

Fonctionnement à Haute Température d'une Cellule Solaire à Base du Silicium Polycristallin

F. Khelfaoui, M. Remram

Département d'Electronique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri, Constantine

1. INTRODUCTION

Actuellement, la recherche dans le domaine des cellules solaires à base du silicium est orientée vers le silicium multicristallin. Ceci est dû principalement à deux facteurs importants; Le faible prix de revient et le contrôle des propriétés du matériau à travers la taille, l'activité et la composition chimique des grains et l'orientation des joints des grains durant l'élaboration [1]. Cependant, l'utilisation de la cellule solaire multicristalline dans un environnement hostile en occurrence à haute température perturbe son fonctionnement et dégrade ses performances.

Dans cette optique, nous avons développé un programme qui permet l'évaluation de l'augmentation de la température par rapport à la température ambiante, dans une structure en fonction de son exposition permanente à une densité de puissance de chaleur donnée.

En outre, nous avons simulé le fonctionnement de la cellule à haute température en utilisant le PC1D afin d'évaluer la dégradation de ces caractéristiques photovoltaïques. A titre comparatif, nous avons présenté les résultats d'une cellule monocristalline fonctionnant dans les mêmes conditions.

2. MODELISATION ET SIMULATION

2.1 Modélisation de la diffusion de la chaleur

Notre modèle repose sur la résolution de l'équation de Poisson de flux de chaleur (éq. 1) par la méthode de Fourier [2].

$$\nabla^2 T(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

La solution obtenue décrit la diffusion de la chaleur dans une structure à trois couches de matériaux différents et de dimensions latérales égales. Chaque couche i ($i = 1, 2, 3$) est caractérisée par sa conductivité thermique K_i et son épaisseur L_i . Une telle structure peut être assimilée à un dispositif électronique (cellule solaire) exposé à une densité de puissance permanente générée par une ou plusieurs sources de chaleur uniformes ou non uniformes. Pour la résolution de l'équation (1), nous avons considéré une densité de puissance $P(x, y)$ de la forme :

$$P(x, y) = P_0 U(x, y) \quad (2)$$

Où P_0 est la densité de puissance permanente par unité de surface et $U(x, y)$ est la fonction qui décrit la géométrie et l'uniformité ou non-uniformité des sources générant la chaleur, elle est égale à l'unité en contact de la surface de la source de chaleur et zéro ailleurs.

En outre, nous avons supposé les conditions aux limites suivantes : il n'y a pas de déperditions de la chaleur dues aux radiations ou aux convections à travers les surfaces latérales. Il n'y a pas de résistance thermique de contact entre les différentes couches qui sont en contact. Chaque couche est uniforme, isotropique et sa conductivité thermique est indépendante de la température. Il n'y a pas de densité de puissance à l'intérieur de la structure et la chaleur est générée uniquement sur la face supérieure.

La solution obtenue est la suivante :

$$T_i(x, y, z) = P_0 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4U(n, m) \tau_i(n, m, z) \cos(n \pi x / L_x) \cos(m \pi y / L_y)}{(\delta_{n0} + 1)(\delta_{m0} + 1) L_x L_y K_t} \quad (3)$$

où :

- $T_i(x, y, z)$ est la température dans la couche i au point $R(x, y, z)$ et dont le transformé de Fourier est $\tau_i(n, m, z)$ ($i = 1$ correspond à la couche supérieure).

$$\tau_i(n, m, z) = \alpha_i \cos h(\gamma z) + \beta_i \sin h(\gamma z) \quad (4)$$

- α_i, β_i sont déterminés à partir des conditions aux limites citées ci-dessus.

- L_x , et L_y sont les dimensions latérales de la structure suivant les deux axes X et Y respectivement.

- $U(n, m)$ est le transformé de Fourier de la fonction $U(x, y)$, l'effet de plusieurs sources est obtenu en sommant $U(n, m)$ de chaque source. En outre l'effet d'une source non uniforme est réalisé par un chevauchement adéquat d'un nombre de sources uniformes.

