



Full Length Research Paper

# Amélioration des paramètres électriques macroscopiques d'une cellule solaire à base de couche mince de $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ par l'optimisation des paramètres optiques et morphologiques de la couche la plus externe en face avant

Alain Kassine EHEMBA<sup>1</sup>, Amsata NDIAYE<sup>2</sup>, Demba DIALLO<sup>1</sup>, Mouhamadou Mamour SOCE<sup>1</sup>, Moustapha DIENG

<sup>1</sup> Laboratoire des Semiconducteurs et d'Energie Solaire (LASES), Faculté des Sciences et Techniques (FST), Université Cheikh Anta Diop de Dakar UCAD - Dakar, Sénégal

<sup>2</sup> Laboratoire d'Electronique, Informatique, Télécommunications et Energies Renouvelables (LEITER), Université Gaston Berger - Saint-Louis, SENEGAL

Received June 2017 – Accepted November 2017



\*Corresponding author. E-mail: [amsata.ndiaye@ugb.edu.sn](mailto:amsata.ndiaye@ugb.edu.sn)

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

## Abstract:

Conscients de l'importance de la capture de la lumière incidente sur les performances d'une cellule solaire, nous avons étudié la problématique de la réflexion en face avant de la cellule et l'optimisation des paramètres morphologiques des solutions existantes de cette problématique. Notre étude est basée sur une cellule solaire photovoltaïque à base de couche mince de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  ayant une couche antireflet à texture pyramidale. Nous prenons en compte une large bande de longueurs d'ondes incidentes allant de 300nm à 1200nm, avec un éclairement incident constant de  $0.1\text{W.cm}^{-2}$ , sous la condition standard AM1.5. Nous avons amélioré les paramètres électriques en utilisant une épaisseur de couche antireflet de 105nm qui donne une densité de courant de court circuit de  $0.023\text{mA.cm}^{-2}$ , une tension de circuit ouvert de 0.828V et une puissance maximale de 0.01858mW. L'étude portée sur l'indice de réfraction de la couche antireflet enduite (ARC) donne un indice optimal de 1.676. Nous trouvons avec cette valeur une densité de courant de court-circuit de  $0.0267\text{mA.cm}^{-2}$ , une tension de circuit ouvert de 0.829V et une puissance maximale de 0.01915mW. Nous trouvons qu'une couche antireflet d'épaisseur 105nm et d'indice 1.676, nous donne un rendement quantique externe maximale de 88.28% pour une longueur d'onde incidente de  $0.7\mu\text{m}$ . L'étude de l'effet de la morphologie de la texture de surface face avant de la cellule, donne une nette amélioration des performances de la cellule solaire. On obtient un angle de texture optimale de  $70^\circ$  qui donne une densité de courant de court-circuit égale à  $0.3361\text{mA.cm}^{-2}$ , une tension de circuit ouvert de 0.8289V et une puissance maximale de cellule de 0.2375mW. L'étude de la variation des paramètres électriques en fonction des effets combinés de l'angle et de la profondeur de texture donne des performances optimales pour un angle de  $70^\circ$  et une profondeur 21.875nm. L'étude portée sur ces trois volets ont permis d'optimiser les paramètres de la couche antireflet dans le but d'obtenir des paramètres électriques de cellules plus performants.

**Keyword:** Couche antireflet ; réflexion ; indice de réfraction ; texture pyramidale ; cellule solaire.

## Cite this article:

Alain Kassine EHEMBA, Amsata NDIAYE, Demba DIALLO, Mouhamadou Mamour SOCE, Moustapha DIENG (2017). Amélioration des paramètres électriques macroscopiques d'une cellule solaire à base de couche mince de  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  par l'optimisation des paramètres optiques et morphologiques de la couche la plus externe en face avant. Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 2(2), pp. 20-29. ISSN 2312-8712.

## 1. Introduction

Les paramètres électriques externes et d'utilisation de la cellule et les paramètres internes de la cellule ont une grande influence sur les performances de la cellule solaire. La recherche vise sans relâche l'amélioration du rendement de la cellule en passant par l'élaboration [1]-[2], la technologie de la cellule [3], et les

paramètres d'utilisation de la cellule [4]-[5]. Cet objectif ne pourrait être atteint que lorsqu'on aura réalisé une étude globale et approfondi de tous les paramètres impactant l'efficacité de la cellule solaire. Dans cette optique, conscient de l'importance de la capture de la lumière incidente, nous présentons dans cet article un travail de synthèse du projet de recherche

que nous avons mené. Nous avons d'abord étudié la problématique de la réflexion en face avant de la cellule puis nous avons approfondi l'optimisation des paramètres morphologiques des solutions existantes de cette problématique. Pour cela notre recherche a été orientée sur trois axes principaux.

- Le premier axe est l'étude de l'effet de la réflexion face avant sur les paramètres électriques macroscopiques de la cellule solaire. Dans la bibliographie, des études de réflexion face avant ont été menées mais basées plus particulièrement sur le matériau utilisé comme couche antireflet tel que le ZnO [6], ou sur les contacts métalliques qui peuvent jouer un rôle de réflecteur [7]. Cette réflexion en face avant peut en effet être due à des facteurs naturels intrinsèques aux matériaux et à des facteurs externes. Tous ces facteurs contribuent à l'augmentation de la réflexion diminuant par conséquent l'absorption des photons incidents. Notre étude va porter non pas sur les causes de la réflexion face avant mais sur leurs effets sur les paramètres électriques de la cellule. Les coefficients de réflexion varient de 0% à 80%, une gamme de valeur relativement grande pour prendre en compte tous les facteurs susceptibles d'augmenter la réflexion. La solution utilisée pour réduire la réflexion est la couche antireflet.

- Le deuxième axe est l'optimisation de l'épaisseur et de l'indice de réfraction de l'enduit de la couche antireflet. En effet la couche antireflet augmente la transmission du flux lumineux incident. Les couches antireflets les plus utilisées dans la bibliographie sont l'Oxyde de Silicium SiO<sub>2</sub>, le Nitrure de Silicium SiN, le Dioxyde de Titane TiO<sub>2</sub> et les TCO [8]-[9]. Nous avons étudié dans un premier temps l'impact des épaisseurs d'enduit allant jusqu'à 200nm avec une analyse basée sur les épaisseurs de 80nm à 120nm. En effet l'influence de l'épaisseur est accentuée sur cette dernière plage de longueur d'ondes. Dans un deuxième temps nous avons étudié l'impact de l'indice de réfraction de la couche antireflet sur les paramètres électriques en utilisant des indices de réfraction allant de 1.50 à 1.75. Cette gamme d'indices concerne une variété de matériaux utilisés comme couche antireflet.

- Le troisième axe a pour objectif de parfaire la texture de la couche antireflet. Nous étudions l'alternative d'une couche pyramidale. L'efficacité de cette morphologie, permettant une augmentation du flux transmis, peut être optimisée en cernant l'influence de sa profondeur et de son angle de texture sur les paramètres électriques de la cellule. Pour cela nous étudions d'abord l'effet de l'angle de texture variant de 0° à 80° sur ces dits paramètres. Puis nous cherchons l'impact des effets combinés de l'angle de texture et de la profondeur de texture. Cette dernière varie de 5nm à 25nm. L'étude portée sur ces trois volets a permis d'optimiser les paramètres de la couche antireflet dans le but d'obtenir des paramètres électriques de cellules très importants.

