristalline du CdTe ainsi que sa composition peuvent fortement influencer sur ses propriétés optiques et électroniques. La bonne compréhension de la structure de ce matériau est donc nécessaire dans le but d'optimiser un dispositif à base de CdTe [4].

II.2.1 Structure cristalline du CdTe

C'est un des matériaux binaires qui cristallisent dans la structure cubique blende de zinc : les atomes de cadmium et les atomes de tellure forment deux sous- réseaux cubiques à faces centrées décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de la grande diagonale du cube. La différence du paramètre de maille entre CdTe ($a_0 = 6,48 \text{ \AA}$) et ZnTe ($a_0 = 6,10 \text{ \AA}$) est très importante ($\approx 5,8\%$). Ce désaccord de maille joue un rôle primordial dans la réalisation d'hétérostructures et permet la réalisation de boîtes quantiques par épitaxie, comme nous le verrons plus loin.

Le semi-conducteur CdTe peut cristalliser dans deux structures différentes : la structure cubique « sphalérite » **fig.II.1a** et la structure hexagonale « Würtzite » **fig. II.1b**. La structure cubique est la plus stable dans les conditions normales de température et de pression [5].

On peut assister, sous certaines conditions, à des transitions de l'une à l'autre ou à l'existence des deux structures en même temps [5].

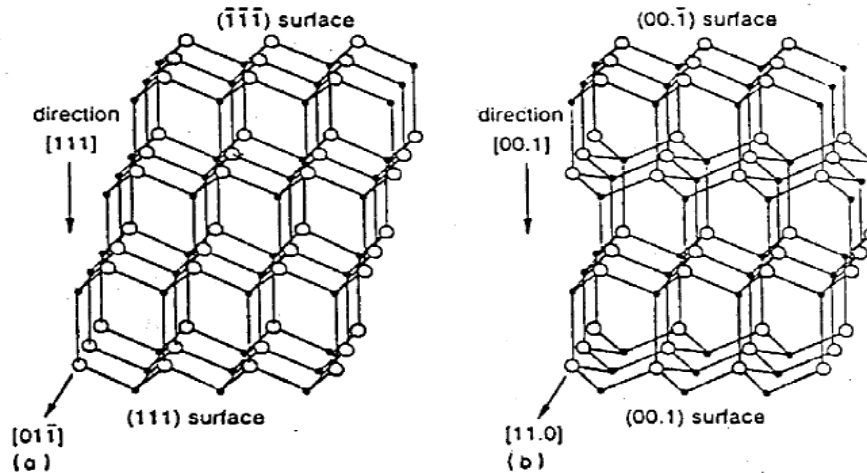


Fig.II.1 (a) structures sphalérite, (b) structure würtzite de CdTe observées dans les directions normales à [011] et [110]

II.2.1.1 La structure Quartzite

La maille élémentaire est composée de deux molécules du composé II-VI. Les atomes du groupe II occupent les positions $(0,0,0)$ et $(1/3,1/3,1/2)$ et les atomes du groupe VI occupent les sites $(0,0,u)$ et $(1/3,2/3,1/2+u)$, avec $u=3/8$; un atome du groupe II est entouré de quatre atomes du groupe VI disposés aux sommets d'un tétraèdre. Le groupe d'espace est $p63mc$.

II.2.1.2 La structure sphalérite

La maille élémentaire comporte quatre molécules du composé II-VI : les atomes du groupe II : $(0,0,0)$; $(0,1/2,1/2)$; $(1/2,0,1/2)$; $(1/2,1/2,0)$, et les atomes du groupe VI: $(1/4,1/4,1/4)$; $(1/4,3/4,1/4)$; $(3/4,1/4,1/4)$; $(1/4,3/4,3/4)$.

Chaque atome est entouré de quatre atomes de l'autre type, placés aux sommets d'un tétraèdre. Cette structure est appelée de type blende de zinc, référence à la cristallisation de ZnS . Le groupe d'espace est $F43m$.

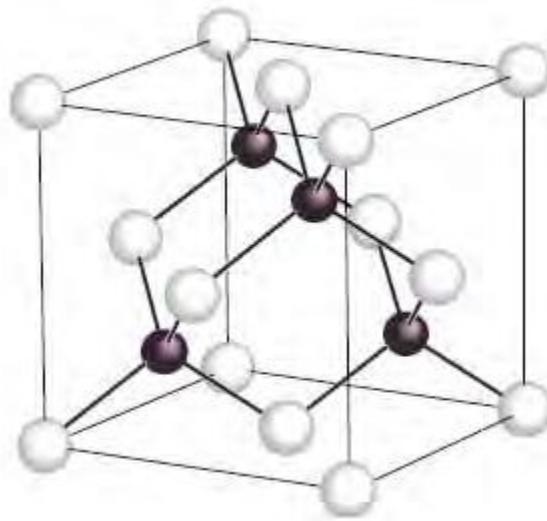


Fig.II.2 Maille élémentaire de la structure de CdTe (Blende de Zinc)

II.2.2 La structure de bande

II.2.2.1 Bandes d'énergie

Le comportement des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit via la théorie des bandes. Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut prendre des valeurs d'énergie comprises dans certain intervalle que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement bandes permises les quelles sont séparées par d'autres « bandes » appelées bandes interdites [6].

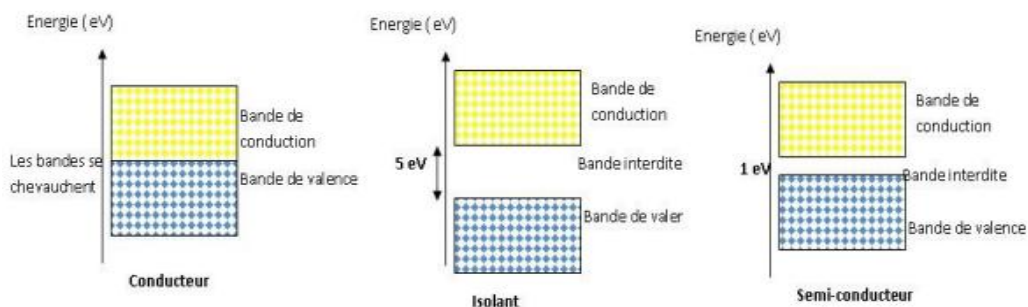


Fig II.3: Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériau [6].

Lorsque la température du solide tend vers le zéro absolu, deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier :

- La dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence »
- La bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction »
- La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du zéro absolu dans un semi-conducteur) soit semi-remplie (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide.

Dans les conducteurs (métaux), la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide.

Dans un semi-conducteur, comme dans un isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée couramment « gap ». L'unique différence entre un semi-conducteur et un isolant est la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives.

Dans un isolant, cette valeur est si grande (aux alentours de 6 eV pour le diamant par exemple) que les électrons ne peuvent passer de la bande valence à la bande de conduction : les électrons ne circulent pas dans le solide.

Dans les semi-conducteurs cette valeur est plus petite (1,12 eV pour le silicium, 0,66 eV pour le germanium, 2,26 eV pour le phosphore de gallium). Sion apporte cette énergie (ou plus) aux électrons, par exemple en chauffant le matériau, ou en lui appliquant un champ électromagnétique, ou encore dans certains cas en l'illuminant, les électrons sont alors capables de passer de la bande de valence à la bande de conduction, et de circuler dans le matériau [6].

II.2.2.2 La structure de bande de CdTe

Le matériau binaire CdTe est un semi-conducteur à bande interdite directe : le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence se situent au centre de la zone de Brillouin (point Γ sur la **fig.II.4**). L'absorption et l'émission de lumière peuvent alors se faire avec conservation du vecteur d'onde c'est-à-dire sans impliquer d'interaction avec d'autres quasi particules comme les phonons.

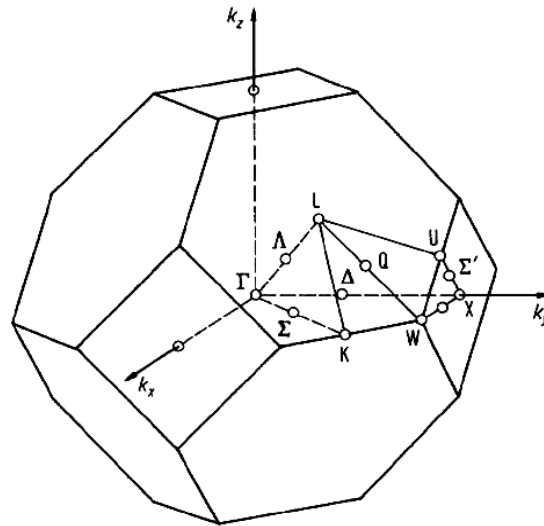


Fig.II.4 Première zone de Brillouin d'un réseau blende de zinc [7].

La bande de conduction est deux fois dégénérée au point Γ et possède la symétrie Γ_6 . L'astucturel de bande, calculée avec le formalisme du pseudo potentiel [5], est représentée sur la **fig.II.5**.

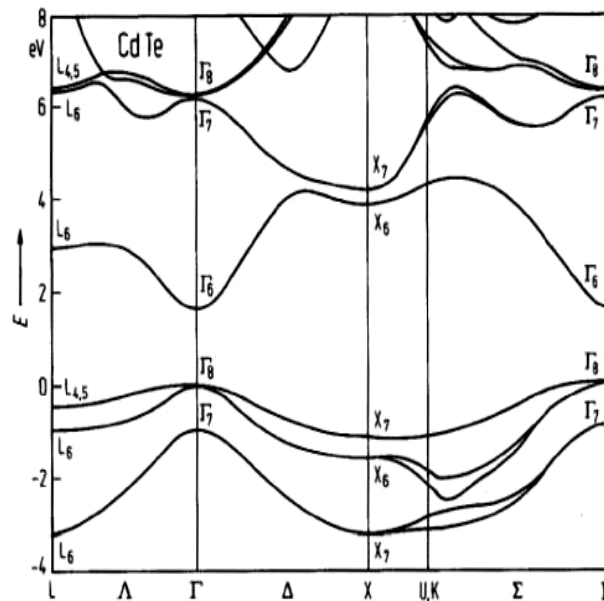


Fig.II.5 Structure de bande électronique de CdTe déterminée par la méthode du pseudo-potentiel empirique incluant le couplage spin-orbite [8,9].

