



# Etude et Simulation des Cellules Solaires à base des Couches Minces: Multicouches et multi-jonctions

Fatiha Benbekhti<sup>\*1</sup>, Abdelhalim Benmansour<sup>2</sup>, Souad Tahraoui<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER),

<sup>1,3</sup> Génie Electrique et Electronique Département, Université de Tlemcen  
B.P 119, URMER, Université de Tlemcen, Algérie

<sup>\*</sup>Corresponding author E-mail: fatiha.benbekhti@mail.univ-tlmcen.dz

**Abstract**— la production d'énergie photovoltaïque a reçu une attention considérable comme l'une des alternatives de production d'énergie les plus prometteuses. Elle peut contenir la consommation mondiale d'électricité. Le photovoltaïque n'a cessé de croître à un rythme rapide au cours des dernières années. Les cellules solaires photovoltaïques à base de silicium cristallin sont largement utilisées dans le monde. Une autre voie est apparue avec un coût de fabrication moins cher par rapport aux modules traditionnels à base de silicium, est celle des couches minces. Ces cellules réduisent la quantité massive utilisée du silicium et améliorent leur rendement de conversion par la déposition que de la quantité efficace. Dans ce papier, une conception à triple jonction est réalisée à base de silicium amorphe/ silicium-germanium amorphe/ Silicium microcristallin. Cela a été réalisé grâce à la modélisation et la simulation en utilisant Silvaco ATLAS<sup>TM</sup>. Une cellule à couches minces a été créée en utilisant les paramètres de cellules solaires réels documentés dans différents papiers.

**Keywords**— Silicium, triple-jonction, couche mince, rendement de conversion .

## I. INTRODUCTION

La domination du silicium dans ses formes cristallines et amorphes est une écrasante majorité de 99% de l'énergie photovoltaïque totale du marché [1, 2]. L'exploitation de cette domination dans les industries des semi-conducteurs, a donné une grande progression à ce matériau afin de tirer d'avantage de ces propriétés électriques [3]. En termes physiques, Si ne figure pas parmi les matériaux les plus appropriés pour être utilisés dans la conversion photovoltaïque de rayonnement solaire. Depuis haute efficacité est la condition la plus importante, le meilleur matériau pour la technologie photovoltaïque est des éléments à couches minces, qui ont de nombreux avantages sur silicium cristallin.

Une autre voie du photovoltaïque est apparue après la technologie dominante du Silicium cristallin, ce dernier est remplacé par un autre matériau plus absorbant [4]. Ces cellules photovoltaïques de deuxième génération ou dites couche mince réduisent la quantité massive utilisée du silicium et améliorent leur rendement de conversion par la déposition que de la quantité efficace [5].

L'introduction des couches minces dans les technologies photovoltaïques offre plusieurs avantages: premièrement, les matériaux utilisés souvent des semi-conducteurs à bande interdite directe, dont leur coefficient d'absorption est très élevé. Deuxièmement, une faible épaisseur de la couche absorbante (quelques micromètres) est suffisante pour absorber la totalité de la lumière incidente ce qui réduit le coût des matériaux [6]. Troisièmement, en raison de la faible dimension du matériau actif de la cellule solaire, des matériaux rares et coûteux peuvent être utilisés. Quatrièmement, malgré que le rendement de conversion des cellules en couches minces est inférieur aux cellules en silicium cristallin mais leur fabrication est moins coûteuse [7] à cause des différentes techniques de dépôt sous vide utilisées, ce qui réduit encore les coûts de traitement. Finalement, la déposition des films minces sur une variété des substrats (substrats flexibles, substrats légers tels que des feuilles polymères, etc.), élargit les domaines d'applications de ces cellules solaires [8].

Un bon accord entre l'énergie des photons entrants, à partir de différentes parties du spectre, et l'énergie de la bande interdite des absorbeurs semi-conducteurs permet une utilisation efficace de l'énergie du spectre solaire. Les cellules solaires à jonction multiple comme tandem a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H micro morphes, et triple jonction comme a-Si:H/a-SiGe:H/ $\mu$ c-Si:H cellules solaires, permettent cette utilisation efficace. [8].

