

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Énergétique et Énergies Renouvelables

Par :

Mr MEZIANI Mouhamed Taha Abdessamad

Sur le thème

Amélioration des propriétés physiques des TCO à base de ZnO pour des applications solaires

Soutenu publiquement le 02 juillet 2023 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr MERAD Laarej	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mme BOUCHAOUR Mama	MCA	Université de Tlemcen	Encadrante
Mr NOM Prénom	MCB	Université de Tlemcen	Examinatrice

2022/2023

RESUME

Le secteur photovoltaïque est un marché intensément étudié dans le but d'atteindre l'équilibre optimal entre l'efficacité énergétique et le coût. En quelques années elle s'est imposée et a apporté de nombreux développements et innovations. L'enjeu est de trouver des matériaux qui offrent des rendements compétitifs tout en permettant des économies de matière significatives. A cet égard, nos recherches s'appuient sur l'utilisation de nouvelles structures à base d'oxyde de zinc. Les études de simulation sont réalisées à l'aide du logiciel SCAPS-1D. Des résultats prometteurs ont été obtenus.

ABSTRACT

Photovoltaic sector is an intensely studied market with the aim of achieving the optimal balance between energy efficiency and cost. In a few years brought many developments and innovations. The challenge is to find materials that offer competitive yields while allowing significant material savings. In this target, our research is based on the use of new structures based on zinc oxide as buffer layer . Simulation studies are carried out using SCAPS-1D software. Promising results have been obtained.

المخلص

يعد قطاع الطاقة الكهروضوئية سوقاً مدروساً بشكل مكثف بهدف تحقيق التوازن الأمثل بين كفاءة الطاقة والتكلفة. في غضون سنوات قليلة ، رسخت هذه الطاقة نفسها وجلبت العديد من التطورات والابتكارات. يتمثل التحدي في العثور على المواد التي تقدم عوائد تنافسية مع السماح بتوفير كبير في المواد. في هذا الصدد ، يعتمد بحثنا على استخدام هياكل جديدة تعتمد على أكسيد الزنك. يتم إجراء دراسات المحاكاة باستخدام برنامج SCAPS-1D.

Dédicace

Grâce à mon Dieu, Je dédié ce travail

aux personnes les plus chères dans ma vie : aux deux bougies qui éclairent
mon monde : mon père et ma mère. Ils m'ont toujours entouré et motivé
pour devenir meilleur.

A mon frère Oussama, et ma sœur Asma

Remerciement

Tout d'abord, Merci Mon Dieu le Tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Au terme de cette étude, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à mon encadrante Dr. BOUCHAOUR Mama Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen pour sa précieuse aide, ses conseils fructueux, ses orientations judicieuses et ses encouragements.

J'adresse mes plus vifs remerciements au *Professeur* MERAD Laarej, Professeur à l'université de Tlemcen qui a bien voulu présider le jury ainsi que *Dr. BOUTASTA Amel*, Maître de conférences « B » à l'université de Tlemcen qui a bien voulu examiner mon travail.

Mes sincères remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ma formation et à tous ceux qui m'ont enrichi de leur connaissance.

Table des matières

Remerciements

Dédicace

INTRODUCTION GENARALE.....8

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux utilisés et la cellule solaire.....10

I.1 Les oxydes transparents conducteurs (TCO).....11

I.2 Applications des Oxydes transparent conducteurs.....12

I.3 L'oxyde de zinc (ZnO) et ces alliages13

I.4 Le nitrure de gallium17

I.5 la filière photovoltaïque CdTe17

I.6 Jonction P-N.....17

I.6.1 Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque.....18

I.6.2 Les paramètres photovoltaïques.....19

CHAPITRE II : MODELISATION PHYSIQUE.....23

II.1 Cellules photovoltaïques étudiées.....24

II.2 Présentation scaps-1D.....24

II.3 Utilisation du logiciel.....24

II.4 Notions de base.....25

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....

Introduction.....	30
III.1 Tableaux des résultats.....	30
III.2 Structure CdTe /ZnO/ZnMgO).....	31
III.3 Diagramme d'énergie.....	32
III.4 Caractéristique J-V.....	34
III.5 Rendement quantique.....	36
III.6 Effet de la température a différente épaisseur.....	37
III.7 Effet du dopage.....	38
III.8 Effet des résistances série et parallèle.....	40
Conclusion générale et Perspectives.....	42

Liste des figures

Figure I.1 Evolution du nombre de publications traitant de ZnO, In ₂ O ₃ et SnO ₂ depuis 1970 à 2008 (Recherche effectuée sur la base de données Scopus).....	
Figure I.2 Historique du ZnO	
Figure I.3 Jonction P-N.....	
Figure I.4 principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].	
Figure I.5 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.....	
Figure II.1 Structure des cellules étudiées	
Figure II.2 Panneau de démarrage de SCAPS	
Figure II.3 Sélection des caractéristiques à simuler.....	
Figure II.4 Panneau d'affichage des résultats.....	
Figure II.5 Diagramme d'énergie de CdTe / ZnO.....	
Figure II.6 Diagramme d'énergie de CdTe / ZnMgO.	
Figure II.7 Diagramme d'énergie de CdTe / GaN	
Figure II.8 Diagramme d'énergie de CdTe / ZnO/GaN.....	
Figure II.9 Diagramme d'énergie de CdTe /ZnO/ ZnMgO.....	
Figure III.1:(J-V) CdTe / ZnO.....	
Figure III.2 (J-V) CdTe / ZnMgO.....	
Figure :III.3 (J-V) CdTe / GaN.....	
Figure III.4 (J-V) CdTe / ZnO/GaN.....	
Figure III.5(J-V) CdTe / ZnO/ZnMgO	
Figure III.6 . Caractéristique (J-V) CdTe / ZnO/ZnMgO	
Figure III.7 Caractéristique (J-V) CdTe / ZnO/ZnMgO/GaN.....	
Figure III.8 rendement quantique des cellules CdTe/ZnO/ZnMgO,CdTe/ZnO/ZnMgO/GaN	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

Tableau 1.1: les paramètres des matériaux utilisé.....	
Tableau 2:les résultats de la simulation.....	
Tableau 3: influence de l'épaisseur (ZnO)	
Tableau 4 :influence du dopage.....	
Tableau 5: influence de température.....	

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie augmente rapidement. En effet, l'énergie a toujours été le moteur de l'activité humaine. Les énergies renouvelables sont la solution pour débarrasser la planète des ressources fossiles non renouvelables telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel qui constituent une menace constante. L'énergie renouvelable est une source d'énergie qui se recharge si rapidement qu'elle est considérée comme inépuisable.

L'énergie renouvelable provient de phénomènes naturels causés principalement par le soleil.

Le rayonnement solaire est une source d'énergie respectueuse de l'environnement, la plus partagée et la plus abondante sur terre. Une partie de ce rayonnement peut être utilisée pour générer directement de la chaleur ou de l'électricité. En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becker découvre l'effet photovoltaïque.

Après la formation d'excitons (paires électron-trou) lors de l'absorption de photons incidents dans le matériau semi-conducteur, un courant électrique est généré en fonction de la séparation des charges sous l'influence du champ. Électricité d'une jonction pn. L'efficacité des cellules solaires dépend de l'efficacité de cette séparation [1].

De nombreux efforts ont été faits pour obtenir des cellules solaires à couches minces avec une bonne efficacité de conversion et un faible coût.

Les premières études utilisaient des cellules à base de silicium et du tellure de cadmium (CdTe).

Les deux matériaux contiennent les éléments les plus abondants sur terre. D'autres études sont basées sur des cellules CIGS à base de chalcopyrite. Des rendements très intéressants ont été obtenus [2-3]. Le domaine du photovoltaïque évolue avec l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les matériaux organiques et pérovskites.

L'objectif de notre étude repose sur l'utilisation de la cellule solaire à base d'oxyde de zinc comme couche tampon sur la couche de CdTe.

Le manuscrit est divisé en trois chapitres. Des informations générales sont données dans le premier chapitre. La partie 2 introduit la modélisation à l'aide du logiciel SCAPS-

1D. Les résultats obtenus à partir des simulations sont présentés au chapitre 3. Enfin, nous terminons ce manuscrit en présentant les conclusions et les perspectives de cette étude.

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux utilisés et la cellule solaire

Ce chapitre introduit les différents matériaux utilisés dans notre étude ainsi qu'un rappel sur la cellule solaire et ses paramètres essentielles.

I.1 Les oxydes transparents conducteurs (TCO)

La découverte du TCO remonte au début du XXe siècle, lorsque Bädeker [5] a découvert que les couches minces d'oxyde de cadmium (CdO) déposées dans des chambres à décharge lumineuse étaient conductrices et transparentes. De ce premier constat est né un nouveau sujet de recherche, toujours d'actualité un siècle plus tard. Depuis, de nombreux matériaux TCO ont vu le jour. Notamment In_2O_3 , SnO_2 , ZnO , Cd_2SnO_4 , CdSnO_2 , $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO), $\text{ZnO}:\text{Al}$, $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, $\text{SnO}_2:\text{Cd}$, $\text{SnO}_2:\text{F}$, CdInO_x , $\text{In}_2\text{O}_3:\text{F}$. L'obtention de tels matériaux offrant un bon compromis entre la transparence à la lumière visible et une bonne conductivité électrique représente un défi majeur pour l'industrie.