La largeur de bande interdite E_g , les constants diélectriques statiques ϵ_0 et ϵ_∞ et les masses effectives des porteurs sont présentés dans le **tab.II.1**, qui indique les valeurs de ces paramètres près du point Γ .

Grandeur	Valeur
E_g	1606 eV
ϵ_∞	7,4
ϵ_0	10,6
Δ_{SO}	0,90 eV
m_{hhz}	0,4
m_e	0,096

Tab.II.1 Valeurs de quelques paramètres physiques de CdTe [8]

II.2.3 Diagramme de phase

II.2.3.1 Diagramme de phase composition-température

Le diagramme de phase de CdTe est assez simple **fig.II.6**, il a un point de fusion à 1092 ± 1 C° pour une concentration approximative de tellure de 50 at %.

Deux paliers eutectiques à 324 ± 2 C° pour la région riche en Cd et à 449 ± 2 C° pour la région riche en Te [7].

Le composé stœchiométrique représenté par une ligne se trouve en réalité répartie sur un domaine étroit tel qu'on aura un point de fusion à 897C° et 1092C° pour une concentration de tellure de 49,99985% et de 50,00085% respectivement [10].

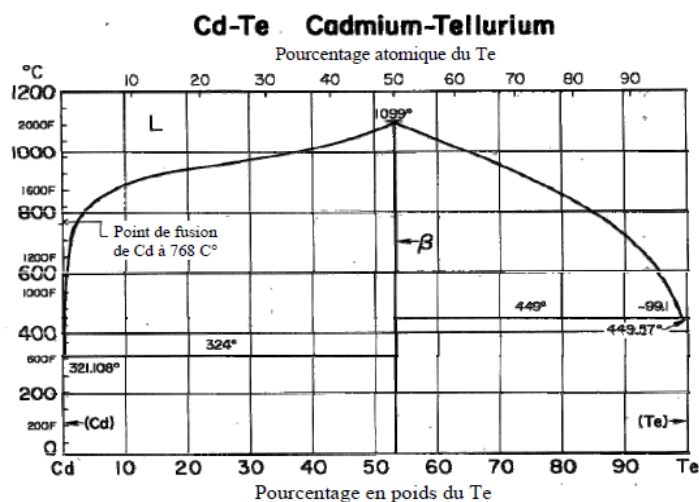


Fig.II.6 diagramme de phase composition-température de CdTe.

II .2.3.2 Le diagramme de phase pression-température

Le diagramme de phase pression-température de CdTe présenté sur la **fig.II.7** permet de savoir avec précision les conditions d'élaboration des cristaux [7].

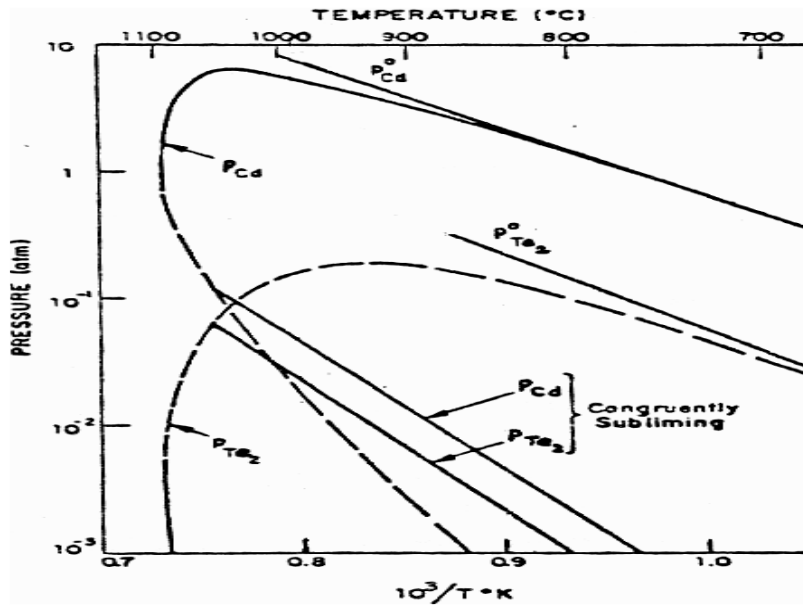


Fig.II.7 Diagramme de phase pression-température de CdTe.

II.2.4 Propriétés optiques et électriques

Les courbes EC , $E(k)$ dites aussi « relation dispersion » ou EC représente le niveau d'énergie du bas de la bande de conduction, EV le haut de la bande de valence. [11]. Et (k) : le vecteur d'onde associé à un électron, il a une quantité de mouvement ($p = mV = \hbar k$) fait apparaître deux types de semi-conducteur :

II.2.4.1 Semi-conducteur à gap direct

Les extremums, soient le minimum de EC et le maximum de EV correspondent à la même valeur de k c'est-à-dire à la même quantité de mouvement, ainsi le gap est direct.

II.2.4.2 Semi-conducteur à gap indirect

Les extremums de E_C et de E_V ne correspondent pas à la même valeur de k , la transition indirecte nécessite donc une modification de la quantité de mouvement. Le gap est indirect.

CdTe est un semi-conducteur à gap direct, sa structure de bande **fig.II.8a** [12], lui permet des transitions verticales radiatives entre la bande de valence et la bande de conduction. Il présente une large bande interdite, d'environ 1.51 eV à température ambiante, ce qui lui donne un seuil d'absorption optique dans le domaine de l'infrarouge.

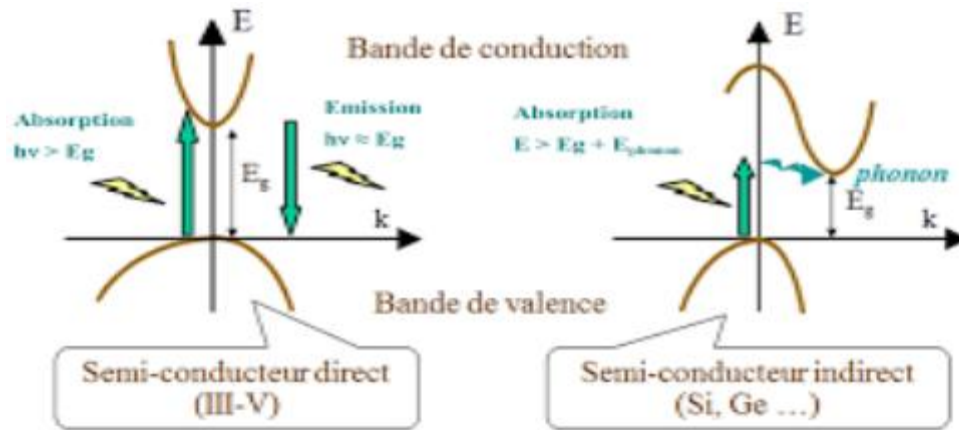


Fig.II.8 Transitions électroniques entre les extrêmes des bandes de valence et de conduction : Gauche (semi-conducteur à gap direct, les transitions sont verticales radiatives). Droit) semi-conducteur à gap indirect, les transitions sont obliques (non radiatives).

CdTe peut présenter les deux types de conductivité n ou p ; leur obtention, facile à contrôler, justifie les multiples applications de ce matériau dans le domaine de l'optoélectronique, notamment en détection infrarouge et en tant que substrat pour l'épitaxie des couches de CdHgTe. Le changement de type est aussi possible, notamment sous atmosphère de Cd [12].

II.3 Propriétés fondamentales du CdS

Le sulfure de cadmium est un composé chimique inorganique de soufre et de cadmium, le CdS est de couleur jaune.

II.3.1 Semi-conducteur CdS

Le sulfure de cadmium est un semi-conducteur à gap direct de type n dont la largeur de la bande est de l'ordre de 2.44 eV et qui a un Paramètres de maille voisin de celui du ternaire CIS (CuInSe₂) [13].

II.3.2 Structure cristalline de CdS

Le sulfure de cadmium est un semi-conducteur qui cristallise dans deux types de structures :

Fig.II.3.2.a l'une, hexagonale, est thermodynamiquement stable elle est de type wurtzite (**Fig II.9.1**).

Fig.II.3.2.b la seconde, cubique est de type zinc blende (une structure cubique à faces centrées (CFC) contient 4 cations (Cd²⁺) et quatre anions (S₂) (**Fig.II.9.1**)).

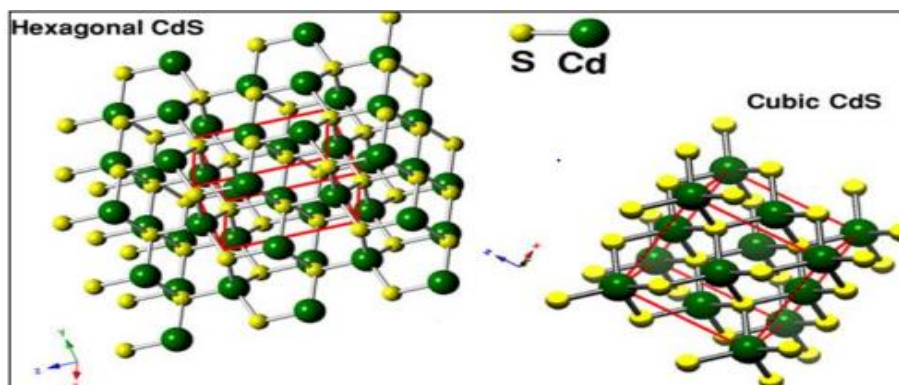


Fig.II.9.1 Maille Wurtzite et Maille blende

II.3.3 Propriétés du CdS

Le sulfure de cadmium peut être obtenu par réaction entre le sulfure d'hydrogène et la vapeur de cadmium à 800 °C, en chauffant un mélange de cadmium (ou d'oxyde de cadmium) avec du soufre. Habituellement, les sulfures sont précipités à partir de solutions aqueuses de sels de cadmium par addition de sulfure d'hydrogène (ou de sulfure soluble tel

Le CdS peut aussi être préparé par barbotage de sulfure d'hydrogène dans une solution avec de l'acide chlorhydrique [14].

