



Etude des performances d'une cellule solaire p-i-n en fonction du gap de la couche fenêtre p-nc-SiO_x:H et de l'épaisseur de la couche active i-a-Si:H

A. Belfar¹, B. Amiri², H. Aït-kaci³.

Laboratoire de Physique des Plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications (LPPMCA),
Université d'Oran des Sciences et de la Technologie, USTO "M.B.", BP 1505 El-M'naouer, Oran 31000,
Algeria.

a_belfar@hotmail.com¹, amiri.benameur@yahoo.fr², h.aitekaci@gmail.com³

Résumé –

Une cellule solaire de type p-i-n, à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et de silicium nanocristallin oxyde-hydrogéné (nc-SiO_x:H) a été simulée, en utilisant le code de calcul unidimensionnel AMPS-1D (One Dimensional Analysis of Microelectronic and Photonic Structures). D'un côté, notre objectif était de déterminer l'effet de l'épaisseur de la couche active i-a-Si:H, ainsi que la variation du gap de la couche fenêtre sur les performances de la cellule, à savoir, le courant de court circuit (J_{SC}), la tension de circuit ouvert (V_{OC}), le facteur de forme (FF) et l'efficacité (E_{ff}). D'un autre côté et de trouver l'ensemble des paramètres structurels caractérisant chaque couche constituant la cellule.

Nos calculs, ont montré que la meilleure épaisseur pour la couche active qui donne des bonnes performances de la cellule et pour des raisons technologiques est celle de 400 nm. La simulation a montré également que les meilleures valeurs de l'énergie de la bande interdite de la couche fenêtre, qui conduisent à des meilleurs paramètres de sortie de la cellule se situent entre 2,10 eV et 2,15 eV.

Mots Clés: Couche fenêtre, cellule solaire, a-Si:H, nc-SiO_x:H, AMPS-1D, simulation.

I. INTRODUCTION

Plusieurs études ont montré que les cellules solaires en couches minces, à base de silicium amorphe (a-Si:H) présentent, après une certaine durée d'utilisation, des performances proches des performances initiales. Dans ce cas, le coût de fabrication des cellules en couches minces à base de a-Si:H est moins élevé et présente des possibilités de dépôt, sur différents types de substrats (rigides, flexibles, léger). Tous les travaux de recherches menés dans ce sens, tentent à développer de nouveaux procédés de fabrication et d'inventer de nouveaux designs, dans le but d'améliorer les performances des

cellules solaires avec un faible coût de réalisation [1-4]. Plusieurs possibilités existent pour améliorer l'efficacité de conversion d'une cellule solaire. D'une part, les interfaces entre les matériaux de la fenêtre, les électrodes et la zone intrinsèque (zone active) doivent être de bonnes qualités. D'autre part, un matériau semiconducteur à large bande interdite, de type p, peut être utilisé comme couche fenêtre afin d'améliorer la transmission de la lumière. Cette même couche doit être de haute conductivité pour augmenter le potentiel électrique dans la structure et réduire les effets de la résistance série [5]. Cela conduit à une meilleure concordance entre les différentes couches de la structure. Dans ce travail, une couche fenêtre à base de silicium nanocristallin oxydé (p nc-SiO_x:H), dont son gap peut varier de 2 eV jusqu'à 2,25 eV et, ce en fonction le dosage des atomes d'oxygène. Pingate et al. ont fait état d'une augmentation de l'efficacité dans une cellule à base de μ c-Si et dont la couche p est de type p nc-SiO_x [6]. Dans une étude menée par Pingate et al. sur les caractéristiques électriques et optiques des couches de p nc-SiO_x, il a été montré et révéler qu'il existe une séparation de phases nette dans ces films entre les régions riches en Si et celles riche en oxygène O [6]. Il a été montré également que cette microstructure des couches p nc-SiO_x peut améliorer l'efficacité des cellules Micromorph (Tandem). En particulier, une couche p nc-SiO_x améliore la qualité du contact en réduisant l'effet de la rugosité de l'électrode avant sur les performances des cellules que se soit en configuration simple ou Micromorph [7].