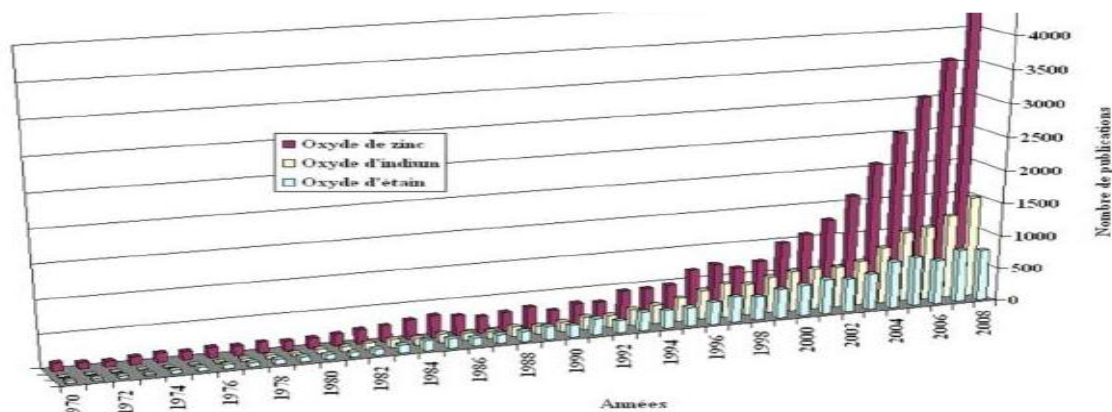


Figure I.1 : Evolution du nombre de publications traitant de ZnO , In_2O_3 et SnO_2 depuis 1970 à 2008 (6).

Ces TCO sont des matériaux largement utilisés car de nombreuses applications nécessitent une combinaison de transparence optique et de conductivité électrique. Certains d'entre eux sont énumérés ci-dessous :

- écran plat ,
- vitres antigel ,
- Fenêtres réfléchissant la chaleur (bâtiments, poêles, etc.),
- miroirs et vitres électrochromes,
- écran de contrôle tactile,
- Protection électromagnétique,
- Décharge statique,

- Cellule solaire : En tant que contact frontal par lequel la lumière doit passer pour entrer dans la cellule solaire.

I.2 Applications des Oxydes transparent conducteurs :

Les caractéristiques du TCO lui permettent d'être utilisé dans diverses applications.

I. 2. 1. Cellules solaires :

La fonction cellulaire commence par l'absorption de photons pour générer des excitons. Il diffuse dans une couche typiquement de 10 nm de long. A l'interface donneur-accepteur, l'exciton se dissocie en deux charges distinctes. La charge est ensuite transportée vers les électrodes où elle est collectée. Pour extraire de manière plus fiable la charge photogénérée, le travail de sortie de l'électrode doit être au même niveau que le travail de sortie de la couche active. Le niveau donneur HOMO doit correspondre à Φ_{TCO} et le niveau accepteur LUMO à $\Phi_{\text{Métal}}$ (4).

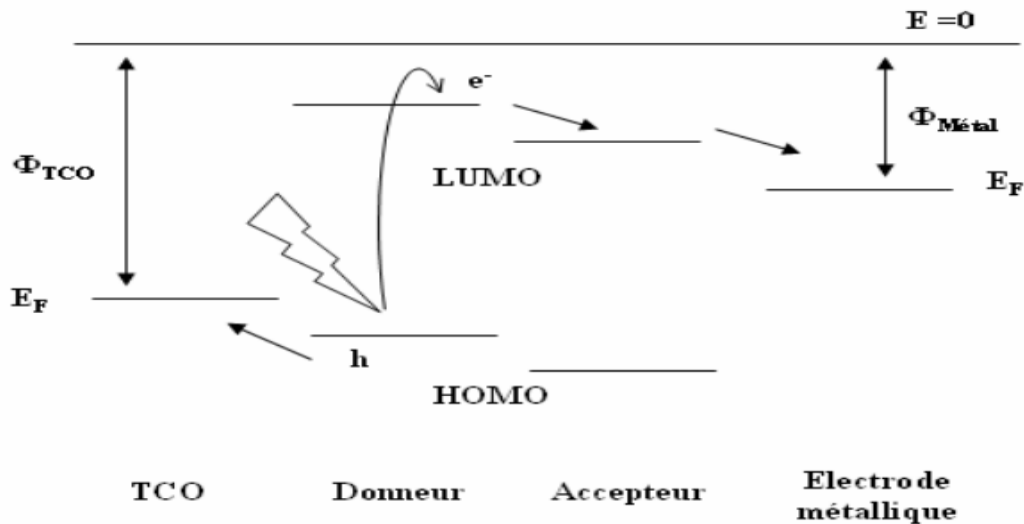


Figure I.2: Structure de bandes typiques d'une cellule solaire organique.

I.2.2. Système optoélectronique : Les oxydes transparents conducteurs sont utilisés comme électrodes dans les diodes électroluminescentes organiques (OLED).

I.2.3. Capteur de gaz : Les propriétés électriques du TCO peuvent changer en présence de certains gaz. Le gaz considéré est absorbé à la surface de la couche mince. Les molécules adsorbées peuvent piéger les électrons libres. Cela conduit à une diminution de la conductivité électrique.

I.3. L'oxyde de zinc (ZnO) et ces alliages

L'oxyde de zinc (ZnO) est un matériau découvert par M. Matsuok en 1971. Le ZnO est un semi-conducteur à large bande interdite (énergie de gap ou écart d'énergie). Transparent dans le visible et le proche infrarouge, ses propriétés lui permettent d'être utilisé dans une variété d'applications, telles que les composants d'équipements électroniques pour limiter les coupures de courant à grande échelle [6]. On le trouve dans l'optoélectronique, les capteurs ou les couches minces. Il possède également des propriétés électromécaniques très intéressantes, lui permettant d'être utilisé comme conducteur transparent et matériau piézoélectrique dans les dispositifs acoustiques [7].

La figure suivante l'arbre historique du ZnO [8, 33].

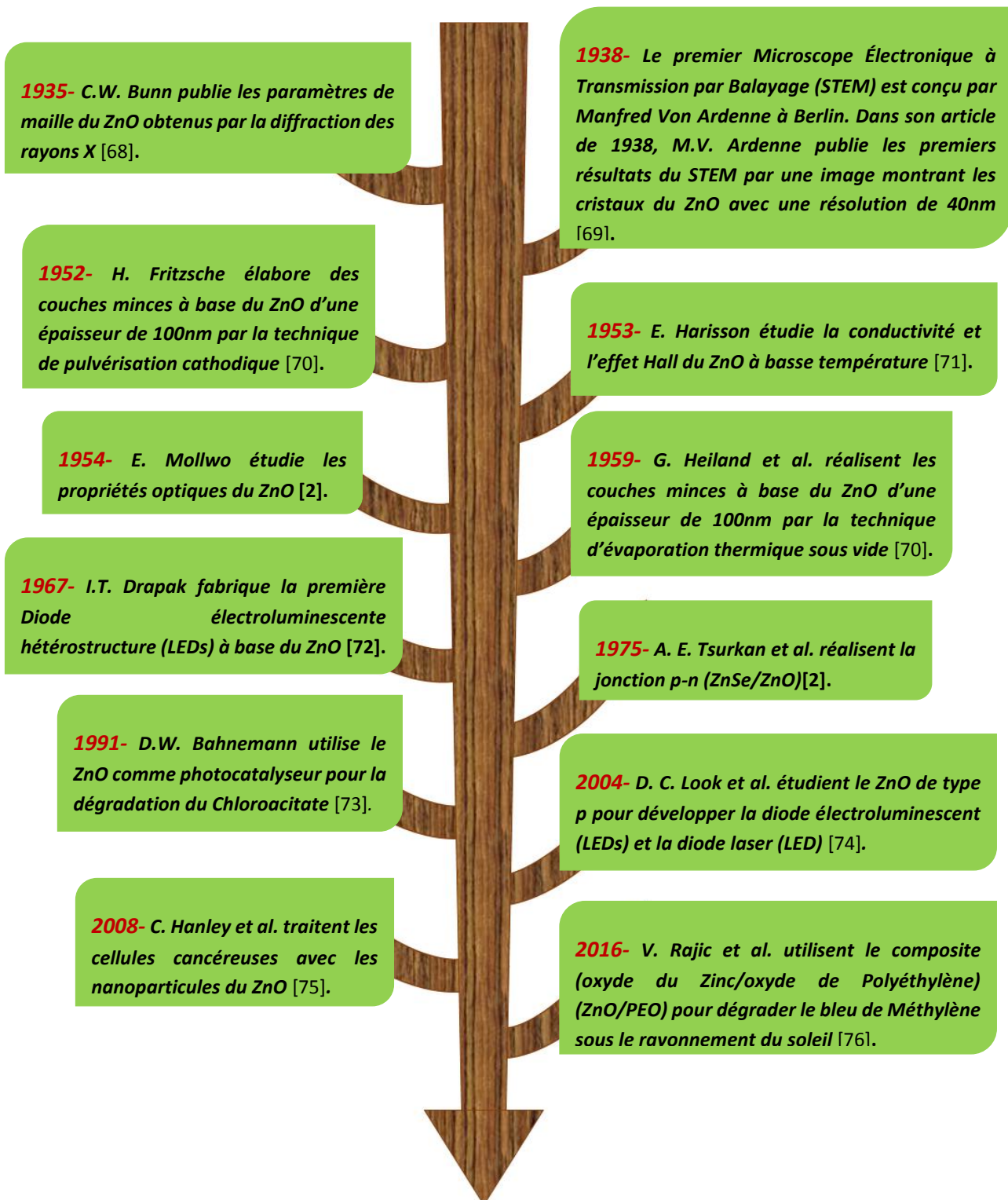


Figure 3- Arbre historique du ZnO [8, 33].

I.3.1 PROPRIETES DE ZnO :

Propriétés cristallographiques de ZnO

Un monocristal de ZnO idéal est constitué d'atomes de zinc et d'oxygène liés par covalence. Partiellement ionique, c'est-à-dire polaire. En fait, l'ionicité dite de Phillips de la liaison ZnO est de 0,61 ; la limite au-dessus de laquelle la liaison est considérée comme intrinsèquement ionique est de 0,68. Cette propriété de liaison ZnO affecte la cristallographie de ZnO. Le réseau de ZnO est de type wurtzite à température et pression normales, et de type NaCl à haute température et haute pression.

