



ETUDE DE L'ELECTRODE DE CONTACT AVANT DE LA STRUCTURE ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al AVEC LE LOGICIEL ASDMP

Dr H. MADANI YSSAAD^a ;Dr D.RACHED^b,

^aE.N.S.E.T . B.P. 1523 Route d'Es Senia 31000 Oran Algérie. Laboratoire RTFM, Département de Génie mécanique. Email: habib.yssaad@yahoo.fr.

^bUniversité des Sciences et de la Technologie d'Oran U.S.T.O. Département de Physique. B.P. 1505, El M'nouar, Oran, Algérie. Email: djaaffar31@yahoo.fr.

Resume :

La courbure de bande entre le TCO/p-a-Si :H est parmi les facteurs les plus importants qui limitent les performances des hétérojonctions à base de silicium amorphe /silicium cristallin Dans cet article nous avons utilisé le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) pour étudier et analyser l'effet de cette courbure de bande de l'électrode de contact avant de la structure (HIT) ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al. Nous avons montré que lorsque l'on augmente cette courbure de bande (Augmentation de la hauteur de la barrière de potentiel) qui mène à un meilleur contact ohmique entre l'ITO et la couche p-a-Si:H, le V_{bi} augmente et le champ électrique à l'interface ITO/p-a-Si :H diminue. Cette réduction du champ va permettre aux trous de passer de la couche p au contact, ce qui va faciliter la collecte des paires électrons trous.

mots clés :

Cellules solaires - HIT - Simulation - Courbure de bande - Caractéristique I(V).

1. INTRODUCTION

Malgré les progrès réalisés dans le domaine de la fabrication des cellules solaires [1,2], le rendement de celles-ci reste considérablement limité par les recombinaisons à l'interface TCO/p-a-Si :H ou bien TCO/n-a-Si :H. Le S_nO_2 et l'ITO sont les oxydes transparents conducteurs les plus largement utilisés comme électrodes de contact avant dans la fabrication des cellules solaires, en raison de leurs très bonnes propriétés électriques et optiques. Cependant, beaucoup de

problèmes sont associés à l'utilisation de ces oxydes transparents conducteurs. La courbure de bande à l'interface TCO/p-a-Si:H ou bien TCO/n-a-Si :H est l'un des facteurs qui limite les performances des cellules HIT (Heterojunctions with Intrinsic Thin layers). Il est donc nécessaire de réduire les pertes électriques et optiques engendrées à l'interface (TCO/a-Si :H).

Nous avons étudié la sensibilité de la courbure de bande qui représente l'un des principaux facteurs qui interviennent dans le rendement de

conversion des cellules HIT de type n à base de silicium polymorphe: (ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al). Afin d'optimiser les caractéristique $J = f(V)$, nous avons étudié l'influence de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} au niveau de la face avant (ITO/p-Si :H) de la structure HIT.

Lorsqu'un métal et un semiconducteur sont au contact (TCO/p-a-Si :H), la structure de bande au voisinage de l'interface est conditionnée par la différence des travaux de sortie du métal et du semiconducteur (fig. 1), Des études expérimentales réalisées par le professeur P.Roca i Cabarocas ont démontré qu'il est possible d'augmenter le travail de sortie du S_nO_2 en interposant une couche de palladium ou de chrome entre S_nO_2 /p-a-Si:H, et ainsi améliorer les rendements des p-i-n en augmentant la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} [3,4].

Dans le but d'étudier et d'analyser l'effet de la courbure de bande qui existe dans l'électrode de contact avant des structures HIT: ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al (fig. 1), nous avons fait varier cette courbure de bande en changeant le E_{sbb} afin de réduire la barrière de potentiel qui existe entre l'ITO et la couche p-a-Si:H et qui réduit le passage des trous dans le métal. Nous avons choisi le silicium polymorphe comme couche

intrinsèque pour ses bonnes propriétés électriques [5].