Les épaisseurs d'environ 300  $\mu$ m des substrats de silicium sont fabriquées par la technique industrielle pour des questions de résistance mécanique. Par ailleurs, des études ont montré que l'utilisation d'une épaisseur de l'ordre de 50  $\mu$ m de couches minces d'un substrat de silicium monocristallin, permet potentiellement d'atteindre un rendement de conversion élevé, supérieurs à 20 % [6, 9].

## II. MATERIAUX ET METHODES

Une cellule solaire à triple jonction avec la structure suivante a été utilisée dans la simulation, une couche d'Aluminium Al (1  $\mu$ m), une couche d'oxyde de Zinc ZnO (100 nm), cellule inférieure (Bottom Cell) composée de trois couches minces de silicium microcristallin déposées comme



suit  $n\text{-}\mu\text{-Si:H}$  (10 nm)/ $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$  (1,7 $\mu\text{m}$ )/ $p\text{-}\mu\text{-Si:H}$  (15 nm) avec un fort dopage ( $10^{20}$  at/cm<sup>3</sup>). Cellule du milieu (Middle Cell) composée de trois couches minces de silicium-germanium amorphe déposées comme suit  $n\text{-}a\text{-SiGe:H}$ (15nm)/ $i\text{-}a\text{-SiGe:H}$ (500nm)/ $p\text{-}a\text{-SiGe:H}$  (20nm) avec un fort dopage ( $10^{20}$  at/cm<sup>3</sup>). Cellule supérieure (Top Cell) composée de trois couches minces de silicium amorphe déposées comme suit  $n\text{-}a\text{-Si:H}$ (10 nm)/ $i\text{-}a\text{-Si:H}$ (200 nm)/ $p\text{-}a\text{-Si:H}$ (15 nm) avec un fort dopage ( $10^{20}$  at/cm<sup>3</sup>) et une couche d'oxyde de Zinc dopé par l'Aluminium  $\text{ZnO:Al}$  (100 nm).

$e$  : est la charge électrique élémentaire,  
 $\epsilon$  : est la permittivité diélectrique du semi-conducteur,  
 $N_D$  et  $N_A$  sont les concentrations de donneurs et d'accepteurs ionisés,  
 $n$  et  $p$  sont les densités d'électrons et de trous libres.

Equation de continuité pour les électrons et les trous  
Les courants d'électrons et de trous résultent de la somme de deux termes : un gradient de concentration et un gradient de potentiel électrostatique :

$$\begin{cases} J_n = ne\mu_n E + eD_n \overrightarrow{\text{grad}h} , \\ J_p = pe\mu_p E + eD_p \overrightarrow{\text{grad}\phi} \end{cases} \quad (2)$$

Où  
 $n$  et  $p$  sont les densités d'électrons et de trous libres,  
 $e$  : est la charge électrique élémentaire,  
 $\mu_n$  et  $\mu_p$  : la mobilité des électrons et des trous,  
 $D_n$  et  $D_p$  : le coefficient de diffusion des électrons et des trous,

Equation de courant

Pour décrire les phénomènes de transport des porteurs, on utilise les équations de continuité pour les électrons et pour les trous, qui régissent la condition d'équilibre dynamique des porteurs de charge dans le semi-conducteur. Elles donnent la relation entre les courants, les mécanismes de génération et de recombinaison et la distribution spatiale et temporelle des porteurs de charges libres :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_n , \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p + \frac{1}{e} \text{div} \vec{J}_p \end{cases} \quad (3)$$

Où  
 $n$  et  $p$  sont les densités d'électrons et de trous libres,  
 $G_n$  et  $G_p$  : représentent les taux de génération des électrons et des trous,  
 $U_n$  et  $U_p$  : représentent les taux de recombinaison des électrons et des trous,  
 $J_n$  et  $J_p$  : la densité de courant des électrons et des trous,  
 $e$  la charge électrique élémentaire.

La performance d'une cellule peut être tirée par ses paramètres ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) extraire de sa caractéristique courant-tension (IV).