II.3.4 Propriétés physiques du sulfure de cadmium

Nom UICPA	sulfure de cadmium
Apparence	jaune orange, jaune citron ou jaune clair à rouge brique
Etat chimique	solide cristallisé
Masse molaire	144,476 g/mol
Etat physique	solide cristallisé
L'évaporation à 20°C	est négligeable
Solubilité dans l'eau	Nulle
Stabilité de produit est réactivité	ce produit est stable
T° fusion	1 750 °C
T° sublimation	980°C
Densité relativité(eau=1):	4.82
Dopage	type n

II.3.5 Les propriétés optiques

Les propriétés optiques les plus généralement rapportées sont : la transmission optique, avec quelques études également sur la photoluminescence. Tous les films CdS ont une transparence optique très élevée (en général entre 60 et 90%), dans les régions visibles du spectre solaire (520-850) nm, qui permet de les utiliser comme des couches fenêtres dans les cellules solaires (cellules photovoltaïques) [13 ,14]. Cependant, ces films sont uniformes, ont une forte adhérence et une excellente transmission dans le spectre visible. La transmission est une fonction de l'épaisseur, du gap, et de la structure de film. Il a été noté une forte limite d'absorption à environ 450 nm qui correspond à un gap de 2,47 eV, approximativement. Si la température du bain augmente, la limite d'absorption des films devient difficile à connaître

Le CdS en couche mince est un matériau à gap optique direct, sa valeur varie entre 2,33 et 2,56 eV, ou entre 2,1 à 2,4 eV à différentes températures. Le gap a diminué de 2,46 à 2,4 eV avec l'augmentation de l'épaisseur de film de 26 à 95 nm [15,16]. Cette diminution du gap est due à l'influence de divers facteurs tels que la taille des grains, les paramètres structuraux, la concentration des porteurs, la présence des impuretés, le décalage de la stœchiométrie du film et la diminution de la contrainte du réseau [17, 18].

II.3.6 Structure électrique de bandes

On rappelle que les structures électriques du soufre et du cadmium sont :

Cd: [Kr] 4d¹⁰ 5s²

S: [Ne] 3s² 3p⁴

Les états 3p de Sulfure forment la bande de valence, les états 5s de Cadmium constituent la zone de conduction. Le CdS est un semi-conducteur à gap direct comme le ZnOx, le minimum de la Γ de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence est situé au point zone de Brillouin. La bande interdite est de l'ordre de 2,4 eV, lui permet des transitions verticales entre la bande de valence et la bande de conduction, et aussi d'avoir des transitions radiatives [14].

II.3.7 Applications des couches minces de CdS

Les couches minces de chalcogénures métalliques ont été étudiées largement au cours de ces dernières décennies à cause de leurs diverses applications dans les domaines de la science et la technologie, tels que : la minéralogie, la géologie, et la science de corrosion.

Le sulfure de cadmium (CdS) dû à ses bonnes propriétés optiques et électriques est le matériau le plus généralement utilisé en optoélectronique. Il est employé en couches minces dans divers dispositifs.

Le CdS est utilisé principalement dans les pigments, notamment les pigments fluorescents comme colorant pour les textiles, le papier, le caoutchouc, les plastiques, les verres et les émaux (décorations). Il est également utilisé dans l'industrie électronique (transistors à effet de champ), dans le domaine de l'optoélectronique (diodes luminescentes, diodes luminescentes multicouches, détecteurs optiques, filtres optiques, les cellules photoélectriques), dans les détecteurs nucléaires de rayonnement et les sondes de gaz.

Les couches de CdS sont actuellement utilisées dans les la fabrication des cellules solaires à base de couches minces (ZnO/CdS/CuS) où (ZnO/CdS/CIS) **Fig.II.10**.

Les couches minces de CdS utilisées dans cette filière de cellule solaire doivent posséder quelques propriétés : une transparence relativement élevée, pas trop épaisses pour permettre l'absorption dans la couche absorbante de CuS, CIS ou CdTe, pas trop minces pour éviter le court-circuit, conductivité relativement élevée pour réduire les pertes électriques de piles solaires et photoconductivité plus élevée pour ne pas altérer la réponse spectrale de la pile solaire [19].

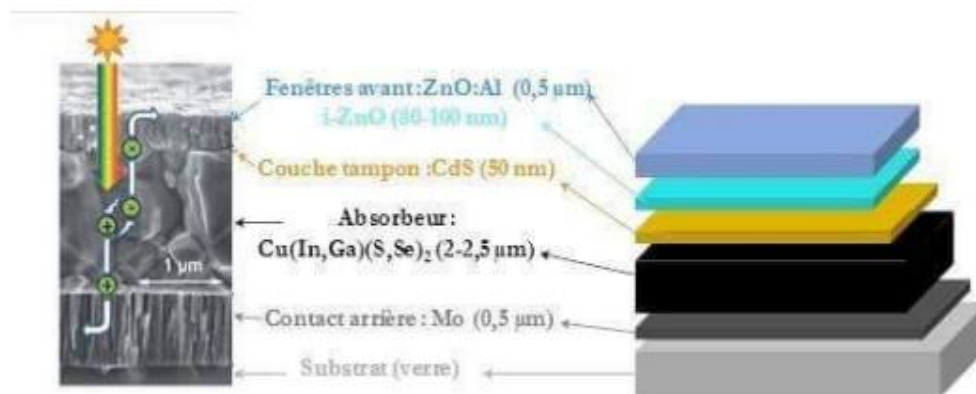


Fig. II.10 Schéma simplifié d'une photopile en couches minces de type CIGS

II.4 La cellule CdTe / CdS

La couche tampon est un semi-conducteur ayant une conductivité de type n dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbant. Deux rôles lui sont majoritairement attribués : un rôle électrique, et un rôle de couche protectrice. Du point de vue électrique, cette couche adapte la largeur de la bande interdite entre l'absorbant et la couche fenêtre et limite les recombinaisons des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également de protéger la surface de

l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche de ZnOx, qui peut engendrer des défauts à la surface du CdTe. Plusieurs semi-conducteurs de type n dont les bandes interdites sont entre 2,0 et 3,6 eV ont été appliquées comme tampon pour les cellules solaires CdTe. Cependant, le CdS déposé par bain chimique (CBD) reste le préféré car il donne toujours des hauts rendements. Néanmoins, sa largeur de bande interdite, égale à 2.4 eV relativement faible engendre des pertes optiques, de sorte que des quantités importantes de lumière sont absorbées avant de pouvoir atteindre la couche CdTe, même pour les couches de CdS aussi minces que 50 nm. Les photons absorbés dans le CdS ne contribuent pas au photocourant, à cause de la petite longueur de diffusion des porteurs minoritaires (trous) dans le CdS, ce qui conduit à un taux élevé de recombinaison. Pour cette raison, et en plus des contraintes liées à l'utilisation du Cadmium (Cd) qui est un élément toxique, de nombreuses études sont menées pour substituer le CdS par d'autres matériaux, parmi eux, on peut citer (OH, S), Zn (O, OH), ZnS, ou ZnSe.

II.4.1 Propriétés des différentes couches

II.4.1.1 Le substrat

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique des différentes couches, dont l'empilement ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Le substrat le plus couramment utilisé est le verre soda-calcique, qui présente toutes les propriétés requises. Il contient notamment du sodium, qui diffuse vers le CIGS lors de l'étape de recuit. Son effet bénéfique sur le fonctionnement de la cellule a été démontré par de nombreux auteurs [20 ,21].

II.4.1.2 Le contact arrière

Le contact arrière représente le pôle positif du générateur photovoltaïque. Il s'agit d'un métal déposé sur la partie inférieure de l'absorbeur dont le rôle est de collecter les porteurs à partir de l'absorbeur puis les livrer à la charge externe. Il doit donc, répondre à certains critères chimiques, mécaniques et économiques. De nombreux métaux ont été étudiés comme le Tungstène, le Molybdène, le Chrome, le Tantale, le Manganèse, l'Or, l'Aluminium, l'Argent et le cuivre [22]. Parmi ces métaux, le Molybdène est le plus couramment utilisé comme contact arrière des cellules solaires CIGS par les laboratoires de recherche et en industrie, en raison de sa stabilité relative aux températures élevées rencontrées lors du procédé de fabrication du CdTe, et de sa faible résistance de contact avec le CdTe. Son épaisseur est d'environ 300 nm à 1000 nm. La méthode de dépôt utilisée est la pulvérisation cathodique.

II.4.1.3 La couche absorbeur

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière à base de sulfure de Cadmium et de Tellure de Cadmium (CdS-CdTe) représentait l'une des approches les plus prometteuses pour le photovoltaïque terrestre. La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2 μ m.

Les résultats de rendement de conversion sont très encourageants : près de 11% sur une surface de 4900 cm². Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière [23].

II.4.1.4 La Couche tampon

La couche tampon est un semi-conducteur ayant une conductivité de type n et dont le gap doit être supérieur à celui de l'absorbeur. Cette couche permet d'adapter la largeur de la bande interdite entre l'absorbeur et la couche fenêtre ainsi que limiter la recombinaison des porteurs à l'interface de ces deux couches. Elle permet également déprotéger la surface de l'absorbeur lors du dépôt par pulvérisation cathodique de la couche ZnOx, qui peut engendrer des défauts à la surface du CdTe [22].