Ce travail est une étude des performances d'une cellule solaire à simple dessin p-i-n, utilisant le silicium amorphe hydrogéné comme matériau absorbant. D'un côté, notre objectif est d'étudier l'effet de l'épaisseur, du gap de la couche active sur



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014



les performances de la cellule avec la variation du gap de la couche fenêtre. De l'autre côté l'extraction de paramètres physiques caractérisant chacune des couches constituant les structures a été réalisé.

II. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE SIMULEE

Nous avons considéré un dispositif basé sur le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), déjà réalisés expérimentalement. Cette structure a été fabriquée par la technique RF-PECVD (Radio Frequency Plasma-Enhanced Chemical Vapor position) [1, 2]. La cellule a été déposée sur un substrat métallique qui joue le rôle de contact arrière. Pour le contact avant, une couche TCO (Transparent Conducting Oxide) a été déposée, sur le côté p. Le dispositif est constitué d'une couche a-Si:H intrinsèque d'épaisseur 400 nm, prise en « sandwich » entre une couche n a-Si:H d'épaisseur 10 nm et une couche fenêtre p à base de silicium nanocristallin oxydé hydrogéné (p-nc-SiOx:H) d'épaisseur 10 nm (Fig. 1). Une couche tampon intrinsèque à base de silicium amorphe carboné hydrogéné (i a-SiC:H) d'épaisseur 3 nm, a été incorporée entre la couche p et la couche active.

TCO
nc-SiOx:H (p) épaisseur = 10 nm
a-SiC:H (i) tampon épaisseur = 3 nm
a-Si:H (i) épaisseur = 400 nm
a-Si:H (n) épaisseur = 10 nm
Métal

Fig. 1 Schéma représentatif de la cellule simulée.

III. MODELE DE SIMULATION

Le code AMPS-1D, utilisé dans notre simulation, est basé sur la résolution de l'équation de Poisson couplée aux équations de continuité des électrons et des trous, à chaque position dans le

dispositif [8]. La résolution de ces différentes équations est réalisée par les méthodes des différences finies et de Newton-Raphson.

AMPS-1D simule le fonctionnement du dispositif en prenant en compte les statistiques de recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH). La simulation numérique nécessite également un modèle pour la densité des états pièges dans la structure. Pour la densité d'état locale, présente dans la bande interdite du silicium amorphe et du silicium nanocristallin oxydé, il a été supposé l'existence de deux types d'états, les états accepteurs et les états donneurs. Leurs densités sont modélisées par des queues de bande exponentielles (Urbach queues) et états gaussiens, associé aux liaisons pendantes.

IV. SIMULATIONS DE LA STRUCTURE ET PARAMETRES D'ENTREES

A. Paramètres d'entrées optiques

Un rayonnement solaire AM 1,5 avec une densité de puissance de 100 mW/cm^2 , comme une source d'éclairage, a été adoptée, l'allure du flux de ce rayonnement est présentée dans la figure 2. La réflexion de la lumière à la face avant (RF) a été fixée à 0,2. Pour le contact arrière nous avons choisi la valeur de 0,6 pour rétro-réflexion (RB).

Le coefficient d'absorption, pour les différentes couches ont été intégrés dans le code AMPS-1D.

B. Paramètres d'entrées électriques

Le calcul utilisant le programme AMPS-1D nécessite des paramètres d'entrée tels que les vitesses de recombinaison en surface, les hauteurs de barrières, la densité de puissance du rayonnement ainsi que les caractéristiques des couches constituant la structure à simuler.

Pour les électrons et les trous, nous avons utilisé la valeur de 10^7 cm/s comme vitesses de recombinaison en surface [9].

La hauteur des barrières du contact avant ϕ_{bo} (TCO/p couche) et du contact arrière ϕ_{bL} (n couche/métal) ont été fixées à 1,45 eV et 0,21 eV, respectivement. ϕ_{bL} représente l'énergie d'activation de la couche n.

