

ETUDE NUMERIQUE DE L'INFLUENCE DES PROPRIETES OPRIQUES DE L'EMETTEUR SUR LES PERFORMANCES DES CELLULES SOLAIRES A HETEROJONCTIONS DE SILICIUM.

Djaaffar RACHED*¹, Wassila Leila RAHAL^{2,3}, Keltoum DRIS¹, Habib MADANI YSSAAD⁴

¹Laboratoire de Physique des plasmas, Matériaux Conducteurs et leurs Applications. U.S.T.O.M.B. Oran.

²Laboratoire d'Analyse et d'Application des Rayonnements. U.S.T.O.M.B. Oran.

³Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

⁴Laboratoire RTFM, département de Génie Mécanique, ENPO Maurice Audin, Oran.

*djaaffar31@yahoo.fr

Résumé : Dans cet article, nous nous sommes intéressés à l'étude de la jonction entre le silicium amorphe hydrogéné et le silicium cristallin. Pour cela, nous avons changé l'émetteur des cellules solaires HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) de type n (ITO/a-Si:H(p)/i-pm-Si:H/c-Si(n)/Al) en utilisant plusieurs matériaux à base de silicium amorphe hydrogéné pour analyser l'influence de leurs gaps sur les performances de ce type de cellules. Pour réaliser ce travail, plusieurs logiciels de simulation existent, parmi lesquels, nous avons choisi le logiciel ASDMP. Les résultats montrent que pour les cellules HIT de type n, les rendements augmentent de 18.64% à 19.49% pour des émetteurs à faibles gaps (entre 1.6 eV et 1.84 eV) puis une chute de ces rendements de 19.49 à 15.93 % pour des matériaux à grands gaps. Notre étude a démontré qu'une augmentation du gap des émetteurs des cellules étudiées, crée une barrière de potentiel pour les trous au niveau de la bande de valence. L'augmentation de taux recombinaison induisant une diminution du rendement pour les cellules constituées d'émetteurs à grands gaps comme le silicium polymorphe hydrogéné et le nitrure de silicium s'explique donc par la création de cette barrière qui empêche le passage des trous vers le contact avant (ITO) et favorise leurs recombinaisons avec les électrons.

Mots-clés: Cellule solaire HIT, silicium amorphe, silicium cristallin, gap, ASDMP.

Abstract: In this article, we are interested in the study of the junction between hydrogenated amorphous silicon and crystalline silicon. For this, we changed the emitter of the n-type HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) solar cells (ITO / a-Si: H (p) / i-pm-Si: H / c-Si (n) / Al) using several materials based on hydrogenated amorphous silicon to analyze the influence of their gaps on the performances of this type of cells. To carry out this work, several simulation software exist, we have chosen the ASDMP software. The results show that for n-type HIT cells, the efficiency increases from 18.64% to 19.49% for emitters with low gaps (between 1.6 eV and 1.84 eV), then the efficiency decreases from 19.49 to 15.93% for materials with large gaps. Our study has shown that an increase in the emitter gap of the studied cells creates a potential barrier for holes in the valence band. The increase in recombination rate inducing a reduction in the efficiency for cells made up of emitters with large gaps such as hydrogenated polymorphous silicon and silicon nitride is therefore explained by the creation of this barrier, which prevents the holes passage towards the front contact (ITO) and promotes their recombination with electrons.

Keywords: HIT solar cell, amorphous silicon, crystalline silicon, gap, ASDMP.

1. Introduction

La conversion de l'énergie solaire en électricité est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création de paires électrons-trous. Un champ électrique permanent, au sein de la structure, permet la séparation rapide de ces porteurs de charges pour éviter les

phénomènes de recombinaison. Les cellules solaires à hétérojonctions HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) à base de silicium amorphe hydrogéné/silicium cristallin sont en plein essor dans le photovoltaïque.