Liaison covalente	Zn neutre : 1.31 Å°	O neutre : 0.66 Å°
Liaison ionique	Zn ²⁺ : 0.70 Å°	O ²⁻ : 1.32 Å° [11]
	Zn ²⁺ : 0.78 Å°	O ²⁻ : 1.24 Å° [12]
	Zn ²⁺ : 0.60 Å°	O ²⁻ : 1.38 Å° [13]

Tableau I.1: Rayons atomiques et ioniques des atomes de zinc et d'oxygène dans ZnO [9]

Caractéristiques électriques

Le ZnO est un semi-conducteur dégénéré de type N. La conductivité élevée des couches d'oxyde pur est due à la forte concentration de porteurs de charge (électrons), car la mobilité dans ces couches est bien inférieure à la masse du matériau correspondant.

Des concentrations élevées d'électrons sont attribuées à des écarts par rapport à la stoechiométrie.

Propriétés électroniques et optiques

La structure électronique du ZnO a fait l'objet de diverses études théoriques au fil des années.

La bande interdite ou « gap » du matériau est comprise entre 0 et 3,4 eV. Le niveau de Fermi monocristallin idéal se situe au milieu de cette bande. Ces deux propriétés confèrent au ZnO ses propriétés de semi-conducteur à large "gap".

Propriétés optiques de ZnO

L'oxyde de zinc est un matériau transparent ayant un indice de réfraction égal à 2 [10]. Il fait partie de la famille des oxydes semi-conducteurs transparents et présente une forte absorption et diffusion Des rayonnements ultraviolets.

Sous l'action d'un faisceau lumineux de haute énergie ($E > 3,4\text{eV}$) ou d'un bombardement d'électrons, l'oxyde de zinc émet des photons. Ce phénomène correspond a de la luminescence. En fonction des conditions d'élaboration et des traitements ultérieurs, différentes bandes de photoluminescence ont été observées. Elles vont du proche UV ($\lambda=350\text{nm}$), au visible (Rayonnement de couleur verte de longueur d'onde proche de $\lambda=550\text{ nm}$).

Les propriétés mécaniques [8]

ZnO est un matériau souple avec une dureté Mohs d'environ 4,5. Sa constante élastique est inférieure à celle des semi-conducteurs III-V tels que le GaN. La capacité calorifique du ZnO, sa conductivité thermique élevée, sa faible dilatation thermique et sa température de fusion élevée sont avantageuses pour la céramique. Parmi les semi-conducteurs à liaisons tétraédriques, ZnO serait le plus élevé. Tenseur piézoélectrique comparable à GaN et AlN. Cette propriété en fait un matériau important pour de nombreuses applications piézoélectriques nécessitant un couplage électromécanique important.

I.3.2. Structure ZnMgO

Les nanostructures de ZnMgO sont souvent en phase wurtzite. Les propriétés d'électroluminescence du ZnO ont été exploitées en utilisant une couche de ZnMgO comme couche barrière énergétique pour confiner les porteurs.

Le changement de la constante de réseau et le décalage vers le bleu de l'émission au bord de la bande indiquent que les ions Zn^{2+} dans le réseau ZnO ont été remplacés avec succès par des ions Mg^{2+} . Les études de diffusion Raman révèlent un trouble de substitution microscopique dû aux changements de forme des lignes de phonons E2 (ordre supérieur) dans les nanostructures ZnO: Mg. En plus des phonons hôtes ZnO, deux bandes supplémentaires autour de 383 et 510 cm^{-1} peuvent être attribuées aux modes vibrationnels liés au Mg [11].

I.4 Le nitrure de gallium (GaN) [12]

Le nitrure de gallium (formule chimique GaN) est un matériau semi-conducteur aux propriétés particulières. Le GaN est utilisé dans l'électronique depuis de nombreuses années, en commençant par les LED dans les années 1990, puis pour émettre de la lumière pour éclairer les téléviseurs et les écrans d'ordinateur, aussi dans les panneaux solaires pour convertir la lumière en électricité. Aujourd'hui, le GaN a remplacé le silicium, autrefois le matériau semi-conducteur le plus populaire de l'industrie, dans les transistors. Il est utilisé dans les transistors, etc. Ces transistors à base de GaN peuvent transporter plus de puissance, avoir des vitesses de commutation plus rapides (environ 40 millions de fois par seconde) et sont plus économes en énergie.

I.5 la filière photovoltaïque CdTe [14]

La filière CdTe (tellerure de cadmium) est caractérisée par les propriétés optiques optimales telles que la bande d'énergie interdite directe de l'ordre de 1,5 eV et une grande absorption dans le spectre solaire. Les recherches sur la classe de CdTe a commencé dans les années 60. Les premières utilisations des structures à base de CdTe sont apparues en 1964. Les premiers modules basés sur CdS/ CdTe a vu le jour en 1972. Malgré le rendement encourageant de 15%, cette filière fut délaissée.

I.6 Jonction P-N [13]

Une jonction N-P est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie du cristal est dopée N et l'autre partie est dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Le fonctionnement de la jonction est simple. Cette jonction se divise en deux parties. On peut connecter la région N à la borne négative du générateur et la région P à la borne positive (tension directe).

Les électrons libres dans la région N et les trous libres dans la région P migrent vers la jonction avec une direction de polarisation spécifique.

Le courant circule lorsque les deux parties se touchent. Des électrons sont injectés dans la région P et des trous sont injectés dans la région N. On parle d'injection de porteurs de charges minoritaires. Lorsque la jonction est polarisée dans des directions opposées, les

électrons se déplacent vers le pôle (+) et les trous se déplacent vers le pôle (-), s'éloignant de la jonction et laissant des charges dues aux impuretés près de la jonction. Les impuretés sont des atomes qui sont étroitement liés dans le réseau cristallin et ne peuvent pas bouger.

Lorsque les deux parties sont en contact, la résistance inverse du dispositif est très élevée du fait de la présence de régions isolantes proches. Par conséquent, les jonctions NP agissent comme des redresseurs, permettant au courant de circuler dans le sens direct et présentant une résistance très élevée dans le sens inverse.

Pour la polarisation directe, des porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la gamme P, sont injectés. Ces électrons ont tendance à se recombiner avec des trous abondants dans cette région P.

Ça s'effectue après une période de temps appelée durée de vie des porteurs minoritaires. Lorsqu'une jonction PN mince est exposée à un flux lumineux, des photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite du matériau génèrent des paires électron-trou. Cela augmente le courant de saturation inverse proportionnellement au flux lumineux.

I.6.1 Les différents rendements d'une cellule photovoltaïque [14]

Réponse spectrale

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante :

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (1)$$

Rendement quantique externe

Le rendement quantique externe EQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par :

$$EQE = SR(\lambda) \frac{hc}{\lambda q} \quad (2)$$

Rendement quantique interne

Le rendement quantique interne IQE de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe EQE par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1 - R(\lambda)} \quad (3)$$

Le coefficient de réflexion s'écrit :

$$R(\lambda) = \left(\frac{n_2(\lambda) - n_1(\lambda)}{n_2(\lambda) + n_1(\lambda)} \right)^2 \quad (4)$$

si les matériaux en contact sont d'indices de réfraction n_1 et n_2 .

I.6.2 Les paramètres photovoltaïques

La caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire explique comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température. En observant la caractéristique (figure 4), trois points importants sont distincts:

- Point un (1) correspondant au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro (courant à court-circuit).
- Point trois (2) correspondant à la tension maximale de la cellule solaire sans charge (circuit ouvert).
- Point deux (3) correspondant à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire.

Aussi, dans une cellule solaire, la caractéristique peut être divisée en trois intervalles différents:

- L'intervalle où la cellule solaire est considérée en tant que source courant; le courant est constant tandis que la tension est variable (Intervalle I).
- L'intervalle, elle n'est considérée ni comme source de courant ni comme une source de tension (intervalle II).
- L'intervalle où elle est considérée comme une source de tension. Comme la tension est variable, le courant est constant (intervalle III).

Lorsqu'une cellule solaire est soumise à une charge résistive constante, cette charge est représentée par un point sur la courbe I-V de la cellule. Lorsque la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace vers la droite le long de la courbe caractéristique. Cependant, à mesure que la charge diminue, le point de fonctionnement de la courbe caractéristique augmente vers la gauche de la direction [15].

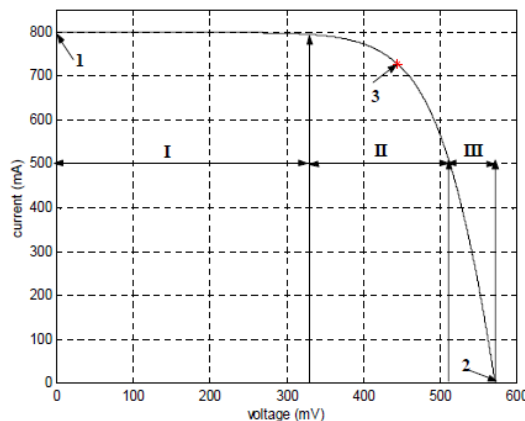


Figure 4 : Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire [15].

Rappelons certaines grandeurs liées à la cellule solaire :

a. courant de court-circuit, I_{cc}

I_{cc} correspond à l'intensité du courant de court-circuit, c.à.d. à $V=0$. Il est directement proportionnel à l'énergie du rayonnement à la température ambiante et à la surface de la cellule.

b. tension de circuit ouvert, V_{oc}

La valeur V_{co} correspond à la tension en circuit ouvert c.à.d. $I=0$. Elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des matériaux.