En ce qui concerne les énergies de bandes interdites, pour les couches intrinsèques nous avons choisi les valeurs variant de 1,80 eV à 1,90 eV et pour la couche de type n, la valeur de 1,75 eV a été fixée. La valeur de 1,92 eV a été utilisée comme énergie de bande interdite, pour la couche tampon. Pour la couche fenêtre p-nc-SiOx:H les valeurs allant de 2 eV à 2,25 eV ont été utilisées dans nos calculs.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014**



Dans la couche nanocristalline oxyde hydrogéné, les valeurs $5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et $0,5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ont été utilisés, respectivement, pour les mobilités des électrons (μ_e) et des trous (μ_h).

L'affinité électronique (χ) est supposée différente pour les couches à base de p-nc-SiOx:H et les couches à base de a-Si:H.

Tous les paramètres décrits dans ce paragraphe et d'autres utilisées dans la simulation sont résumés dans le Tableau I.

TABLEAU I

Paramètres extraits de la simulation pour la structure étudiée à température ambiante.

Tels que, les abréviations utilisées dans ce tableau sont les suivantes :

ϵ_r : permittivité diélectrique relative. L: épaisseur de couche. χ : affinité électronique. E_g : gap d'énergie. μ_e , μ_h : mobilité des électrons et des trous. N_A , N_D : dopage en accepteurs et en donneurs. N_C , N_V : densités effectives d'états dans la bande de conduction et de valence. N_{DG} , N_{AG} : densités gaussiennes pour les états donneurs et accepteurs. G_{DO} , G_{AO} : préfacteurs des états queues de bande d/a. E_D , E_A : énergies des états de queues de bandes donneurs et accepteurs. E_{DG}/E_{AG} : position de l'énergie de pointe gaussienne, pour les états donneurs et accepteurs.

Paramètres	nc-SiOx:H(p)	tampon a-SiC:H(i)	a-Si:H(i)	a-Si:H(n)
ϵ_r	11,9	11,9	11,9	11,9
L (nm)	10	3	200-650	10
χ (eV)	3,76	3,92	4,00	4,00
E_g (eV)	2,00-2,25	1,90	1,80	1,75
N_C (cm ⁻³)	1×10^{23}	2×10^{20}	2×10^{20}	2×10^{20}
N_V (cm ⁻³)	1×10^{23}	2×10^{20}	2×10^{20}	2×10^{20}
μ_e (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5	20	20	10
μ_{h+} (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	0,5	4	4	4
N_A (cm ⁻³)	1×10^{19}	0	0	0
N_D (cm ⁻³)	0	0	0	1×10^{19}
G_{DO}/G_{AO} (cm ⁻³ eV ⁻¹)	1×10^{22}	4×10^{21}	2×10^{21}	4×10^{21}
E_D/E_A (eV)	0,06 / 0,03	0,07 / 0,05	0,04 / 0,02	0,05 / 0,03
N_{DG} (cm ⁻³)	1×10^{18}	7×10^{16}	2×10^{15}	5×10^{18}
N_{AG} (cm ⁻³)	1×10^{18}	7×10^{16}	2×10^{15}	5×10^{18}
E_{DG}/E_{AG} (eV)	1,25 / 1,15	1,13 / 0,15	1,08 / 0,98	1,05 / 0,96

V. RESULTATS DE SIMULATIONS ET DISCUTIONS

Le diagramme de bande d'énergie de la cellule p-i-n est représenté sur la figure 2. Dans un premier temps et, dans le but de comprendre l'effet de l'épaisseur de la couche active i a-Si :H et l'énergie de la bande interdite de la couche fenêtre p nc-SiOx :H sur les performances de la cellule, nous avons simulé et comparé les caractéristiques de sortie de cette dernière à savoir, le courant de court-circuit (J_{sc}), la

tension de circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF) et l'efficacité (E_{ff}). Pour cela, en fixant le gap la couche absorbante à 1.80 eV et on fait varier simultanément son épaisseur de 200 nm jusqu'à 650 nm et le gap de la couche fenêtre de 2 eV jusqu'à 2,25 eV.

