

## Le Rôle Du Mécanisme de Recombinaison sur Les Performances Photovoltaïques des Cellules Solaires de Type Cu(In,Ga)(S,Se<sub>2</sub>)

M.Benosman<sup>(1,2)</sup>, M. Bouchaour, F. Dujardin<sup>(1)</sup>, J.P. Charles<sup>(3)</sup> et B. Benyoucef<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Laboratoire de Théorie de la Matière Condensée, Institut de Physique et d'Electronique – 1, Boulevard Arago, 57078 Metz, Cedex 3, France

<sup>(2)</sup>Laboratoire de Matériaux et des Energies Renouvelables, Faculté des Sciences, Université Abou bekr Belkaïd b. p 119, Tlemcen 13000, E-Algérie, mail : me\_benosman@mail.univ-tlemcen.dz

<sup>(3)</sup>Laboratoire d'optique et d'Electronique, Cloes – Supelec, 02 rue Edouard Belin, 57070 Metz, France

**Résumé** – Dans le domaine de la conversion photovoltaïque, bien que différentes filières et technologies se partagent le marché, on constate que c'est toujours le silicium cristallin qui en occupe la plus grosse place. Ainsi, compte tenu des recherches et des connaissances acquises sur le silicium massif de qualité électronique, c'est ce matériau qui est encore à l'heure actuelle commercialisé.

Néanmoins, dans un souci de réduction de coût, d'autres filières, telle que celle des photopiles en couches minces, enregistrent des progrès rapides grâce à certaines de leurs propriétés intrinsèques.

Cette filière présente donc des atouts sérieux et des perspectives de réduction des coûts. Parmi les matériaux en couches minces utilisés à l'heure actuelle dans les photopiles, citons le silicium amorphe, le silicium microcristallin, et les matériaux polycristallins tels que le CdTe et le Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Dans notre étude, on se limitera à l'étude des matériaux chalcopyrites tels que le Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.

Dans ce papier, l'étude des différents obstacles qui affectent les performances de ces structures et en particulier la tension en circuit ouvert sont présentés, comme le phénomène de recombinaison au volume du matériau et à l'interface ainsi que les défauts existants dans le matériau. Pour ce, une simulation du modèle proposé est nécessaire. Cette dernière nous permet d'établir des mesures de la spectroscopie d'admittance et de la caractéristique C-V afin de pouvoir examiner les limites d'amélioration de la tension en circuit ouvert et des performances photovoltaïques.

**Abstract** – In the field of photovoltaic conversion, although various dies and technologies divide the market, one notes that it is always the crystalline silicon which occupies the largest place of it. Thus, taking into account research and of the knowledge obtained on the silicon of electronic quality, it is this material which is still at the present time marketed.

Nevertheless, in a preoccupation with a reduction of cost, other dies, such as that of the photovoltaic cells in thin films, record fast progress thanks to some their intrinsic properties.

This die thus presents serious assets and prospects for reduction of the costs. Among materials in thin layers used at the present time in the photovoltaic cells, let us quote amorphous silicon, microcrystalline silicon, and polycrystalline materials such as CdTe and Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>. In our study, one will limit oneself to the study of the materials chalcopyrites such as Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>.

In this paper, the study of the various obstacles which affect the performances of these structures and in particular the tension in open circuit are presented, like the phenomenon of recombination in the bulk of material and the interface as well as the existing defects in material. For this, a simulation of the model is necessary. The latter enables us to establish measurements of the admittance spectroscopy and characteristic C-V in order to be able to examine the limits of improvement of the tension in open circuit and photovoltaic performances.

**Keys words** : Recombination – Simulation – Defects – Thin Films – CIGS

### 1. INTRODUCTION

Durant ces dernières années, le développement des cellules solaires en couche minces et en particulier les cellules de type chalcopyrites telles que Cu (In,Ga) S, Se<sub>2</sub> a eu des progrès très significatifs. Un rendement de 18%[1] a été détenu par NREL. Une structure typique de ces cellules consiste en une couche absorbeur de type p Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, déposée sur du Mo comme contact arrière, une couche tampon CdS suivie d'une couche d'oxyde transparent d type n et qui sert comme une couche fenêtre.

