

MINIMISATION DES PERTES PAR REFLEXION POUR UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ZnO/CdS/CIS

A. Mahdjoub^(*), L. Remache et H. Moualkia

*Laboratoire des Matériaux et Structure des Systèmes Electromécaniques et leur Fiabilité (LMSSEF)
Université Larbi Ben M'hidi d'Oum El Bouaghi, Algérie.*

(Reçu le 4 Novembre 2014 ; accepté le 01 Mars 2015 ; publié en ligne le 07 Mars 2015)

RÉSUMÉ :

Une cellule photovoltaïque en couche minces à base de séléniures de cuivre et d'indium (CuInSe₂) avec un bon rendement peut être réalisée en utilisant des technologies abordables et à faible coût. Les matériaux utilisés comme absorbeurs dans les cellules photovoltaïques ont un indice de réfraction élevé, ce qui cause de fortes pertes par réflexion (30% environ). Les couches minces (CdS et ZnO) qui constituent les couches tampon et la fenêtre de cette cellule ont des indices plus faibles. Ils sont donc naturellement adaptés à des applications antireflets. Le choix de leurs épaisseurs respectives permettra de minimiser les pertes par réflexion. Nous proposons dans ce travail des solutions qui permettent de réduire les pertes par réflexion à moins de 4% tout en respectant les contraintes technologiques. On utilise pour ces calculs des données expérimentales pour les indices optiques des différents matériaux.

MOTS-CLÉS: Réflectivité, Indices optiques, épaisseur et rendement photovoltaïque.

I. INTRODUCTION

En laboratoire avec des dépôts sous vide le rendement des cellules photovoltaïques en couche minces à base de CuInSe₂ atteint 17.5% et 19.9% pour CuInGaSe₂ [1-3] sur feuille Mo et 14.1% sur feuille en plastique. L'industrie propose des cellules flexibles avec des rendements de 6 à 11% sur Mo [2]. Pour les techniques de dépôt à faible coût utilisées au sein de notre laboratoire (électrodéposition, bain chimique et spray pyrolyse ultrasonique) les rendements escomptés sont de l'ordre de 10%. La réduction des pertes par réflexion permettra d'améliorer considérablement le rendement de nos cellules. Les couches minces (CdS et ZnO) qui constituent respectivement la couche tampon et la fenêtre de cette cellule ont des indices plus faibles que ceux de CuInSe₂. Ils sont donc naturellement adaptés à des applications anti-réfléchissantes. Il s'agit donc de déterminer les épaisseurs optimales susceptibles de minimiser les pertes par réflexion tout en restant objectif quant aux limites technologiques. Le matériau conventionnel pour des traitements antireflet pour ce genre de cellule solaire est le MgF₂

choisi pour son faible indice de réfraction [4]. On propose dans ce travail d'appliquer une couche antireflet en silice poreuse de faible indice de réfraction au dessus de la grille métallique pour ne pas alourdir le processus technologique.

II. CRITERE DE QUALITE

Pour évaluer les performances des solutions proposées il faut choisir un critère de qualité: notre choix c'est porté sur la réflectivité effective pondérée par rapport à $\Phi(\lambda)$: le spectre solaire standard AM1.5 [5]. Plus la réflectivité effective est faible moins on a de pertes par réflexion dans notre cellule solaire. Notre calcul couvre la gamme du spectre solaire comprise entre 300nm et 1100nm.

$$R_{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Notre cellule solaire présente une structure en couches minces comme indiqué dans la figure 1.

^(*)Auteur correspondant, abdelmah@yahoo.com

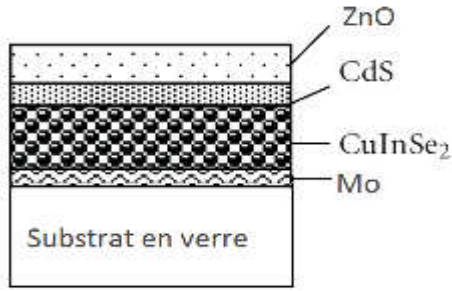


Figure 1 : cellule solaire en couches minces

La réflectivité spectrale $R(\lambda)$ est calculée en appliquant la théorie des milieux stratifiés [6] sous sa forme matricielle simple, en utilisant des indices optiques expérimentaux déterminés par ellipsométrie sur les matériaux utilisés [7]. Nous considérons dans notre cas une incidence normale. Le calcul sera fait pour chaque longueur d'onde à partir des relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \prod_{j=1}^N \begin{bmatrix} \cos\delta_j & -\tilde{n}_j^{-1} \sin\delta_j \\ -\tilde{n}_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ n_s E_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec
$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j d_j \quad (3)$$

On peut alors calculer :

$$R(\lambda) = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \quad (4)$$

$\tilde{n}_j(\lambda)$ et d_j représentent respectivement les indices complexes et les épaisseurs de chaque strate. Les indices optiques des différents matériaux utilisés dans ce travail sont représentés dans la figure 2.