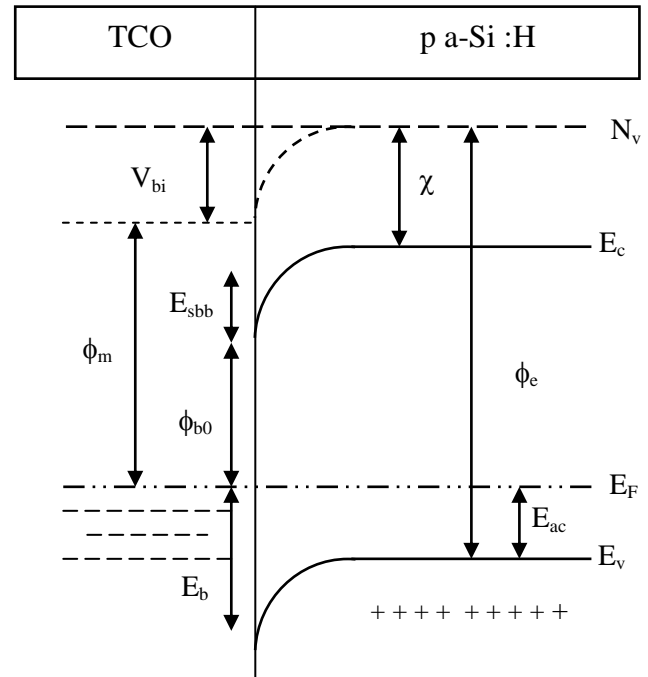


Figure 1: Structure de bande au voisinage de l'interface ITO / p-a-Si:H

- ϕ_{b0} est la hauteur de la barrière de potentiel pour les électrons.
- E_{sbb} est la courbure de bande à l'interface ITO/couche p (p-a-Si:H).
- E_{ac} (p) est l'énergie d'activation de la couche p.

2. MODEL DE SIMULATION :

Les différents paramètres de notre dispositif ont été déterminés par le logiciel ASDMP [6,7] (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program). Ce logiciel a été développé par Professeur Pr. Parsathi Chatterjee. Il est similaires au programme AMPS [8,9,10] développé par Professeur Fonash. ASDMP a été conçu pour des dispositifs basés sur des homojonctions ou hétérojonctions de silicium cristallin et amorphe. Il est à une dimension et simule le profil de génération ainsi que les mécanismes de transport.

Il comprend deux parties.

La partie électrique : Elle résout simultanément les équations de continuité des trous et des électrons ainsi que l'équation de Poisson [11,12]. Les queues de bandes sont représentées par des exponentielles et les liaisons pendantes par des gaussiennes. Ce profil ne dépend pas du niveau de Fermi. (Le defect pool n'a pas encore été introduit dans ce modèle).

La partie optique [13,14] : Elle intègre le modèle semi-empirique de François Leblanc [15]. Le facteur de génération est calculé en tenant compte des réflexions multiples et de la diffusion par les interfaces rugueuses. Le système obtenu est résolu par la méthode des différences finies et celle de Newton-Raphson. On obtient alors le potentiel électrostatique et les quasi-niveaux de Fermi en tout point du dispositif. La hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} entre l'ITO et la couche p-Si :H à $x = 0$ et ϕ_{bL} entre la couche n-Si :H et le métal à $x = L$ sont données par :

$$\phi_{b0} = E_{\mu}(p) - E_{ac}(p) - E_{sbb} \quad (1)$$

et

$$\phi_{bL} = E_{ac}(n) \quad (2)$$

Ces contacts sont caractérisés par les vitesses de recombinaison à l'interface pour les électrons et les trous. Celles-ci sont égales à : S_{n0} , S_{p0} , S_{nL} et $S_{pL} = 10^7$ cm/sec. $E_{ac}(p)$ et $E_{ac}(n)$ sont les énergies d'activations de la couche p-a-Si :H et n-c-Si et V est la différence de potentiel appliquée. E_{sbb} et la courbure de bande. Les principaux paramètres utilisés

dans cette étude sont récapitulés dans le tableau 1.

Paramètres	p-a-Si :H	i-pm-Si :H	Couche défectueuse sur c-Si	n-c-Si
d (μm)	0.0110	0.003	0.0032	299
χ (eV)	3,90	3,95	4,22	4,22
E_a (eV)	0.27	0.92	0.06	0.06
E_{μ} (eV)	1,90	1,96	1,12	1,12
La densité du dopage ND (cm^{-3})	0	0	910^{14}	910^{14}
La densité du dopage NA (cm^{-3})	10^{19}	0	0	0
ND, NATOT (cm^{-3})	10^{19}	10^{14}	9.10^{14}	3.10^{11}
E_D (eV)	0,050	0,050	0,050	0,005
E_A (eV)	0,030	0,030	0,030	0,003
G_{D0}, G_{A0} ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$)	4.10^{21}	4.10^{21}	10^{20}	10^{20}
μ_e (cm^2/Vs)	20	30	1000	1000
μ_{h+} (cm^2/Vs)	4	12	450	450
N_C, N_V	2.10^{20}	2.10^{20}	5.10^{18}	5.10^{18}
ϕ_{b0} (eV)	1,20-1,50			
ϕ_{bL} (eV)	0.06			

