



## Effet de la largeur des queues de bandes du silicium amorphe sur le rendement d'une cellule solaire à hétérojonction

<sup>a</sup>H.Madani Yssad, <sup>b</sup>W.L.Rahal, <sup>c</sup>D.Rached,

<sup>a</sup>U.S.T.O.M.B. B.P. 1505 , El M'nouar, Oran, Algérie. Laboratoire de Physique des plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications.

<sup>b</sup>U.S.T.O.M.B. B.P. 1505 , El M'nouar, Algérie. Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements.

<sup>c</sup>Laboratoire RTFM, département de Génie Mécanique, ENPO Maurice Audin Oran, Algérie.  
[habib.yssaad@yahoo.fr](mailto:habib.yssaad@yahoo.fr) [wassilaleila@hotmail.com](mailto:wassilaleila@hotmail.com) [djaaffar31@gmail.com](mailto:djaaffar31@gmail.com)

### Résumé :

*Dans cet article, deux des facteurs qui limitent les performances des cellules solaires HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) à base d'hétérojonction 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], puis nous avons analysé l'effet des mobilités des électrons  $\mu_n$  et des trous  $\mu_p$  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 diminution de  $E_D$  dans la couche p-a-Si:H décroît la densité des états donneurs dans le gap, ainsi que les recombinaisons des trous dans cette couche. Cependant aucune amélioration n'a été observée lorsque  $E_A$  diminue. D'autre part, nous avons démontré que lorsque l'on augmente les mobilités des électrons  $\mu_n$  et des trous  $\mu_p$  le rendement des cellules étudiées est amélioré.*

**Mots clés :** cellule solaire HIT, silicium amorphe, silicium cristallin, énergies caractéristiques, queues de bandes, mobilités, ASDMP.

## I. INTRODUCTION

Ces dernières années, d'énormes progrès ont été réalisés dans l'élaboration des cellules solaires [1,2], cependant beaucoup de choses restent à faire pour atteindre de meilleurs rendements 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.[3].

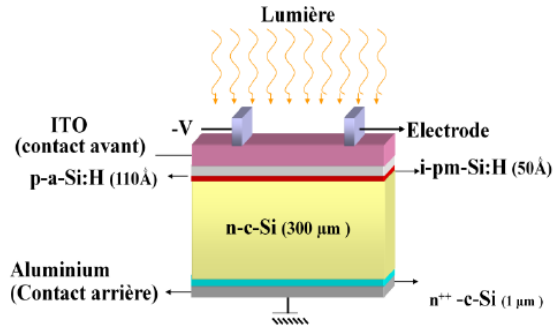


Figure 1: L'hétérostructure ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al utilisée dans nos simulations.

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 semi-conducteur 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. La distribution de ces états détermine un grand nombre de propriétés du matériau, et influence considérablement les performances des cellules solaires.

## 2. DISTRIBUTION DES ETATS LOCALISES DANS LE GAP DU SILICIUM AMORPHE HYDROGENE

Dans le diagramme de bande du silicium amorphe, les états sont étendus dans les bandes de valence et de conduction, alors qu'ils sont localisés dans les queues de bande qui se prolongent dans la bande interdite.

Les défauts profonds dus aux liaisons pendantes peuvent être modélisés par deux différents types de distribution: Le modèle en U (Figure 2a) et le modèle en gaussiennes (Figure 2b), tous deux intégrés dans le logiciel ASDMP. 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.

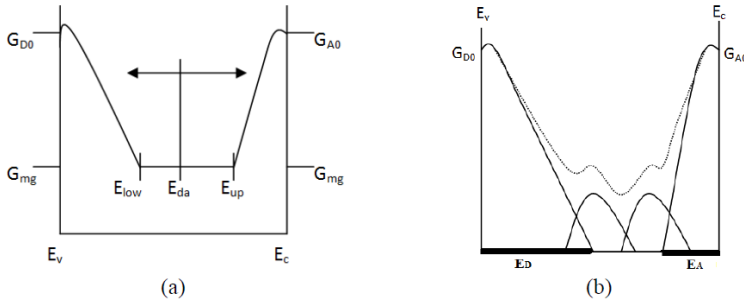


Figure 2 : Distribution des états localisés dans le gap du silicium amorphe hydrogéné. (a) Modèle en U. (b) Modèle en deux gaussiennes.

### 2.1. Distribution dans les queues de bandes

Les queues de bande des états donneurs sont modélisées par l'équation 1 [2] :

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

$E$  est mesurée à partir de  $E_v$ .

Les queues de bande des états accepteurs sont modélisées par l'équation 2:

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

$E'$  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.

## 2.2. 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 3 et 4:

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

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

$E_{up}$  est mesurée positivement à partir de  $E_c$ .

$E_{low}$  est mesurée positivement à partir  $E_v$ .