Notre modèle peut être utilisé aussi pour une structure contenant uniquement une ou deux couches en jouant sur les épaisseurs ou sur les conductivités thermiques.

Nous avons utilisé ce modèle afin d'étudier l'effet de la méthode d'élaboration sur le comportement thermique du matériau. Pour ceci, nous avons évalué la température en surface de trois échantillons de même épaisseur élaborés différemment (CZ, la méthode de Polix et la méthode d'élaboration des rubans). Ces échantillons sont exposés à une densité de puissance de 700 W/cm^2 dont le flux de chaleur est focalisé sur une surface de 0.16 cm^2 centrée sur la face supérieure d'un échantillon de section de 1 cm^2 . Sur la figure 1, nous présentons le résultat obtenu en supposant que la source de chaleur est en contact direct avec l'échantillon.

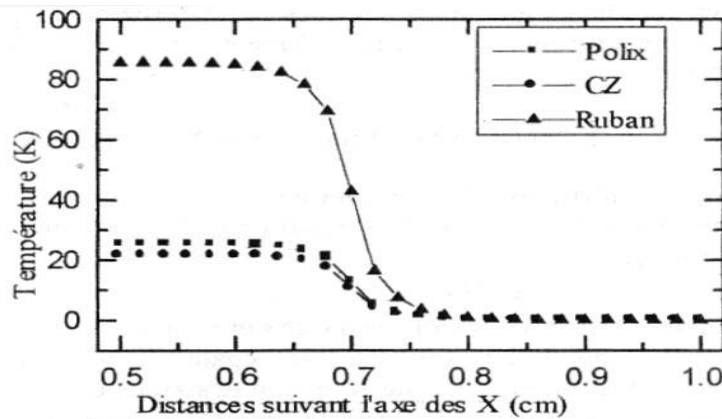


Fig. 1 : Effet du matériau sur la température atteinte en surface

Nous remarquons que la température maximale atteinte dans les différents échantillons se trouve au dessous de la source, puis elle diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne latéralement. Cette diminution est plus accentuée dans le cas de l'échantillon élaboré par la méthode produisant des rubans comparé aux deux autres échantillons. De même, la température la plus élevée a été obtenue dans le même cas. Ceci nous renseigne sur une difficulté de la dissipation thermique au niveau de cet échantillon. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la méthode d'élaboration des rubans produit du silicium multicristallin dont la taille des grains est petite comparée au silicium colonnaire à large grain élaboré par la méthode de Polix de Photowatt. Par conséquent le silicium obtenu sous forme des rubans contient une plus grande densité des joints des grains. Ces derniers ont pour effet

d'interrompre le flux de chaleur, ce qui gêne la diffusion de la température dans toutes les directions [3]. Dans les mêmes conditions, nous avons pris en considération une couche d'air d'épaisseur 2 cm séparant l'échantillon de la source de chaleur, nous avons obtenu une faible augmentation de la température (4 K pour l'échantillon élaboré par la technique de polix). De plus, cette augmentation est uniforme sur toute la surface. Ceci peut être expliqué par une déperdition importante de la chaleur dans l'air car ce dernier présente une faible conductivité thermique. En outre, puisque cette couche d'air est relativement épaisse, elle contribue effectivement dans la conduction thermique latérale.

2.2 Simulation de l'effet photovoltaïque

2.2.1 Présentation de la cellule

Pour estimer l'effet de la température sur le fonctionnement de la cellule, nous avons simulé les quatre caractéristiques photovoltaïques I_{cc} , V_{co} , η et FF pour deux cellules fonctionnant dans les mêmes conditions (les mêmes densités de puissances) dans des applications terrestres.

Nous avons mené notre simulation pour une cellule de type N^+PP . Pour la cellule multicristalline, le matériau de base est dopé 10^{16} cm^{-3} élaboré par la méthode de Polix de Photowatt et dont la longueur de diffusion est de 35 μm mesurée par la méthode du photopotential en surface SPV [4]. En ce qui concerne la cellule monocristalline, le matériau de base est élaboré par la méthode de CZ de même dopage 10^{16} cm^{-3} et de longueur de diffusion de 200 μm .

