



Amélioration des performances d'une cellule solaire par l'optimisation de sa couche fenêtre

Wassila Leila RAHAL*¹, Djaaffar RACHED²

¹Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements.

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

²Laboratoire de Physique des plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications.

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

* wassilaleila@hotmail.com

Résumé- Dans cet article, deux des facteurs qui limitent les performances des cellules solaires HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) à base de silicium amorphe/silicium cristallin ont été étudiés. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'influence des énergies caractéristiques des queues de bande de valence E_A et de conduction E_D du silicium amorphe hydrogéné [1] sur le rendement des cellules, puis nous avons analysé l'effet des mobilités des électrons μ_n et des trous μ_p de la couche fenêtre de la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si/Al. A cet effet, nous avons utilisé le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) [1,2] pour effectuer nos simulations.

Nos résultats ont montré qu'une augmentation de E_D dans la couche p-a-Si:H accroît la densité des états donneurs dans le gap, ainsi que les recombinaisons des trous dans cette couche, ce qui réduit le rendement des cellules. Cependant aucune détérioration n'a été observée lorsque E_A augmente. D'autre part, nous avons démontré que lorsque l'on réduit les mobilités des électrons μ_n et des trous μ_p le rendement des cellules étudiées diminue.

Mots clés - Cellule solaire HIT, silicium amorphe, silicium cristallin, énergies caractéristiques, queues de bandes, mobilités.

I. INTRODUCTION

Ces dernières années, d'énormes progrès ont été réalisés dans la l'élaboration des cellules solaires [1,2], cependant beaucoup de choses restent à faire pour atteindre de meilleurs rendement à moindre coût. A la fin des années 90, l'entreprise japonaise Sanyo a commencé une production de masse de modules photovoltaïques à base de cellule HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) représentée dans la figure 1.

En combinant la bonne performance du silicium cristallin et le bas coût de production du silicium amorphe, cette technologie a permis d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le prix de revient (budget thermique plus bas, épaisseur des couches plus mince, ce qui réduit le coût de production). Sanyo a ensuite perfectionné ses cellules jusqu'à atteindre des valeurs records de rendement (25,6% en 2015) [3].

Le silicium amorphe hydrogéné présent en couche mince dans la structure HIT joue le rôle de l'émetteur de la cellule solaire. Comme dans tout semiconducteur amorphe, il existe des états localisés continus dans le gap. Ces états proviennent des queues de bande (distorsion du réseau cristallin) représentées par des courbes exponentielles et des défauts ou liaisons pendantes représentées par des Gaussiennes.

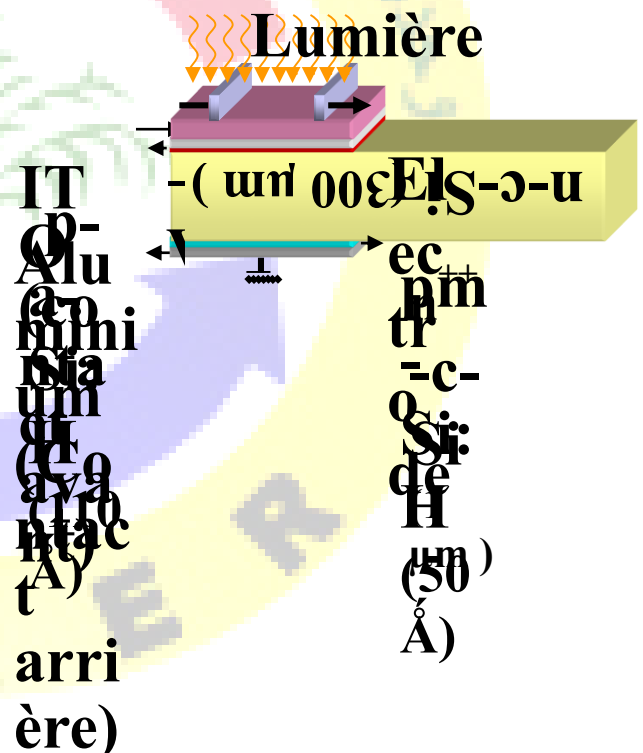


Figure 1: L'hétérostructure ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations.

La figure 2 représente les deux différents types de distribution des états localisés continus dans le gap intégrés dans le logiciel ASDMP [2].