Tableau 1 : Principaux paramètres de simulation de la structure HIT ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al.

d (\AA) représente l'épaisseur de la couche,

χ (eV) représente l'affinité électronique, E_{μ} (eV) représente le gap de mobilité, E_{ac} (eV) représente l'énergie d'activation,

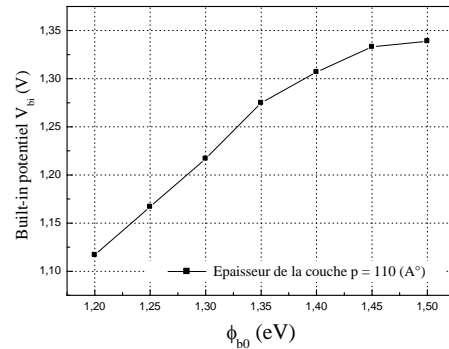
E_D et E_A (eV) représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de valence et de conduction,

G_{D0} et G_{A0} ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$) representent un pré-facteur exponentiel des états donneurs et accepteurs dans les queues de bandes, μ_{e-} et μ_{h+} ($\text{cm}^2/\text{V s}$) representent les mobilités des électrons et des trous, N_C et N_V representent les densités effectives d'états des électrons et des trous de la bande de conduction et de valence,

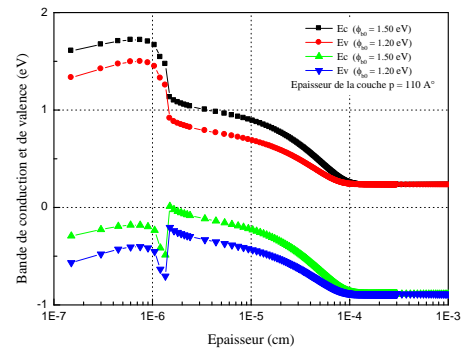
3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le dispositif utilisé dans cette partie de notre travail se compose de la structure suivante : ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al. Nous avons utilisé 11 nm pour l'épaisseur de la couche dopée p. Les différents paramètres de chaque couche sont résumés dans le tableau IV.1. Nous avons fait varier le E_{sbb} [eq. 1], de façon à obtenir $1.20 \text{ eV} < \phi_{b0} < 1.50 \text{ eV}$.

Le graphe 1 représente le built-in-potential V_{bi} en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} . Le V_{bi} mesure la différence de potentiel entre la région p et la région n. Ce graphe montre clairement que le V_{bi} dépend fortement de la valeur de ϕ_{b0} . En effet, l'augmentation du V_{bi} de 1,12 eV à 1,34 eV est le résultat de la réduction de la barrière de potentiel à l'interface ITO/p-a-Si :H. Cette réduction est significative sur le graphe 2.

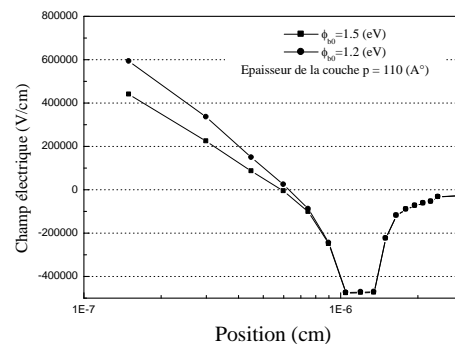


Graphe 1 : Built-in potential V_{bi} en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} .



Graphe 2 : Schéma du diagramme de la bande de valence et de conduction à l'interface sous éclaircissement à $V = 0$ pour des cellules avec une épaisseur de la couche p de 11 nm et avec $\phi_{b0} = 1.50 \text{ eV}$ et 1.20 eV .

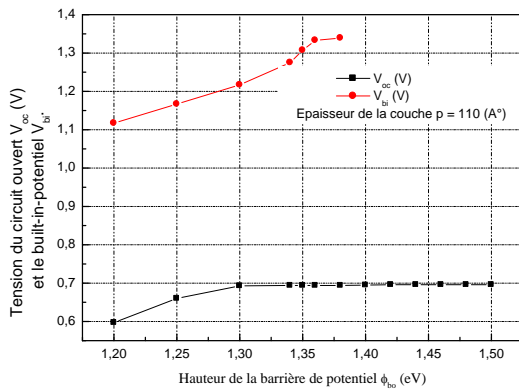
Le graphe 3, ci-dessous, représente la variation du champ électrique à l'interface ITO/p-a-Si :H dans la cellule étudiée.