Ces cellules sont composées d'un substrat en silicium cristallin c-Si qui joue le rôle d'absorbeur sur lequel sont déposées des couches de silicium

amorphe hydrogéné (a-Si:H). L'entreprise Sanyo a été la première entité à appliquer avec succès cette idée pour réaliser des cellules solaires [1]. Ces cellules possèdent de nombreux avantages à la fois pour diminuer les coûts et augmenter les rendements. Nous avons utilisé le modèle d'Anderson qui met en évidence la présence de discontinuités aux raccordements des bandes engendrées par les différents gaps. À l'aide d'outils de simulation, nous avons étudié l'influence de différents émetteurs sur les performances des cellules à hétérojonctions *HIT* de type n. La structure de la cellule solaire *n-HIT* simulée est représentée sur la figure 1.

La première couche est constituée d'*ITO* (Indium Tin Oxide). Cette couche est transparente. Son rôle est d'améliorer l'absorption des photons dans la cellule. Son épaisseur est de 84.5 nm. La deuxième couche qui constitue l'émetteur de notre cellule solaire est une couche à base de silicium amorphe hydrogéné de type p de concentration des accepteurs $N_A=10^{19}\text{cm}^{-3}$. Son épaisseur est de 110 Å. La troisième couche est la couche de passivation. Elle est en silicium polymorphe hydrogéné intrinsèque. Son épaisseur est de 30 Å. La quatrième couche c'est la couche active. Elle est constituée de silicium cristallin type n avec une concentration des donneurs $N_D=9.10^{14}\text{cm}^{-3}$, son épaisseur est de 300 µm. La dernière couche représente la cathode de la cellule, elle est en aluminium et son épaisseur est de 100 nm. Les principaux paramètres que nous avons utilisés dans la simulation de la cellule solaire *n-HIT* (ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al) sont groupés dans le tableau 1.

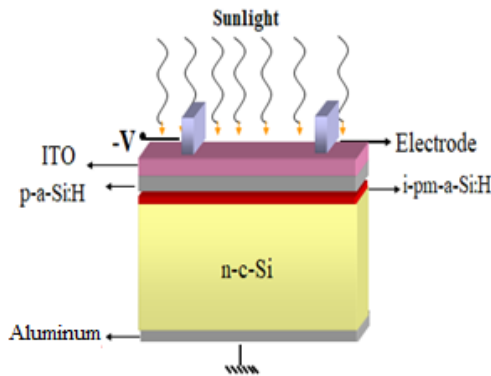


Figure 1. Structure de la cellule solaire *n-HIT* simulée

Tableau 1. Les principaux paramètres de la cellule *n-HIT* simulée

Paramètres	p-a-Si :H	i-pm-Si :H	n-c-Si
<i>Epaisseur</i> (µm)	0.011	0.003	300
χ (eV)	3.9	3.95	4.22
E_g (eV)	1.6	1.96	1.12
N_D (cm ⁻³)	0	0	9.10^{14}
N_A (cm ⁻³)	$2.7 \cdot 10^{19}$	0	0
E_D (eV)	0.02	0.05	0.005
E_A (eV)	0.03	0.03	0.003
μ_e (cm ² /Vs)	20	30	1000
μ_h (cm ² /Vs)	4	12	450

2. Logiciel de simulation

Amorphous Semiconductor Device Modeling Program *ASDMP*, développé par le Professeur P.Chatterjee et largement validé par les résultats expérimentaux, est un programme détaillé où l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous sont simultanément résolues par la méthode des différences finies et par la méthode de Newton-Raphson [2]. *ASDMP* est à une dimension, il analyse les propriétés de transport en fonction de la position dans tout le dispositif. Il a été conçu au début pour modéliser des dispositifs à base de silicium amorphe, il a été ensuite généralisé au silicium cristallin et aux cellules *HIT* [3]. Le logiciel *ASDMP* est conçu sous Fortran [4,5] et il fonctionne sous l'environnement Linux. Les différents fichiers de sortie sont obtenus après une exécution qui dure en moyenne 1 min.