## 2. Procédé expérimental

L'approche scientifique est purement théorique. Nous basons notre étude sur une cellule solaire photovoltaïque à base de couche mince de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Cette cellule est présentée par la figure 1. Elle est formée par une couche antireflet à texture pyramidale jouant le rôle de couche fenêtre en ZnO dopé n, une couche tampon en CdS dopé n et une couche absorbante en CIGS dopé p. Notre procédé technique est axé sur deux phases. La première phase de notre travail porte sur la manipulation des équations fondamentales qui régissent le fonctionnement d'une cellule et faisant intervenir les effets optiques. Ces équations partent de l'équation de Poisson, les équations de continuité et les équations de transport. La relation 1 montre l'équation de Poisson.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_s} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$\epsilon_s$  la permittivité diélectrique du semiconducteur  
 $\rho$  la densité de charge d'espace

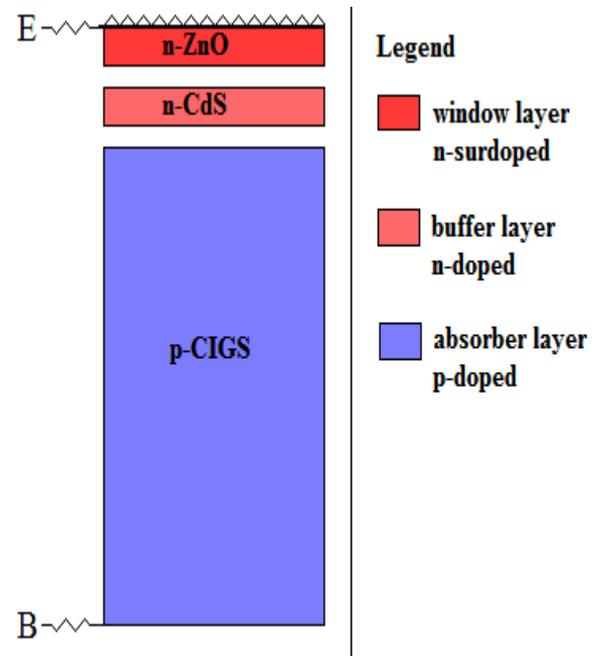


Figure 1. Présentation de la cellule solaire étudiée

Les relations 2 et 3 donnent les équations de continuité. Pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad [\text{Eq. 2}]$$

Pour les trous :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad [\text{Eq. 3}]$$

$\vec{J}_n$  et  $\vec{J}_p$  les densités de courant des électrons et des trous respectivement

$G_n$  et  $G_p$  les taux de générations des électrons et des trous respectivement

$R_n$  et  $R_p$  les taux de recombinaison des électrons et des trous respectivement

$e$  est la charge électrique élémentaire.

Les relations 4 et 5 présentent les équations de transport.

$$\vec{J}_p = -eD_p \vec{\nabla} p - e\mu_p \vec{\nabla} V + p\mu_p kT \vec{\nabla} (n_{ie} L_n) \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$\vec{J}_n = eD_n \vec{\nabla} n - e\mu_n \vec{\nabla} V - n\mu_n kT \vec{\nabla} (n_{ie} L_n) \quad [\text{Eq. 5}]$$

Les densités des porteurs de charge électrons et trous sont données par:

$$\begin{cases} J_n = \mu_n n \nabla E_{Fn} \\ J_p = \mu_p p \nabla E_{Fp} \end{cases} \quad [\text{Eq. 6}]$$

L'approximation exponentielle de Boltzmann pour la fonction de distribution de Fermi se résume à:

$$\begin{cases} n = N_C e^{-(E_c - E_{Fn})/kT} \\ p = N_V e^{-(E_{Fp} - E_v)/kT} \end{cases} \quad [\text{Eq. 7}]$$

Le coefficient d'absorption de la lumière incidente (IL) relatif au gap direct des couches minces utilisées :

$$\alpha_{IL} = A_{IL} \sqrt{h\nu - E_{g,IL}} \quad [\text{Eq. 8}]$$

Le coefficient d'absorption des porteurs de charges (CC):

$$\alpha_{cc} = K_1 n \lambda^a + K_2 p \lambda^b \quad [\text{Eq. 10}]$$

Dans ces équations  $A_{IL}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $a$  et  $b$  sont des constantes déterminées empiriquement et sont relatives aux matériaux utilisés. Cette base mathématique s'étend jusqu'à la détermination des paramètres électriques macroscopiques.

Le tableau 1 présente les propriétés des matériaux prises en compte.

**Tableau 1. Propriétés physiques des matériaux**

	n-ZnO	n-CdS	P-Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub>
Epaisseur (µm)	0.05	0.05	2.5
Constante diélectrique	10	13.6	13.6
Bande d'énergie (eV)	3.3	2.4	1.2
Concentration intrinsèque à 300K (cm <sup>-3</sup> )	1.99×10 <sup>9</sup>	0.04353	5.232×10 <sup>8</sup>
Indice de réfraction	3.45	3.45	3.45
Taux de dopage type-P de la base (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>18</sup>	10 <sup>17</sup>	2×10 <sup>16</sup>
Diffusion face avant des porteurs de type-N (cm <sup>-3</sup> )	6×10 <sup>19</sup>	10 <sup>18</sup>	2×10 <sup>16</sup>

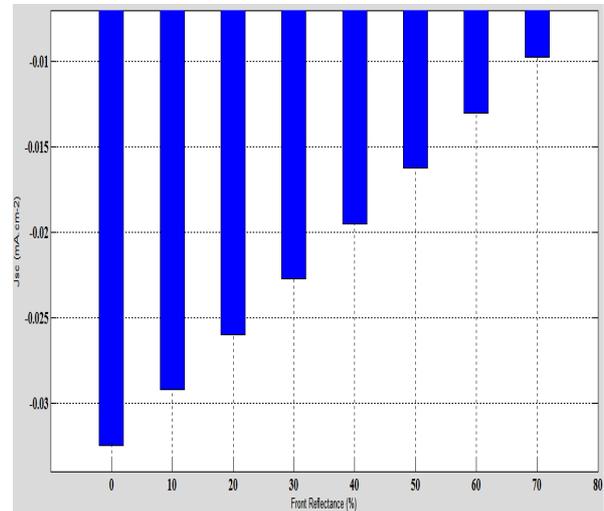
La deuxième phase des travaux porte sur le traçage des courbes à l'aide du Matlab. C'est un logiciel de calcul et de visualisation, dont les entités de base sont des matrices. MATLAB est une abréviation de Matrix Laboratory. C'est un langage interprété qui propose des

facilités de programmation et de visualisation, ainsi qu'un grand nombre de fonctions réalisant diverses méthodes numériques [10]-[11]. Ces étapes combinées de nos travaux nous permettent d'avancer avec logique vers l'obtention de résultats justes et fiables. Nous avons ainsi étudié l'effet de la réflexion sur la densité de courant de court circuit  $J_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la puissance maximale  $P_m$  de la cellule et la variation du rendement quantique externe EQE. On prend en compte une large bande de l'irradiation, soit des longueurs d'onde allant de 300nm à 1200nm, avec un éclairement incident constant de 0.1W.cm<sup>-2</sup>, sous la condition standard AM1.5

### 3. Résultats et Interprétation

#### 1.- Impact de la réflexion sur les paramètres électriques macroscopiques [12]

La photopile solaire fonctionne en mode redresseur. Ce qui explique le signe négatif de la densité de courant.