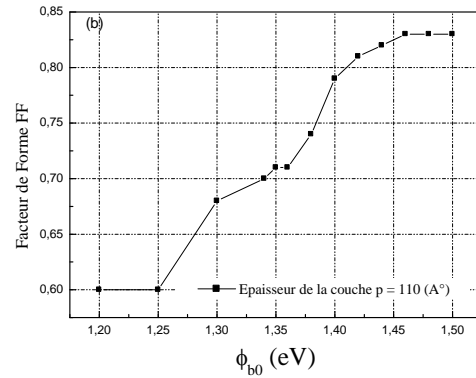
Graphe 3 : Le champ électrique en fonction de la position de la cellule avec une épaisseur de la couche p de 11 nm et avec $\phi_{b0} = 1.50 \text{ eV}$ et 1.20 eV .

Nous remarquons une diminution du champ électrique à l'interface ITO/p-a-Si:H lorsque la valeur de ϕ_{b0} augmente. La diminution du champ électrique est due à une accumulation des trous à l'interface. Cette diminution favorise le passage des trous vers le métal (ITO) ce qui va permettre aux trous de passer de la couche p au contact, et ainsi faciliter la collecte des paires électrons trous. Ceci mène normalement à une amélioration de la caractéristique des cellules étudiées

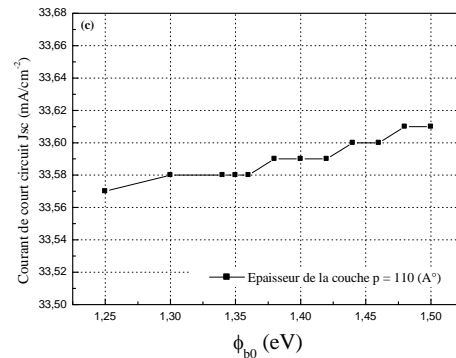
Les graphes 4 (a-d) représentent les caractéristiques $J=f(V)$ sous éclaircissement de la structure ITO/p-a-Si:H / i-pm-Si:H / n-c-Si / Al.



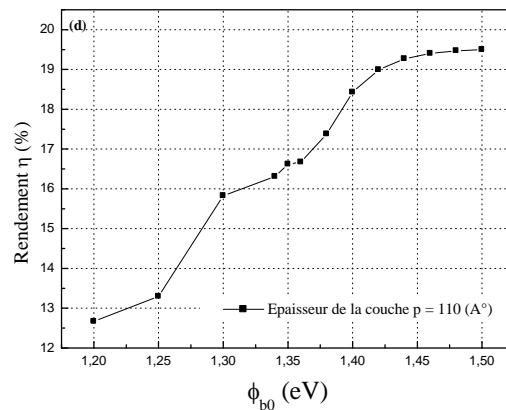
Graphe 4a : Tension du circuit ouvert V_{oc} et le built-in-potential V_{bi} en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} . L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.



Graphe.4b : Facteur de forme FF en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} . L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.



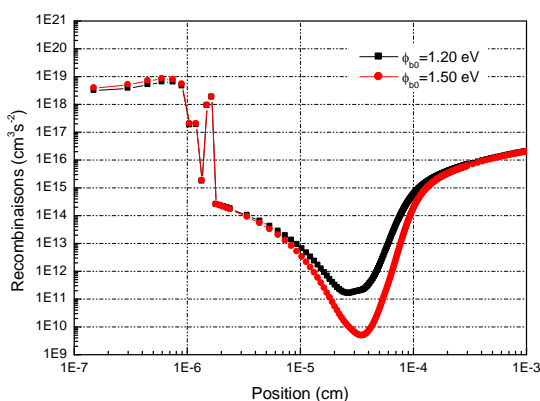
Graphe 4c : Courant de court circuit J_{sc} en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} . L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.



Graphe 4d : Rendement η en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} . L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.

Nous remarquons une nette amélioration du V_{oc} et du FF avec l'augmentation de ϕ_{b0} . En effet, le V_{oc} passe de 0,59 eV à 0,69 eV. Cette augmentation est due à la diminution de la barrière de potentiel (vue par les trous) qui se produit à l'interface et qui empêche la transmission des trous photogénérés. Une réduction de cette barrière conduit à une augmentation du V_{bi} , et par conséquent, une augmentation du V_{oc} . La réduction du champ électrique à l'interface ITO/couche p (cf. graphe IV.3) va faciliter le passage des trous vers l'ITO.

