



Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables  
The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



# Optimisation des rendements des cellules solaires au silicium polymorphe par modélisation de la courbure de bande de l'émetteur.

Djaaffar RACHED\*<sup>1</sup>, Wassila Leila RAHAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Physique des plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications.

U.S.T.O.M.B.-B.P.1505, El M'naouar, Oran, Algérie.

<sup>2</sup>Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements.

U.S.T.O.M.B - B.P. 1505, El M'naouar Oran, Algérie.

djaaffar31@yahoo.fr

**Résumé-** La courbure de bande entre le TCO/p-a-Si:H est parmi les facteurs les plus importants qui limitent les performances des cellules solaires 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 (Heterojunctions with Intrinsic Thin layers): 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 built-in-potential  $V_{bi}$  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. Les cellules solaires étudiées ont atteint des rendements de 19,50 %.

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

## I. 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  $\phi_{b0}$  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  $\phi_{b0}$  [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].



**Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 - 25 Octobre 2016

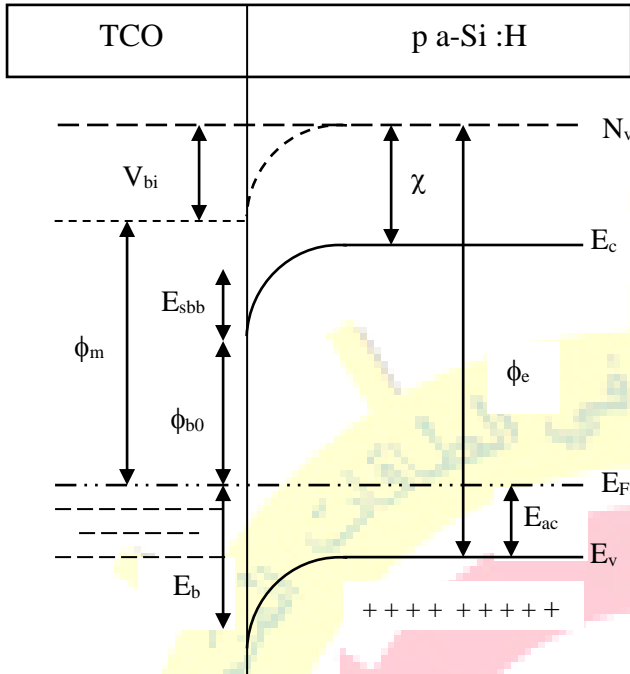


Figure 1: Structure de bande au voisinage de l'interface ITO / p-a-Si:H

- $\phi_{b0}$  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.

## II. 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 : 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] : 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  $\phi_{b0}$  entre l'ITO et la couche p-Si :H à  $x = 0$  et  $\phi_{bL}$  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.

$d$  (Å) représente l'épaisseur de la couche,  
 $\chi$  (eV) représente l'affinité électronique,  
 $E_{\mu}$  (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  $G_{A0}$  ( $\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$ ) représentent un pré-facteur exponentiel des états donneurs et accepteurs dans les queues de bandes,  
 $\mu_{e-}$  et  $\mu_{h+}$  ( $\text{cm}^2/\text{V s}$ ) représentent les mobilités des électrons et des trous,  
 $N_C$  et  $N_V$  représentent les densités effectives d'états des électrons et des trous de la bande de conduction et de valence,



**Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 - 25 Octobre 2016



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

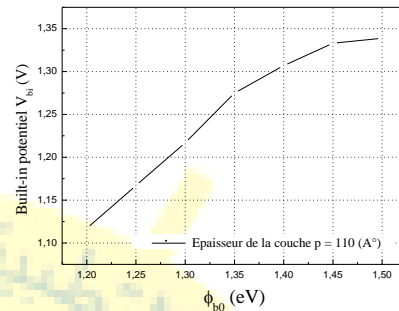
Paramètres	p-a-Si:H	i-pm-Si:H	Couche défectueu se sur c- Si	n-c-Si
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	0.0110	0.003	0.0032	299
$\chi$ (eV)	3,90	3,95	4,22	4,22
$E_a$ (eV)	0.27	0.92	0.06	0.06
$E_{\mu}$ (eV)	1,90	1,96	1,12	1,12
La densité du dopage $N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	0	0	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$
La densité du dopage $N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{19}$	0	0	0
$N_D$ , NATOT ( $\text{cm}^{-3}$ )	$10^{19}$	$10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{11}$
$E_D$ (eV)	0,050	0,050	0,050	0,005
$E_A$ (eV)	0,030	0,030	0,030	0,003
$G_{D0}$ , $G_{A0}$ ( $\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$ )	$4 \cdot 10^{21}$	$4 \cdot 10^{21}$	$10^{20}$	$10^{20}$
$\mu_e$ ( $\text{cm}^2/\text{V s}$ )	20	30	1000	1000
$\mu_{h+}$ ( $\text{cm}^2/\text{V s}$ )	4	12	450	450
$N_C$ , $N_V$	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$
$\phi_{bL}$ (eV)	0.06			
$\phi_{b0}$ (eV)	1,20-1,50			