3. Résultats et interprétations

Nous avons étudié dans ce travail l'influence des différents émetteurs sur les performances des cellules à hétérojonctions *HIT* de type n (ITO/a-Si:H(p)/i-pm-Si:H/c-Si(n)/Al) pour étudier l'influence de leurs gaps sur les paramètres de sortie de ce type de cellule. Les matériaux que nous avons choisis sont des matériaux issus de la

bibliographie à base de silicium amorphe hydrogéné suivant :

- Le silicium amorphe hydrogéné faiblement dopé (a-Si:H) de gap $E_g=1.6$ eV [6].
- Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) de gap $E_g = 1.72$ eV [7].
- Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) de gap $E_g= 1.74$ eV [8].
- Le carbure de silicium amorphe hydrogéné (a-SiC: H) de gap $E_g = 1.84$ eV [9].
- Le carbure de silicium amorphe hydrogéné (a-SiC:H) de gap $E_g = 1.91$ eV [9].
- Le silicium polymorphe hydrogéné (pm-Si:H) de gap $E_g = 1.96$ eV [10].
- Le nitrure de silicium (a-SiNX:H) de gap $E_g = 2$ eV [11].

Letableau 2 représente les paramètres photovoltaïques des cellules HIT étudiée (ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al).

D'après le tableau, aucune variation n'est remarquée sur les J_{cc} (densités de courant de court-circuit) pour les différents émetteurs utilisés dans nos cellules solaires au cours nos simulations car le J_{cc} dépend principalement de la densité de l'éclairement et non du matériau utilisé. Pour les cellules composées d'émetteurs à faibles gaps comme le silicium amorphe faiblement hydrogéné, le silicium amorphe et le carbure de silicium amorphe hydrogéné le V_{oc} (tension de circuit ouvert) reste constant alors que le FF (facteur de forme) passe de 79.7 à 83.4 %. Pour les émetteurs composés de matériaux à grand gap comme le silicium polymorphe et le nitrure de silicium, le V_{oc} et le FF chutent. Le V_{oc} passe de 0.69 à 0.68eV alors que le FF passe de 83.4 à 68.6%.

Pour le η (rendement), nous observons une augmentation de 18.64% à 19.49% pour des émetteurs à faibles gaps (entre 1.6 eV et 1.84 eV) puis une chute de ces rendements de 19.49 à 15.93 % pour des matériaux à grands gaps.

Tableau 2. Les paramètres photovoltaïques de la cellule n-HIT (ITO/p-a-Si:H/i-pm-Si:H/n-c-Si/Al) en fonction des différents émetteurs à base de a-Si:H (p).

Matériaux	J_{cc} (mA/c m ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	η (%)
-----------	---------------------------------------	-----------------	-------------	---------------

a-Si :H, $E_g=1.6$ eV	33.6	0.70	79.7	18.64
a-Si:H, $E_g=1.72$ eV	33.6	0.70	83.3	19.47
a-SiC:H, $E_g=1.74$ eV	33.6	0.70	83.4	19.49
a-SiC:H, $E_g=1.84$ eV	33.6	0.70	83.1	19.41
a-SiC:H, $E_g=1.91$ eV	33.6	0.70	77.8	18.17
pm-Si:H, $E_g=1.96$ eV	33.6	0.69	71.1	16.58
a-SiN _x :H, $E_g=2$ eV	33.6	0.68	68.6	15.93

Pour pouvoir interpréter ces résultats, nous avons tracé la variation du taux de recombinaisons en fonction de la position dans les cellules pour les sept émetteurs. Les courbes obtenues sont représentées sur la Figure 2.

D'après ces courbes, nous constatons que le taux de recombinaison diminue lorsque le gap des différents émetteurs des cellules étudiées varie entre 1.6 et 1.84 eV. Cette diminution des recombinaisons a permis l'augmentation des rendements de 18.6% jusqu'à 19.5%. Cependant, contrairement aux cellules constituées d'émetteurs à petits gaps, une augmentation du taux de recombinaison est observée pour les cellules constituées par des émetteurs dont les gaps dépassent 1.84 eV. Nous pouvons donc conclure que la diminution du V_{oc} , du FF et par conséquent les rendements est le résultat de l'augmentation des recombinaisons dans l'émetteur.