Malgré les rendements de cellules impressionnants, les processus électroniques limitant les performances du dispositif restent inconnus. Une analyse des caractéristiques courant tension (I-V) révèlent que la recombinaison dans la couche Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> se produit par la présence des défauts à l'intérieur de la région de charge d'espace de l'absorbeur [2]. Par conséquent, la recombinaison à l'interface tend à devenir dominante dans les dispositifs avec des compositions d'absorbeurs proches de CuGaSe<sub>2</sub>. Pour les deux types de cellules, les niveaux de défauts, localisés dans l'absorbeur produisent un courant de recombinaison. A cet effet, la détermination du mécanisme de recombinaison limitant les performances d'une telle structure est étudié. Pour ce, différentes techniques de mesures sont utilisées telles que la spectroscopie d'admittance et les mesures de s caractéristiques I-V et C-V.

Dans un première partie de notre étude, les modèles d recombinaison et les différent défauts physiques dans Cu(In,Ga)S<sub>2</sub> sont décrits. Pour les mesures des caractéristiques I-V et C-V, le programme SCAPS [3] est utilisé. Les résultats obtenus montrent qu la recombinaison au niveau de l'absorbeur est la plus dominante alors que celle à l'interface, affecte la tension en circuit ouvert de la cellule et que la présence de défauts a un effet très significatif pour les performances de la cellule Cu(In,Ga)S<sub>2</sub>.

## 2. MODELE DE RECOMBINAISON

Le phénomène de recombinaison à l'interface de la couche tampon/ absorbeur ou au niveau du volume de la couche chalcopyrite joue un rôle très important et on ne peut y répondre directement. La méthode d'extrapolation de la tension en circuit ouvert à  $T = 0K$  a été appliqué dans la littérature [4,5] afin de pouvoir déterminer la recombinaison majeure. Il a été rapporté que l'énergie de gap de l'absorbeur indique la recombinaison dans la région de charge d'espace.

En circuit ouvert, tous les porteurs de charge photogénérés se recombinent à l'intérieur de la cellule solaire. Les différentes recombinaisons possibles pour ces porteurs dans la couche absorbeur sont présentés sur la figure n°1[6]. Ici, on considère la recombinaison dans le volume (A), à la surface arrière de l'absorbeur (A'), la recombinaison dans SCR et la recombinaison à l'interface couche tampon/absorbeur (C).

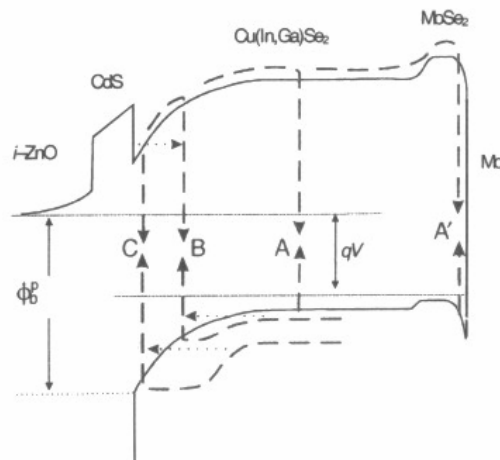


Fig.1: Présentation des différentes recombinaisons dans CdS-Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. A et A' représentent la recombinaison au volume et au contact arrière. B et C n sont les recombinaisons à dans SCR et à l'interface

## 3. LES DEFAUTS PHYSIQUES DANS Cu(In, Ga)S<sub>2</sub>

Les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencés par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour pouvoir augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts diminue la possibilité de transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion.

Les défauts et les impuretés sont créés à l'intérieur du gap, ils peuvent être profonds ou superficiels. Généralement, un état de défaut est dit peu profond si son niveau d'énergie est proche du minimum de la bande de conduction  $E_c$  ou le maximum de la bande de valence  $E_v$ . Dans le cas contraire, il est appelé niveau profond. L'étude des caractéristiques des centres de défauts peut être obtenue à partir de la capacité en utilisant différentes méthodes spectroscopiques telles que la spectroscopie d'admittance (AS) [7] ou deep level transient spectroscopy (DLTS)[8]. Les recherches effectuées sur les cellules de type Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> à l'aide de ces deux techniques indiquent qu'ils existent des pièges de trous avec une densité autour de 280 meV au dessus de la bande de valence [9- 10]. Pour les deux techniques, le signal associé avec ce niveau de défaut est très significatif surtout pour un niveau discret.