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  $N_{AG}$  cm<sup>-3</sup>. La deuxième Gaussienne ( $D^{+/0}$ ) se compose d'états accepteurs de densité d'états  $N_{DG}$  cm<sup>-3</sup>. Les expressions des densités d'états D.O.S 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.

$\sigma_{AG}$  et  $\sigma_{DG}$  représentent l'écart type des deux gaussiennes.

Les énergies  $E''$  et  $E'''$  sont mesurées respectivement à partir des pics  $E_{AG}$  et  $E_{DG}$ .

### 3. 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].

L'équation de Poisson :

$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (7)$$

L'équation de continuité des trous :

$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0$$

(8)

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 :

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

Avec R le taux de recombinaison,  $p_T$  et  $n_T$  la 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.

La partie optique [2,4] 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.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

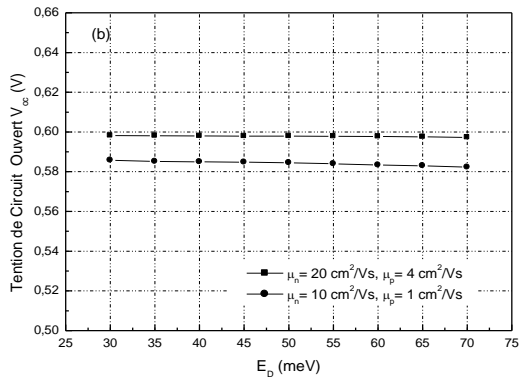
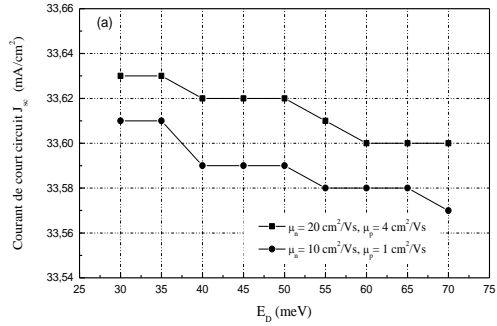
Dans un premier temps, nous avons étudié la sensibilité de la caractéristique  $J = f(V)$  sous éclairage aux énergies  $E_D$  et  $E_A$ , qui représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction (Queues d'Urbach) du silicium amorphe dans la structure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

Dans le Logiciel *ASDMP*, les queues de bande des états donneurs et accepteurs sont modélisées par les équations 11 et 12 [9] :

$$g_{DT}(E) = G_{D0} \exp\left[-E / E_D\right] \quad (11)$$

$$g_{AT}(E') = G_{A0} \exp\left[-E' / E_A\right] \quad (12)$$

Nous avons représenté les caractéristiques  $J = f(V)$  sous éclairage de la 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).



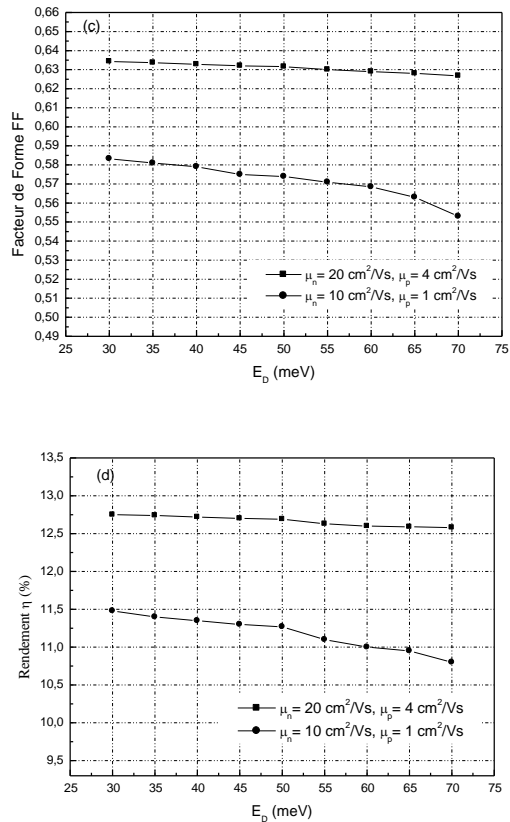


Figure 3 (a-d) : Les paramètres photovoltaïques de la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si / Al en fonction de  $E_D$ .

D'après ces graphes, nous constatons que lorsqu'on augmente l'énergie caractéristique  $E_D$  de 30 meV à 70 meV, la caractéristique  $J=f(V)$  diminue, ce qui se traduit par la diminution des paramètres photovoltaïques.

Cette diminution est due à l'augmentation des recombinaisons (Figure 4). Une augmentation de  $E_D$  dans la couche fenêtre p-a-Si:H accroît les états donneurs dans le gap, ce qui explique cette hausse de recombinaison.