### III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

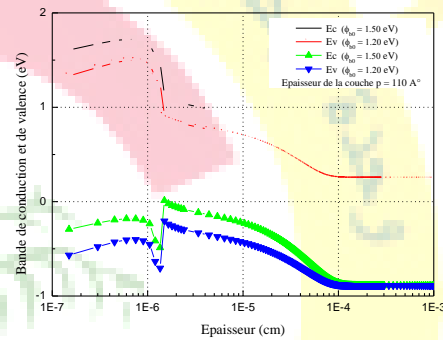
Le dispositif utilisé dans cette partie de notre travail se compose de la structure suivante : ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al. Nous avons utilisé 11 nm pour l'épaisseur de la couche dopée p. Les différents paramètres de chaque couche sont résumés dans le tableau IV.1. Nous avons fait varier le  $E_{sbb}$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

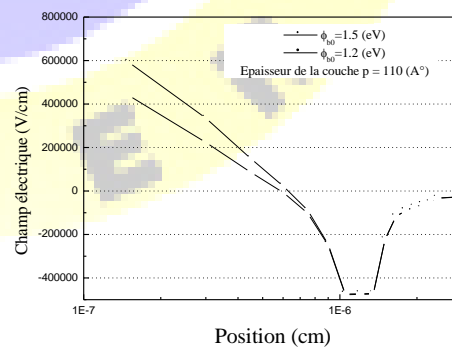


**Graphe 1 :** Built-in potential  $V_{bi}$  en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel  $\phi_{b0}$ .



**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  $1.20 \text{ eV}$ .

Le graphe 3, 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  $1.20 \text{ eV}$ .



# Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

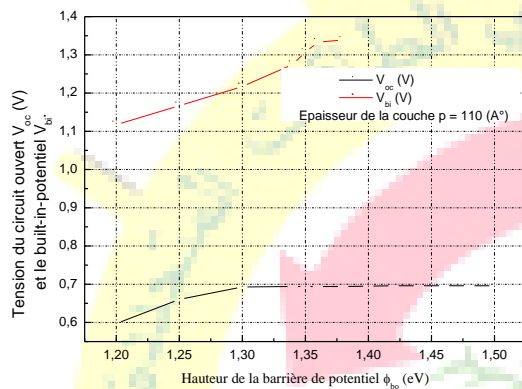
## The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algérie 24 - 25 Octobre 2016

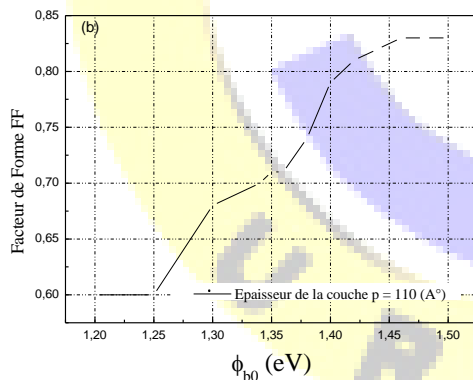


Nous remarquons une diminution du champ électrique à l'interface ITO/p-a-Si:H lorsque la valeur de  $\phi_{b0}$  augmente. La diminution du champ électrique est due à une accumulation des trous à l'interface. Cette diminution favorise le passage des trous vers le métal (ITO) ce qui va permettre aux trous 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

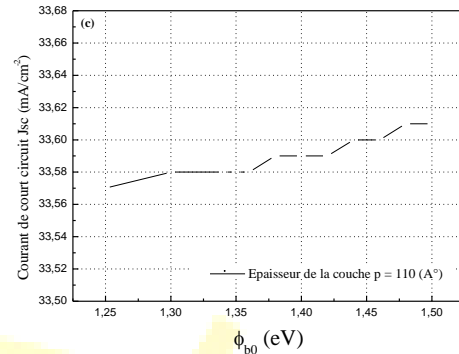
Les graphes 4 (a-d) représentent les caractéristiques  $J=f(V)$  sous éclaircissement de la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si / Al.



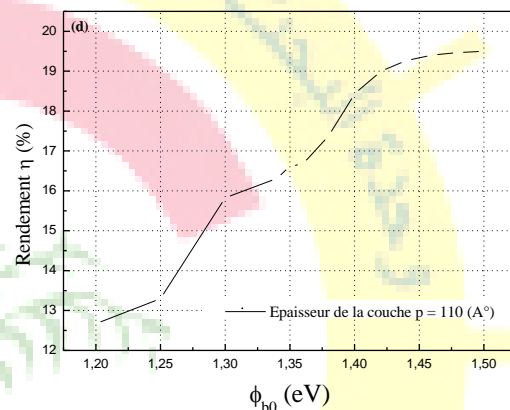
Graph 4a : Tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  et le built-in-potential  $V_{bi}$  en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel  $\phi_{b0}$ . L'épaisseur de la couche p est égale à 11 nm.