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \log\left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0}\right) \quad (7)$$

c. La puissance maximale P_m

C'est la puissance maximale de sortie correspondant au point pour lequel le produit de la tension et de l'intensité du courant soit maximal, elle est donnée par :

$$P_m = I_m \times V_m \quad (8)$$

d. Facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et le produit entre I_{cc} et V_{co} correspondant à la puissance maximale idéale, il est exprimé par :

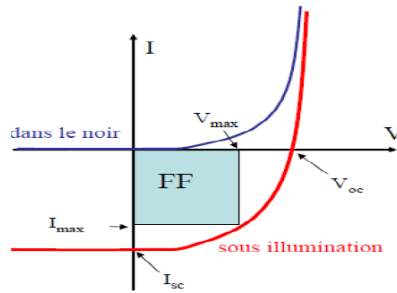


Figure I.1 : Les courbes $I = f(V)$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (9)$$

e. Rendement de la cellule, η

Il représente la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Il donne le rapport entre la puissance électrique optimale délivrée et la puissance solaire reçue par la cellule à une température donnée. Il est défini par :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = FF \frac{I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc}} \quad (10)$$

P_{inc} : la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$. Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique.

En circuit ouvert ($R_c = \infty, I = 0, V = V_{co}$) ou en court-circuit ($R_c = 0, I = I_{cc}, V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur

optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée P_{max} (figure 5).

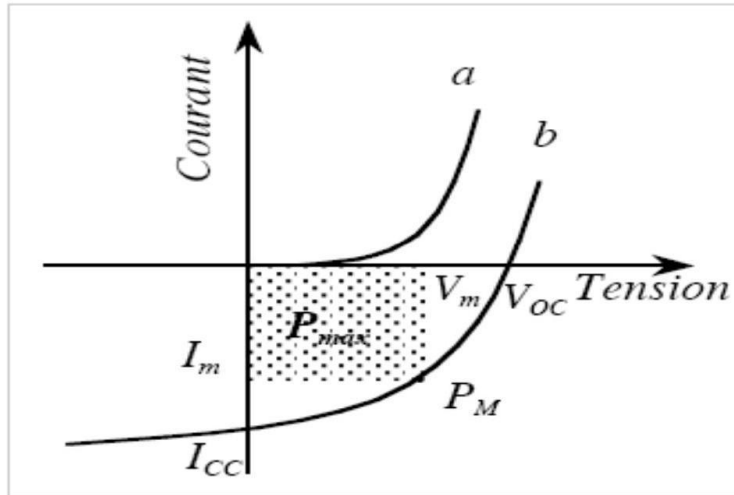


Figure 5. Caractéristique courant-tension d'une cellule PV [15]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents matériaux utilisés dans notre étude. Un rappel sur le fonctionnement de la cellule solaire a été également présenté ainsi que les différents paramètres nécessaires à l'étude de la cellule photovoltaïque et à obtenir par le simulateur SCAPS-1D.

CHAPITRE II: MODELISATION PHYSIQUE

Ce chapitre est consacré à une brève description du modèle mathématique, des structures simulées par le logiciel SCAPS-1D utilisé dans l'étude.

II.1. Cellules photovoltaïques étudiées

La modélisation numérique des cellules solaires à couches minces est importante pour étudier les explications physiques proposées pour les variations physiques des performances des cellules solaires. En général, c'est le cas lorsque l'on n'a qu'une connaissance partielle des paramètres d'entrée de la cellule étudiée. Nos recherches portent sur les cellules solaires à base de CdTe, ZnMgO et GaN en prenant la couche ZnO comme couche tampon.

Les recherches tournent sur autres matériaux car les cellules à base de silicium utilisent une grande épaisseur. Ce qui rend les dispositifs couteux donc on cherche de minoriser ces épaisseurs des cellules pour un rendement compétitif.

Le choix s'est porté sur le CdTe abandonné. Pourquoi ce choix car il a été délaissé et beaucoup de secrets restent à percer. Afin de mener à bien notre étude, nous avons recherché les paramètres nécessaires à introduire dans le logiciel SCAPS-1D.

II.2 PRESENTATIONDESCAPS-1D [16]:

Le code de simulation d'appareil SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension) permet de simuler les propriétés de couches minces ou de cellules solaires permanentes. (Largeur, dopage...). Il a été développé par Marc Burgelman de l'université de Gent en Belgique afin de résoudre et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs solaires.

Il permet de simuler les caractéristiques du courant électrique alternatif ou continu des cellules solaires en films minces. Il possède une base de données contenant plusieurs types de cellules solaires (fichier data) d'extension « def » dont on peut modifier leurs différents paramètres (largeur, dopage...)

II.3 UTILISATION DU LOGICIEL :

On clique sur l'icône ci-dessous sur le bureau ou bien double-clique sur le fichier SCAPS 3303.EXE dans le gestionnaire de fichiers ou dans n'importe quelle autre version de

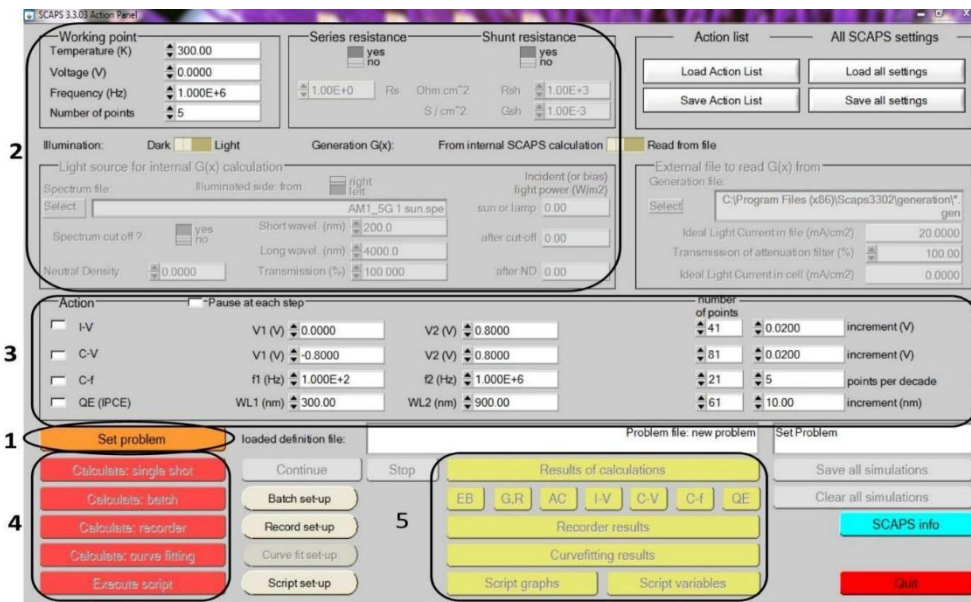
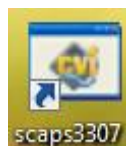


Figure II.1. Panneau de démarrage de SCAPS.

SCAPS.



II.4 NOTIONS DE BASE :

Afin de simuler et contrôler tous les paramètres d'un dispositif PV au moyen du logiciel SCAPS-1D, on doit passer par trois grandes fenêtres :

- Fenêtre d'exécution (action panel).
- Fenêtre de conception de dispositif et la définition du problème (Definition panel)
- Fenêtre des résultats

SCAPS s'ouvre avec la fenêtre Action Panel. On peut à n'importe quel moment accéder aux deux autres fenêtres, fenêtre de conception de dispositif et fenêtre des résultats comme le montre la figure ci-dessous

La signification des blocs nommés de 1 à 5 est expliquée comme suit :

1. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée
2. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée
3. Indiquer la mesure à simuler
4. Commencer le calcul

5. Afficher les courbes de simulation.

Il est possible de faire du copier-coller vers, par exemple Excel ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données.

On peut basculer vers un des panneaux personnalisés.