**Figure 2. Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de la réflexion face avant.**

La figure 2 montre que plus la réflexion du flux incident est importante moins la densité de photocourant est importante. Pour une réflexion face avant nulle on note une densité de courant de court circuit  $|J_{cc}|$  égale à 0.0325mA.cm<sup>-2</sup>. Cette valeur diminue avec l'augmentation de la réflexion face avant pour être égale à 0.0065 mA.cm<sup>-2</sup> avec une réflexion de 80%. Ce phénomène s'explique par le fait que la densité de courant de court circuit soit proportionnelle au flux lumineux incident.

Dans la figure 3 nous notons que, lorsqu'aucune réflexion n'intervient nous notons une tension de circuit ouvert maximale de 0.8337V. Lorsque cette réflexion face avant augmente la tension de circuit ouvert diminue. Nous obtenons pour une réflexion de 80%, une tension minimale de 0.7923V. Ce comportement de la tension de circuit ouvert est du au fait que la densité de courant de court circuit  $J_{cc}$  est proportionnel au flux lumineux incident. L'augmentation de la réflexion face avant contribue à la diminution de flux absorbé, ce qui provoque une baisse de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

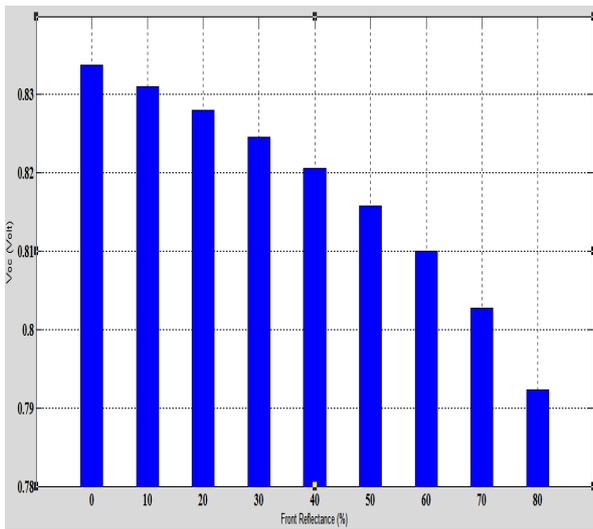


Figure 3. Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  en fonction de la réflexion face avant.

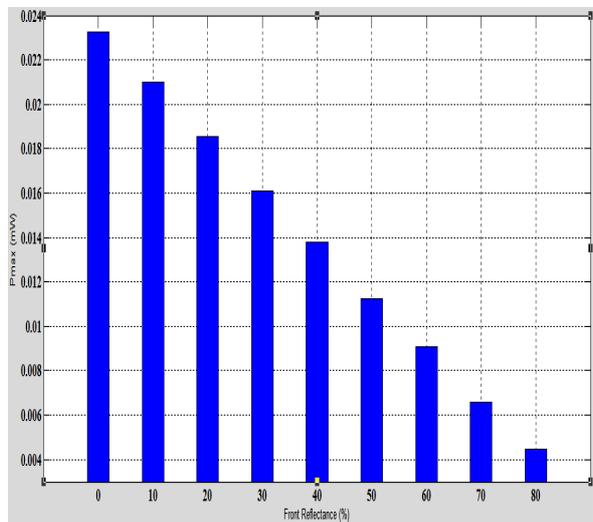


Figure 4. Variation de la puissance maximale  $P_m$  de la cellule solaire en fonction de la réflexion face avant.

La figure 4 nous indique, pour une réflexion nulle on a une puissance maximale de 0.0223mW. Cette puissance de la cellule diminue avec l'augmentation du coefficient de réflexion pour évaluer une valeur minimale de 0.0045mW pour une réflexion face avant de 80%. Les comportements de la tension de circuit ouvert et de la densité de courant de court circuit avec l'augmentation du coefficient de réflexion permettent de prédire et d'expliquer la chute de la puissance maximale du dispositif.

Tableau 2. Valeur maximale du rendement quantique externe en fonction de la réflexion face avant

Réflexion face avant (%)	EQE		
	Valeur maximale (%)	Longueur d'onde incidente ( $\mu\text{m}$ )	Energie incidente (eV)
0	99.29	0.71	1.75
20	79.43	0.71	1.75
40	59.57	0.70-0.71	1.75-1.77
60	39.71	0.70-0.72	1.72-1.77
80	19.86	0.69-0.72	1.72-1.80

Dans le tableau 2 nous présentons l'évolution du rendement quantique externe EQE. La valeur maximale

de l'EQE baisse considérablement avec l'augmentation de la réflexion face avant. Elle passe de 99.29% pour un coefficient de réflexion nul à 19.86% pour un coefficient de réflexion égale à 80%. Cette diminution s'explique physiquement par le fait que le rendement quantique est lié à la sensibilité spectrale. En effet lorsque la réflexion face avant augmente, la réponse spectrale de la cellule diminue du fait que le courant produit par rapport à la puissance reçue reste faible.

## 2. - Optimisation de l'épaisseur et de l'indice de réfraction de la couche antireflet enduite (ARC) sur les paramètres électriques macroscopiques [13]

### 2.1. – Optimisation de l'épaisseur de l'ARC

Les caractéristiques courant-tension obtenues et présentées par la figure 5 nous attestent les bonnes performances de la cellule qui se comporte comme un redresseur. Ces performances seront améliorées à la fin de cette étude par l'optimisation de la couche antireflet.

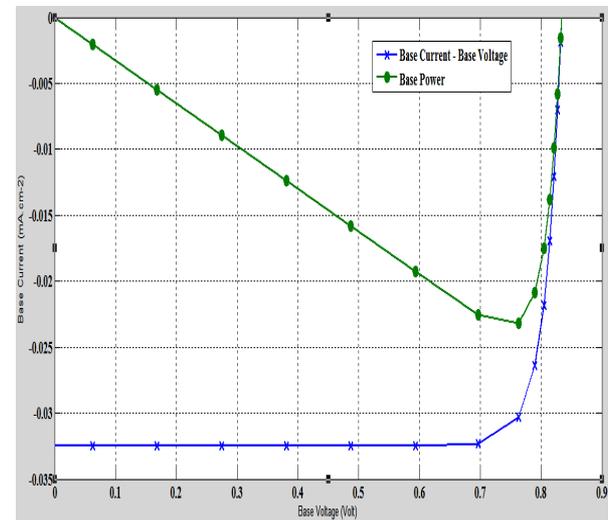


Figure 5. Caractéristiques densité de courant-tension et puissance max-tension de la cellule solaire à base de couche mince de CIGS sans couche antireflet.