Plusieurs semi-conducteurs de type n dont les bandes interdites sont comprises entre 2,0 et 3,6 eV ont été appliquées comme couche tampon pour les cellules solaires CdTe. Cependant, le CdS déposé par bain chimique (CBD) reste le préféré car il donne toujours des hauts rendements. Néanmoins, sa largeur de bande interdite, égale à 2,4 eV relativement faible engendre des pertes optiques, de sorte que des quantités importantes de lumière sont absorbées avant de pouvoir atteindre la couche CdTe, même pour les couches de CdS aussi minces que 50 nm.

Les photons absorbés dans le CdS ne contribuent pas au photo-courant, à cause de la petite longueur de diffusion des porteurs minoritaires (trous) dans le CdS, ce qui conduit à un taux élevé de recombinaison. Pour cette raison, et en plus des contraintes liées à l'utilisation du Cadmium (Cd) à cause de sa toxicité, de nombreuses études sont menées pour substituer le CdS par d'autres matériaux comme le Zn (OH, S), Zn (O, OH), ZnS ou ZnSe [24]

II.4.1.5 La Couche fenêtre

La couche fenêtre doit être à la fois transparente, afin de transmettre le maximum de photons à la région de jonction et à la couche absorbante du dispositif, et conductrice afin de

réduire les pertes lors du transport du photo-courant généré au circuit extérieur. Cette couche fenêtre est constituée TCO, sur lequel une fine grille métallique doublée (Ni-Al) est déposée de façon à réduire la résistance série de la couche fenêtre et de collecter les charges générées par le dispositif. Le Ni sert de couche d'accroche et permet d'éviter l'oxydation de l'Al liée à la présence du TCO. Le TCO, généralement utilisé pour les cellules CdTe, est ZnO déposé par pulvérisation cathodique, mais l'oxyde d'Indium dopé à l'étain (ITO) peut également être rencontré [25].

Une bicouche ZnO est souvent utilisée pour le contact frontal transparent. La première couche est une couche mince de ZnO intrinsèque (i-ZnO), qui est typiquement de 50 à 100 nm d'épaisseur et très résistive. Elle sert à limiter la formation de court-circuit dans les zones présentant un recouvrement imparfait du CdTe par la couche tampon [26]. La seconde couche est fréquemment du ZnO dopé à l'Aluminium (ZnO:Al), mais d'autres dopants comme le Bore (ZnO:B) ou le Gallium (ZnO:Ga) existent aussi. L'épaisseur et le dopage de cette couche sont ajustés de façon à combiner transparence et conductivité. La bande interdite de la couche fenêtre doit être aussi élevée et aussi mince que possible afin de maintenir une faible résistance série. Le ZnO et le ZnO : Al a respectivement des bandes d'environ 3,2 eV et 3,6 à 3,8 eV.

II.4.1.6 Contact avant

Le contact avant d'une pile solaire doit être transparent et conducteur. Différents TCO ont été expérimentés et ZnO dopé d'aluminium (ZnO : Al) est le plus généralement utilisé. L'oxyde de zinc a une large bande de gap de 3.3eV et a de bonnes propriétés électriques et optiques (une transmission de 90% dans la gamme de 400-1000nm et une résistivité de $9.10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$).

Les piles solaires de CdTe utilisent plus fréquemment, ZnO dopé d'Al. Une combinaison d'une qualité intrinsèque (i-ZnO) et d'une couche de ZnO dopée est généralement employée, car cette double couche rapporte des rendements uniformément plus élevés.

Il a été constaté que des paramètres de cellules, en particulier, le FF varie avec l'épaisseur des couches intrinsèques de ZnO. Le rendement le plus élevé a été réalisé une couche d'i-ZnO d'épaisseur environ 70nm.

D'autre part, quand la couche d'i-ZnO est très épaisse, la performance de cellules s'est dégradé en raison de l'augmentation de la résistance en série. Par conséquent une épaisseur optimale de la couche d'i-ZnO est nécessaire pour une meilleure performance de la pile solaire.

Plusieurs techniques de dépôt telles que la pyrolyse de jet, la CVD, et la pulvérisation ont été utilisées avec succès pour fabriquer des films de ZnO. La pulvérisation a été la technique la plus utilisée pour sa production.

Le dopage de la couche de conduction de ZnO est réalisé par des éléments du groupe III, en particulier l'aluminium. Toutefois les investigations montrent que le bore est une bonne solution, car il rapporte une mobilité élevée des porteurs de charge et une transmission plus élevée dans la région spectrale de longue longueur d'onde, provoquant des courants plus élevés.

En outre, pour les cellules à haute efficacité, la température de dépôt de TCO devrait être inférieure à 150°C afin d'éviter l'inter-diffusion nuisible à travers l'interface de CdS/CdTe.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons généralisé sur les CdTe et CdS et ces différentes caractéristiques et composants de base. Ensuite, nous avons cités les différentes couches sur la cellule CdTe/CdS. Finalement Le CdTe pur et allié avec quelques impuretés iso électroniques s'est avéré devant plus de vingt ans comme étant très prometteur dans le domaine optoélectronique. L'efficacité des composants à base de ces matériaux est strictement liée à leur qualité. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail.

L'effet des dislocations sur les propriétés optiques est caractérisé par un décalage du bord d'absorption par rapport à l'état non déformé, dû à la création de centres accepteurs, qui sont les lacunes neutres de Cd pour CdTe et par la diminution de la concentration des atomes Zn ou Mn substituant les atomes de Cd.

Dans le chapitre suivant on va présenter l'outil de simulation et la discussion des résultats simulés.

Références

- [1] BP Solar BP3160-160W Multi-crystalline photovoltaic Module Datasheet.
- [2] <http://www.uraer.dz> dernier accès le (20/10/2010).
- [3] A. Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system", mémoire de master, université polytechniques de Sab Luis Obispo, California, (2005).
- [4] D. Mabkhout, Simulation numérique d'une cellule solaire en CdS/CIGS par le logiciel Atlas-Silvaco, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Département de Génie Electrique, (2019).
- [5] K. Zanio, Semiconductors and Semimetals, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press.
- [6] Site web : google.fr / Puissance focalisés de haute logement faisceau de la lampe à arc (450W-1600W mercure-xénon).
- [7] K. Zanio semiconductors and semimetals, R. K. Willardson and C. Beer, Academic Press New York (1978).
- [8] L. Börnstein. Semiconductors, Springer, Berlin, 17(1999).
- [9] D. J. Chadi, J. P. Walter, M. L. Cohen, Y. Petroff, and M. Balkanski, "Reflectivities and Electronic Band Structures of CdTe and HgTe", Phys, 3058(1972).
- [10] H. Hartmann, R. Mach and B. Sell, Current topics in materials science, E. Kaldisnorth, Holland , 9 (1982).
- [11] Cours de physique des S-C, écoles poly technique de Marseille, (2005).
- [12] F. A. Sellim, V. Swaminathan, F. A. Karoger, Physic, Stat. Sol, 29 (1975) 465.
- [13] A. E. Rakhshani, A.S. Al-Azab, J. Phys. Condens. Matter. 12 (2000) 8745-8755.
- [14] Y. Kouhlane, mémoire de Magister, " Étude et mise au point d'une technique d'élaboration du composé CuInGaSe₂ pour le déposer en couche absorbante dans la fabrication des cellules solaires, université Badji Mokhtar Anaba, (2008).
- [15] Charles, Roger doctorat, "Développement de cellule photovoltaïque à base de CIGS sur substrats métalliques ", université de Grenoble, France, (2013).
- [16] H. Houadsithèse de master " Elaboration et caractérisation optique des couches minces de sulfure de cadmium (cds) ", université larbi ben m'hidi Oum el bouaghi, (2014).
- [17] H. Barkahoum, thèse de magister , "Etude des propriétés optiques des nonocristaux du semi-conducteur cds dispersés dans des films mines du polystyrène et de la silice sio₂ ", université Mentouri Constantine, (2006).

- [18] Y. A. Jaber, thèse de magister, "A Comparative Study of Properties of CdS Thin Films Deposited by Thermal Evaporation and Chemical Bath Techniques", Université de Taïba, Arabie Saoudite, (2011).
- [19] K. Djebba, K. Zerroug, Elaboration par bain chimique et étude des couches minces de sulfure cadmium (CdS) et sulfure de cuivre (CuS), MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique, Université Oum El-Bouaghi, (2016/2017).
- [20] M. Elbar, "Étude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS à multijonction par le logiciel Tcad Silvaco", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Département : Génie électrique, (2018).
- [21] F. Kessler, D. Herrmann, M. Powalla, "Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells", Thin Solid Films, 481 (2005) 491–498.
- [22] N. Touafek, "Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couche mince à base de $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ", Thèse de doctorat, Université des frères Mentouri, Constantine, (2015).
- [23] M. Boufia, L. Deblaoui, "Modélisation et simulation d'une cellule solaire couche mince à base di-séléniure de cuivre, d'indium et de Gallium [GIGS]", mémoire de master, université Kasdi Marbah Ourgla, (2012).
- [24] N. Kohara, S. Nishiwaki, Y. Hashimoto, T. Negami and T. Wada, "Electrical properties of the Cu (In, Ga) Se₂/ MoSe₂/Mo structure", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 67, (2001).
- [25] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori and T. Mise, "Novel device structure for Cu (In, Ga) Se₂ thin film solar cells using transparent conducting oxide back and front contacts", Solar Energy, 77 (2004).
- [26] U. Rau, P. O. Grabitz, J. H. Werner, "Resistive limitations to spatially inhomogeneous electronic losses in solar cells", Applied Physics Letters, 85 (2004) 6010.

Chapitre III

Résultats de simulation et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la simulation numérique par le logiciel SCAPS-1D de cellule solaire simple jonction CdTe /CdS et l'interprétation des résultats trouvés. Nous commençons dans ce chapitre par la détermination de la structure de notre cellule solaire étudiée, et les paramètres des matériaux utilisée dans la simulation numérique (tableau III.1). Après cela, nous allons étudier l'effet de la variation de l'épaisseur et dopage (Na, Nd) des deux couches absorbeur CdTe et Tampon CdS. Ensuite, nous montrons aussi l'effet de variation de l'énergie de gap de la couche CdTe. Enfin, nous allons étudier l'influence de température dans la structure de la cellule.