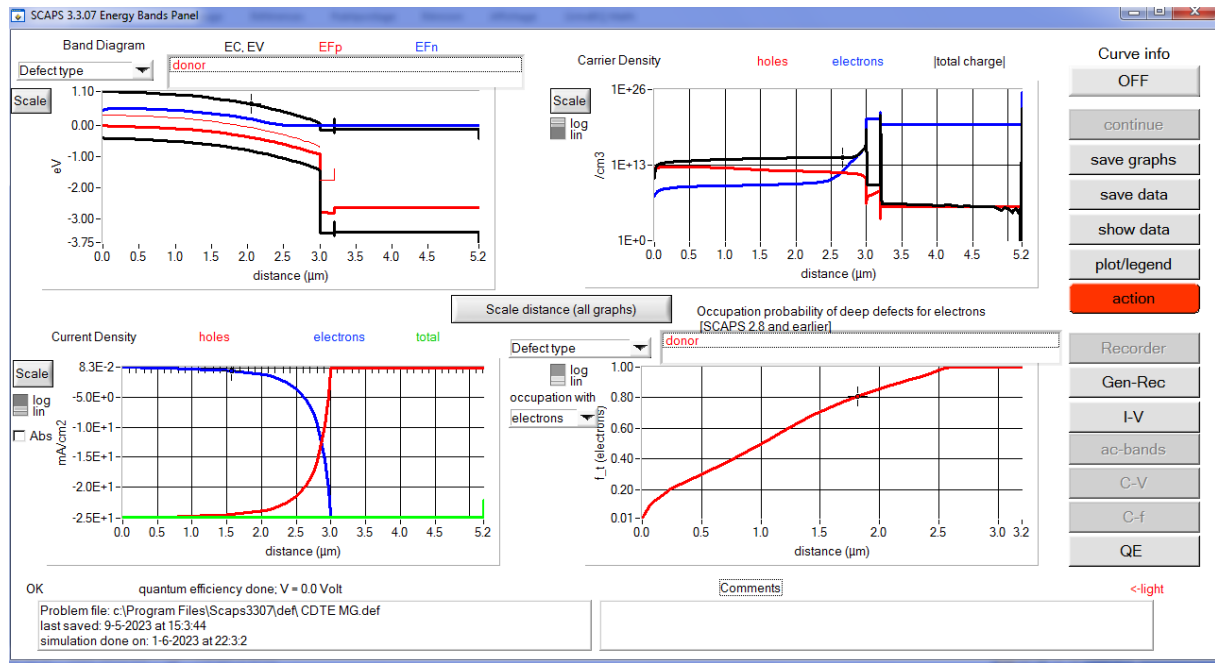


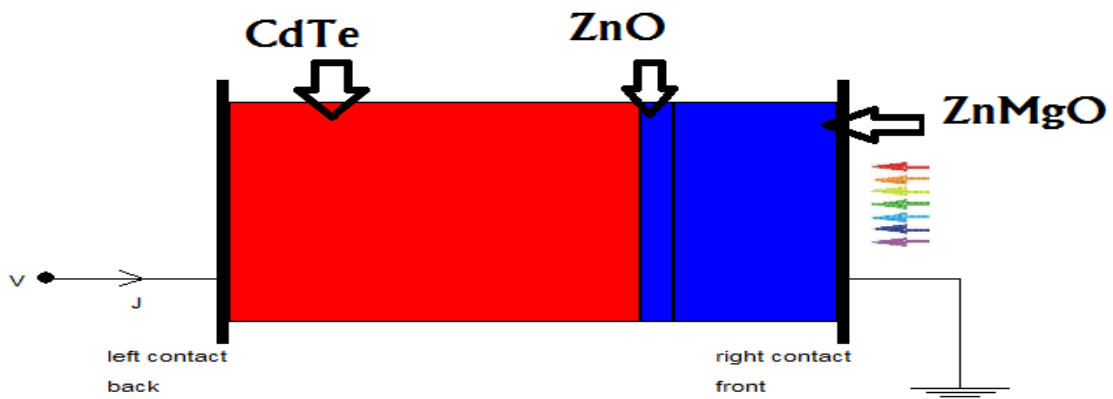
Figure II.2 Panneau d'affichage des résultats

Le temps d'exécution est très court égal à peu près à 5 secondes.

Exemple d'affichage de quelques cellules étudiées dans ce travail.

Cellule CdTe/ZnO/ZnMgO

Cette cellule utilise la couche absorbante à base de CdTe, la couche tampon est de ZnO et la couche fenêtre peut être soit ZnMgO ou GaN.



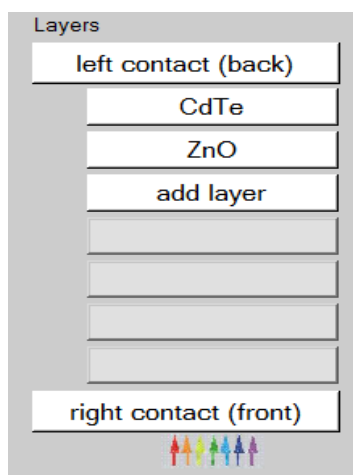
FigureII.3. Exemple de Structure de cellule étudiée affichée par SCAPS-1D

les paramètres des matériaux introduites sont résumés dans le tableau suivant. Si l'un des paramètres manque, la simulation n'est pas complète et les résultats.

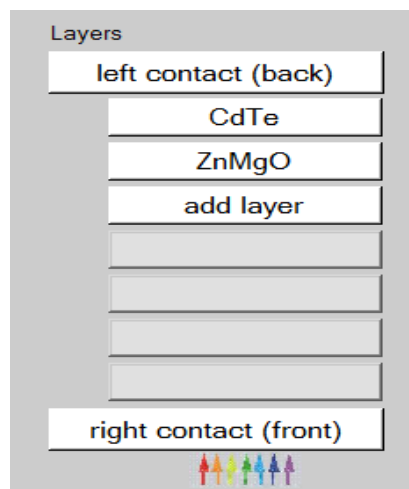
Grandeurs	Absorbeur CdTe	Couche Tampon, ZnO	Couche fenêtre ZnMgO
Epaisseur (μm) Bande de gap(eV)	3	2	2
Affinité électrique (eV)	1,50	3,30	3,320
Constante diélectrique Densité, $N_C(\text{cm}^{-3})$	3,900	4,100	4,530
Densité $N_V(\text{cm}^{-3})$	9,40	9,00	9,00
$\mu_e(\text{cm}^2/\text{Vs})$	8×10^{17}	4×10^{18}	$2,2 \times 10^{18}$
$\mu_h(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$1,8 \times 10^{19}$	1×10^{19}	$1,8 \times 10^{19}$
Donneur ND (cm^{-3})	$3,2 \times 10^2$	1×10^2	1×10^2
Accepteur NA (cm^{-3})	4×10^1	$2,5 \times 10^1$	$2,5 \times 10^1$
Vitesse électron, $V_e(\text{cm/s})$	0×10^0	1×10^{18}	1×10^{20}
Vitesse trou, $V_h(\text{cm/s})$	2×10^{14}	1×10^5	1×10^0
	10^7	1×10^8	1×10^7

Introduction et affichage de certaines structures étudiées sur le panneau du logiciel SCAPS-1D :

CdTe /ZnO



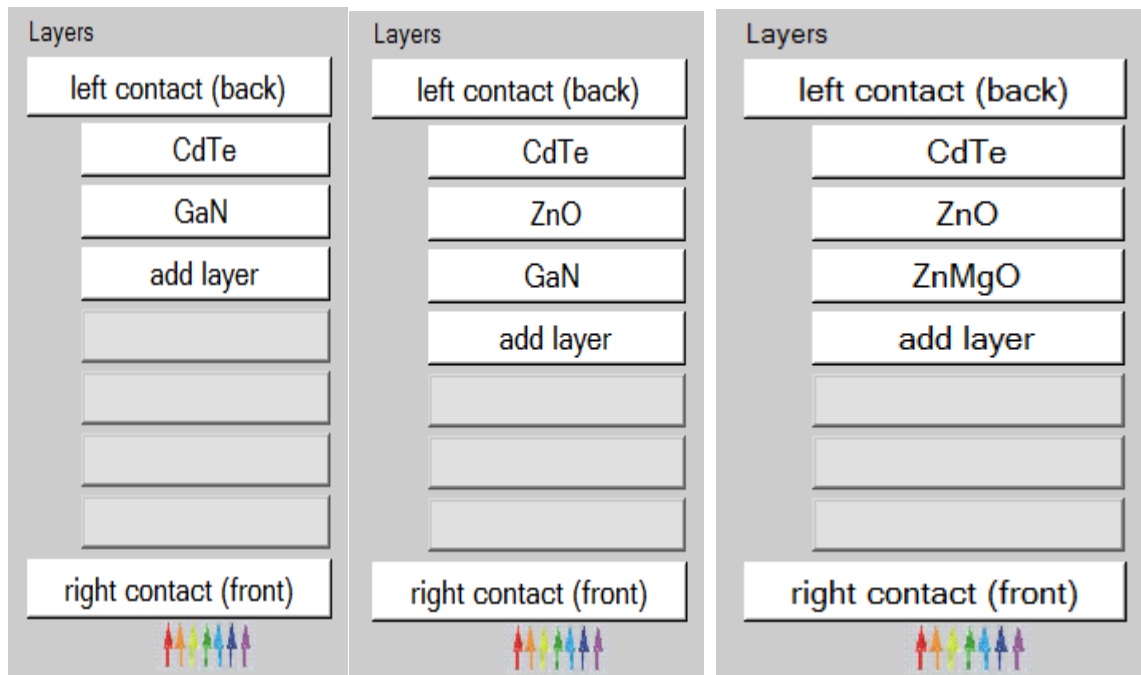
CdTe / ZnMgO



CdTe / GaN

CdTe / ZnO / GaN

CdTe / ZnO / ZnMgO



CHAPITRE III :
RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Les résultats numériques des différentes structures suivantes ; CdTe/ZnO, CdTe/ZnMgO, CdTe/GaN, CdTe/ZnO/ZnMgO, CdTe/ZnO/GaN sont présentés dans ce chapitre.

Ils concernent

- La densité de courant de court-circuit J_{cc} ,
- La tension de circuit ouvert V_{co}
- Le facteur de forme FF
- Le rendement quantique

Les tableaux suivants les résumant et les présentent.

III.1 Tableaux des résultats

Le tableau III.1 présente une comparaison avec les différentes structures utilisées. Nous avons voulu dans un premier temps étudier l'influence du matériau sur la structure et la comparer à la cellule de CdTe du logiciel lui-même. Les structures à base de ZnO montrent un net changement. En effet, les rendements étaient meilleurs ; Un rendement avoisinant 17% a été atteint pour la structure CdTe/ZnO/ZnMgO. Quand on a vérifié la structure CdTe/ZnMgO, le rendement était faible, égal à 13,4%. La littérature montre un rendement avoisinant 16,4% pour des structures différentes de la nôtre ; à savoir CdTe/CdS/SnO₂ [33,34]

	FF	$\eta\%$	jsc	voc
CdTe /ZnO	67.78	16.73	25.088197	0.9842
CdTe/ZnMgO	60.00	13.40	25.887655	0.9842
CdTe /ZnO/ZnMgO	67.79	17	25.088179	0.9839
CdTe /ZnO/GaN	67.89	16.72	25.087904	0.9815

CdTe exemple(logiciel)	66.45	16.04	24.184575	0.9979
-------------------------------	--------------	--------------	------------------	---------------

TableauIII.1 Résumé de la simulation des différentes structures

III.2 STRUCTURE CdTe /ZnO/ZnMgO)

Influence de l'épaisseur de la couche tampon (ZnO)

Epaisseur (ZnO) (μm)	FF	η %	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)
0.02	67.41	17.21	25.806968	0.9893
0.2	67.79	16.73	25.088179	0.9839
0.9	67.87	16.53	24.796013	0.9820
1.5	67.91	16.44	24.673338	0.9812
2	67.93	16.39	24.596933	0.9807

TableauIII.2 Effet de l'épaisseur de la couche tampon

Le tableau montre l'effet de l'épaisseur de ZnO sur les différents paramètres de la cellule solaire et principalement le rendement de conversion de la cellule solaire.