La densité de courant de court-circuit obtenu est de  $0.032 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ , la tension de circuit-ouvert de 0.83V, et la puissance maximale de la base de 0.023mW.

La figure 6 nous montre la variation de la densité de courant de court-circuit de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche antireflet en ZnO posée la couche tampon en CdS. Le dispositif étant redresseur on note une densité de courant négative, qui pour plus de commodité sera prise en valeur absolue. Pour une épaisseur de 0nm à 200nm nous avons une amélioration de la  $J_{cc}$  qui est suivie d'une nette diminution. Lorsqu'on considère une épaisseur de l'ARC qui varie entre 80 et 120nm, nous nous approchons de l'épaisseur idéale qui donne une densité de courant-circuit optimale. Nous trouvons une densité de courant de court-circuit maximale de  $0.026 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  pour une épaisseur de 105nm. Ce comportement de la  $J_{cc}$  s'explique par sa proportionnalité au flux lumineux incident. La couche antireflet augmente le flux transmis.

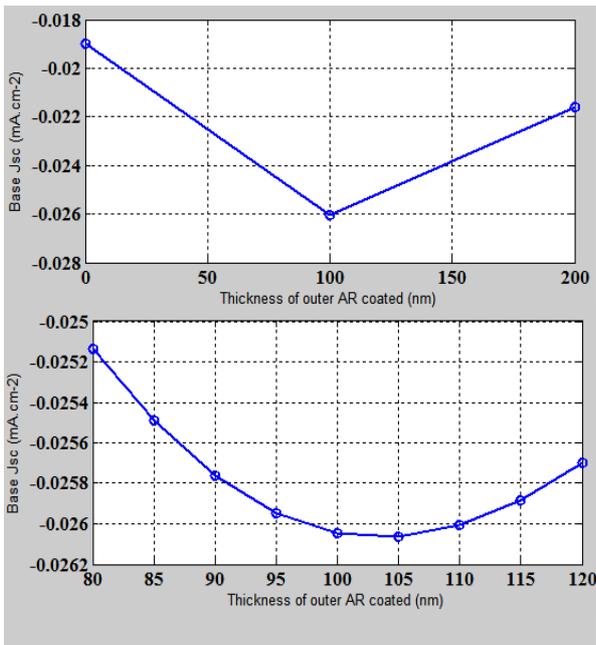


Figure 6. Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'épaisseur de l'ARC

Lorsqu'on dépasse son épaisseur idéale la transmission faiblit car l'épaisseur importante de la couche antireflet de la cellule constitue un frein à la diffusion des longueurs d'onde incidentes. Ce qui provoque la décroissance de la  $J_{cc}$ . Par rapport aux porteurs minoritaires on note que pour une épaisseur de 105nm, ils ont plus la possibilité de traverser la jonction pour être collecter. Lorsque l'épaisseur de la couche antireflet augmente, la durée de vie des porteurs ne leur permet pas de traverser la jonction, ils se recombient.

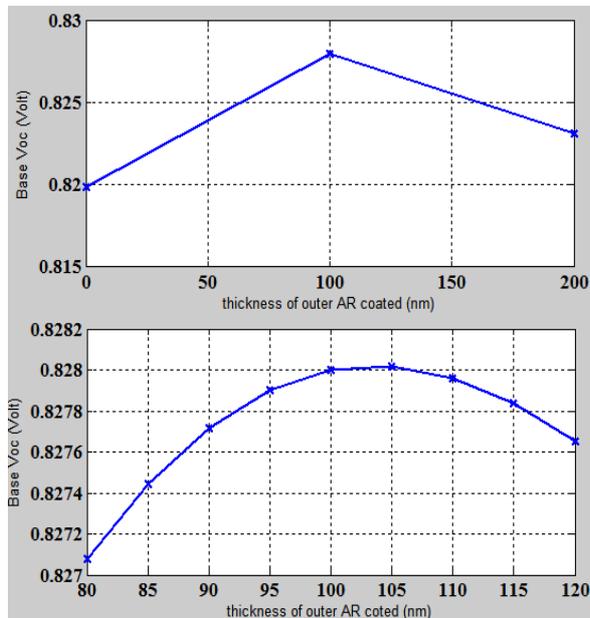


Figure 7. Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'épaisseur de l'ARC

La caractéristique de la tension de circuit-ouvert pour différentes épaisseurs de l'ARC présentée par la figure 7 montre aussi une épaisseur idéale. Cette dernière est élucidée en considérant une épaisseur allant de 80nm à 120nm. La  $V_{co}$  est maximale et est égale à 0.828V pour

une épaisseur de 105nm. En effet l'augmentation du flux transmis fait croître le nombre de porteurs photocréés. Le nombre de porteurs minoritaires stockés à la jonction de la cellule augmente d'où la croissance de la tension de circuit ouvert. Le même phénomène noté à la décroissance de la densité de courant de court-circuit fait chuter aussi la tension de circuit-ouvert.

La figure 8 nous présente la variation de la puissance maximale de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'ARC. Conformément aux variations de la tension de circuit ouvert et de la densité de courant de court-circuit on note un point de puissance maximale de 0.01858mW pour l'épaisseur optimale de 105nm.

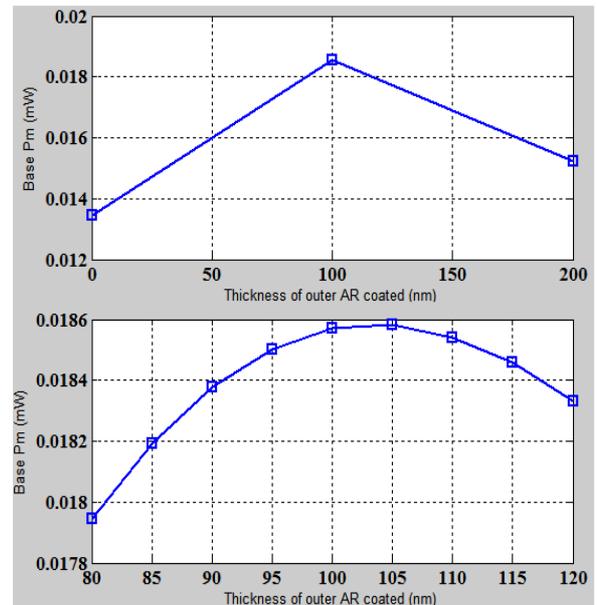


Figure 8. Variation de la puissance maximale  $P_m$  de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'ARC

## 2.2.- Optimisation de l'indice de réfraction de l'ARC

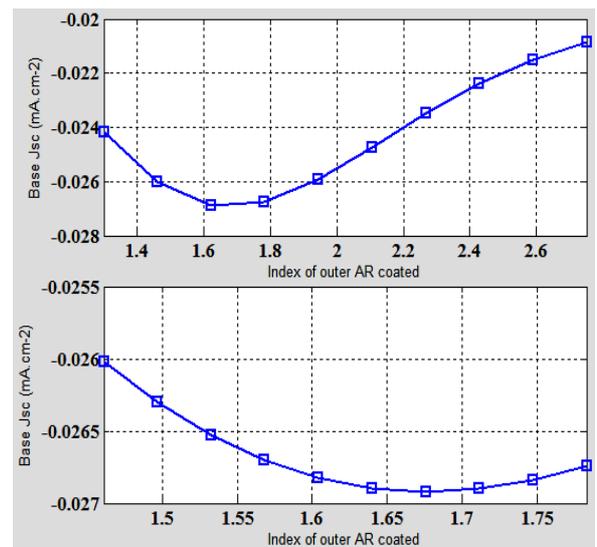


Figure 9. Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  en fonction de l'indice de réfraction de l'ARC.