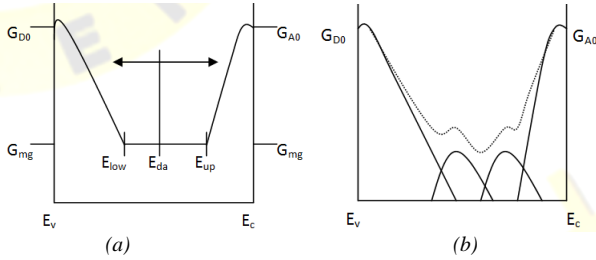


Figure 2 : Distribution des états localisés dans le gap utilisée dans le programme. (a) Modèle en U (U-shaped model). (b) Modèle en deux gaussiennes. La courbe en pointillé représente la densité d'états effective D.O.S. Dans les deux cas, les états donneurs et accepteurs dans les queues de bandes présentent un préfacteur exponentiel G_{D0} et G_{A0} . E_{da} est l'énergie à laquelle les états passent du type donneur au type accepteur.

• Distribution dans les queues de bandes

Les queues de bande des états donneurs sont modélisées par l'équation [2] :

$$g_{DX}(E) = G_{D0} \exp[-E/E_D] \quad (1)$$

E est mesurée à partir de E_v .

Les queues de bande des états accepteurs sont modélisées par l'équation :

$$g_{AX}(E') = G_{A0} \exp[-E'/E_A] \quad (2)$$

E' est mesurée à partir de E_c

g représente la densité d'états (D.O.S. ($\text{cm}^{-3}\text{eV}^{-1}$)).

E_D et E_A représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction.

• Distribution au milieu du gap

Dans le modèle en U (U-shaped model), la densité d'états dans le gap est une valeur constante égale à G_{mg} (figure 2 (a))

E_{up} et E_{low} sont modélisées par les équations ci-dessous :

$$E_{up} = E_A \cdot \ln(G_{A0}/G_{mg}) \quad (3)$$

$$E_{low} = E_D \cdot \ln(G_{D0}/G_{mg}) \quad (4)$$

Cette région plate est alors ajoutée à la région exponentielle des queues de bandes pour ainsi compléter le modèle en U.

Dans le modèle en Gaussiennes, la distribution de la densité d'états dans le gap est modélisée en utilisant deux gaussiennes. Dans le cas du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), la séparation entre les deux pics des deux gaussiennes est prise égale à 0.5 eV [4, 8].

La première Gaussienne se compose d'états donneurs ($D^{(0)}$) de densité d'états $N_{AG} \text{ cm}^{-3}$. La deuxième Gaussienne ($D^{(0)}$) se compose d'états accepteurs de densité d'états $N_{DG} \text{ cm}^{-3}$. Les expressions des densités d'états sont données dans

les deux cas par les équations 5 et 6 [2].

$$g_{AG}(E'') = \left(\frac{N_{AG}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{AG}} \right) \exp \left\{ -\frac{(E'' - E_{AG})^2}{2\sigma_{AG}^2} \right\} \quad (5)$$

$$g_{DG}(E''') = \left(\frac{N_{DG}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{DG}} \right) \exp \left\{ -\frac{(E''' - E_{DG})^2}{2\sigma_{DG}^2} \right\} \quad (6)$$

Où E_{AG} et E_{DG} représentent les positions en eV des pics des deux Gaussiennes.

σ_{AG} et σ_{DG} représentent l'écart type des deux gaussiennes. Les énergies E'' et E''' sont mesurées respectivement à partir des pics E_{AG} et E_{DG} .

II. LE MODELE DE SIMULATION

Les différents paramètres de notre dispositif ont été déterminés par le logiciel ASDMP [2,4]. Ce logiciel a été développé par la Professeure Parsathi Chatterjee. Il est similaire au programme AMPS [5,6,7] 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 qui résout simultanément les équations de continuité des trous et des électrons ainsi que l'équation de Poisson [6,7].

$$\text{L'équation de Poisson : } \frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (7)$$

$$\text{L'équation de continuité des trous : } G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\text{L'équation de continuité des électrons : } G(x) - R(p(x), n(x)) + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

La densité de charge effective :

$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \quad (10)$$

$$\text{Le champ électrique : } E = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \quad (11)$$

ϵ représente la constante diélectrique, E le champ électrique, $\Psi(x)$ la position de l'énergie du niveau du vide, x la position dans le dispositif, p et n les densités des trous et des électrons dans la bande de valence et de conduction, q la charge électrique, R le taux de recombinaison, p_T et n_T la



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

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



densité des trous et des électrons piégés respectivement, N_{net}^+ la densité de dopage effective, G le taux de génération de paires électron-trou, J_p et J_n les densités de courant des trous et des électrons respectivement.