Nous avons adopté une moyenne épaisseur 100 μm pour la cellule afin de bénéficier d'une quantité importante de la lumière absorbée d'une part et d'autre part pour minimiser les pertes par recombinaison des photoporteurs [5]. Les recombinaisons face avant et face arrière sont fixées à 100 et 500 cm/s respectivement. Pour le choix de la profondeur de jonction nous avons tracé le rendement énergétique en fonction de la profondeur (Fig. 3). Le résultat obtenu concorde bien avec la littérature [6]. Pour une faible vitesse de recombinaison face avant de 100 cm/s , le rendement augmente légèrement avec la profondeur de jonction. Malgré ce résultat, nous avons privilégié une faible profondeur de jonction (0.1 μm .) car l'augmentation ou rendement n'est pas importante d'une part et d'autre part une profonde jonction induit une large zone morte (siège des dislocations et des défauts ponctuels) engendrée par le processus de diffusion que le simulateur ne prend pas en compte. Le dopage des zones $N^+ P^+$ est $5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [4].

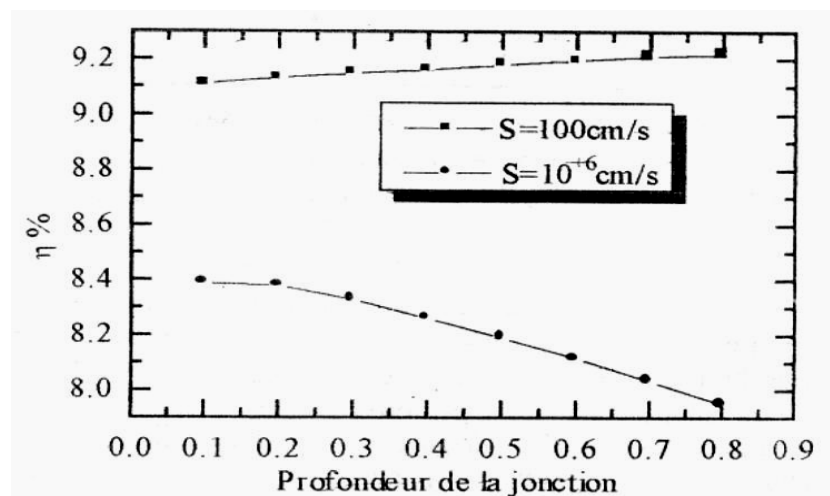


Fig. 2: Etude de la profondeur de jonction sur le rendement

2.2.2 Résultats

Puisque la température atteinte dans les cellules dépend de la méthode d'élaboration du matériau de base, nous avons utilisé notre modèle pour déterminer l'augmentation de la température en surfaces des deux cellules engendrée par des densités de puissance de 700, 1400, 2100, 2800 et 3500 W/cm² en supposant que le flux de chaleur est uniformément distribué sur la surface de la cellule. Les résultats obtenus sont regroupés sur le tableau 1.

Tableau 1: Augmentation de la température en fonction de la densité de puissance

	700 W/cm ²	1400 W/cm ²	2100 W/cm ²	2800 W/cm ²	3500 W/cm ²
CZ	21 K	42 K	64 K	85 K	106 K
Polix	25 K	50 K	75 K	100 K	125 K

Puisque le gradient de la température en profondeur de la cellule est faible et la température maximale est en surface, nous avons utilisé ces résultats pour la simulation du fonctionnement de la cellule.

Sur la figure 3, nous présentons l'évolution du courant de court circuit en fonction de la densité de puissance.