Nous notons dans la figure 9 que pour des indices allant de 1.3 à 2.75 on note un indice préférentiel. La caractéristique obtenue avec des indices allant de 1.46 à 1.78 nous permet de repérer l'indice optimal qui est

égal à 1.676. Cet indice donne une densité de courant de court-circuit de  $0.02692\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . En effet le flux transmis est plus important pour cet indice de réfraction de l'ARC, ce qui correspond à une création de porteurs minoritaires plus importante. Le nombre de porteurs traversant la jonction pour être collecter augmente la  $J_{cc}$ .

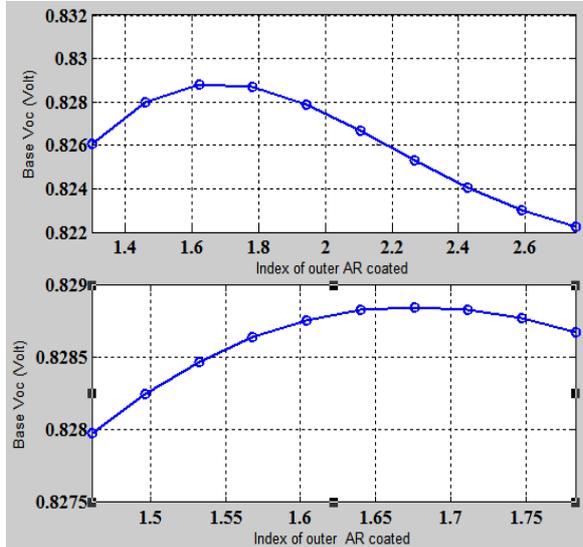


Figure 10. Variation de la tension de circuit-ouvert  $V_{cc}$  en fonction de l'indice de réfraction de l'ARC

Nous notons, dans la figure 10, pour une gamme d'indices allant de 1.3 à 2.75, un indice optimal. La caractéristique qui correspond aux indices allant de 1.46 à 1.78, indique une tension de circuit ouvert maximale égale à  $0.8289\text{V}$  pour  $n=1.676$ . Cet indice donne une transmission maximale qui augmente le nombre de porteurs minoritaires stockés à la jonction. Ceci explique l'augmentation de la  $V_{co}$ . Lorsque cet indice dépasse 1.676 le flux lumineux transmis est réduit et s'accompagne d'une baisse de la tension de circuit ouvert.

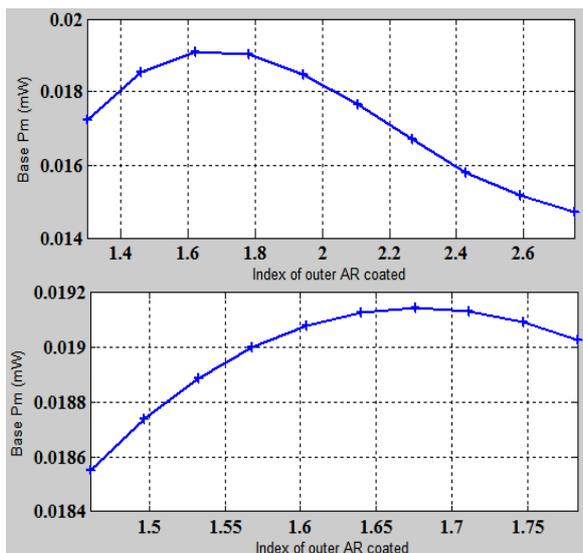


Figure 11. Variation de la puissance maximale  $P_m$  de la cellule en fonction de l'indice de réfraction de l'ARC

Comme indiqué par la figure 11, par analogie aux variations de la densité de courant de court-circuit et de

la tension de circuit ouvert, nous pouvons prédire une puissance maximale optimale de  $0.01915\text{mW}$ . Cette valeur est aussi liée à la transmission maximale qui donne un plus grand nombre de porteurs minoritaires photocréés.

La deuxième partie de nos travaux nous permet d'utiliser les paramètres optimaux pour avoir la figure 12 qui présente les nouvelles caractéristiques J-V et  $P_m$ -V de la cellule avec une couche antireflet d'épaisseur et d'indice optimisés.

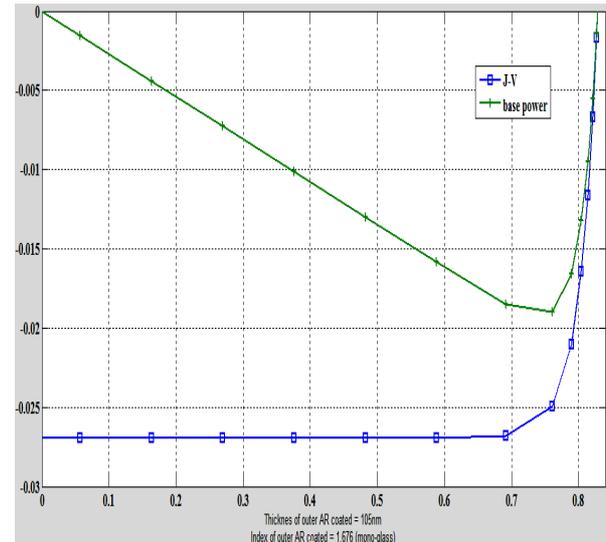


Figure 12. Caractéristiques densité de courant-tension-puissance de la cellule avec une ARC d'épaisseur  $105\text{nm}$  d'indice  $n=1.676$

Le rendement quantique externe EQE est le rapport du nombre de charges collectées sur le nombre de photons incidents. Elle donne une idée de la réponse spectrale du dispositif suivant les différentes longueurs d'onde incidentes. Nous utilisons pour obtenir la figure 13, un éclairage constant de  $0.1\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , et des longueurs d'onde incidentes allant de  $300\text{nm}$  à  $1200\text{nm}$  couvrant ainsi les domaines de l'Ultraviolet, du Visible et du Proche-Infrarouge.