III.2 Description du logiciel SCAPS

SCAPS (Solar cell capacitance simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires en couches minces à hétérojonction. Il a été développé à l'université de Gent en Belgique avec Lab Windows/ CVI de National Instruments par Marc Burgelman et al [1]. Il a été mis à disposition à l'université chercheuse dans la communauté photovoltaïque après la deuxième PV de la Conférence mondiale de Wine, 1998. Le programme SCAPS 1-D résout les équations pour des structures contenant un certain nombre de couche semi-conducteur qui ont un profil de dopage arbitraire (comme fonction de la position), avec une distribution énergétiques arbitraires des niveaux profonds des donneurs ou des accepteurs sous différents types d'éclairement. Des itérations de résolutions des équations sont faites jusqu'à convergence de l'algorithme. SCAPS 1-D a été introduit dans la littérature avec les articles [2,3]. Alors que les algorithmes de SCAPS sont détaillés dans les références [4].

SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe_2 et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro morphes Si). Les applications de la simulation en utilisant SCAPS peuvent être consultées dans les références [5, 6].

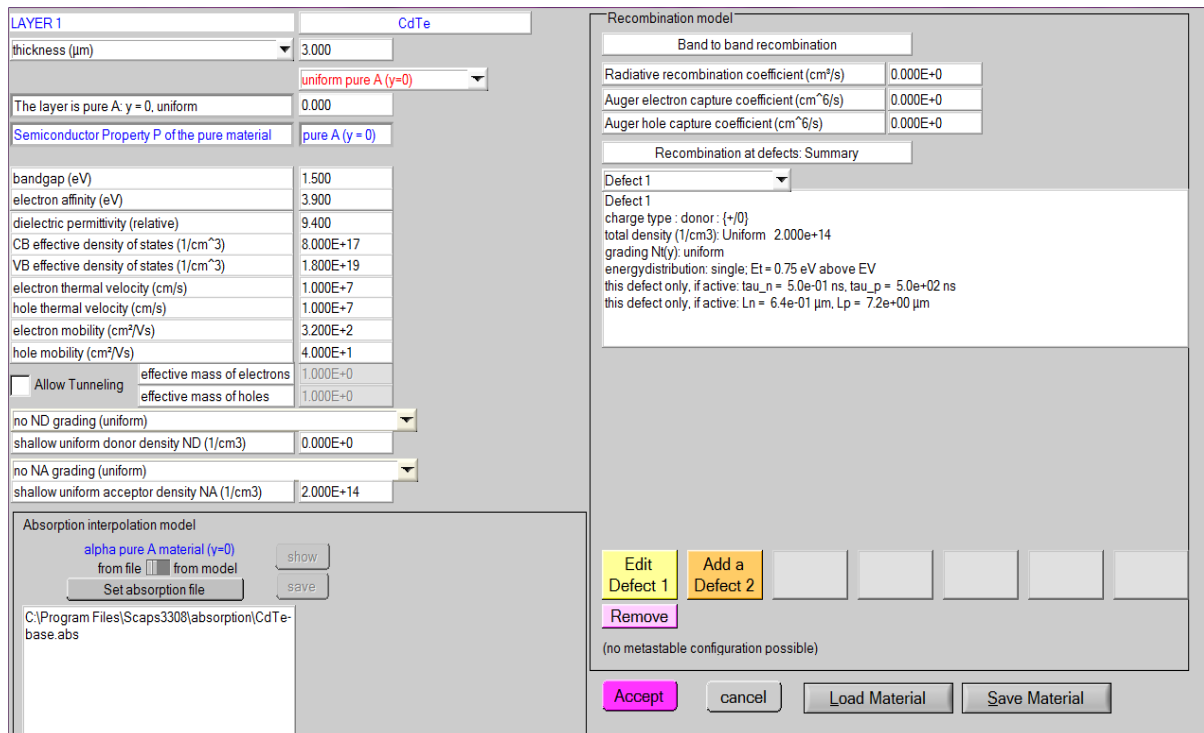


Fig.III.1 Fenêtre du logiciel SCAPS pour écrire les paramètres d’une cellule.

L’utilisation de SCAPS est très pratique, il permet de simuler n’importe qu’elle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...), la fenêtre du logiciel pour écrire ces paramètres est représenté sur la **fig.III.1**. Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c’est un gain de temps et d’argent.

Ont obtenu comme résultat les courbes la caractéristique courant tension « I-V », la capacitance en fonction de la tension « C-V », la capacitance en fonction de la fréquence « C-f », le rendement quantique « Q-E », mais aussi le diagramme de bande, densité de porteur, densité de courant, un exemple de résultat est donner dans la **fig.III.2**.

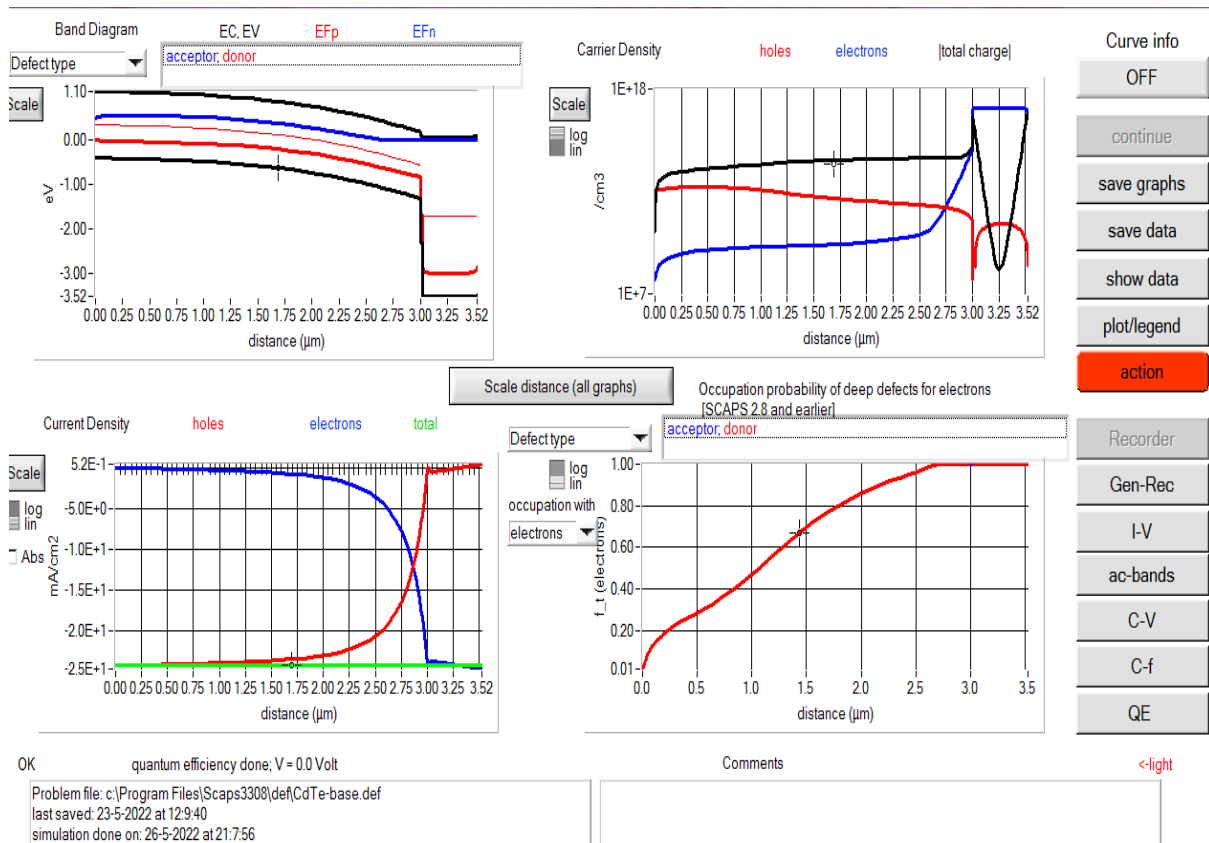


Fig.III.2 Exemple de simulation d'une cellule CdTe/CdS/SnOx dans SCAPS.

III.3 La structure et les paramètres de la cellule solaire

Une cellule solaire est constituée d'un ensemble des couches minces semi-conductrices, dans notre étude, nous utilisons une cellule PV homo-jonction P-CdTe /n-CdS/SnO_x simulée par le simulateur SCAPS dont les épaisseurs et les concentrations des dopants de deux couches sont $N_a = 2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et épaisseur $d = 3 \mu\text{m}$ pour l'absorbeur et $N_d = 1.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $d = 0.025 \mu\text{m}$ pour la couche absorbante. La **fig.III.3** décrit le schéma de cette structure.

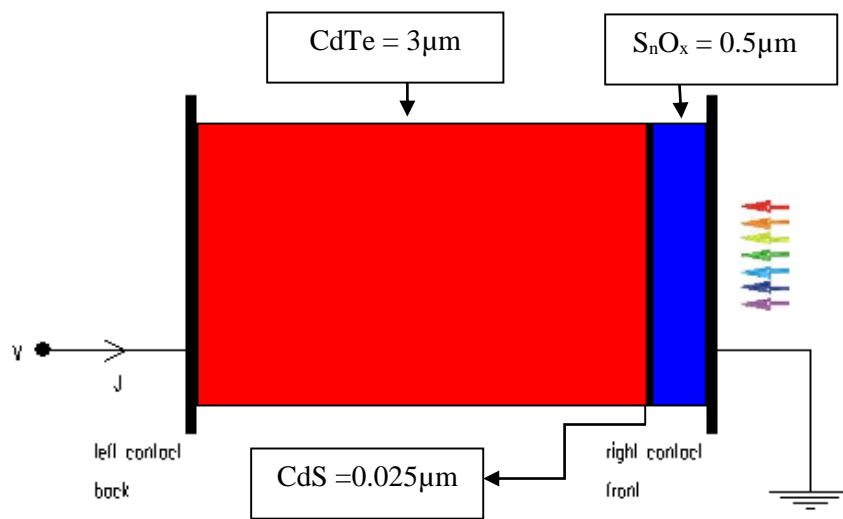


Fig.III.3 Le schéma de la cellule introduit au simulateur à base de CdTe.