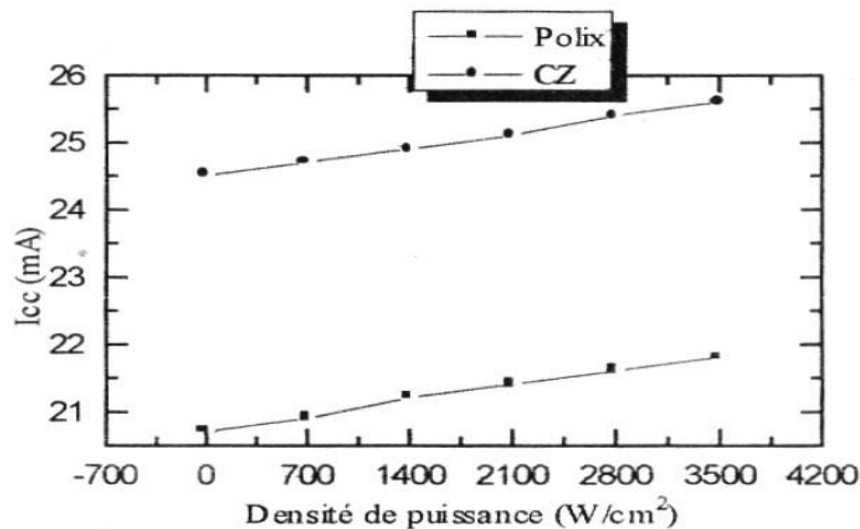


Fig. 3: Effet de la densité de puissance sur le courant de court circuit

Nous pouvons remarquer que les courants de court-circuit varient de la même façon en fonction de la densité de puissance. Ils augmentent légèrement avec la température. L'élévation de la température crée un désordre thermique dans la microstructure de la cellule ce qui fait diminuer la mobilité et la durée de vie des porteurs libres. Donc, cette faible augmentation de 0.04 mA/°C est due principalement à une amélioration du coefficient d'absorption [7]. Ceci est réalisé par un processus d'absorption assisté par une multiplication des phonons dû à l'effet thermique [8] et un décalage du seuil d'absorption vers les basses énergies [9]. Ceci est confirmé par l'efficacité quantique interne illustrée sur la figure 4.

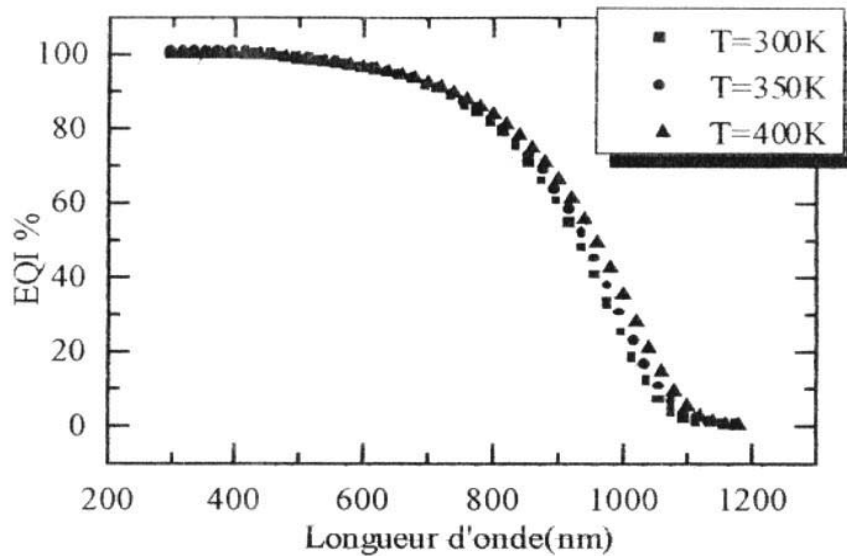


Fig. 4: Efficacité quantique interne de la cellule multicristalline en fonction de la température

La figure-5 illustre la variation de V_{co} en fonction de la densité de puissance. La diminution de V_{co} en fonction de la température est due principalement à l'augmentation du courant d'obscurité engendrée par l'élévation de la concentration intrinsèque. Cette dernière est favorisée par l'augmentation de la température et la diminution de l'énergie de gap. L'effet de cette dernière reste minime par rapport à celui de la température.