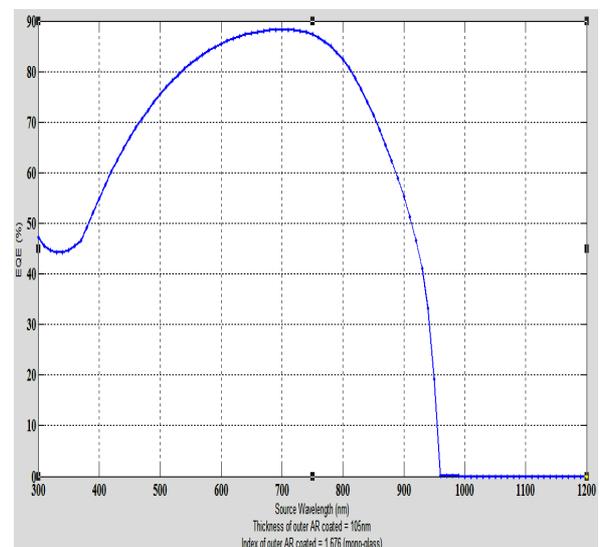


Figure 13. Variation du rendement quantique externe EQE de la cellule avec une ARC d'épaisseur  $105\text{nm}$  et d'indice  $n=1.676$ .

La variation du rendement quantique externe de la cellule avec une couche antireflet en ZnO d'épaisseur 105nm et d'indice 1.676, montre une zone d'absorption maximale qui s'étend de part et d'autres du domaine du visible. La réponse est supérieure à 40% dans le domaine de l'ultraviolet. Elle atteint une valeur maximale de 88.28% pour une longueur d'onde incidente de 700nm qui correspond à une énergie de 1.77eV. Cette valeur s'annule dans le domaine du proche infrarouge car les longueurs d'ondes incidentes s'accompagnent d'énergie plus faible que le gap optique de la base en Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.

### 3.- Optimisation de la texture pyramidale de la couche antireflet [14]

La figure 14 présente la texturation de la couche antireflet.

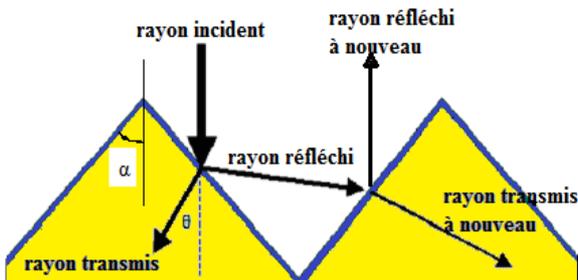


Figure14. Texturation pyramidale d'angle  $\alpha$  et principe de fonctionnement de la couche antireflet

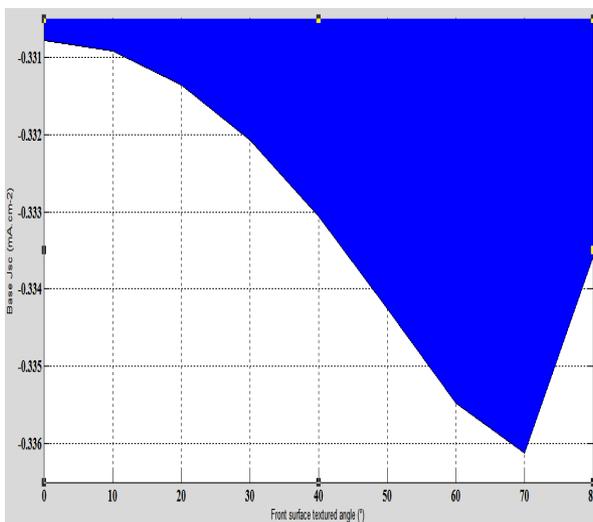


Figure 15: Variation de la densité de courant de court-circuit en fonction de l'angle  $\alpha$  de texture de la face avant

Tel que représenté à la figure 15 pour un angle de texture de 0°, nous avons une densité de courant de court-circuit égale à une valeur minimale d'environ 0.3308mA.cm<sup>-2</sup>. Cette valeur augmente avec l'ouverture de l'angle de texture pour atteindre une valeur maximale d'environ 0.3361mA.cm<sup>-2</sup> correspondant à un angle de texture de 70°. Lorsque ce dernier dépasse cette valeur la  $J_{cc}$  diminue. Ces variations sont en effet liées au confinement optique du flux lumineux incident. Lorsque l'angle de texture augmente le confinement optique augmente le flux lumineux absorbé. La densité de courant de court-circuit étant proportionnelle au flux lumineux on note

une nette amélioration. Cependant lorsque l'angle de texture dépasse 70°, sa morphologie pyramidale tend vers une structure plane qui diminue le confinement optique. Ceci donne une décroissance de la  $J_{cc}$ .

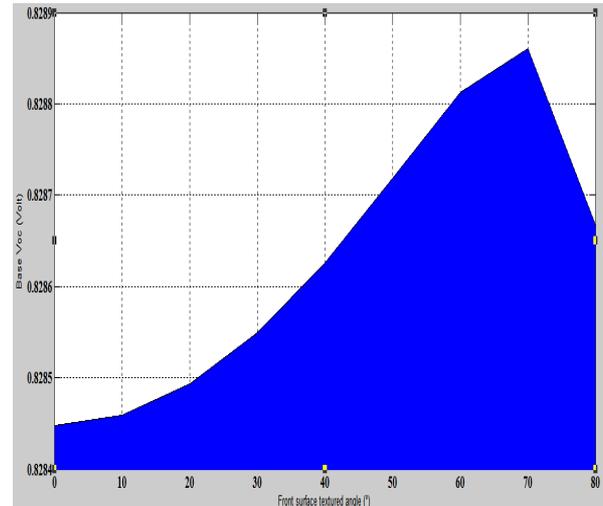


Figure 16. Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'angle  $\alpha$  de texture de la surface avant

La tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , dont la caractéristique est donnée par la figure 16, est égale à une valeur minimale d'environ 0.8284V pour un angle de texture égale à 0°. Cette tension s'améliore progressivement avec l'augmentation de l'angle de texture jusqu'à une valeur maximale de 0.8286V pour un angle de texture de 70°. Lorsqu'on dépasse cet angle la tension de circuit ouvert diminue. Ce comportement de la tension de circuit ouvert s'explique par le fait que l'augmentation de l'angle de texture augmente le confinement optique. Un rayon incident réfléchi a la possibilité de rencontrer une paroi de la texture pour une deuxième absorption. Cette double réflexion améliore l'absorption des rayons incidents qui s'accompagne d'une augmentation de la  $V_{co}$ .