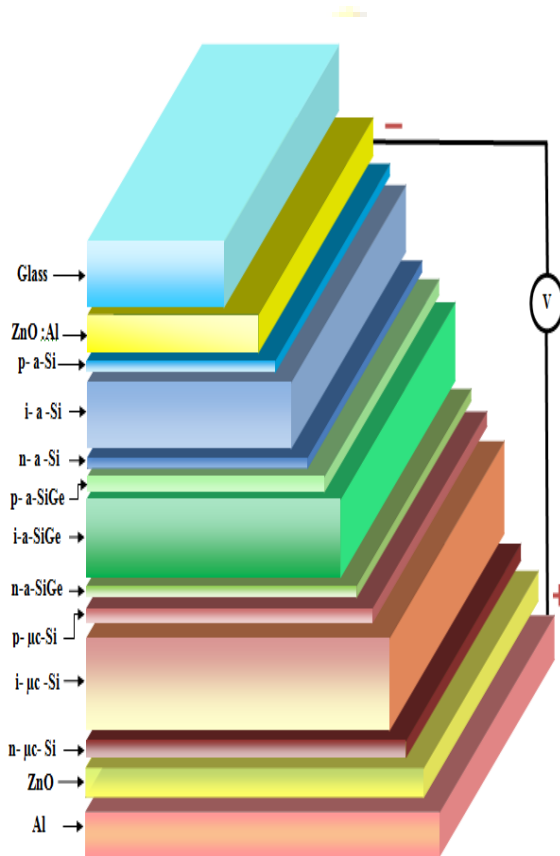


Fig. 1 Schéma d'une structure à Triple Jonction :  $a\text{-Si:H}/a\text{-SiGe:H}/\mu\text{-Si:H}$

La simulation numérique par Silvaco est basée sur la résolution numérique de trois équations fondamentales de transport de charges à semi-conducteurs, qui sont respectivement l'équation de Poisson et l'équation de continuité pour les électrons et les trous et l'équation de courant.

Equation de Poisson

$$\Delta\psi = -\frac{e}{\epsilon}(N_a - N_d + p - n) , \quad (1)$$

Où

$\Psi$  est le potentiel électrostatique.

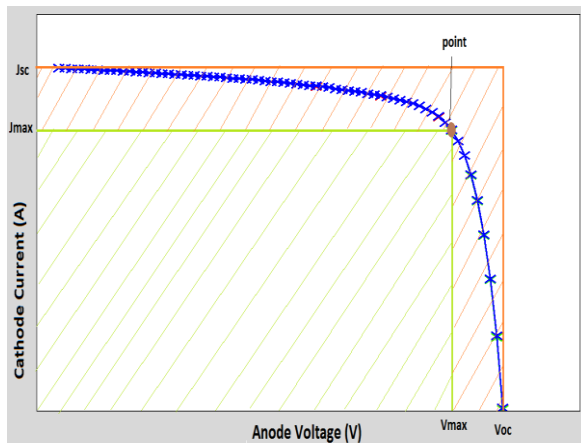


Fig. 2 Caractéristique IV d'une cellule solaire

Il existe un point sur la courbe dont le produit courant-tension est maximal, c'est le point de fonctionnement.

$I_{m\max}$  et  $V_{m\max}$  sont le courant maximal et la tension maximale au point de fonctionnement.

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ): le courant obtenu quand on connecte les bornes de la cellule.

La tension à circuit ouvert ( $V_{co}$ ) est obtenue quand aucune charge extérieure n'est branchée, le courant qui traverse la cellule est nul.

Facteur de Forme (FF): c'est le rapport entre la puissance actuelle peut être fournie d'une cellule solaire par le produit du courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le facteur de forme ne peut pas dépasser 89%.

Le rendement ( $\eta$ ) d'une cellule solaire désigne le rendement de conversion en puissance, est défini comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule ( $P_{\max}$ ) et la puissance lumineuse incidente ( $P_{in}$ ) [10]. Il est donné par l'équation (6), avec  $P_{in} = 100mW/cm^2$ .

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Maintenant, il apparaît que les modules a-Si commerciaux à jonctions multiples pourraient être dans la plage de 7% - 9% de rendement à court terme. Cependant, il reste un certain nombre de problèmes sérieux avec la technologie de silicium amorphe. Meilleurs rendements cellulaires d'aujourd'hui (stable) sont environ 12% [11].

La structure obtenue par le simulateur Silvaco est représenté sur la figure (Fig. 3).