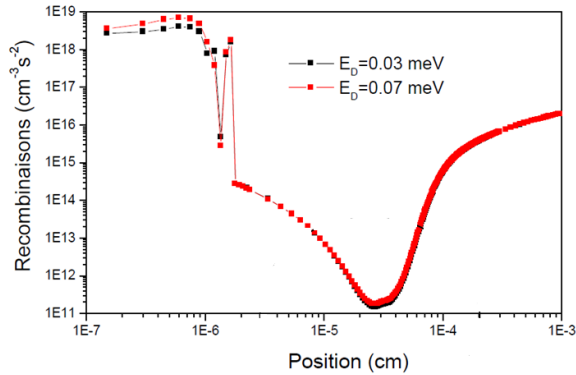


Figure 4: Recombinaisons sous éclaircment AM1.5 en fonction de la position dans la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si/Al pour  $E_D = 0.03$  meV et  $E_D = 0.07$  meV.

D'autre part, nous avons étudié l'influence des mobilités des porteurs de charge sur les paramètres photovoltaïques de la cellule étudiée pour  $E_D = 0.07$  meV. Nous avons trouvé que lorsque l'on diminue les mobilités des électrons  $\mu_n$  de  $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  et des trous  $\mu_p$  de  $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , 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.

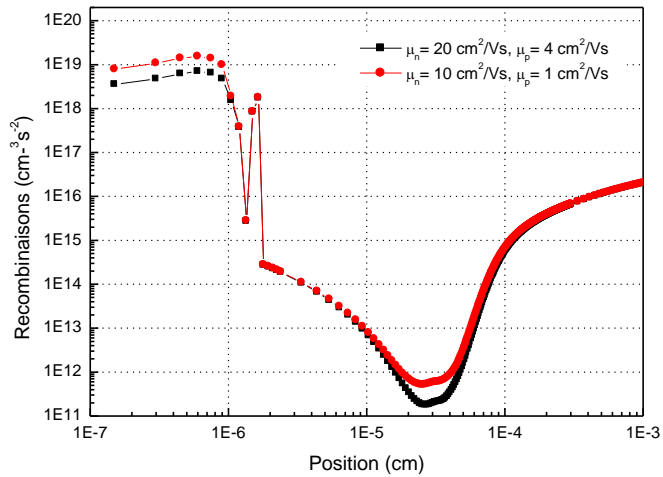


Figure 5 : Recombinaisons sous éclaircment AM1.5 en fonction de la position dans la structure ITO/p-a-Si:H /i-pm-Si:H /n-c-Si / Al pour  $E_D = 0.07$  meV et pour des mobilités des électrons  $\mu_n$  de  $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  et des trous  $\mu_p$  de  $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

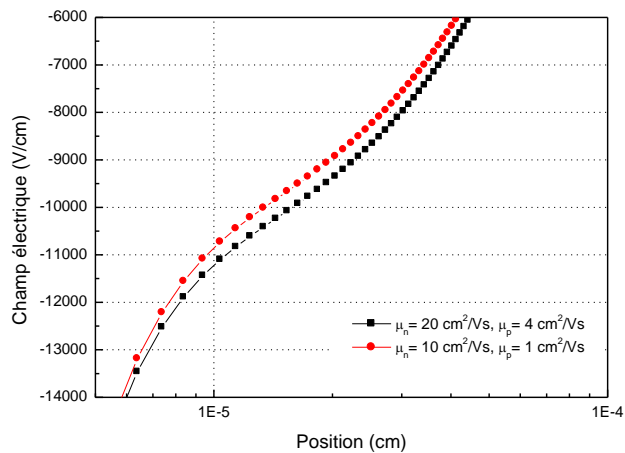


Figure 6 : Le champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour  $E_D = 0.07$  meV et pour des mobilités des électrons  $\mu_n$  de  $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  et des trous  $\mu_p$  de  $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ .

D'après les graphes 5 et 6, 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 du graphe 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  $E_A$ . Les caractéristiques  $J = f(V)$  sous éclairage de la structure ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al 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 qui n'influe pas sur la collecte des trous.

#### 4. 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  $\mu_n$  de  $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  et des trous  $\mu_p$  de  $4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  à  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , tous les paramètres photovoltaïques de la cellule étudiée diminuent.

#### 4. 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, 2003, pp. 170-173.
- [2] P. Chatterjee, M. Favre, F. Leblanc, and J. Perrin, *Mater. Res. Soc. Symp.Proc.* 426, (1996) 593.
- [3] Vinh Ai Dao et al. "High-Efficiency Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer Solar Cells: A Review." *Current Photovoltaic Research* 1(2) 73-81 (2013)
- [4] N. Palit and P. Chatterjee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 53, (1998) 235.
- [5] P. J. McElheny, J. K. Arch, H.-S. Lin, and S. J. Fonash, *J. Appl. Phys.* 64, (1988) 1254
- [6] P. Chatterjee, photovoltaic performance of a-Si:H homojunction p-i-n solar cells: A computer simulation study. *J. Appl. Phys.* 76(2), 1994, pp. 1301-1313.
- [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), 1996, pp. 7339- 7347.
- [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 silicon heterojunction solar cells. *Thin Solid Films.* 2008, pp. 5087-5092.
- [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)