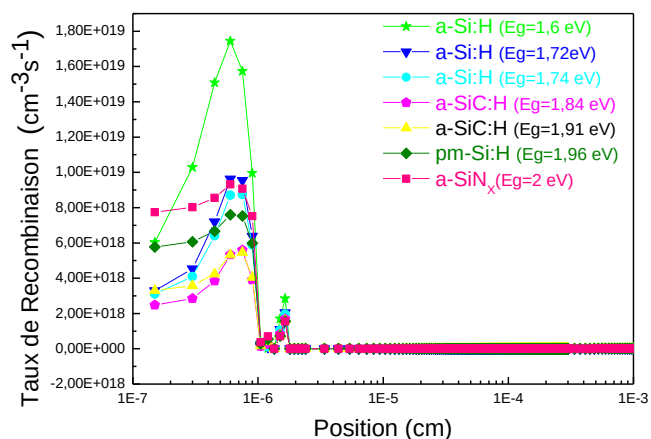


Figure 2. Taux de recombinaison en fonction de la position dans le dispositif pour les sept matériaux de l'émetteur

Suite à ces résultats, nous avons tracé, sur la figure 3, la variation du champ électrique en fonction des cellules pour les sept émetteurs. Le but est d'expliquer pourquoi le taux de recombinaison diminue pour des émetteurs à faibles gaps alors qu'il augmente pour les grands gaps.

A partir de ce graphe, nous pouvons voir que le champ électrique devient plus important lorsque le gap des émetteurs augmente favorisant ainsi la séparation des électrons et des trous photogénérés de part et d'autre de la jonction p-n (a-Si:H/c-Si) conduisant ainsi à l'amélioration du rendement qui est relié aux nombres de paires électrons trous collectées.

Cette amélioration du champ électrique explique la diminution du taux de recombinaison pour les cellules constituées d'émetteurs de faibles gaps, mais n'explique pas l'augmentation de taux de recombinaison et la diminution du rendement pour les cellules constituées d'émetteurs dont les gaps dépassent 1.84 eV.

Afin d'expliquer ces résultats, nous avons tracé les diagrammes de bandes en fonction de la position dans le dispositif pour les sept matériaux utilisés comme émetteurs. Les courbes obtenues sont représentées sur la Figure 4.

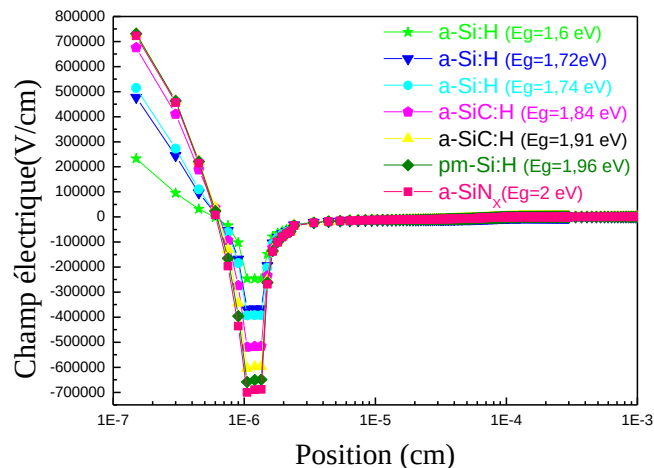


Figure 3. Champ électrique dans la zone de déplétion en fonction de la position dans le dispositif pour les sept matériaux de l'émetteur.

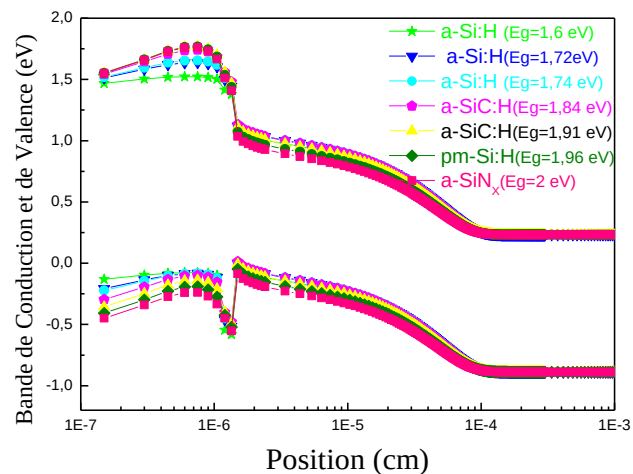


Figure 4. Diagramme de bandes pour les sept matériaux utilisés dans l'émetteur des cellules HIT en fonction de la position dans le dispositif.