L'épaisseur des couches mince a un rôle important dans la construction des cellules solaires. L'intervalle d'épaisseur de la couche tampon variait entre 0,02μm et 2 μm. Nous remarquons un rendement intéressant et prometteur pour une épaisseur de 20 nm (Rendement de conversion = 17,21%). Plus l'épaisseur augmente, plus le rendement se réduisait. En effet, l'épaisseur a un impact sur le rendement. Aussi, il peut influencer le cout. ; Quelques faibles couches économisent le prix de revient des cellules et de ce fait réduire la consommation de la matière première.

Effet de l'épaisseur de la couche absorbante

L'épaisseur de la couche d'absorbeur CdTe est passée de 2 μm à 3,5 μm . On observe qu'avec l'augmentation de l'épaisseur, seul le courant de court-circuit J_{sc} augmente du fait de l'augmentation de l'absorption. Cependant, V_{oc} n'est en grande partie pas affecté par l'épaisseur. Le résultat est une amélioration de l'efficacité pouvant atteindre environ 17,59 %. Ainsi, l'épaisseur idéale de la couche d'absorbeur CdTe est d'environ 3 μm , au-delà de laquelle l'efficacité ne s'améliore pas significativement. Les résultats calculés montrent que de bonnes performances sont obtenues en faisant varier les paramètres, avec des épaisseurs de CdTe, GaN et ZnMgO de 3 μm , 2 μm et 2 μm donnant les meilleures performances des cellules solaires (17,59 %) dans les conditions spécifiées. Les résultats ci-dessus joueront un rôle important dans la fabrication de systèmes de cellules solaires CdTe plus efficaces.

Le rendement décroît lorsque la couche absorbante de CdTe augmente. Ceci peut être expliqué par la probabilité de recombinaison des transporteurs générés plus importante au voisinage du contact arrière.

III.3 DIAGRAMME D'ENERGIE :

Les figures III.1 à III.3 exposent le diagramme d'énergie pour les cellules solaires **de CdTe / ZnO, CdTe / ZnO/ZnMgO et CdTe / ZnO/ZnMgO.**

Dans les semi-conducteurs de type P, le niveau de FERMI est la distance au-dessus du pic de la bande de valence. Pour les semi-conducteurs de type N, le niveau de FERMI est inférieur au minimum de la bande de conduction. Lorsque les deux semi-conducteurs se touchent, les plans FERMI s'alignent. Par conséquent, la courbure apparaît dans le diagramme d'énergie. Dans les Figures III. 1-3, l'apparition de pics représente la barrière de potentiel interfaciale. La présence de discontinuités à l'interface jouera un rôle important dans les phénomènes de transport de charge. Certains photons de moyenne énergie sont absorbés dans la couche tampon. Par contre, la plupart des photons atteignent la couche absorbante.

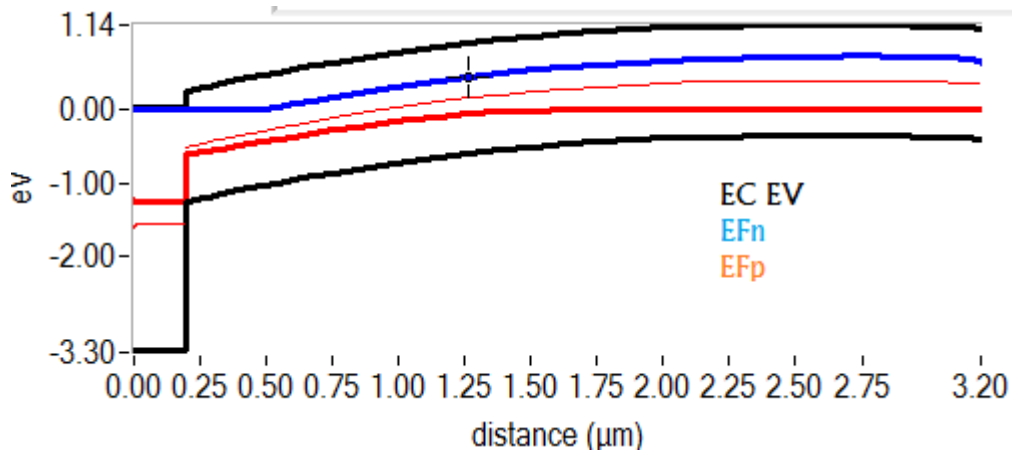


Figure III.1 : Diagramme d'énergie de CdTe / ZnO.

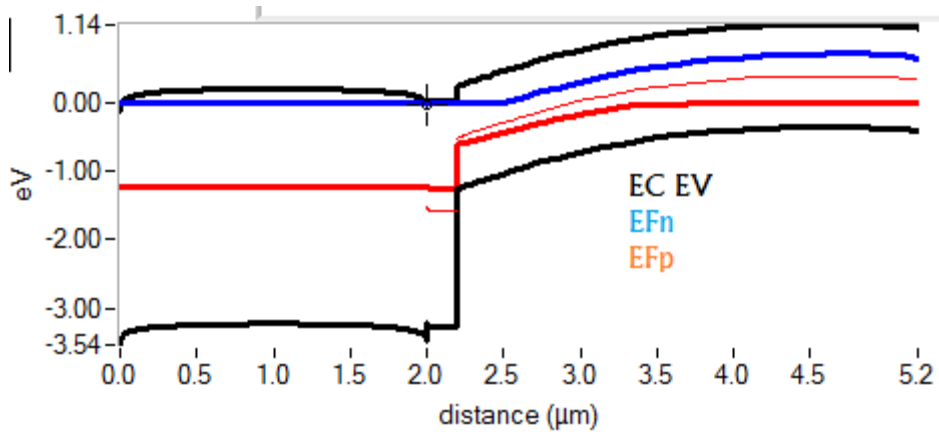


Figure III.2 : Diagramme d'énergie de CdTe / ZnO/GaN.

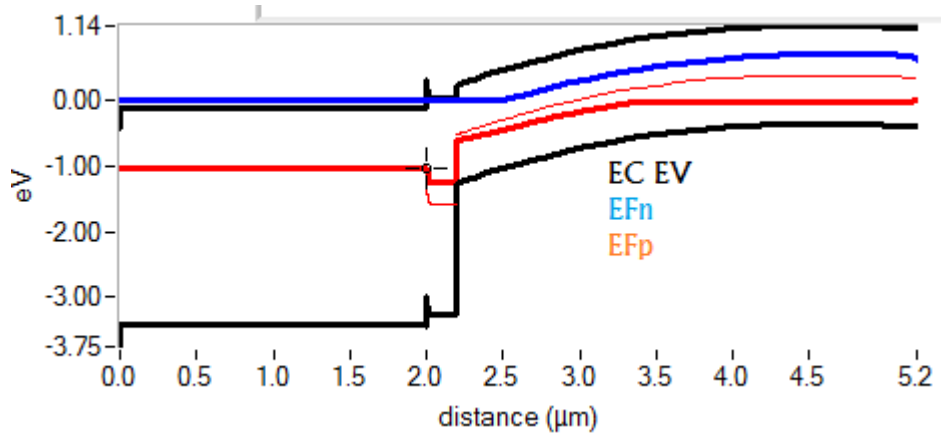


Figure III.3 : Diagramme d'énergie de CdTe / ZnO/ZnMgO.

III.4 CARACTERISTIQUE J-V :

Les courbes de densité de courant-tension J-V est importante pour les paramètres des cellules solaires. Elle détermine le rendement de la cellule solaire. La mesure standard de J-V est réalisée à température ambiante et sous illumination standard (à 25° et 1000/m²). La courbe J-V de la cellule solaire est similaire à celle d'une diode dans l'obscurité.

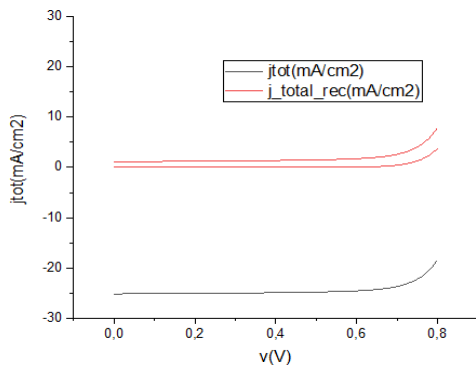


Figure III.4 (J-V) CdTe / ZnO

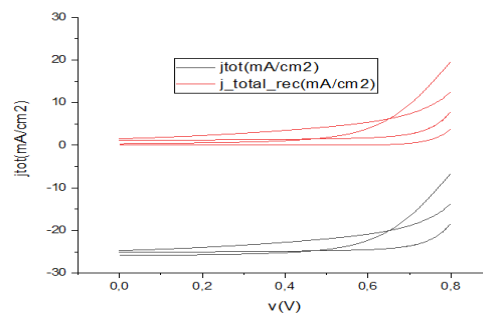
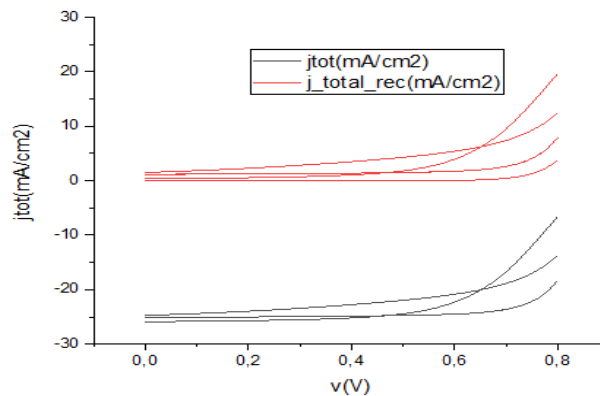


Figure III.5 (J-V) CdTe / ZnO/GaN



(J-V) CdTe / ZnO/ZnMgO

Nous avons également testé une structure tandem de CdTe/ZnO/ZnMgO/GaN et avons constaté que la structure CdTe / ZnO/ZnMgO a un meilleur courant de court-circuit de 25.08 mA/cm² et un circuit ouvert qui est de 0.9839 V. Le rendement de conversion des deux structures sont presque similaires.