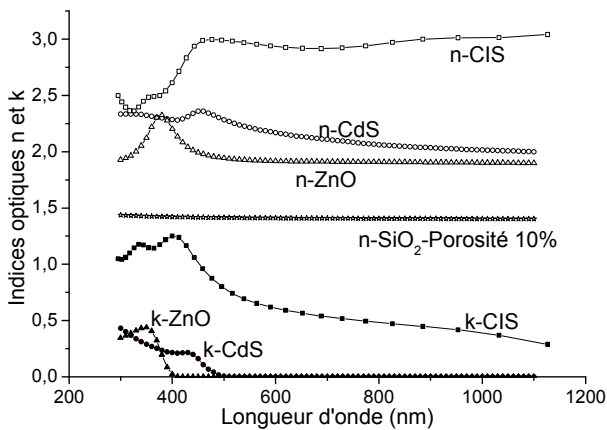


Figure 2 : Indices optiques des matériaux utilisés.

Il s'agira par la suite de trouver les paramètres optiques (indices et épaisseurs) convenables pour que notre structure stratifiée donne la réflectivité effective la plus faible possible. Ce problème d'optimisation peut facilement être traité par analyse numérique.

III. REFLECTIVITE DE CuInSe₂

L'absorbeur CuInSe₂ (ou CIS) de la cellule photovoltaïque en couches minces nécessite une épaisseur de l'ordre de quelques microns. D'un point de vue optique, cette épaisseur couvre totalement le verre et la métallisation en molybdène. La réflectivité spectrale obtenue sur une structure CIS/Mo/Verre est parfaitement confondue avec celle d'un simple substrat de CuInSe₂ (fig3). Les pertes par réflexions sont estimées à 26.5%.

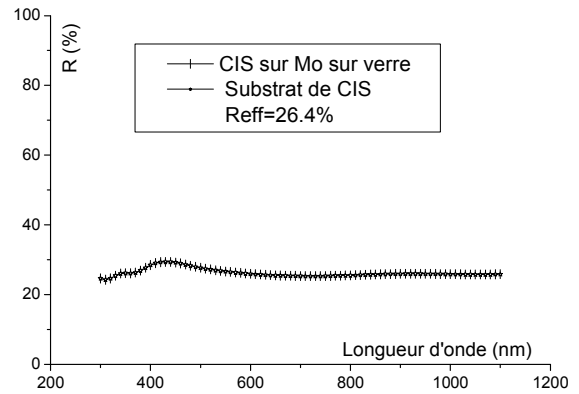


Figure 3 : Réflectivité de CuInSe₂ /Mo/Verre.

IV. REFLECTIVITE DE ZnO et CdS SUR CuInSe₂

En déposant la couche tampon de 50nm de CdS sur l'absorbeur CuInSe₂ pour réaliser l'hétérojonction de notre cellule solaire, les pertes par réflexion sont réduites à 13% (fig4). L'indice de réfraction de CdS étant plus faible que celui de CuInSe₂ l'effet antireflet opère. On utilise une faible épaisseur de CdS pour la collecte des porteurs photo-générés et obtenir un bon rendement énergétique.

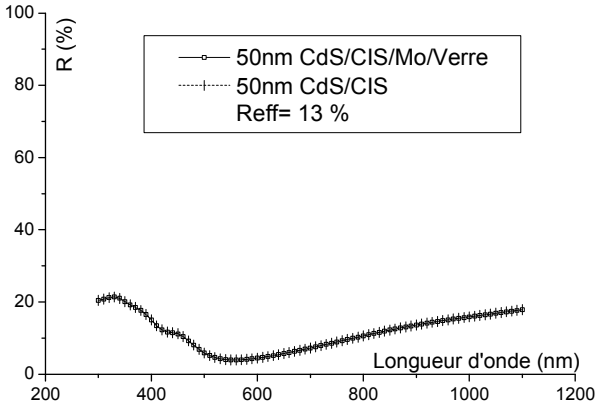


Figure 4 : Réflectivité de CdS/CuInSe₂/Mo/Verre

Quand on rajoute la fenêtre : une couche de 300nm de ZnO transparent et conducteur (TCO) qui joue le rôle d’une grille conductrice, d’indice de réfraction encore plus faible que celui du CdS, les pertes par réflexion sont alors de 11.5% (fig5). On considère que ces pertes sont encore importantes et peuvent être réduites.