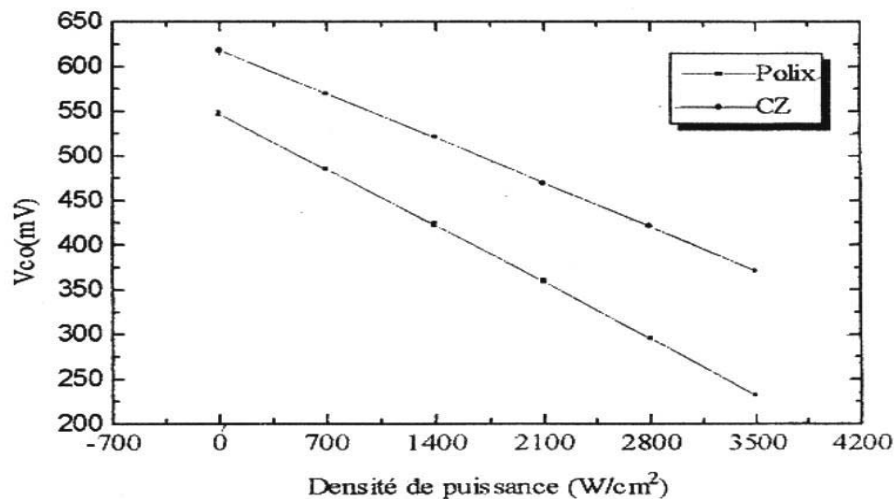


Fig. 5: Effet de la densité de puissance sur la tension de circuit ouvert

La figure 6 représente le facteur de forme FF. A température ambiante ($0W/cm^2$), les facteurs de forme des deux cellules sont voisins. Lorsque la densité de puissance augmente, les températures induites dans les cellules seront de plus en plus éloignées ce qui induit la grande différence entre les deux facteurs. Cette diminution du facteur de forme en fonction de la densité de puissance est dû principalement à la diminution de la tension de circuit ouvert.

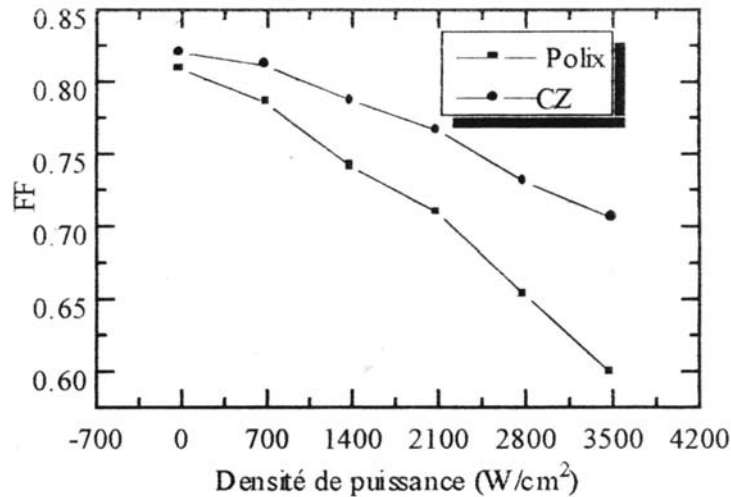


Fig. 6: Effet de la densité de puissance sur le facteur de forme

Puisque la diminution de V_{oc} et du FF est plus importante que l'augmentation de I_{cc} , ceci induit la dégradation du rendement énergétique en fonction de la densité de puissance. En plus, le rendement énergétique de la cellule multicristalline devient rapidement néfaste alors que pour la cellule CZ, il demeure relativement acceptable jusqu'à une densité de puissance de 1400 W/cm² (voir Figure 7).