## 4. SPECTROSCOPIE DE DEFAUTS

La spectroscopie de défaut est un processus très important qui nous permet de comprendre le mécanisme de transport des porteurs de charge des hétérostructures et les contacts Schottky. La présentation d'état des défauts permet de contrôler les transformations électroniques provoquées par les modifications mécaniques et chimiques et morphologiques. Les mesures de la capacité de la jonction peuvent être effectuées en fonction de la température, la tension de polarisation et de la fréquence afin de mieux étudier la présence des défauts.

#### 4.1 La spectroscopie d'admittance

La spectroscopie d'admittance permet de déterminer le taux d'émission thermique des porteurs de charge pour les états de défauts. Les mesures de capacité –tension (C-V) sont utiles pour l'obtention d'une concentration de défaut. Les états de défauts peuvent être étudiés en mesurant la fréquence de l'admittance complexe de la jonction. La tension alternative avec la fréquence  $f = \omega/2\pi$  est appliquée à l'hétérojonction ou au contact Schottky .

La réponse à ce signal est l'admittance :  $Y = G + i\omega C$ , est déterminée expérimentalement. G est la conductance, C la capacité et  $\omega$  est la fréquence angulaire. Ceci est appliqué pour vérifier la chute de tension appliquée à travers SCR de la jonction. Dans notre cas, la spectroscopie d'admittance est utilisée pour déterminer les concentrations de défauts. Walter et al [11] ont décrit une méthode qui peut être appliquée pour les pièges au niveau du volume , par contre pour la détermination de la concentration des défauts, ceci reste difficile à déterminer.

### 5. RESULTATS ET DISCUSSION

Les mesures des caractéristiques I-V et C-V sont effectués à l'aide du programme SCAPS. La figure n°2 présente la caractéristique I-V pour la cellule CIGS, avec une concentration de défauts égale à  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  au niveau de l'absorbeur. Les électrons photo générés sont capturés et piégés dans le volume de l'absorbeur. Ceci cause une diminution du niveau de Fermi pour les trous et cependant augmente la densité des porteurs majoritaires et la conductivité. A l'intérieur de SCR de  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{S}_2\text{Se}_2$  les électrons piégés représentent une charge d'espace négative. Par conséquent, la profondeur de SCR diminue, de ce fait, la capacité de la jonction augmente fig.n °3.

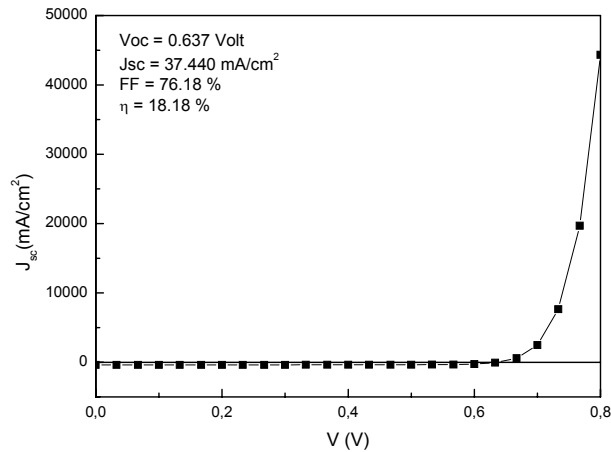


Fig.2: caractéristique I-V de ZnO/CdS/CIGS avec une concentration de défauts au volume de l'absorbeur