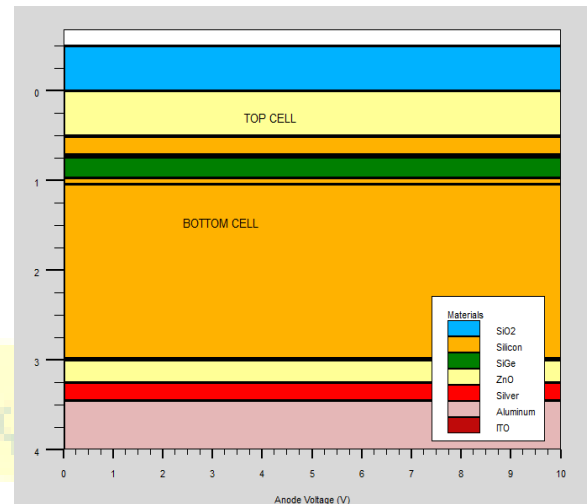


Fig. 3 Structure de la Triple Jonction de cellule solaire simulée  
*a-Si:H/a-siGe:H/ $\mu$ c-Si:H*

En raison de l'incorporation de germanium dans le silicium, le coefficient d'absorption augmente. L'incorporation de Ge provoque une augmentation du rendement quantique externe dans la partie rouge du spectre et donc à une augmentation de l'efficacité tandis que l'épaisseur de la couche d'absorbeur reste constante [12].

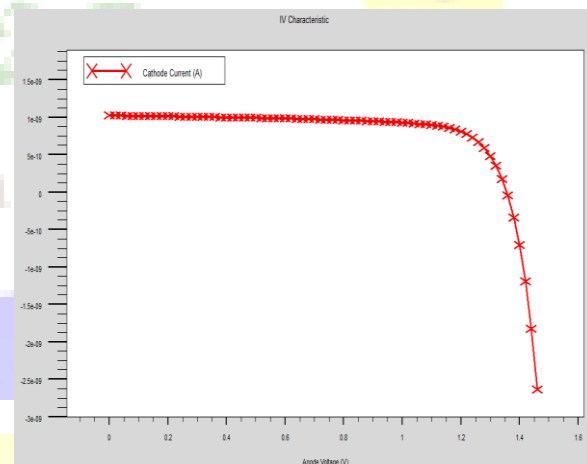


Fig. 4 Caractéristique IV obtenue après simulation de la Triple Jonction  
*a-Si:H/a-siGe:H/ $\mu$ c-Si:H*

Une durée de vie élevée  $\tau_n$  des porteurs maintient un bon  $V_{oc}$ .

Les valeurs,  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  tirés de la caractéristique IV permettent de calculer le facteur de forme FF et le rendement de conversion.



$$FF = 77\%$$

$$\eta = 12\%$$

L'ajout de deux électrodes permet le passage entre les couches de silicium amorphe et les couches de silicium-germanium amorphes et le passage entre ces dernières et les couches microcristallines, il superpose exactement la couche intermédiaire avec la liaison d'une résistance localisée force le flux de courant de l'anode à la cathode et empêche tout courant dans l'électrode. Physiquement, elles peuvent être justifiées par le fait que la couche intermédiaire agit comme une résistance sans quitter la limitation significative de courant. La valeur de la résistance peut être utilisée pour ajuster la quantité de courant à circuler à travers l'autre électrode en commandant ainsi la résistance de la couche intermédiaire. La recombinaison de surface avant et arrière de la cellule et de la faible longueur de diffusion des porteurs sont deux facteurs qui réduisent le rendement quantique. D'où la nécessité pour la passivation de la surface des cellules pour réduire cette recombinaison, et ainsi réduire la perte de rendement quantique.

#### IV. CONCLUSIONS

Un faible dopage de la couche a-Si:H (p) permet d'atteindre des valeurs minimales de  $J_0$ , mais provoque des pertes résistives qu'il semble difficile d'éliminer. Des couches plus conductrices limitent la résistance série des dispositifs, mais diminuent également leur  $V_{oc}$ . L'utilisation d'une triple couche a-Si:H augmente le rendement de conversion [13].