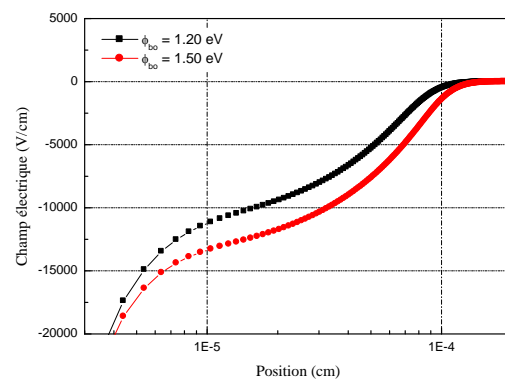
Le graphe ci-dessous (graphe 5) représente les recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour $\phi_{b0} = 1.20$ et 1.50 eV. D'après le graphe 4b, le facteur de forme augmente de 0.60 à 0.83. Cette grande amélioration du FF a été obtenu en raison de la réduction des recombinaisons (graphe 5) ainsi qu'un meilleur contact ohmique entre l'ITO et la couche p [9].



Grappe 5 : Les recombinaisons en fonction de la position dans le dispositif pour $\phi_{b0} = 1.20$ et

1.50 eV. L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.

Cette diminution des recombinaisons est en fait attribuée à la diminution du champ électrique dans la zone de déplétion (graphe 6) lorsqu'on augmente la barrière de potentiel $\phi_{b0} = 1.20$ et 1.50 eV. La diminution du champ électrique favorise le passage des trous vers la couche p et ainsi facilite la collecte des paires électrons trous.



Grappe 6 : Le champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour $\phi_{b0} = 1.20$ et 1.50 eV. L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.

L'augmentation du FF et du V_{oc} mène à l'augmentation du rendement des cellules solaires étudiées qui passe de 12,50 % à 19,50 % (graphe 4d). Pour le courant de court circuit J_{sc} (graphe IV.4c), aucune modification n'a été observée avec la variation de ϕ_{b0} . Ceci est dû au fait que nous n'avons pas utilisé le modèle optique dans nos simulations.



4. CONCLUSION

Ces simulations nous montrent que pour obtenir des cellules photovoltaïques de bonne qualité, il est important d'augmenter la valeur de ϕ_{b0} , pour augmenter le V_{bi} et ainsi réduire le champ électrique à l'interface ITO/p-a-Si:H. Cette réduction du champ va permettre aux trous de passer de la couche p au contact, ce qui va faciliter la collecte des paires électrons trous.

REFERENCES

- [1] Tagushi, Kawamoto, Tsuge, Baba, Sakata, Morizane, Uchihashi, Oota. "HIT Cells-high-efficiency Crystalline Si cells with novel structure". Progress in photovoltaics, Res.Appl.2000; 8: 503-513.
- [2] M.Tanaka, S.Okamoto, S.Tsuge, S.Kyama. "Development of HIT solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialisation of highest performance HIT modules". 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan May 2003. p. 38.
- [3] P. Roca i Cabarrocas, S. Ramprashad, J.Z. Liu, V. Chu, A. Maruyama, S. Wager, 21st IEEE Photovoltaic Conference, 2 (1990) 1610.
- [4] P. Roca i Cabarrocas, U. Eicker, 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, April 8-12, 1991, Lisbon, Portugal, p. 335.
- [5] A. Fontcuberta, Ph.D. Thesis, Laboratoire LPICM, Ecole Polytechnique, France, 2002.
- [6] P. Chatterjee, M. Favre, F. Leblanc, and J. Perrin, Mater. Res. Soc. Symp.Proc. 426, (1996) 593.
- [7] N. Palit and P. Chatterjee, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 53, (1998) 235.
- [8] P. J. McElheny, J. K. Arch, H.-S. Lin, and S. J. Fonash, J. Appl. Phys. **64**, (1988) 1254
- [9] P. Chatterjee, J. Appl. Phys. **76**, (1994) 1301.
- [10] P. Chatterjee, J. Appl. Phys. **79**, (1996) 7339 .
- [11] P.Chatterjee, J.Appl. Phys, 79, 7339 (1996).
- [12] P.Chatterjee, J.Appl. Phys, 76, 1301 (1994).
- [13] P.Chatterjee, M.Favre, F.Leb Blanc and J.Perrin, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 426, 593 (1996).
- [14] N.Pallit and P.Chatterjee, Sol. Energy matter. Sol. Cells 53, 235 (1998)
- [15] F.Leb Blanc, J.Perrin, and J.Schmitt, J.Appl. Phys. 75, 1074 (1994).