Nous pouvons constater à partir de la figure 4 l'apparition d'une courbure de bande vers le bas créant une barrière de potentiel pour les trous photogénérés au niveau la bande de valence. Cette barrière de potentiel pour les trous augmente et devient importante avec l'augmentation du gap des émetteurs des cellules étudiées. La diminution du rendement et l'augmentation du taux de recombinaison pour les cellules constituées d'émetteurs à grand gap comme le silicium polymorphe hydrogéné et le nitrure de silicium s'explique par création de cette barrière qui

empêche le passage des trous de la couche p vers le contact avant (ITO) et favorise leurs recombinaisons.

4. Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans cet article à la deuxième couche (émetteur) des cellules à hétérojonctions de type n. En nous appuyant sur des outils de simulation, nous avons étudié l'impact du gap des différents émetteurs sur les performances des cellules *HIT* de type n. Les résultats montrent que pour ces cellules, les rendements augmentent de 18.64% à 19.49% pour des émetteurs à faible gap (entre 1.6 eV et 1.84 eV) puis une chute de ces rendements de 19.49 à 15.93 % pour des matériaux à grands gaps. Notre étude a démontré qu'une augmentation du gap des émetteurs des cellules étudiées, crée une barrière de potentiel pour les trous au niveau de la bande de valence. L'augmentation du taux recombinaison induisant une diminution du rendement pour les cellules constituées d'émetteurs à grand gap comme le silicium polymorphe hydrogéné et le nitrure de silicium s'explique donc par la création de cette barrière qui empêche le passage des trous vers le contact avant (ITO) et favorise leurs recombinaisons avec les électrons.

Références

- [1] L. Zhao, C. L. Zhou, H. L. Li, H. W. Diao, and W. J. Wang, Design optimization of bifacial HIT solar cells on p-type silicon substrates by simulation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 92, 673 (2008).
- [2] M. Rahmouni, S. Belarbi, Defect Pool Numerical Model In Amorphous Semiconductor Device Modeling Program, *jnep* 11(2) 02008 (2019).
- [3] M. Rahmouni, Etude des Cellules photovoltaïques HIT en vue d'Améliorer leur rendement, Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf (2010).
- [4] P. Chatterjee, M. Favre, F. Leblanc, and J. Perrin, A Global Electrical-Optical Model of Thin Film Solar Cells on Textured Substrates *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 426, 593 (1996).
- [5] N. Palit and P. Chatterjee, A computer analysis of double junction solar cells with a-Si : H absorber layers, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 53, 235 (1998).
- [6] W. Futako et al. Fabrication of narrow-band-gap hydrogenated amorphous silicon by chemical annealing, *J. Appl. Phys.*, 84(3) 1333 (1998)
- [7] Y. Poissant, P. Chatterjee and P. Roca i Cabarrocas, No benefit from microcrystalline silicon N layers in single junction amorphous silicon p-i-n solar cells, *Journal of Applied Physics* 93, 170 (2003).
- [8] M. Bouzaki, B. Benyoucef, A. Soufi, M. Chadel, Thickness and doping concentration optimization of a-Si/c-Si layers by computer aided simulation for development of performances solar cell, 3ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa, Algérie (2016).
- [9] B. Vet, M. Zeman, Comparison of a-SiC:H and a-SiN:H as candidate materials for a p-i interface layer in a-Si:H p-i-n solar cells, *Energy Procedia* 2, 227 (2010).
- [10] P. Chatterjee, P. Roca i Cabarrocas, Influence of N-type $\mu\text{-SiO}_x\text{:H}$ intermediate reflector and top cell material properties on the electrical performance of micromorph tandem solar cells, *AIP Advances* 8, 015115 (2018)
- [11] J. Barbé, Fabrication et caractérisation de nanocristaux de silicium encapsulés dans des matrices silicées amorphes, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse (2013).