Le tableau montre les paramètres d'entrées avec le logiciel SCAPS 1-D.

Tab.III.1 Quelques propriétés physiques et chimiques des éléments CdTe, CdS et SnOx.

Paramètres	CdTe	CdS	SnO _x
Epaisseur (μm)	3	0.025	0.5
Bande de gap(eV)	1.5	2.4	3.6
Affinité de électron(eV)	3.9	4	4
Permittivité (relative)	9.4	10	9
CB densité effective des états (1/cm ³)	8.10 ⁺¹⁷	2.2 .10 ⁺¹⁸	2.2.10 ⁺¹⁸
VB densité effective des états (1/cm ³)	1.8.10 ⁺¹⁹	1,8.10 ⁺¹⁹	1.8.10 ⁺¹⁹
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	1.10 ⁺⁷	1.10 ⁺⁷	1.10 ⁺⁷
Vitesse thermique du trou (cm/s)	1.10 ⁺⁷	1.10 ⁺⁷	1.10 ⁺⁷
μ _n mobilité des électrons (cm ² /V.s)	3,2.10 ⁺²	1.10 ⁺²	1.10 ⁺²
μ _p mobilité des trous (cm ² /V.s)	4.10 ⁺¹	2,5.10 ⁺¹	2,5.10 ⁺¹

III.4 Résultats et discussion

Dans notre travail qui suit nous allons faire une étude sur la structures d'un cellule photovoltaïque CdTe /CdS. Nous allons étudier les effets des épaisseurs, dopages, énergies de gap et la température en fonction des principaux paramètres photovoltaïques qui sont ; le rendement de conversion électrique (η), le facteur de forme (FF), la densité de courant de court-circuit(J_{SC}) et la tension de circuit ouvert(V_{OC}).

III.4.1 Effets de l'épaisseur de la couche tampon CdTe

Représentation la courbe l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbeur CdTe, on observe une augmentation des caractéristiques V_{oc} , J_{sc} et de rendement η , mais le facteur de forme démentait de la cellule simulée. Ce qui est tout à fait logique, puisque c'est dans cette dernière que se passe le phénomène d'interception des photons et de conversion photovoltaïque.

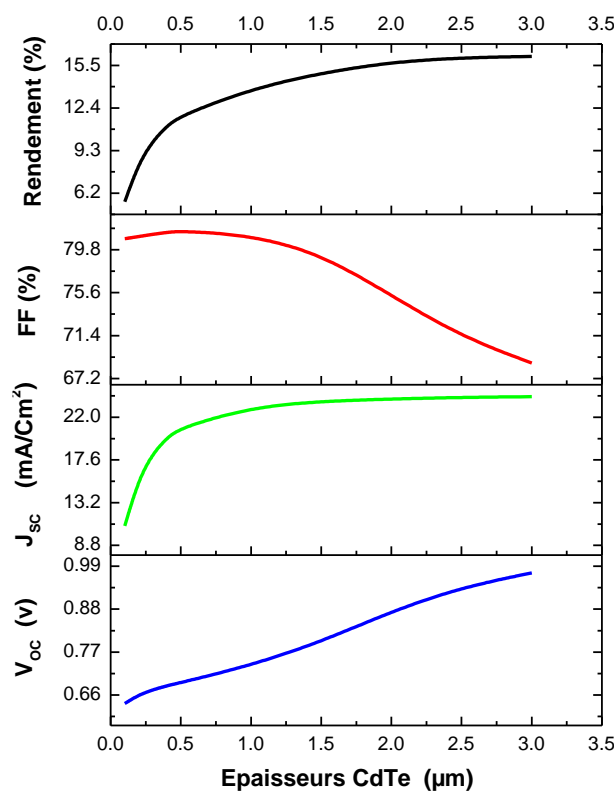


Fig.III.4 Les caractéristiques V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche CdTe.

III.4.2 Effets de l'épaisseur de la couche tampon CdS :

La **fig.III.5** représente le changement des caractéristiques de V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur. À travers de la courbe 3 représentative dans la **Fig.III.5** nous notons que le courant

de court-circuit J_{SC} , la tension de circuit ouvert V_{oc} , le rendement μ a progressivement diminué dans l'augmentation de l'épaisseur de la couche de CdS dans la performance et la forme. On note aussi que le facteur de forme FF augmente d'épaisseur jusqu'à 68,94(%)

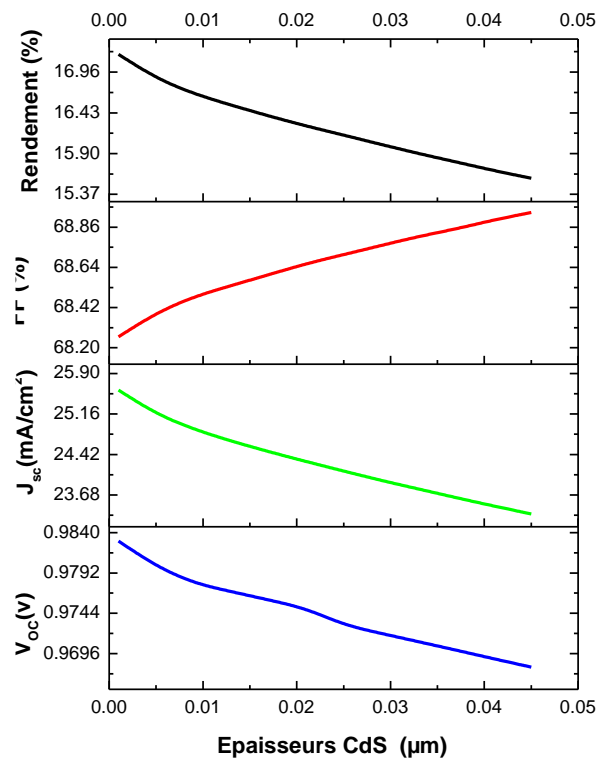


Fig.III. 5 Les caractéristiques V_{oc} , J_{sc} , FF et η en fonction de l'épaisseur de la couche CdS.

III.4.3 Effets de la concentration du dopant Na de la couche absorbeur CdTe

La lecture des résultats obtenus permet d'inférer l'effet du dopage de la couche CdTe sur les performances photoélectriques, on note une diminution en Caractéristiques électriques qui est la densité de courant de court-circuit J_{sc} , facteur de forme FF avec une augmentation du dopage de la couche CdTe.

Nous notons également que l'augmentation de la couche CdTe a un effet positif sur le rendement η et la tension en circuit ouvert V_{oc} , mais avec de petits changements. Ainsi, la valeur de couche CdTe en concentration du dopant est de $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ pour un rendement optimal de 15,86%.

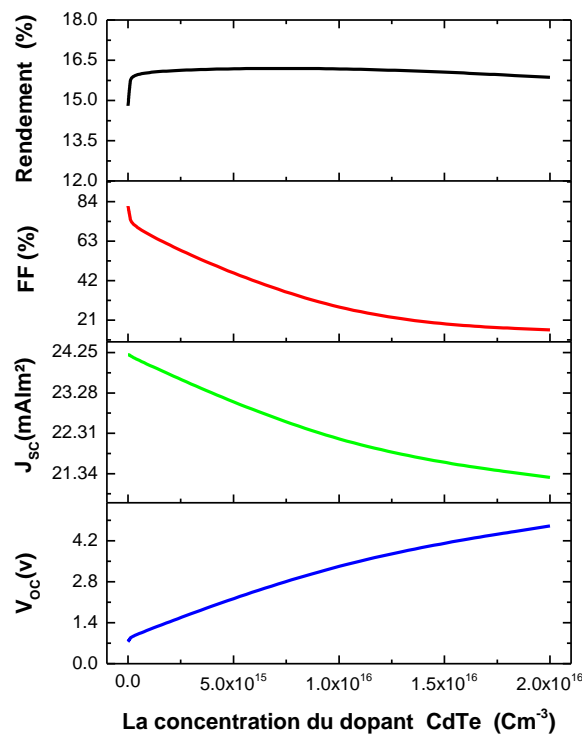


Fig III.6 Variation de la V_{oc} et du J_{sc} et FF et Rendement en fonction de la concentration du dopant Na (CdTe).

III.4.4 Effets de la concentration du dopant Nd de la couche tampon CdS

Nous avons varié la concentration du dopage Nd de la couche de CdS dans la marge de $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ à $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.

Les résultats obtenus dans la **fig.III.7** montrent que l'augmentation du dopage de la couche CdS influe positivement sur le rendement η et le facteur de forme FF. Alors que, la tension de circuit ouvert V_{oc} presque reste fixe et la densité de courant de court-circuit J_{sc} décroît pour le dopage Nd de $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, après cette valeur la densité augmente mais avec des petits changements. Donc, la valeur optimale de dopage de couche CdS est de $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ pour un rendement optimal de 16.22%.