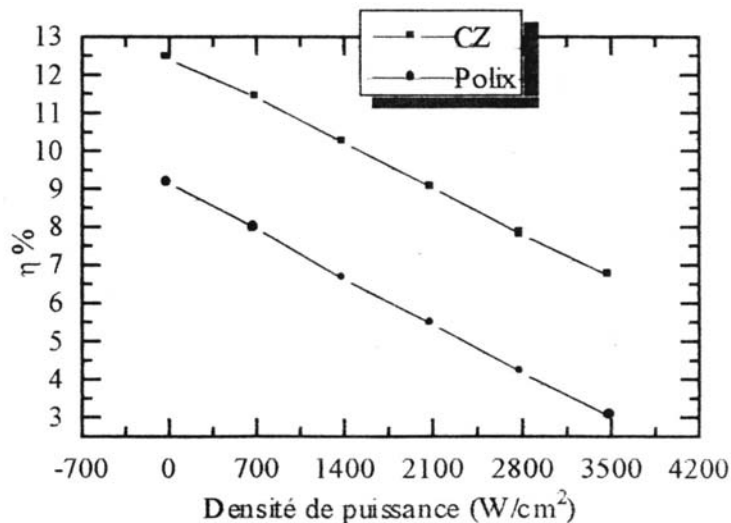


Fig. 7: Effet de la densité de puissance en fonction de la densité de puissance

2.2.3 Discussion

L'écart existant entre les caractéristiques des deux cellules à température ambiante (zéro densité de puissance) est dû au fait que l'échantillon multicristallin possède une densité des joints des grains, ces régions sont le siège des liaisons pendantes et des défauts qui augmentent le taux de recombinaison et par conséquent limitent la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. Lorsque la densité de puissance augmente, le comportement thermique de la cellule multicristalline vient pour dégrader encore une fois le comportement photovoltaïque de cette cellule. Dans le Silicium CZ, la conduction thermique se fait principalement par le réseau [10], le flux de chaleur est transporté à travers les liaisons

atomiques d'un atome à un atome voisin. Cependant pont- le silicium multicristallin, le flux de chaleur se trouve interrompu par les liaisons pendantes et les défauts ponctuels ou linéaires aux niveaux des joints des grains ce qui gêne la dissipation thermique. L'effet du comportement thermique est plus marquant dans les caractéristiques fortement dépendantes de la température tels que la tension de circuit ouvert et le facteur de forme.

3. CONCLUSION

Nous pouvons conclure que l'effet de la température est néfaste sur le fonctionnement de la cellule solaire. Il est plus accentué dans le cas de la cellule multicristalline. Pour le matériau polycristallin, il devient de plus en plus gênant lorsque la taille des grains diminue.

REFERENCES

- [1] B.M. Abdurakhmano and al, '*Change in Electrical Activity of Grain Boundaries on Heat Treatment and its Effect on Properties of Film Polycrystalline Silicon Solar Cells*', *Appi. Solar. Ener.*, Vol. 32, N°4, 1996.
- [2] R.V. Churchill, '*Fourier Series and Boundary Value Problems*', Edition McGraw-Hill, 1963.
- [3] T. Kamins, '*Polycrystalline Silicon for Integrated Circuits and Displays*', Edition Kluwer Academic Publisher, USA, 1998.
- [4] Z. Benmohamed, M. Remram, A. Laugier, '*Modeling of the Influence of Oxygene and Carbon on mc-Si Photovoltaic Solar Cells*', World Renewable Energie Network, Brighton, UK, 1-7, July, 2000.
- [5] M. Orgeret, '*Les Piles Solaires, le Composant et ses Applications*', Institut National des Sciences Appliqués, Lyon, 1983.
- [6] H.J. Hovel, '*Semiconductors and Semimetals*', Edition R.K. Willardson, 1975.
- [7] G.E. Jellison, Jr. and F.A. Modine, '*Optical Absorption of Silicon Between 1.6 and 4.7 eV at Elevated temperature*', *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 41, N°2, July, 1982.
- [8] B.O. Séraphin and al., '*Topics in Applied Physics*', Vol. 31, Edition B.O. Seraphin, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York, 1979.
- [9] H.A. Weakliem and D. Redfield, '*Temperature Dependence of the Optical Properties of Silicon*', *J. Appl. Phys.*, Vol. 50, N°3, pp. 1491-1493, 1979.
- [10] P. Pavlov and A Khokhlov, '*Physique du Solide*', Edition Mir, 1989.