Les queues de bandes sont représentées par des exponentielles et les liaisons pendantes par des gaussiennes.

La partie optique du logiciel intègre le modèle semi-empirique de François Leblanc [8]. 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-a-Si:H à $x = 0$ et ϕ_{bL} entre la couche n-a-Si:H et le métal à $x = L$ sont données par :

$$\phi_{b0} = E_{\mu}(p) - E_{ac}(p) - E_{sbb} \quad (12)$$

$$\phi_{bL} = E_{ac}(n) \quad (13)$$

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} est la courbure de bande [10,11].

Les principaux paramètres utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : PRINCIPAUX PARAMETRES 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 défectueuse	n-c-Si	BSF n ⁺⁺
d (μm)	0,003-0,005	0,003	0,0032	299	1
χ (eV)	3,90	3,95	4,22	4,22	4,22
E_{μ} (eV)	1,90	1,96	1,12	1,12	1,12
ND (cm^{-3})	0	0	$9 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{18}$
NA (cm^{-3})	10^{19}	0	0	0	0
$\frac{ND_{TOT}}{NA_{TOT}}$	10^{19}	10^{14}	$9 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
E_D (eV)	0,050	0,050	0,050	0,005	0,005
E_A (eV)	0,030	0,030	0,030	0,003	0,003
$\frac{G_{D0}}{G_{A0}}$ ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$)	$4 \cdot 10^{21}$	$4 \cdot 10^{21}$	10^{20}	10^{20}	10^{20}
μ_e ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	20	30	1000	1000	1000

μ_{h+} ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	4	12	450	450	450
N_C, N_V	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$	$5 \cdot 10^{18}$
σ_n (cm^2)	10^{17}	10^{17}	10^{17}	$2 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{19}$
σ_c (cm^2)	10^{16}	10^{16}	10^{16}	$2 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$
ϕ_{b0} (eV)	1,20-1,50				
ϕ_{bL} (eV)	0,06				

- d (μm) 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} ($\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$) représentent un pré-facteur exponentiel des états donneurs et accepteurs dans les queues de bandes,
- μ_e et μ_{h+} ($\text{cm}^2/\text{V s}$) représentent les mobilités des électrons et des trous,
- N_C et N_V représentent les densité effective d'états des électrons et des trous de la bande de conduction et de valence,
- σ_c tails et σ_c midgap représentent les sections efficaces de capture des défauts chargés dans les queues de bandes et dans le gap, σ_n tails et σ_n midgap représentent les sections efficaces de capture des défauts neutres dans les queues de bandes et dans le gap.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans un premier temps, nous avons étudié la sensibilité de la caractéristique $J = f(V)$ sous éclaircissement aux énergies E_D et E_A , qui représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction (Queues d'Urbach) du silicium amorphe dans la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si/Al.

Dans le Logiciel ASDMP, les queues de bande des états donneurs sont modélisées par l'équation ci-dessous [9,12] :

$$g_{DR}(E) = G_{D0} \exp[-E / E_D] \quad (14)$$

Les queues de bande des états accepteurs sont modélisées par l'équation ci-dessous:

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp[-E' / E_A] \quad (15)$$

Nous avons représenté les paramètres photovoltaïques (Courant de court circuit J_{sc} , tension de circuit ouvert V_{oc} , facteur de forme FF et rendement η) sous éclaircissement de la



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable Energies

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



structure ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al en fonction de E_D dans la figure 3 (a-d).