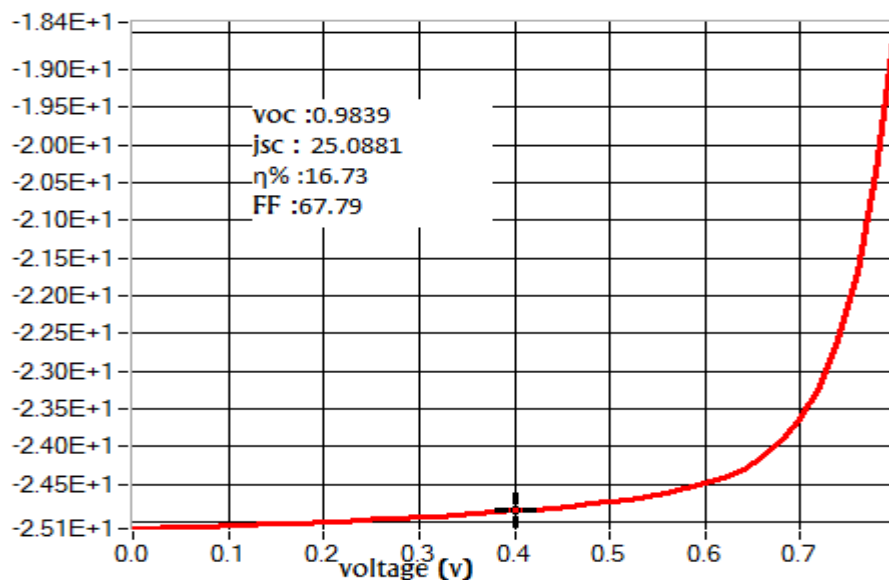


Figure.III.7. Caractéristique (J-V) CdTe / ZnO/ZnMgO

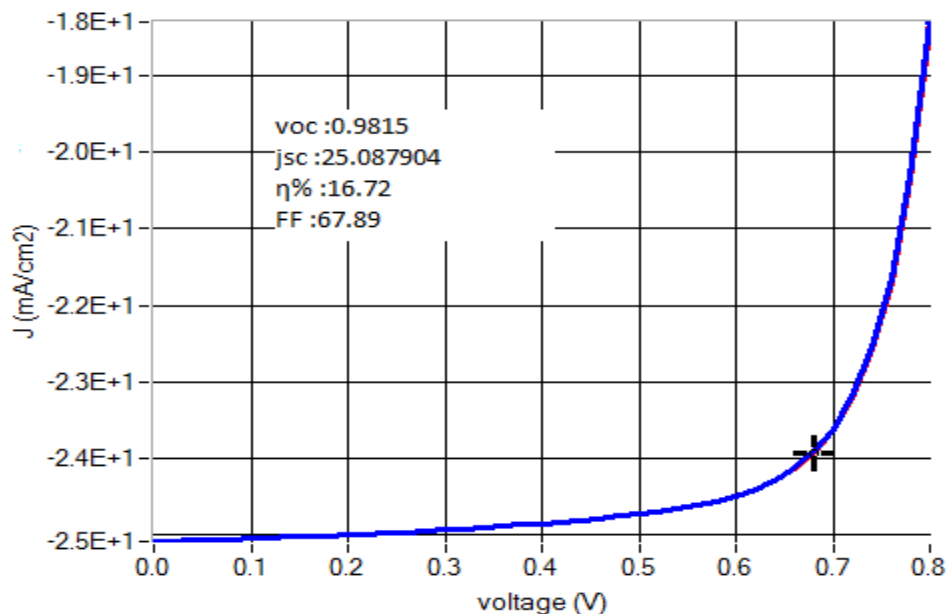


Figure III.8 Caractéristique (J-V) CdTe / ZnO/ZnMgO/GaN

Les figures montrent deux zones différentes :

- La 1^{ère} zone de **0 -6 V** : il n'ya pas de variation.

- La 2^{ème} zone de **0,6-0,75 V** : les courbes subissent des variations et modifications. Le point de fonctionnement (puissance maximale) présente la stabilité.

III.5 RENDEMENT QUANTIQUE

Le rendement quantique est un paramètre sans dimension. Il caractérise le courant collecté au sein des cellules solaires. On le définit par le rapport entre la quantité d'électrons collectés et la quantité de photons incidents à chaque longueur d'onde. A partir de ce paramètre optoélectronique, on peut savoir la capacité de la cellule solaire ainsi que la gamme spectrale du dispositif[24].

Les figures suivantes présentent le rendement quantique en fonction de la longueur d'onde.

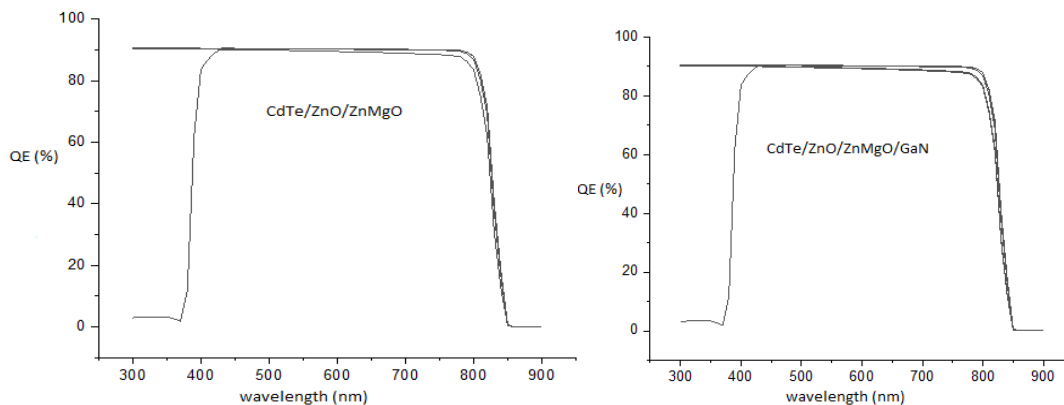


Figure III.9 Rendement quantique des cellules CdTe/ZnO/ZnMgO et CdTe/ZnO/ZnMgO/GaN

La forme de la courbe de rendement quantique est conditionnée par les pertes optiques et électriques comme les pertes d'absorption et de recombinaison parasites.

La figure III.9 montre que le CdTe/ZnO/ZnMgO et CdTe/ZnO/ZnMgO/GaN ont une meilleure absorption du spectre à courte longueur d'onde.

Pour des longueurs d'onde supérieures à 350 nm (>350 nm), les rendements quantiques des deux structures sont proches de 90 %. Ceci peut s'expliquer par le fait [20–25,30–32] que dans cette région tous les photons absorbés sont convertis en paires électron-trou. Dans le cas où les longueurs d'onde sont supérieures à

850nm pour les deux structures, l'absorbeur lui-même devient transparent, de sorte que la majeure partie de la lumière quitte la cellule solaire avant d'être absorbée. Les deux structures ont de meilleures performances couvrant UV à (infrarouge proche ; NIR)

III. 6 EFFET DE LA TEMPERATURE A DIFFERENTE EPAISSEUR

Comme tous les dispositifs et modules à semi-conducteurs, les cellules solaires sont sensibles à la température. Les tableaux suivants présentent les caractéristiques des cellules à différentes structures. Les tableaux montrent la décroissance du rendement avec l'augmentation de la température. Un rendement de 17%, 17,11% a été obtenu pour les cellules respectivement CdTe/ZnO/ZnMgO et CdTe/ZnO/GaN à des épaisseurs de 200 nm et 100 nm de la couche tampon (ZnO) avec un température de 295°.

Tableau III. 3 Comparaison de température : (CdTe/ZnO/ZnMgO)

/ZnO :0.200

	jsc	voc	FF	%
T=295	25.089210	1.0434	64.81	17
T=320	25.084315	0.8298	75.44	15.70
T=350	25.079160	0.7461	74.74	13.98

Tableau III. 4 Comparaison de température : (CdTe/ZnO/ZnMgO)

/ZnO :0.100

	jsc	voc	FF	%
T=295	25.294955	1.0450	64.74	17.11
T=350	25.286035	0.7464	74.76	14.11
T=320	25.290592	0.8304	75.43	15.84

III.5 Comparaison de température : (CdTe/ZnO/GaN) /ZnO :0.100

	jsc	voc	FF	%
T=295	25.294889	1.0442	64.78	17.11
T=350	25.285963	0.7464	74.74	14.11
T=320	25.290518	0.8303	75.42	15.84

**Tableau III. 6 Comparaison de température : (CdTe/ZnO/ZnMgO)
/ZnO :0.200**

	jsc	voc	FF	%
T=295	25.089144	1.0426	64.85	16.96
T=350	25.079089	0.7461	74.72	13.98
T=320	25.084241	0.8297	75.43	15.70

La température peut influencer les différents paramètres de la cellule solaire. la tension diminue légèrement car l'énergie de bande interdite diminue et crée plus de porteurs de charges [16-19].

III.7 EFFET DU DOPAGE

Les tableaux 7 et 8 résument les variations des différentes caractéristiques des deux structures utilisées en fonction du dopage de ZnO. Les valeurs variaient de 10^{16} à 10^{21} cm^{-3} .