Les courbes des quatre caractéristiques de la cellule obtenues par simulation, sont représentées sur la figure 3. A partir de ces courbes, nous avons pu constater et pour des raisons technologiques que la meilleure valeur de l'épaisseur de la couche active qui



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014



donne des meilleures performances de la cellule est

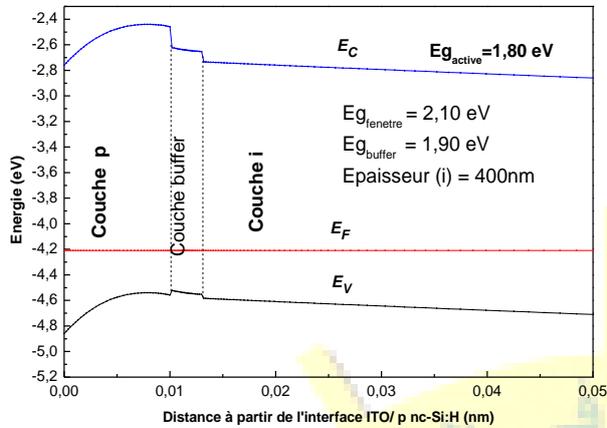


Fig. 2 Diagramme de bande d'énergie de la cellule p-i-n.

celle de 400 nm. La courbe de la tension de circuit ouvert, nous renseigne sur les meilleures valeurs de l'énergie de la bande interdite de la couche fenêtre qui sont comprise entre 2,10 eV et 2,15 eV.

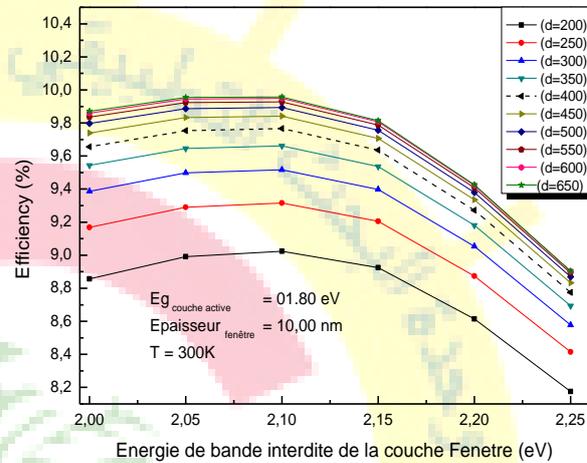
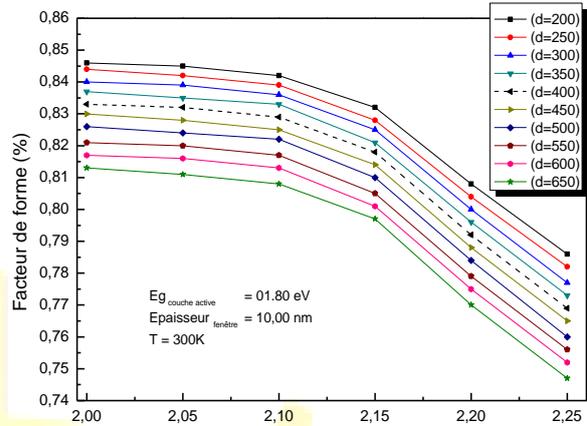
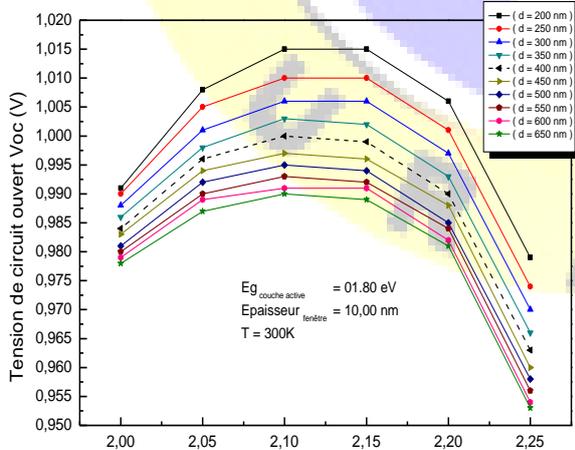
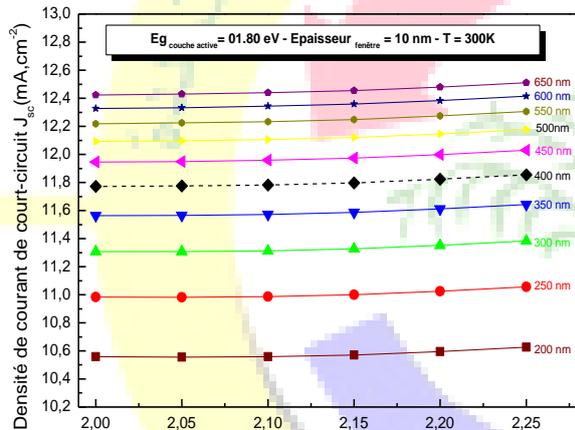