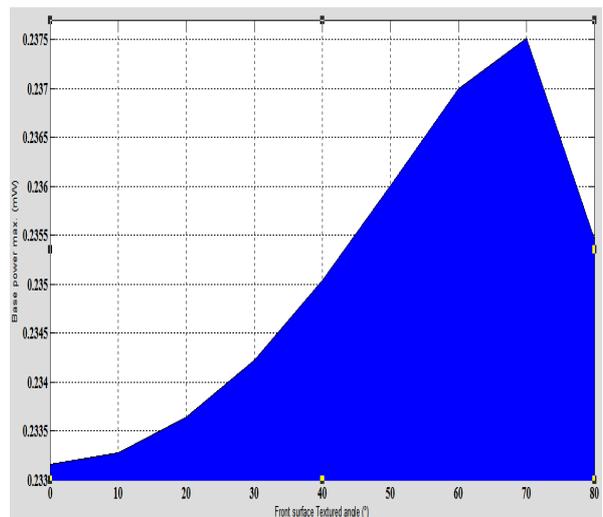


Figure 17: Variation de la puissance maximale de la cellule  $P_m$  en fonction de l'angle  $\alpha$  de texture de la face avant

En accord avec les études de variations de la densité de courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'angle de texture, on note dans la

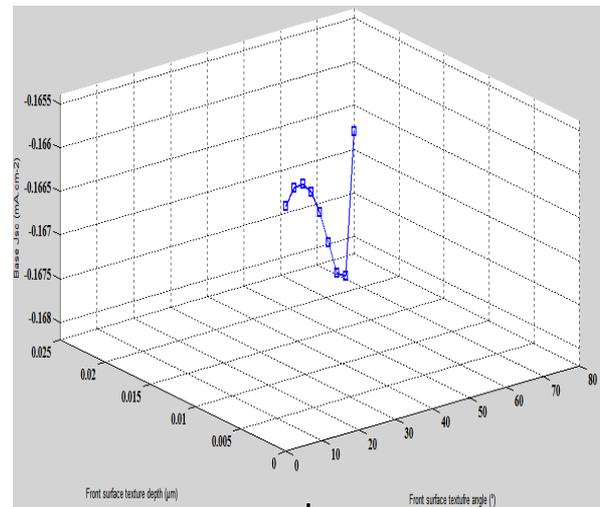
figure 17 une valeur minimale de la puissance maximale d'environ 0.2331mW pour la texture en forme de pic. Cette puissance évolue progressivement avec l'ouverture de l'angle de texture pour atteindre une valeur maximale d'environ 0.2375mW pour un angle de 70°. Tel que décrites précédemment les variations de la puissance maximale dépendent du confinement optique qui est optimal pour un angle de texture de 70°. Lorsqu'on dépasse cet angle le confinement optique diminue est la performance de la cellule régresse. Le tableau 3 récapitule les valeurs numériques de la puissance maximale en fonction de l'angle de texture face avant.

**Tableau 3. Valeurs du rendement quantique externe EQE en fonction de l'angle de texture de la face avant**

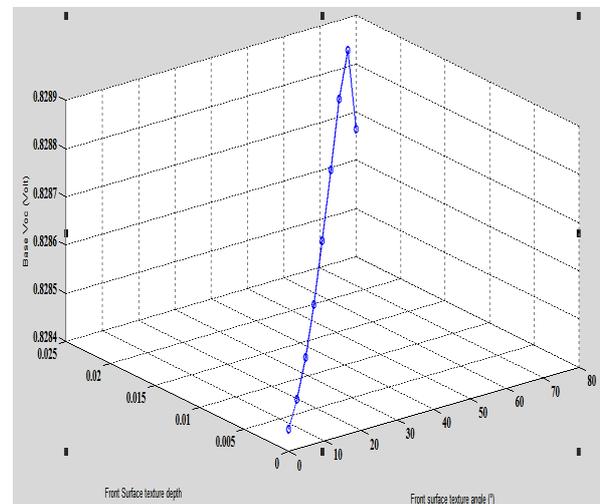
Angle de texture de surface face avant (°)	EQE		
	Valeur maximale (%)	Longueur d'onde incidente (nm)	Energie incidente (eV)
0	99.44	730	1.70
20	99.45	730	1.70
40	99.46	740	1.68
60	99.49	770	1.62
80	99.53	820	1.51

Dans le domaine de l'ultraviolet, qui concerne les longueurs d'onde allant de 300nm à 380nm, l'augmentation de l'angle de texture diminue le rendement quantique externe. En effet le confinement optique pour les forts niveaux d'injection diminue le nombre de charges collectées car l'énergie incidente est largement supérieure aux gaps optiques des matériaux. Dans le domaine du visible, qui concerne les longueurs d'onde allant de 380nm à 780nm, l'EQE reste important quelque soit l'angle de texture. Nous sommes dans la plage d'absorption maximale de la base de la cellule en couche mince de Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Dans le domaine du proche infrarouge, l'augmentation de l'angle de texture s'accompagne d'une augmentation de l'EQE. En effet nous sommes dans le domaine des faibles injections et le nombre de charges collectées augmente avec le confinement optique.

L'étude de la variation de la densité de court-circuit présentée par la figure 18, montre que la cellule se comportant comme un redresseur, donne un profil de densité de courant à la forme d'une cuvette. Nous notons alors le pic de cette caractéristique qui correspond à une Jcc égale à 0.1682mA.cm<sup>-2</sup> pour un angle de 70° et une profondeur de texture de 21.87nm.



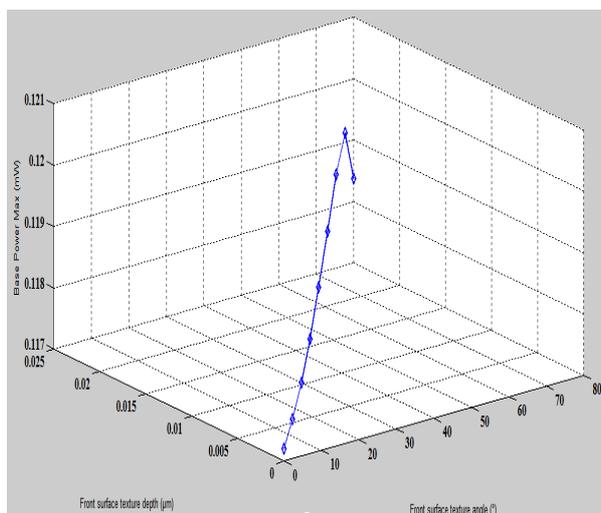
**Figure 18. Variation de la densité de courant de court-circuit de la base en fonction de l'angle et de la profondeur de la texture face avant.**



**Figure 19. Variation de la tension de circuit ouvert Voc de la base en fonction de l'angle et de la profondeur de la texture en face avant.**

L'amélioration et la chute de la tension est facilement perçue à partir de la caractéristique de la figure 19. Nous remarquons un pic qui correspond aux valeurs optimales de l'angle et de la profondeur de la texture. Nous obtenons une valeur maximale de Voc=0.8289V pour une profondeur de 21.87nm et un angle de texture de 70°.

La caractéristique de la figure 20 permet de repérer les paramètres optimaux de la texture face avant. Ils correspondent à une profondeur de 21.87nm et un angle de texture de 70°. Ces paramètres donnent une puissance maximale de 0.1195mW. Ceci est en accord avec les variations de la densité de courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert



**Figure 20. Variation de la puissance maximale  $P_m$  de la base en fonction de l'angle et de la profondeur de la texture face avant.**

## Conclusion

Notre étude permet d'affirmer qu'avec l'utilisation de couche antireflet « idéale », correspondant à une réflexion de 0%, nous pouvons obtenir une tension de circuit ouvert de 0,8337V, une densité de courant de court circuit de  $0.0325\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , une puissance maximale de cellule de 0.0233mW et une valeur maximale du rendement quantique externe de 99.29%. Cependant tous les paramètres physiques étudiés diminuent considérablement avec la réflexion face avant. Nous trouvons pour un coefficient de réflexion de 80% une tension de circuit ouvert de 0,7923V, une densité de courant de court circuit de  $0.0065\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , une puissance maximale de cellule de 0.0045mW et une valeur maximale du rendement quantique externe de 19.86%. Nous notons alors une baisse de la tension de circuit ouvert de 0.0414V, une baisse de la densité de courant de court circuit de  $0.026\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , une baisse de la puissance maximale de la cellule de 0.0188mW et une baisse de la valeur maximale du rendement quantique externe de 79.43%.