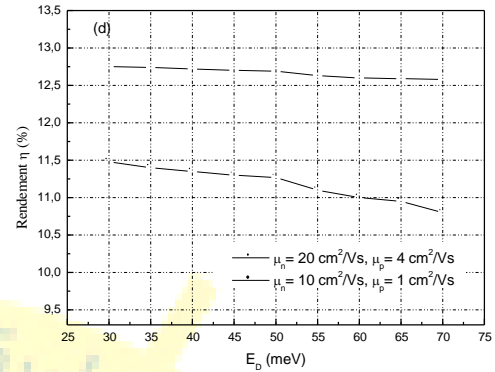
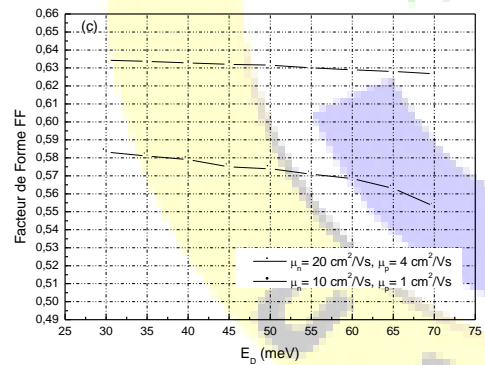
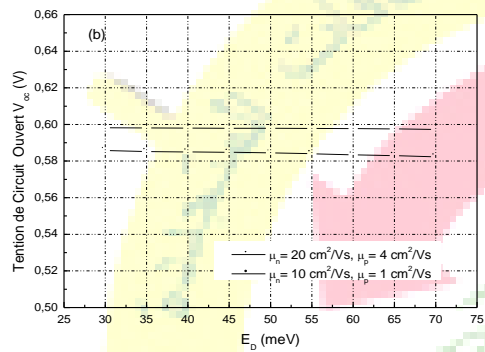
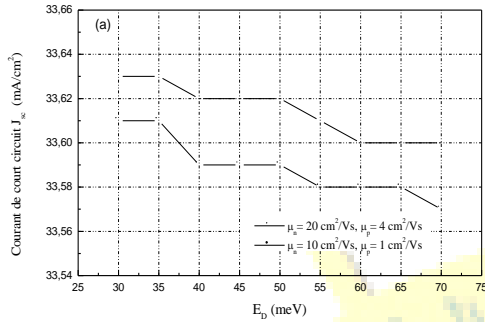


Figure 3 (a-d) : Paramètres photovoltaïques sous éclaircment AM1.5 de la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si / Al en fonction de E_D . La hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} est prise égale à 1.20 eV.

D'après les graphes de la figure 3, nous pouvons constater une diminution de tous les paramètres photovoltaïques (J_{sc} , V_{oc} , FF, η) lorsque l'énergie caractéristique E_d augmente. Ceci peut être expliqué par une augmentation des états donneurs par unité de volume dans le gap qui favorisent les recombinaisons des trous dans la couche fenêtre, réduisant ainsi la performance des cellules étudiées.

D'autre part, nous avons étudié l'influence des mobilités des porteurs de charge sur les paramètres photovoltaïques de la même cellule. Nous avons trouvé que lorsque l'on diminue les mobilités des électrons μ_n de 20 cm^2/Vs à 10 cm^2/Vs et des trous μ_p de 4 cm^2/Vs à 1 cm^2/Vs , toutes les caractéristiques $J = f(V)$ diminuent dès les premières valeurs de E_D . Ce qui mène à une réduction du rendement des cellules étudiées.

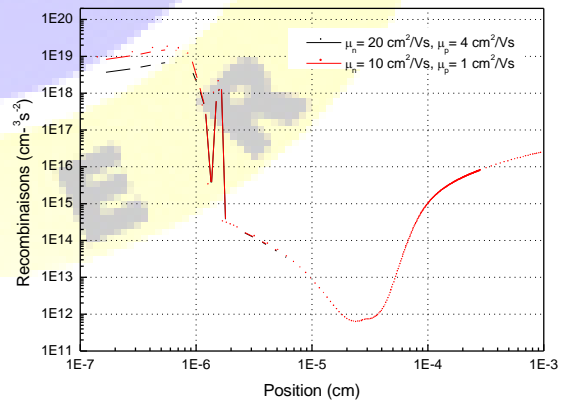


Figure 4 : Recombinaisons sous éclaircment AM1.5 en fonction de la position dans la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si / Al pour



$E_D = 0.07$ meV et pour des mobilités des électrons μ_n de $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et des trous μ_p de $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. La hauteur de la barrière de potentiel est égale à 1.20 eV.