Fig. 3 Paramètres de sortie de la structure simulée.

VI. CONCLUSION

Le code de calcul AMPS-1D a été utilisé pour simuler une cellule solaire de type p-i-n à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et de silicium nanocristallin oxyde-hydrogéné (nc-SiO_x:H). L'objectif de cette étude, était de déterminer l'effet de l'épaisseur de la couche active i a-Si:H et également l'effet de la variation de l'énergie de la bande interdite de la couche fenêtre, à base de silicium nanocristallin oxyde hydrogéné (p nc-SiO_x:H), sur les performances de la cellule. Ça d'un coté, de l'autre coté et de trouver l'ensemble des paramètres structurels caractérisant chaque couche constituant la cellule. Les résultats de simulation, ont montré que, pour la couche active, la meilleure valeur de l'épaisseur et pour des raisons d'application technologiques doit être de l'ordre de 400 nm. En plus, nos résultats de modélisation ont montré que les meilleures valeurs de l'énergie de la bande interdite de la couche fenêtre, qui conduisent à des meilleurs



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 3rd International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Gharđaia – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2014



paramètres de sortie de la cellule sont compris entre
2,10 eV et 2,15 eV.

REFERENCES

- [1] R. Biron, P. Celine, F.J. Haug, J. Escarre, K. Soderstrom, and C. Ballif, *Journal of applied physics*, 110, 2011, p. 124511.
- [2] Baojun. Yan, Lei Zhao, Jingwei Chen, Hongwei Diao, Guanghong Wang, Yanli Mao and Wenjing Wang. *Journal of non-crystalline solids* 358, 2012, pp.3243-3247.
- [3] A. Belfar and H. Ait Kaci, *Thin Solid Films*, 525, 2012, pp.167-171.
- [4] A. Belfar and H. Ait Kaci, *Materials Science and Engineering B* 178, 2013, pp. 438– 442.
- [5] L. Guo, J. Ding, J. yang, Z. Ling, G. Cheng, N. Yuan, S. Wang, *Vacuum* 85, 2011. p.649.
- [6] N. Pingate, D. Yotsaksri and P. Sichenugrist, *Conference Record of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2006, p. 1507.
- [7] P. Cuony, M. Marending, D.T.L. Alexander, G. Bugnon, M. Despeisse and C. Ballif, *Applied Physics Letters* 97, 2010, p.213502.
- [8] S. Fonash, J. Arch, J. Hou, W. Howland, P. Mcelheny, A. Moquin, M. Rogosky, T. Tran, H. Zhu, F. Rubinelli, "A Manual for AMPS-1D for windows 95/NT a One-Dimensional Device Simulation Program for the Analysis of Microelectronic and Photonic Structures". *The Pennsylvania State University:1997*.
- [9] Mohamed Ikbali Kabir, Seyed A. Shahahmadi, Victor Lim, Saleem Zaidi, Kamaruzzaman Sopian, and Nowshad Amin. *International Journal of Photoenergy* ID 460919, 2012.