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



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



Graph 4d : Rendement  $\eta$  en fonction de la hauteur de la barrière de potentiel  $\phi_{b0}$ . 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  $\phi_{b0}$ . 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 (graphe 6) va faciliter le passage des trous vers l'ITO.

Le 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].

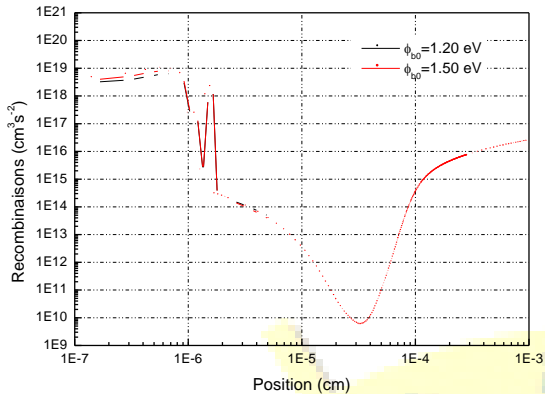




# Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

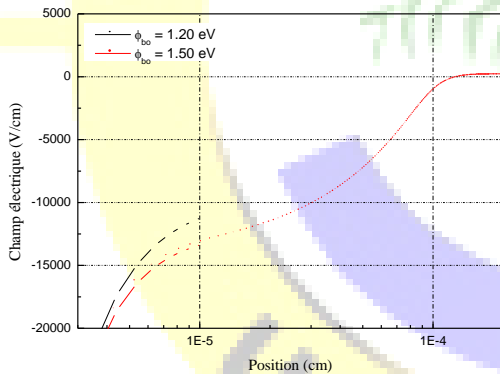
## The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016



Graph 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.



Graph 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  $\phi_{b0}$ . Ceci est dû au fait que nous n'avons pas utilisé le modèle optique dans nos simulations.

### III. CONCLUSION

Ces simulations nous montrent que pour obtenir des cellules photovoltaïques de bonne qualité, il est important d'augmenter la valeur de  $\phi_{b0}$ , 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 et ainsi améliorer les rendements des cellules solaires.

### REMERCIEMENTS

Nous sommes très reconnaissants au professeur Pere Rocas i Cabaroccas, directeur de recherche du Laboratoire de Physique et des Interfaces des couches Minces (LPICM), Ecole Polytechnique de Paris de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire pour effectuer ce travail. Je remercie également le Professeure Parsathy Chatterjee, de m'avoir autorisé à utiliser le logiciel ASDMP.

### 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". 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan May 2003. p. 38.
- [3] P. Roca i Cabaroccas, S. Ramprasad, J.Z. Liu, V. Chu, A. Maruyama, S. Wager, 21<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Conference, 2 (1990) 1610.
- [4] P. Roca i Cabaroccas, U. Eicker, 10<sup>th</sup> 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



**Le 4<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et  
Renouvelables**  
**The 4<sup>th</sup> International Seminar on New and Renewable  
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,  
Ghardaïa – Algeria 24 - 25 Octobre 2016**



- [9] P. Chatterjee, J. Appl. Phys. **76**, (1994) 1301.
- [10] Bushra Mohamed Omer, “Effect of Valence Band Tail Width on the Open Circuit Voltage of P3HT:PCBM Bulk Heterojunction Solar Cell: AMPS-1D Simulation Study” Chin. Phys. Lett. Vol. 32, No. 8, 2015.
- [11] D.Rached and H. Madani Yssad “Computer Modeling of the Band Bending in Heterojunction with Intrinsic Thin Layer Solar Cells” International Journal of Applied Physics. ISSN 2249-3174 Volume 2, Number 1, pp. 13-20, 2012.
- [12] [6] P. Chatterjee, photovoltaic performance of a-Si:H homojunction p-i-n solar cells: A computer simulation study. J. Appl. Phys. 76(2), pp.1301-1313, 1994.
- [13] P. Chatterjee, “A computer analysis of the effect of a wide-band gap emitter layer on the performance of a-Si:H-based heterojunction solar cells”. J. Appl. Phys. 79(9), pp. 7339-7347, 1996.
- [14] D.Rached and H. Madani Yssad “Computer Modeling of the Band Bending in Heterojunction with Intrinsic Thin Layer Solar Cells” International Journal of Applied Physics. ISSN 2249-3174 Volume 2, Number 1, pp. 13-20, 2012.
- [15] D.Rached and H. Madani Yssad, “Study of p-Layer Doping Density and Surface Band Bending on the Indium Tin Oxide/Hydrogenated Amorphous Silicon Heterojunction Solar Cells” ACTA PHYSICA POLONICA A Vol. 127, N°3, 2015.