Nous avons amélioré les paramètres électriques en utilisant une épaisseur de couche antireflet de 105nm qui donne une densité de courant de court circuit de  $0.023\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , une tension de circuit ouvert de 0.828V et une puissance maximale de 0.01858mW. L'étude portée sur l'indice de réfraction de l'ARC donne un indice optimal de 1.676. Nous trouvons avec cette valeur une densité de courant de court-circuit de  $0.0267\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , une tension de circuit ouvert de 0.829V et une puissance maximale de 0.01915mW. La cellule solaire avec une couche antireflet, qui forme l'interface ZnO/CdS, d'épaisseur 105nm et d'indice 1.676, nous donne un rendement quantique maximale de 88.28% pour une longueur d'onde incidente de  $0.7\mu\text{m}$ .

L'étude de l'effet de la morphologie de la texture de surface face avant de la cellule, donne une nette amélioration des performances de la cellule solaire. On obtient un angle de texture optimale de  $70^\circ$  qui donne une densité de courant de court-circuit de  $0.3361\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , une tension de circuit ouvert de

0.8289V et une puissance maximale de cellule de 0.2375mW. Nous avons vu que l'augmentation de l'angle de texture baisse le rendement quantique dans le domaine de l'ultraviolet tandis qu'elle l'augmente de le domaine du proche infrarouge. La zone d'absorption maximale s'étend de part et d'autre du domaine du visible. L'étude de la variation des paramètres électriques en fonction des effets combinés de l'angle et de la profondeur de texture donne des performances optimales pour un angle de  $70^\circ$  et une profondeur 21.875nm.

Au terme de cette étude profonde des paramètres de la couche antireflet en Oxyde de Zinc ZnO, nous pouvons entreprendre la recherche expérimentale des matériaux existants qui peuvent jouer ce rôle capital de couche antireflet. De même vu la durée d'exposition au rayonnement d'une cellule, une étude de la stabilité thermique de la couche antireflet permettrait de prévoir au cours du temps les meilleurs matériaux.

## REFERENCES

- [1] Y. Belghazi, M. AitAouaj, M. El Yadari, G. Schmerber, C. Ulhaq-Bouillet, C. Leuvre, S. Colis, M. Abd-lefdil, A. Berrada, A. Dinia, "Elaboration and characterization of Co-doped ZnO thin films deposited by spray pyrolysis technique", *Microelectronics Journal*, Vol. 40, Issue 2, pp. 265–267, 2009.
- [2] D. Lincot, J.F. Guillemoles, S. Taunier, D. Guimard, J. Sixx-Kurdi, A. Chaumont, O. Roussel, O. Ramdani, C. Hubert, J.P. Fauvarque, N. Bodereau, L. Parissi, P. Panheleux, P. Fanouillere, N. Naghavi, P.P. Grand, M. Benfarah, P. Mogensen, O. Kerrec, "Chalcopyrite thin film solar cells by electrodeposition", *Solar Energy*, Vol. 77, pp. 725–737, 2004.
- [3] Shah, P. Torres, R. Tscherner, N. Wyrsh, H. Keppner, "Photovoltaic Technology: The Case for Thin-Film Solar Cells", *Science*, Vol. 285, No 5428, pp. 692-698, 1999.
- [4] Alain K. EHEMBA, Demba DIALLO, Mouhamadou Mamour SOCE, Ousmane DIAGNE, Moustapha DIENG, "Study of the variations of the macroscopic electric parameters of a solar cell according to the use temperature", *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, Vol. 5, Issue 4, pp. 354-360, 2016.
- [5] Alain K. Ehemba, Ibrahima Wade, Demba Diallo, Djimba Niane and Moustapha Dieng, "Influence of the use temperature on the Capacitance-Frequency measures of a Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cell", *Advances in Applied Science Research*, Vol. 7, Issue 3, pp. 169-174, 2016.
- [6] Yun-Ju Lee, Douglas S. Ruby, David W. Peters, Bonnie B. McKenzie and Julia W. P. Hsu, "ZnO Nanostructures as Efficient Antireflection Layers in Solar Cells", *Nano Lett.*, Vol. 8, Issue 5, pp 1501–1505.
- [7] Zachary C Holman, Stefaan De Wolf and Christophe Ballif, "Improving metal reflectors by suppressing surface Plasmon polaritons: a priori calculation of the internal reflectance of a solar cell", *Science & Applications (2013) 2*, e106; doi:10.1038/lsa.2013.62
- [8] S. Chhajed, M. F. Schubert, E. F. Schubert, J. K. Kim, "Nanostructured multilayer graded-index antireflection coating for Si solar cells with broadband and omnidirectional characteristics", *Applied Physics Letters*, Vol. 93, Issue 25, pp. 01-03, 2008.

- [9] Shui-Yang Lien, Dong-Sing Wu, Wen-Chang Yeh, Jun-Chin Liu, "Tri-layer antireflection coatings ( $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2\text{-TiO}_2/\text{TiO}_2$ ) for silicon solar cells using a sol-gel technique", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 90, pp. 2710-2719, 2006.
- [10] TarakSalmi, Mounir Bouzguenda, Adel Gastli, Ahmed Masmoudi, "MATLAB/Simulink Based Modeling of Photovoltaic Cell", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 2, Issue 2, pp. 213-218, 2012.
- [11] S. Sheik Mohammed, "Modeling and Simulation of Photovoltaic module using MATLAB/Simulink", *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, Vol. 2, Issue 5, pp. 350-355, 2011.
- [12] Alain Kassine Ehemba, Ibrahima Wade, Mouhamadou Mamour Socé, Djimba Niane, Moustapha Dieng, "Study of the Consequences of the Front External Reflection on the Electric Parameters of a Thin Film  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cell", *Research Journal of Engineering Sciences*, Vol. 5, Issue 10, pp. 01-06, 2016.
- [13] Alain Kassine Ehemba, Demba Diallo, Babacar Mbow, Ousmane Diagne, Moustapha Dieng, "Impact of the Thickness and the Index of the Anti-Reflecting Coating on the Macroscopic Electric Parameters of the  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  Thin Film Solar Cell ", *International Journal of Chemical and Physical Sciences* , Vol. 05, Issue 05, pp. 23-34, 2016.
- [14] Alain Kassine Ehemba, Mouhamadou Mamour Socé, Demba Diallo, Salif Cisse, Moustapha Dieng, "Effect of the Pyramidal Texture of the Front Outer Layer on the Macroscopic Electric Parameters of a  $\text{N-Zno/N-Cds/P-Cu}(\text{In, Ga})\text{Se}_2$  Solar Cell ", *International Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 5, Issue. 5, pp. 171-176, 2016.