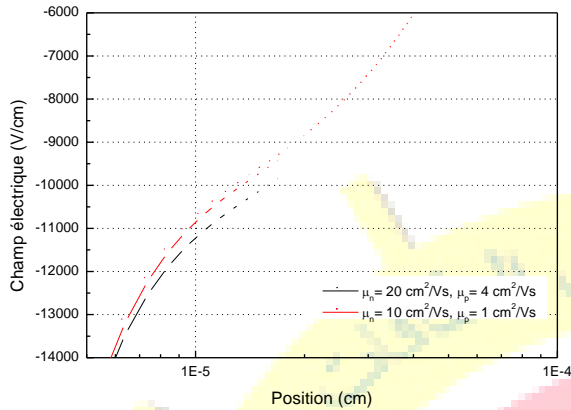


Figure 5 : Le champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour $E_D = 0.07$ meV et pour des mobilités des électrons μ_n de $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et des trous μ_p de $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. La hauteur de la barrière de potentiel est égale à 1.20 eV. L'énergie d'activation est prise égale à 0.27 eV.

D'après les figures 4 et 5 qui représentent respectivement les recombinaisons sous éclairage AM1.5 et le champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour $E_D = 0.07$ meV et pour des mobilités μ_n de $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et μ_p de $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, nous pouvons constater que la diminution de la mobilité des porteurs dans le volume de la couche fenêtre p-a-Si:H provoque une augmentation des recombinaisons dans la zone de charge d'espace. Nous pouvons conclure à partir de la figure 4, que cette augmentation des recombinaisons est due à l'accroissement du champ électrique dans la zone de charge d'espace.

De la même manière, nous avons étudié la variation de l'énergie caractéristique E_A . La hauteur de la barrière de potentiel ϕ_{b0} est égale à 1.20 eV. Les caractéristiques $J = f(V)$ sous éclairage des structures ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al en fonction de E_A restent inchangées. En effet, une augmentation de E_A accroît les états accepteurs dans le gap par unité de volume, ce qui implique un accroissement des recombinaisons des électrons de la couche p-a-Si:H n'influant pas sur la collecte des trous.

Nous avons réalisé une étude similaire pour les mêmes cellules solaires, c'est-à-dire des structures de type n (ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al) en prenant une hauteur de la barrière de potentiel égale à 1.40 eV et cela pour vérifier le comportement des ces cellules par rapport aux énergies caractéristiques E_D et E_A .

Nous avons obtenu les mêmes résultats : une augmentation de l'énergie caractéristique E_D ainsi qu'une diminution des mobilités des porteurs, détériore les performances des cellules solaires par une diminution de leurs caractéristiques alors qu'elles restent inchangées pour une variation de E_A .

IV. CONCLUSION

Lors de ce travail, nous avons montré que pour obtenir des cellules photovoltaïques de bonne qualité, il est important de réduire l'énergie caractéristique des queues de bande dans la bande de conduction E_D afin de diminuer le taux de recombinaison des trous dans la couche fenêtre p-a-Si:H et d'augmenter ainsi le rendement des cellules HIT étudiées. Nous sommes également arrivés à la conclusion que la modification de l'énergie caractéristique E_A de la bande de valence n'influence pas le rendement des cellules.

D'autre part, nous avons remarqué que lorsque l'on réduit les mobilités des électrons μ_n de $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ et des trous μ_p de $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ à $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, tous les paramètres photovoltaïques de la cellule étudiée diminuent.

V. RÉFÉRENCES

- [1] Y. Poissant, P. Chatterjee, P. Roca i Cabarrocas, "no benefit from microcrystalline silicon N layers in single junction amorphous silicon p-i-n solar cells". J. Appl. Phys. Vol.93, no. 4, pp. 170-173, 2003.
- [2] P. Chatterjee, M. Favre, F. Leblanc, and J. Perrin, Mater. Res. Soc. Symp.Proc. 426, 593, 1996.
- [3] Vinh Ai Dao et al. "High-Efficiency Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer Solar Cells: A Review." Current Photovoltaic Research 1(2) pp 73-81, 2013.
- [4] N. Palit and P. Chatterjee, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 53, 235, 1998.
- [5] P. J. McElheny, J. K. Arch, H.-S. Lin, and S. J. Fonash, J. Appl. Phys. 64, 1254, 1988
- [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.
- [7] 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.
- [8] F. Leblanc, J. Perrin, and J. Schmitt, J. Appl. Phys. 75, 1074, 1994.
- [9] 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.
- [10] D. Rached, M. Mostefaoui, effect of the band bending on indium tin oxide/hydrogenated n-doped amorphous



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables

The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies

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



silicon heterojunction solar cells. Thin Solid Films., pp. 5087-5092, 2008.

[11] 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.

[12] 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.