Une cellule solaire à Triple Jonction : a-Si:H/a-SiGe:H/ $\mu$ c-Si:H était réalisée, l'utilisation des couches minces de silicium amorphe augmente l'absorption, et l'incorporation de germanium dans le silicium, augmente le coefficient d'absorption une deuxième fois.

L'épaisseur totale de la cellule solaire à jonction multiple est similaire à une cellule solaire à jonction unique conventionnel, mais chaque cellule composant est plus mince et donc moins sensible aux défauts induits par la lumière [14].

Un avantage supplémentaire d'une structure de cellules à jonctions multiples est que chaque cellule composant peut être adaptée à une partie spécifique du spectre solaire, prolongeant de ce fait une partie utilisable du spectre et l'augmentation du rendement de conversion des cellules solaires [15].

#### ACKNOWLEDGMENT

Cette recherche fait partie du projet de recherche national (PNR) dans le domaine photovoltaïque et a été menée à l'Unité de Recherche des Matériaux et Energies Renouvelables (URMER).

#### REFERENCES

- [1] L. Hong, Rusli, X. Wang, H. Wang, X. Xu, L. He and H. Zheng, "Towards Perfect Anti-Reflection and Absorption for Nanodome-Array Thin Film Silicon Solar Cell," *PV Asia Pacific Conference 2012*, Energy Procedia, vol. 33, 2013, p.p. 150 – 156.
- [2] A. Beaudoin, "Etude de la dynamique des porteurs dans des nanofils de Silicium par spectroscopie terahertz," Université de Sherbrooke, thèse doctorat, 2013.
- [3] O. Demichel, "Propriétés Électroniques de Nanofils de Silicium obtenus par Croissance Catalysée," Université Joseph Fourier – Grenoble I, thèse doctorat, 2010.
- [4] X. Yan, S. Venkataraj and A. G. Aberle, "Modified Surface Texturing of Aluminium-Doped Zinc Oxide (AZO) Transparent Conductive Oxides for Thin-Film Silicon Solar Cells," *PV Asia Pacific Conference 2012*, Energy Procedia, vol. 33, 2013, p.p. 157 – 165.
- [5] M. Grau, "Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres," thèse doctorat, INSA – Lyon, 2012.
- [6] F. Abdo, "Croissance de Couches Minces de Silicium par Epitaxie en Phase Liquide à basse Température pour Applications Photovoltaïques," thèse doctorat, 2007.
- [7] D. Kohen, "Etude des nanofils de Silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïque," université de Grenoble, thèse doctorat, 2012.
- [8] M. Zeman, O. Isabella, K. Jäger, R. Santbergen, S. Solntsev, M. Topich and J. Krc, "Advanced Light Management Approaches for Thin-Film Silicon Solar Cells," *International Conference on Materials for Advanced Technologies 2011 Symposium O*, Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 189 – 199.
- [9] J. Rao and S. Varlamov, "Light Trapping in Thin Film Polycrystalline Silicon Solar Cell using Diffractive Gratings," *Energy Procedia*, vol. 33, 2013, pp. 129 – 136.
- [10] F.Z. Dahou, "Elaboration des Couches Minces Originales pour Réalisation de Cellules Solaires," Université d'Oran, thèse doctorat, 2011.
- [11] K. v. Maydell, K. Grunewald, M. Kellermann, O. Sergeev, P. Klement, N. Reininghaus and T. Kilper, "Microcrystalline SiGe Absorber Layers in Thin-Film Silicon Solar Cells," *E-MRS Spring Meeting 2013 Symposium D - Advanced Inorganic Materials and Structures for Photovoltaics*, 27-31 May 2013, Strasbourg, France, Energy Procedia, vol. 44, 2014, p.p. 209 – 215.
- [12] H. Mathieu, "Physics of semiconductors and electronic components," 4<sup>th</sup> edition. Masson 1997.
- [13] T. Desrués, "Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière", Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, 2009.
- [14] M. Zeman, "Advanced Thin-Film Silicon Solar Cells," Delft University of Technology, The Netherlands.
- [15] X. Deng, X. Liao, S. Han, H. Povolny, P. Agarwal, "Amorphous silicon and silicon germanium materials for high-efficiency triple-junction solar cells," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 62, 2000, p.p. 89-95.