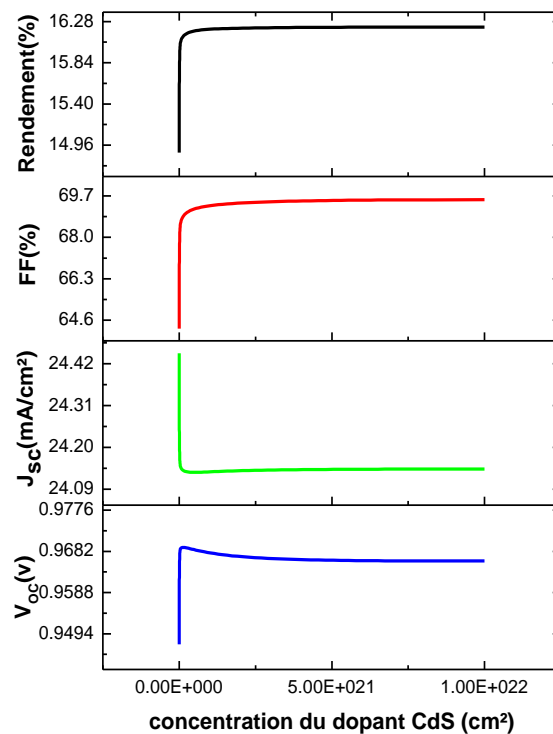


Fig.III.7 Variations de la V_{oc} et du J_{sc} et FF et Rendement en fonction de la concentration du dopant Nd(CdS).

III.4.5 Effets de l'énergie de gap de la couche absorbeur CdTe

Nous avons évalué dans cette étude l'impact de différentes énergies de gap de la couche absorbante CdTe sur la performance de la cellule en trois étapes ($E_g = 1.3\text{eV}$, $E_g = 1.45\text{eV}$, $E_g = 1.6\text{eV}$). L'énergie de gap a été variée de 0.1 eV à 4 eV par pas de 0.5 eV et on peut observer les changements dans les valeurs de J_{sc} , V_{oc} , FF et le rendement à la **Fig.III.8**. Il en ressort que V_{oc} , J_{sc} et Rendement croissent substantiellement jusqu'à 2 eV et restent presque inchangés après cette valeur alors que FF décroît avec la croissance de l'énergie de gap.

Cette décroissance peut s'expliquer par le fait les absorbeurs à gap large n'absorbent pas les photons à grandes longueurs d'onde. On peut donc observer une faible quantité de paires électron-trou générées et donc une faible quantité de porteurs libres collectés ; ce qui pourrait réduire la valeur de FF. La décroissance de l'efficacité après 2 eV est due à la décroissance de FF car V_{oc} et J_{sc} restent presque constants après cette valeur.

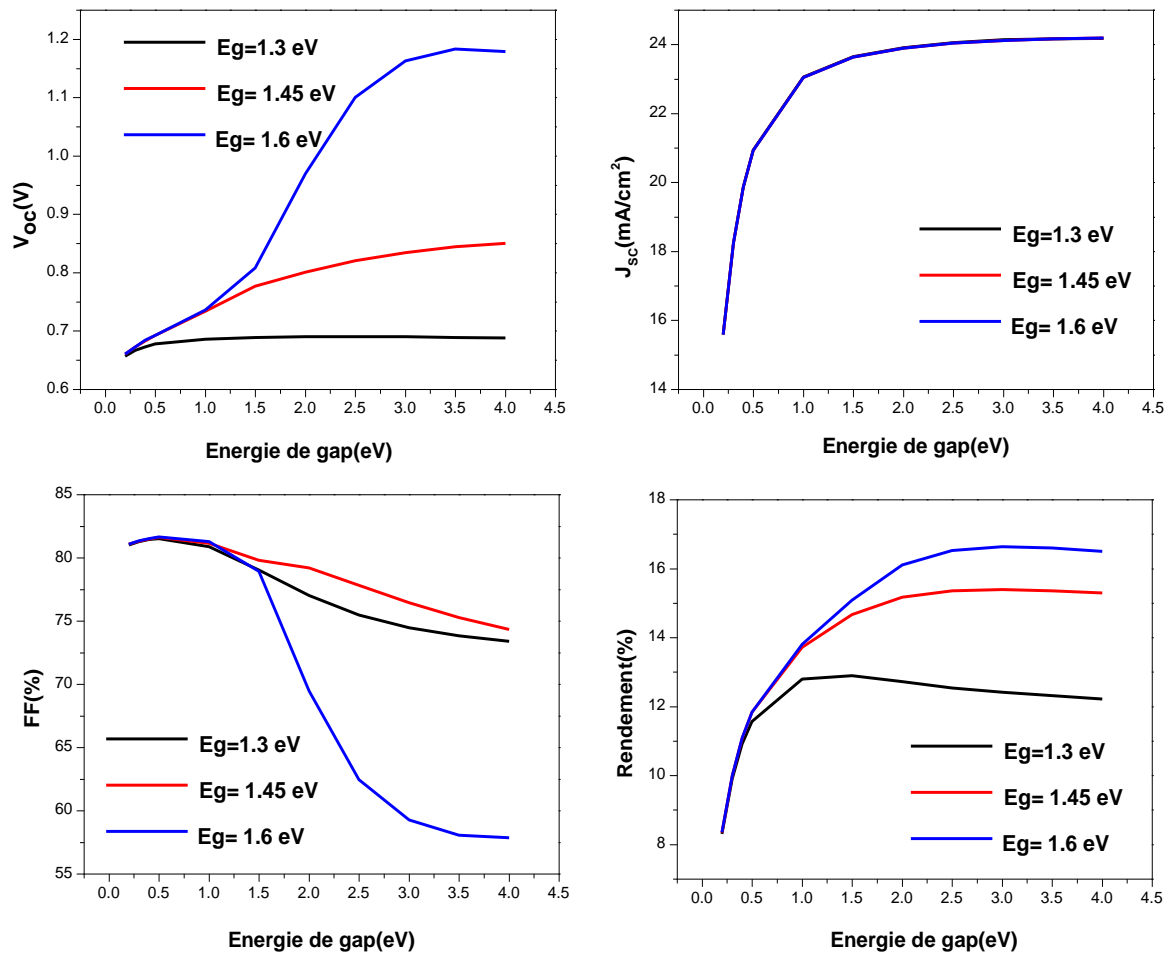


Fig III. 8 Variation de la V_{oc} et du J_{sc} et FF et Rendement en fonction de l'énergie de gap CdTe.

III.4.6 Effets de la température dans la cellule solaire

La température de fonctionnement joue un rôle très important dans situations réelles qui affectent les performances de la cellule solaire globale. Les paramètres tels que la densité effective des états, les coefficients d'absorption, la mobilité des électrons et des trous, les concentrations de porteurs et les bandes interdites des matériaux sont affectés à des températures de fonctionnement plus élevées [7]. Dans cette partie du travail de simulation, la température de fonctionnement de la cellule solaire a varié de 200 K à 700K. Les paramètres tels que V_{oc} , J_{sc} , FF et η ont été mesurés et illustrés sur la **Fig.III.9**.

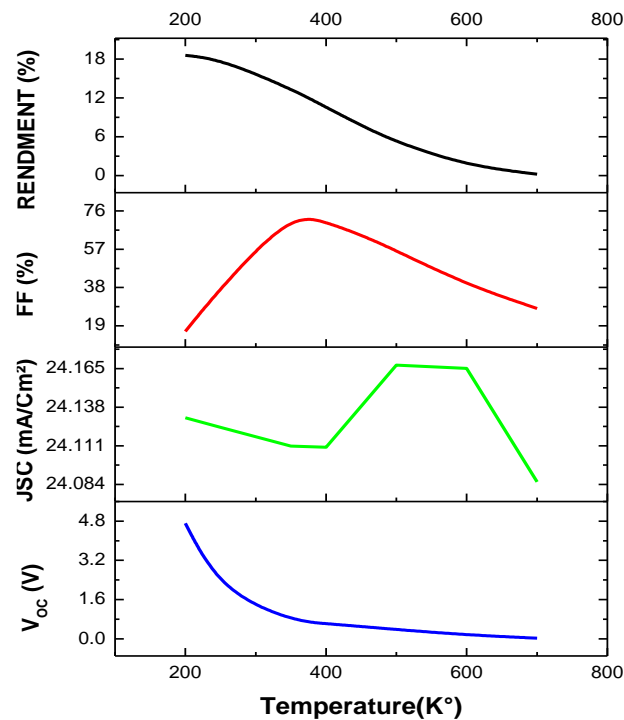


Fig.III.9 Effet de la température sur les paramètres de sortie de la cellule.

Une tendance semblable a été observée pour le graphique des V_{oc} , et le rendement a diminué graduellement à mesure que la température d'exploitation augmentait. Une augmentation de la valeur de FF de 200 K à 400 K a également été observée et a diminué de 400 K à 700 K avec une augmentation de la température de fonctionnement et avec massage la valeur de J_{sc} a chuté de 200 K à 400 K. 600 K à 700 K avec une augmentation de la température et a augmenté de 400 K à 600 K.

III.4.7 Cellule solaire CdTe /CdS :

La cellule solaire à couches minces en tellurure de cadmium (CdTe)/sulfure de cadmium (CdS) est un candidat potentiel pour la production d'énergie grâce à la technologie photovoltaïque (PV), qui réduit les coûts de fabrication en remplaçant les coûteuses plaquettes de silicium. De nombreuses études se sont concentrées sur les attributs clés, tels que la large bande interdite directe et le coefficient d'absorption élevé, de ces semi-conducteurs (CdTe et CdS) qui sont largement utilisés à des fins de production industrielle et de développement de la recherche [8]. Nous proposons Tous d'abord, les caractéristiques et les performances de la cellule solaire à couches minces CdTe/CdS sont également inclus dans cette section de discussion. De plus, les impacts de tous ces facteurs sur les différents paramètres PV (tension

en circuit ouvert, densité de courant de court-circuit, facteur de forme et rendement de conversion) sont analysés et cités dans le **Tab.III.2**. Enfin les développements structurels et les avantages des cellules solaires CdTe/CdS par rapport aux autres cellules contemporaines.

La **fig.III.10** représente la caractéristique de la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation pour différentes valeurs d'une cellule solaire éclairée.