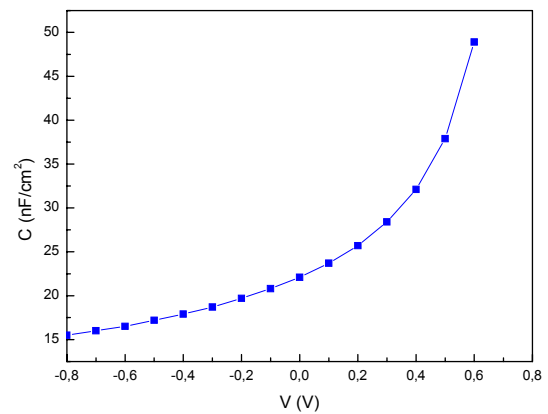


Fig.3: caractéristique C-V obtenue par SCAPS pour ZnO/CdS/CIGS pour une fréquence  $10^5$  Hertz

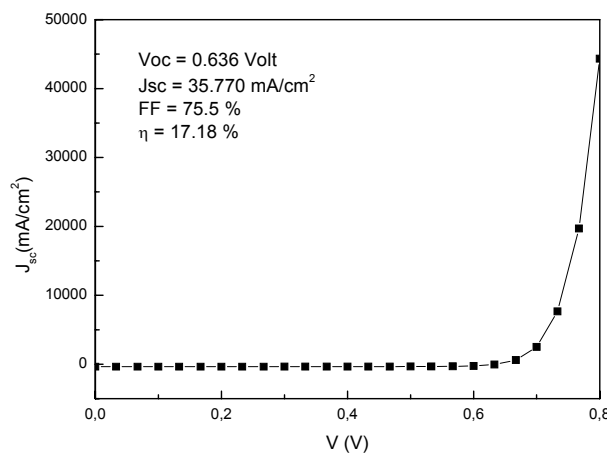


Fig.4: Caractéristique I-V pour ZnO/CdS/CIGS avec la présence de défauts à l'interface CdS/CIGS

Ces effets décrits dans [12] sont expliqués par l'excès de trous capturés à l'interface. Dans notre cas la recombinaison est dominée par Shockley-Read-Hall (SRH)[13], donc le courant de saturation diminue avec la profondeur de SCR. Pour la recombinaison à l'interface est déterminée par la densité des porteurs a cette

interface, elle augmente avec l'augmentation de la profondeur de SCR, c'est ce qui explique la légère augmentation de  $V_{oc}$  (Fig. 4).

## 6. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté l'influence de la recombinaison sur CIGS grâce à une simulation des propriétés de transport électriques effectuée par SCAPS. En premier lieu, nous avons examiné la recombinaison juste au niveau de l'absorbeur avec une concentration de défaut égale à  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  ensuite à l'interface CdS/CIGS tout en mesurant les caractéristiques I-V et C-V. Les résultats montrent que la recombinaison au niveau de l'absorbeur est la plus dominante, en effet, le contrôle des défauts dans  $\text{Cu(In,Ga)S}_2\text{Se}_2$  joue un rôle très important sur l'amélioration des performances d'une telle structure. On conclut ainsi que la recombinaison à l'interface CdS/CIGS limite la tension en circuit ouvert.

## REFERENCES

- [1] M.A. Contreras et al. Prog. Photov. : Resp. Appl. 7, 311, 1999.
- [2] T. Walter et al, in Proceeding of 13th EU Photovoltaic Solar Energy Conference, Bedford, UK, p. 597, 1995.
- [3] M. Burgelman, P. Nollet and S. Degraeve. Thin Solid Films, 361- 362, pp 527, 532, 2000.
- [4] C. Deibel et al., Proceeding of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, P. 1229, München, 2002.
- [5] M. Schmidt et al. ,Thin Solid Films, 361-362: 283, 2000.
- [6] Series on Photovoltaic of Solar Energy. Vol. 1. Editors: Mary. D. Archer. 2001.
- [7] U. Rau et al., Appl. Phys. Lett. 73, 1098, 1997.
- [8] M. Igalson et al., Proceeding 12th European Photovoltaic Energy Conf. Bedford, UK, p. 1584, 1994.
- [9] M. Igalson et al., J. Appl. Phys. 80, 5765, 1996.
- [10] A. Li et al. Electron. Mater. 22, 195, 1993.
- [11] T. Walter et al. J. Appl. Phys. 80, 4411, 1996.
- [12] M. N. Rubro et al, J. Appl. Phys. 61, 4662, 1987.
- [13] F. Engelhardt et al., Inst. Phys. Conf. Ser. 152, 979, 1998.