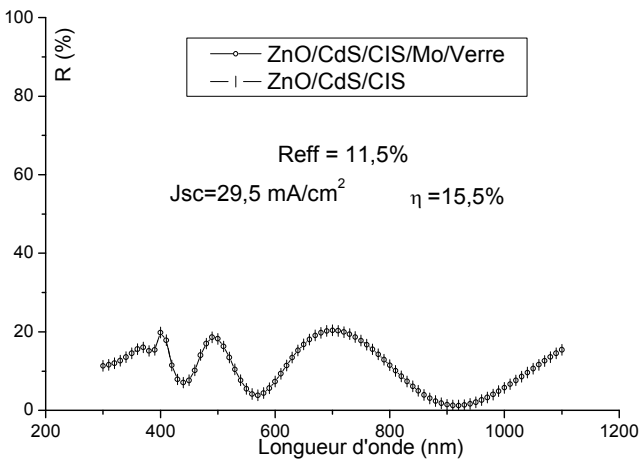


Figure 5 : réflectivité de ZnO/CdS/CuInSe₂/Mo/Verre

La réduction des pertes par réflexion se répercute directement sur le photocourant (sensiblement égal au courant de court-circuit de la cellule, Eq. 5) qui augmente.

$$J_{SC} \approx J_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) [1 - R(\lambda)] S(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

S(λ) étant la sensibilité spectrale de notre cellule. Le rendement de la cellule (directement lié au photocourant) se trouve alors amélioré.

En introduisant la réflectivité spectrale calculée dans un simulateur de cellule solaire avec toutes les données caractérisant notre hétérojonction (dopages, bandes interdites,

mobilités, constantes diélectriques, épaisseurs, résistance série et parallèle, vitesses de recombinaisons etc.), on peut calculer le courant de court-circuit et le rendement énergétique correspondants. Les valeurs sont indiquées dans la figure 5.

V. SOLUTION PROPOSEE

Pour réduire les pertes par réflexion sans alourdir le processus technologique on propose de rajouter une couche mince de silice poreuse à faible indice de réfraction (voir figure 2) sur la surface de la cellule photovoltaïque après dépôt des grilles métalliques.

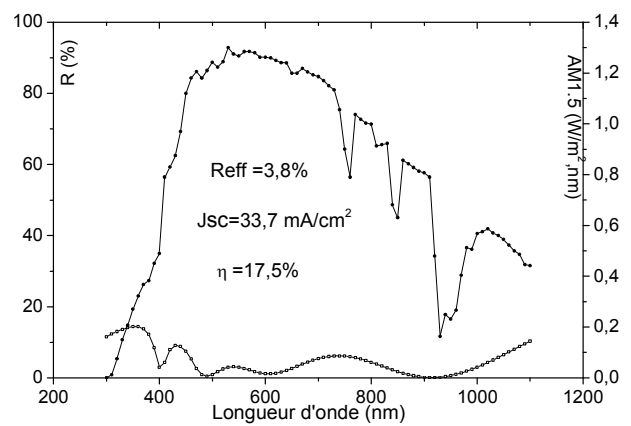


Figure 6 : Réflectivité optimisée de SiO₂/ZnO/CdS/CuInSe₂/Mo/Verre

La recherche des épaisseurs optimales (objectives technologiquement) nous ramène à la solution suivante :

100nm SiO₂/ 260nm ZnO/50nm CdS/CuInSe₂/Mo/Verre

Cette structure permettrait de réduire les pertes par réflexion à moins de 4%.

La minimisation des pertes par réflexion améliore donc le photocourant de plus de 14%. Le rendement énergétique augmente alors de 15.5% (fig5) à 17.5% après optimisation (fig6).

VI. CONCLUSION

La maîtrise des dépôts de couches minces et l’optimisation des choix des matériaux et des épaisseurs permettent de diminuer les pertes par réflexion des cellules photovoltaïques. Dans le cas des cellules en couches minces à base de CuInSe₂ ces pertes peuvent être

réduites à moins de 4% pour un rendement énergétique amélioré de 13%. Le rajout d'une couche de silice poreuse diélectrique à faible indice de réfraction permet une nette diminution des pertes par réflexion et une protection vis-à-vis du milieu ambiant sans alourdir le processus technologique.

[1] T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, *Solar Energy*, 85 (2011) 1580–1608.

[2] I. Repins, M.A. Contreras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, C. L. Perkins, B. To, R. Noufi. *Prog. in Photovolt. Res. Appl.* 2008 16(3).

[3] J. A. M. AbuShama, S. Johnston, T.Moriarty, G.Teeter, K. Ramanathan, and R. Noufi, , *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 12(39) (2004)

[4] N. Dahan, Z. Jehl, T. Hildebrandt, J.-J. Greffet, F. Guillemoles *J. Appl. Phys.* 112, (2012);

[5] L. Remache, L. Fourmond, E. Mahdjoub, A. Dupuis, M. Lemiti, *Materials Science & Engineering B* vol. 176 issue 1 January 15, 2011. p. 45-48

[6] M. Born, and E. Wolf, Oxford, Pergamon Press, 1964.

[7] A.Mahdjoub, L.Hadjeris, L.Herissi, M.Benbouzid, N.Attaf, M.S.Aida, T.Easwarakhanthan, B.Assouar and J.Bougdira, *International Conference on Optics (ICO'08)*, November 8-10 2008, Setif, Algeria.