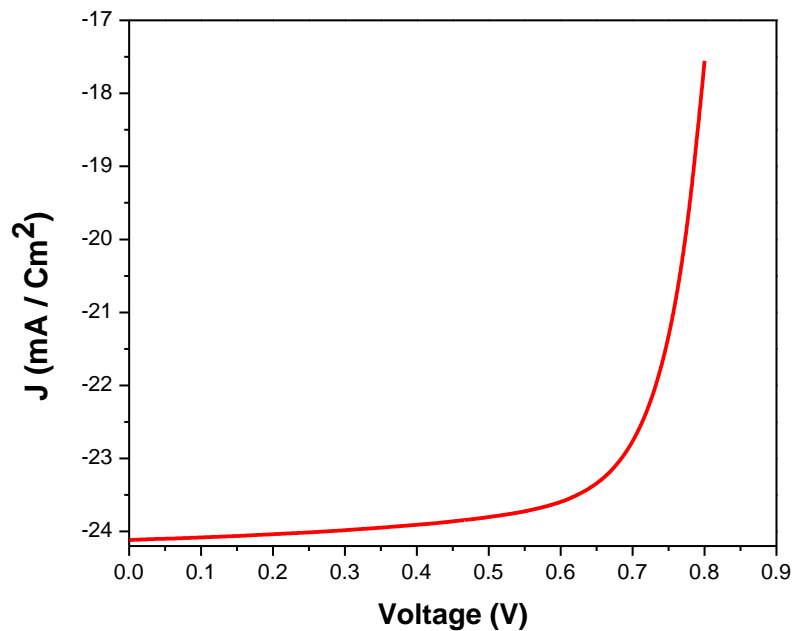


Fig. III.10 Caractéristique courant tension $J(V)$ d'une cellule solaire éclairée.

Le tableau **Tab.III.2** montre les caractéristiques de la cellule solaire avec le logiciel SCAPS 1-D.

Tab.III.2 Les caractéristiques V_{oc} , J_{sc} , FF et η de la cellule solaire CdTe.

Paramètres	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/Cm ²)	FF (%)	η (%)
Cellule solaire CdTe	0.9739	24.116641	68.71	16.14

Le tableau **Tab.III.3** montre des différents travaux de simulation de la cellule solaire CdTe ainsi que l'expérimental.

Tab.III.3 Différents travaux d'une cellule solaire CdTe.

Cellules solaire CdTe/CdS	Rendement (%)	Référence
Simulation	16.14	Notre travail
Simulation	17.66	[9]
Expérimental	16.5	[10]

III.5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet des trois couches, CdS (couche tampon), CdTe (couche absorbante) et SnO_x (couche fenêtre) afin de concevoir la structure parfaite en utilisant SnO_x/CdS/CdTe hétérogène donne la meilleure efficacité électrique.

À cette fin, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur, de la concentration de dopant et de l'énergie d'écart par couche sur la propriété J-V ainsi que sur l'efficacité électrique. Selon notre étude basée sur la simulation, nous avons pu améliorer l'épaisseur et la concentration de dopants et l'énergie de gap des couches. Cela permet une meilleure absorption des photons de courte longueur d'onde et une réduction significative des pertes électriques associées aux mécanismes de recombinaison d'interface. Cette étude nous a donc permis d'améliorer l'efficacité électrique de la structure SnO_x/CdS/CdTe. Enfin, nous pouvons dire que les paramètres de chaque couche jouent un rôle très important par rapport à la performance de l'appareil réfléchi, en particulier dans l'amélioration de l'efficacité de la conversion des cellules solaires.

Références

- [1] A. Niemegeers, M. Burgelman, K. Decock, J. Verchraeg, S. Degrave, "SCAPS 3201 Manual", ELIS, (2013).
- [2] A. Niemegeers, M. Burgelman, "Numerical Modelling of ac-caractéristiques of CdTe and CIS solar cells" Photovoltaïque Specialists Conférence, IEEE, (1996)901-904,
- [3] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, "Modelling polycrystalline semi-conducteur solar cells", Thin Solid Films, 361 (2000) 527-532.
- [4] A. Niemegeers, S. Gillis, M. Burgelman "A user program for realistic simulation of polycrystalline hétérojonction solar celles: SCAPS-1D" Proceedings of the 2nd World Conférence on Photovoltaïque Energie Conversion, JRC, Européen Commission, (1998) 672-675.
- [5] A. Niemegeers, M. Burgelman "Effects of the Au/CdTe back contact on IV and CV caractéristiques of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells", Journal of Applied Physiques, 81(1997) 2881-2886.
- [6] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave "Electronique behaviour of thin-film CdTe solaire cells", Applied Physiques A, 69 (1999) 149-153.
- [7]N. A. Khan, K. S. Rahman, F. Haque, N. Dhar, M. A. Islam, M. Akhtaruzzaman, K. Sopian, N. Amin, "Design Optimization of CdTe Thin Film Solar Cells from Numerical Analysis", 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering (20-22 December, 2014), Dhaka, Bangladesh
- [8]T. Sinha, D. Lilhare, A. Khare,"A review on the improvement in performance of CdTe/CdS thin-film solar cells through optimization of structural parameters", Journal of Materials Science, 54 (2019) 12189-12205.
- [9] D. Parashar, V. S. G. Krishna, S. N. Moger, R. Keshav, M. G. Mahesha, "Thickness Optimization of ZnO/CdS/CdTe Solar Cell by Numerical Simulation", Transactions on Electrical and Electronic Materials, 21 (2020) 587-593.
- [10] R. Noufi, K. Zweibel, IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-4), (May 7-12, 2006), Waikoloa, Hawaii.

Le travail réalisé au cours de ce mémoire de fin d'étude a été guidé par une idée principale à savoir : en utilisant la simulation numérique basée sur le logiciel SCAPS -1D des propriétés et performances des cellules photovoltaïques en couches minces.

Dans un premier lieu, nous donnons des définitions détaillées sur les cellules photovoltaïques, les différentes technologies et notamment la technologie PV en couche minces. Ensuite, nous avons présenté d'une manière générale le matériau de CdTe et CdS, en présentant ses différentes propriétés (structurales, électroniques, Optiques et Electricques), par la suite on a mentionné les différentes techniques d'élaboration des couches minces à base de CdTe.

Après, pour une étudier bienveillante des performances des cellules photovoltaïques, nous avons réalisé la simulation numérique. On optimise les paramètres physiques et électriques tel que les épaisseurs, les dopages, énergie de gap et la température pour chaque cellule afin de voir leurs influences sur la caractéristique électrique des structure n-SnOx/n-CdS/p-CdTe.

Puis on a déterminé les valeurs optimales de Energie de gap de la couche CdTe et des épaisseurs et des dopages pour chaque couche (CdS, CdTe), qui donnent les meilleures performances pour améliorer l'efficacité de la cellule solaire. Les résultats qui nous extrairons dans cette étude par simulation est soumise à éclairément AM1.5G et à la température de fonctionnement de (25°C) 300°K.

L'étude des caractéristiques électriques de la cellule (SnOx/CdS/CdTe) a donné rendement = 16.14 %, FF= 68.71%, Jsc= 24.116641 mA/cm², Voc= 0.9739 V.

Finalement, La couche absorbante CdTe dans la cellule solaire joue un rôle clé dans la détermination du rendement de la cellule, car l'action photoélectrique s'est produite dans le lien formé par la couche absorbante avec la couche isolante CdS et nos résultats sont d'une grande importance pour permettre l'amélioration technologique lors de futures travaux expérimentaux.

Résumé

Des simulations numériques des caractéristiques électriques des cellules solaires à base de tellurure de cadmium (CdTe) ont été réalisées par l'outil Solar Cell Capacitance Simulator (SCAPS 1-D). La structure en couches constituée de (CdTe) en tant qu'absorbeur avec une couche tampon de sulfure de cadmium (CdS) a été étudiée. La cellule solaire de notre a démontré une efficacité de conversion de 16.14 %, une tension de circuit ouvert (VOC) de 0.9739 V, une densité de courant de court-circuit (J_{sc}) de 24.11 mA/cm² et le facteur de forme (FF) de 68.71%. Les cellules ont été éclairées via AM 1,5 pour étudier le courant tension I(V). Les simulations ont été optimisées en ajustant les épaisseurs et les concentrations de dopants de CdTe et CdS, De plus, l'effet de la variation de température sur les performances de l'appareil a été étudié.

Abstract

Numerical simulations of the electrical characteristics of cadmium telluride (CdTe) solar cells have been performed by the Solar Cell Capacitance Simulator (SCAPS 1-D) tool. The layered structure consisting of (CdTe) as an absorber with a buffer layer of cadmium sulfide (CdS) was studied. Our solar cell demonstrated a conversion efficiency of 16.14%, an open circuit voltage (VOC) of 0.9739 V, a short circuit current density (J_{sc}) of 24.11 mA/cm² and the form factor (FF) of 68.71%. The cells were illuminated via AM 1.5 to study the current voltage I(V). The simulations were optimized by adjusting the thicknesses and the dopant concentrations of CdTe and CdS. In addition, the effect of the temperature variation on the performance of the device was studied.

المخلص:

تم إجراء محاكاة عددية للخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية تيلورايد الكادميوم (CdTe) بواسطة أداة محاكاة سعة الخلايا الشمسية (SCAPS 1-D) تمت دراسة التركيب الطبقي المكون من (CdTe) كمتص مع طبقة عازلة من كبريتيد الكادميوم (CdS) أظهرت خليةنا الشمسية كفاءة تحويل تبلغ 16.14٪ ، جهد دائرة مفتوحة (VOC) يبلغ 0.9739 فولت ، كثافة تيار ماس كهربائي 24.11 (Jsc) مللي أمبير / سم² وعامل الشكل 68.71 (FF) ٪. تمت إضاءة الخلايا عبر AM 1.5 ، لدراسة الجهد الحالي (V). تم تحسين عمليات المحاكاة عن طريق ضبط السماكة والتركيزات المشوبة لـ CdTe و CdS. بالإضافة إلى ذلك تم دراسة تأثير تغير درجات الحرارة على أداء الجهاز.