Tableau III.7 Effet du dopage de ZnO : (CdTe/ZnO/ZnMgO)

	jsc	voc	FF	%
1.000E+16	25.024176	0.9667	65.82	15.92
1.000E+17	25.063975	0.9826	67.00	16.50

1.000E+18	25.088179	0.9839	67.79	16.73
1.000E+19	25.107349	0.9796	68.50	16.85
1.000E+20	25.121266	0.9754	68.97	16.90
1.000E+21	25.128119	0.9735	69.16	16.92

Tableau III. 8 Effete de doppage de ZnO : (CdTe/ZnO/GaN)

	jsc	voc	FF	%
1.000E+16	25.028027	0.9676	65.96	15.97
1.000E+17	25.063911	0.9821	67.02	16.50
1.000E+18	25.088110	0.9833	67.82	16.73
1.000E+19	25.107279	0.9789	68.54	16.84
1.000E+20	25.121198	0.9747	69.00	16.90
1.000E+21	25.128053	0.9727	69.20	16.91

L'effet de la variation du dopage de la couche tampon sur le courant court-circuit, la tension en circuit ouvert, facteur de forme et le rendement de conversion est bien illustré. Un rendement avoisinant 16, 9% est obtenu pour les deux structures pour un fort dopage.

III.8 Effet des résistances série et parallèle

La valeur de la résistance en série dépend de la résistivité du matériau et par les résistances de contact des électrodes. Quant à la résistance en parallèle, elle est définie par les défauts des matériaux et des fuites de bords.

Les tableaux suivants présentent l'effet des résistances série et parallèle sur la performance de la cellule de CdTe/ZnO/ZnMgO.

Dans le cas des résistances en série, nous remarquons, dans l'état idéal, que si on diminue la résistance série, la caractéristique J-V s'approche du cas parfait. Ce résultat donne un facteur de forme très important par conséquent un bon rendement.

La résistance série R_s n'a pas d'influence sur les paramètres électriques V_{oc} et J_{sc} à faibles valeurs ($0 < R_s < 5.00E+0$). Quand elle devient importante, elle peut influencer notablement la valeur du courant de court circuit J_{sc} .

La résistance parallèle R_{sh} a une influence légère sur les paramètres électriques V_{oc} et J_{sc} .

Theoriquement, on conclut que pour obtenir un meilleur rendement pour la cellule (CdTe/ZnO/ZnMgO), on doit augmenter la résistance shunt R_{sh} et diminuer la résistance série R_s .

Tableau III. 9. Effet des résistances en série sur les performances de la cellule CdTe/ZnO/ZnMgO

Résistance (Ω)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
5.00E+0	0.9839	25.038034	57.52	14.17
3.00E+0	0.9839	25.059792	61.58	15.18
2.00E+0	0.9839	25.069783	63.63	15.70
1.00E+0	0.9839	25.079234	65.70	16.21
0 (cas parfait)	0.9839	25.088179	67.79	16.73
50.00E+0	0.9839	24.737714	32.65	7.95

Tableau III. 10 Effet des résistances en parallèle sur les performances de la cellule CdTe/ZnO/ZnMgO

Résistance (Ω)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	(η %)
----------------------------	--------------	-----------------------------------	----------	-------------

1.00E+1	0.9742	25.088179	66.29	16.20
4.00E+3	0.9815	25.088179	67.42	16.60
8.00E+3	0.9827	25.088179	67.60	16.67
1.00E+4	0.9830	25.088179	67.64	16.68
0 (cas parfait)	0.9833	25.088110	67.82	16.73
1.00E+8	0.9839	25.088179	67.79	16.73

Conclusion

Dans ce travail nous avons simulé plusieurs types de cellules solaires à base de couches minces. Nous avons analysé l'effet de l'épaisseur, de température, et de dopage ainsi que l'effet des résistances série et parallèle sur les caractéristiques photovoltaïques à savoir leur influence sur le rendement de conversion, le facteur de forme, le courant de court-circuit ainsi que la tension de circuit ouvert.

Un rendement égal 17,11% à une température de 23° a été obtenu. Ces résultats sont très encourageants pour poursuivre les recherches avec d'autres matériaux à base de ZnO.

CONCLUSION GENERALE

& PERSPECTIVES

Une couche tampon doit répondre à certains critères de sélection afin de réaliser de bonnes jonctions avec l'absorbeur.

Dans cette étude, nous avons utilisé un logiciel simple et pratique pour calculer numériquement les propriétés de différentes structures solaires à base de ZnO. Le logiciel SCAPS-1D utilisé par le professeur Marc BURGELMAN est un outil de prédiction des cellules solaires.

La couche tampon ZnO présente des caractéristiques avantageuses du point de vue optique, électrique et structurale.

Sa large bande interdite présente un atout pour alimenter un maximum de photons à l'absorbeur.

Nous avons analysé les effets de l'épaisseur, de la température et du dopage sur les propriétés photovoltaïques : efficacité de conversion, facteur de forme, courant de court-circuit et tension en circuit ouvert. Les résultats obtenus ont indiqué qu'une faible épaisseur de CdTe suffit pour absorber une grande quantité de lumière à l'instar d'autres structures. La structure CdTe/ZnMgO présente un faible rendement de conversion. Si on associe le ZnO comme couche tampon (CdTe/ZnO/ZnMgO), une amélioration importante est constatée. Cette cellule a l'avantage d'être composée d'éléments abondants. Nos résultats numériques confirment que la cellule CdTe/ZnO/ZnMgO a le rendement de conversion le plus élevé (17 %) par rapport à CdTe/ZnO/GAN (16,73 %). Un rendement de 17,11 % a été obtenu avec une couche tampon de 100 nm et une température de 23 °C. Ces résultats indiquent qu'il reste beaucoup à faire et à découvrir dans l'utilisation des alliages d'oxyde de zinc. Dans le futur, d'autres structures en multijonctions seront également étudiées à l'aide d'autres outils numériques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- <http://tpe.photovoltaique.free.fr/historique.html>
- [2]- <http://www.greentechmedia.com/articles/read/First-Solar-Hits-Record-22.1-Conversion-Efficiency-For-CdTe-Solar-Cell>
- [3]- W.Wang, M.T.Winkler, O.Gunawan, T.Gokmen, T.K.Todorov, Y.Zhu, D.B.Mitzi, Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% efficiency, *Advanced materials*, (2013)
- [4]- Pere Roca i Cabarrocas, Thèse de Doctorat, Paris VII (1988).
- [5]- Z. Y. Xiao, Y. C. Liu, D. X. Zhao, J. Y. Zhang, Y. M. Lu, D. Z. Shen, X. W. Fan, *Journal of luminescence* 122-123 (2007).
- [6]- Preston and all Band structure of ZnO from resonant x-ray emission spectroscopy, *Physical Review B*, 78(15), pp. 155114–4, (2008).
- [7]- Schroer, P., Krueger, P., et Pollmann, J., First-principles calculation of the electronic structure of the wurtzite semiconductors ZnO and ZnS, *Physical Review B*, 47(12), p. 6971, (1993).
- [8]- Djuricic et Leung, Y. H., Optical properties of ZnO nanostructures, *Small*, 2(8-9), pp. 944–961, (2006).
- [9]- *Handbook of Chemistry and Physics*, 56th Edition, Ed. R.C. Weast, CRS, Press(1975).
- [10]- <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsenergylett.2c01961>
- [11] <https://scholar.google.com/>
- [12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitruure_de_gallium
- [13] P.F. Gerhardinger and R.J. McCurdy, Thin Films for Photovoltaic and Related Device Applications, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 426, Pittsburg, p. 399, (1996).

-
- [14] G. Jérôme, « Elaboration de couches minces d'oxyde transparents conducteurs par spray CVD assisté par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Paris, (2009).
- [15] K. Afzal, « Synthèse de Cuprates de Strontium (SrCu₂O) par MOCVD comme couche mince d'oxyde transparent conducteur de type P ». Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, (2011).
- [17] O. Boussoum, « Etude de l'effet d'une couche mince de TiO₂ sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium ». Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2011).
- [18] Aktaruzzaman, A.F., Sharma, G.L., Malhotra, L.K., Electrical, optical and annealing characteristics of ZnO:Al films prepared by spray pyrolysis, *Thin Solid Films* 198 (1-2), p. 67-74, (1991).
- [19] E. Fortunato, D. Ginley, H. Hosono, D. C.Paine, *Conducting Oxides for Photovoltaics*, MRS Bulletin, vol. 32, (2007).
- [20] R. Azouani, « Elaboration de nouveaux nanomatériaux photo catalytiques actifs sous rayonnement visible », Thèse de Doctorat, Université Paris 13, (2009).
- [21] C. Jie, G. Xin-shi,, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 55, p. 323-329, (1998).
- [22] P. Jin, L. Miao, *Applied Surface Science*, 212-213, p. 775-781, (2003).
- [23] Z. Peng, Y. Wang, Y. Du, D. Lu, and D. Sun, *Journal of Alloys and Compounds*, 480(2), p. 537-540, (2009)
- [24] J. Garnier « Elaboration de couches minces d'oxydes transparents et conducteurs par spray CVD assiste par radiation infrarouge pour applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, (2009).
- [25] F.Ynineb, « Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO) », Mémoire de Magister en Physique, Univ-Mentouri- Constantine, (2010).
- [26]- Preston and all Band structure of ZnO from resonant x-ray emission spectroscopy, *Physical Review B*, 78(15), pp. 155114-4,(2008).
- [27]- Pere Roca i Cabarrocas, Thèse de Doctorat, Paris VII (1988).
- [28]- Z. Y. Xiao, Y. C. Liu, D. X. Zhao, J. Y. Zhang, Y. M. Lu, D. Z. Shen, X. W. Fan, *Journal of*

luminescence 122-123 (2007).

[29]- Preston and all Band structure of ZnO from resonant x-ray emission spectroscopy, Physical, Review B, 78(15), pp. 155114-4,(2008).

[29]- Djuricic et Leung, Y. H., Optical properties of ZnO nanostructures, Small, 2(8-9), pp. 944-961,(2006).

[30]- Handbook of Chemistry and Physics, 56th Edition, Ed. R.C. Weast, CRS Press(1975).

[[32] B.J. Lokhande and M.D. Uplane, Structural, optical and electrical studies on spray deposited highly oriented ZnO films, Applied Surface Science, 167(3), p. 243-246, (2020).

[33] R. Mosseri, C. Jeandel, « L'ÉNERGIE À DÉCOUVERT »,Éditions. À découvert, 2017