

Réalisation et caractérisation de premiers mini-modules CIGS électrodéposés pour application aux vitrages photovoltaïques semi-transparents

Tarik Sidali*[1], Damien Coutancier[2], Adrien Bou[1], Stéphanie Leyder[1], Elisabeth Chassaing[2], Bertrand Theys[2], Pierre-Yves Thoulon[1], Daniel Lincot*[2]

1. Crosslux, 1200 Avenue Olivier Perroy 13790 Rousset
2. CNRS, IRDEP, 6 Quai Watier 78401 Chatou

L'objectif de ce travail est de présenter le développement d'un vitrage photovoltaïque semi-transparent à partir de l'architecture standard de la technologie couche mince CIGS qui est constituée par un empilement Mo/CIGS/Couche tampon/ZnO/AZO sur un substrat de verre. Pour permettre le passage d'une partie de la lumière à travers le vitrage, une structuration des couches minces est nécessaire pour dégager des zones de verre qui ne soient pas recouvertes du dispositif photovoltaïque opaque (on parle du taux d'ouverture pour faire référence au ratio entre les surfaces des zones dégagées et des zones actives). S'il est possible de structurer cet empilement à la fin du processus, il est néanmoins délicat de réaliser un motif assez fin pour être agréable à l'œil sans dégrader de façon permanente les propriétés photovoltaïques. De plus, cette approche a posteriori entraîne un gaspillage d'indium et de gallium. Une approche plus élégante, développée et présentée ici, consiste ainsi à structurer le contact arrière de Mo puis à déposer sélectivement le CIGS sur cette couche de Mo structurée. Malheureusement, la majorité des techniques de dépôts ne permettent pas d'effectuer une croissance localisée du CIGS, et le dépôt s'effectue sur l'ensemble du substrat, ce qui nécessite d'enlever une partie du CIGS par la suite. Une technique répondant au critère de dépôt localisé est l'électrodépôt. C'est une méthode industrielle et efficace pour l'élaboration de module standard CIGS, avec des rendements allant jusqu'à 14% [1], ce qui la rend tout à fait appropriée pour la fabrication de vitrages photovoltaïques. Elle présente l'avantage d'effectuer une croissance localisée du CIGS sur un(e) substrat/couche métallique, évitant ainsi une perte d'indium et/ou de gallium sur les zones destinées à rester transparentes.

Un premier module structuré d'une surface de 4x4 cm² a été réalisé à partir d'une méthode d'électrodépôt introduite récemment et connue comme la voie oxyde [2,3]. Dans cette méthode, la couche de CIGS est élaborée en trois étapes : la formation d'une couche d'un mélange d'oxydes/hydroxydes de cuivre, indium et de gallium par un dépôt cathodique à partir d'une solution aqueuse de sels de nitrates ; puis, les oxydes sont réduits en métaux par un traitement thermique sous atmosphère d'hydrogène ; enfin, le CIGS est formé par traitement thermique sous atmosphère de sélénium. Le taux d'ouverture de ce premier module est de 35 % avec un motif présentant des trous d'un diamètre de 535 μm avec un écartement centre à centre d'environ 775 μm menant à des canaux de Mo d'une largeur minimale de 240 μm. Ce dispositif présente de bonnes performances électriques avec un V_{OC} de 400 mV, mais également de fortes résistances séries impactant directement le facteur de forme de la caractéristique I(V) du module complet (≈ 25%). Une mesure LBIC confirme la présence d'une forte résistance série provoquée par la grande surface du ZnO:Al. Cependant, en isolant localement plusieurs cellules de 0.1 cm² sur ce module, un rendement de 7.7 % a été obtenu, correspondant à 11.9 % en ne prenant en compte que la surface active de CIGS. De faibles résistances séries ont alors été mesurées. Ces résultats ont déjà fait l'objet d'une publication [4].

Dans ce nouveau papier, afin de diminuer l'impact de l'AZO sur la résistance série, nous avons travaillé sur des modules monolithiques composés de cellules photovoltaïques de hauteurs égales à celle du module mais de faibles largeurs (quelques millimètres) connectées en série avec la configuration standard d'interconnexion P1/P2/P3 [5]. La taille du module a également été augmentée à 10x10 puis 15x15 cm² et le taux d'ouverture sur le substrat a été augmenté jusqu'à 55 % afin de démontrer l'adaptabilité du processus de fabrication à des substrats de plus grandes tailles et à des motifs de structuration du Mo plus fins.

Pour ces réalisations, la couche de CIGS a été formée par la voie métallique à partir d'un empilement Cu/In/Ga. La stœchiométrie de l'alliage quaternaire est ajustée en jouant sur les conditions d'électrodépôt de l'indium et du gallium. L'absorbeur CIGS est enfin formé lors du recuit de l'empilement Cu/In/Ga sous atmosphère de sélénium. Les modules sont finalement complétés avec le dépôt pleine plaque de la couche tampon de CdS par CBD et des couches de ZnO intrinsèque et de ZnO:Al par pulvérisation cathodique.

Un module fonctionnel (Figure 1) d'une surface de 10x10 cm² avec un taux d'ouverture de 55 % (motif présentant des trous d'un diamètre de 530-535 µm avec un écartement centre à centre d'environ 635 µm menant à des canaux de Mo d'une largeur minimale de 100 µm) a été obtenu avec un V_{OC} de 7.5 V, un I_{SC} de 50 mA (soit 33 mA/cm² de surface active) et un facteur de forme de 41%. Ainsi, l'impact de l'AZO sur la résistance série du module a pu être grandement diminué. Cependant, des pertes de performances sont encore présentes et dues à des résistances séries. Nous cherchons à en analyser fondamentalement l'origine par des études locales au MEB. Par ailleurs, nous avons pu démontrer que l'augmentation de la taille du module à 15x15 cm² est conservatrice de l'homogénéité du dépôt de CIGS sur le Mo et des performances optoélectroniques du matériau (Figure 2). De plus, nous avons pu constater une proportionnalité des performances entre les modules structurés en fonction de leur taux d'ouverture (Figure 3) et les modules sans structuration. Ces résultats ouvrent la voie à la réalisation de premiers démonstrateurs à vocation industrielle.

Bibliographie

- [1]: Nexcis, IEEE Conference Publications DOI: 10.1109/PVSC.2015.7356224.
- [2]: A. Duchatelet, T. Sidali, N. Loones, G. Savidand, E. Chassaing and D. Lincot, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol 119, p241-245, Dec 2013.
- [3]: A. Duchatelet, G. Savidand, N. Loones, E. Chassaing and D. Lincot, J. Electrochem. Soc., vol. 161, no 7, p. D3120-D3129, janv. 2014.
- [4]: T. Sidali, A. Bou, D. Coutancier, E. Chassaing, B. Theys, D. Barakel, R. Garuz and D. Lincot, Semi-transparent photovoltaic glazing based on electrodeposited CIGS solar cells on patterned molybdenum/glass substrates, Soumis à EPJ PV.
- [5]: S. Nishiwaki, A. Burn, S. Buecheler, M. Murr, S. Pilz, V. Romano, R. Witte, L. Krainer, G. J. Spühler and A. N. Tiwari, Prog. Photovoltaics Res. Appl., 2015, 23, 1908–1915.



Figure 1 - Photographie d'un échantillon 10x10 cm² avec un taux d'ouverture de 55 %

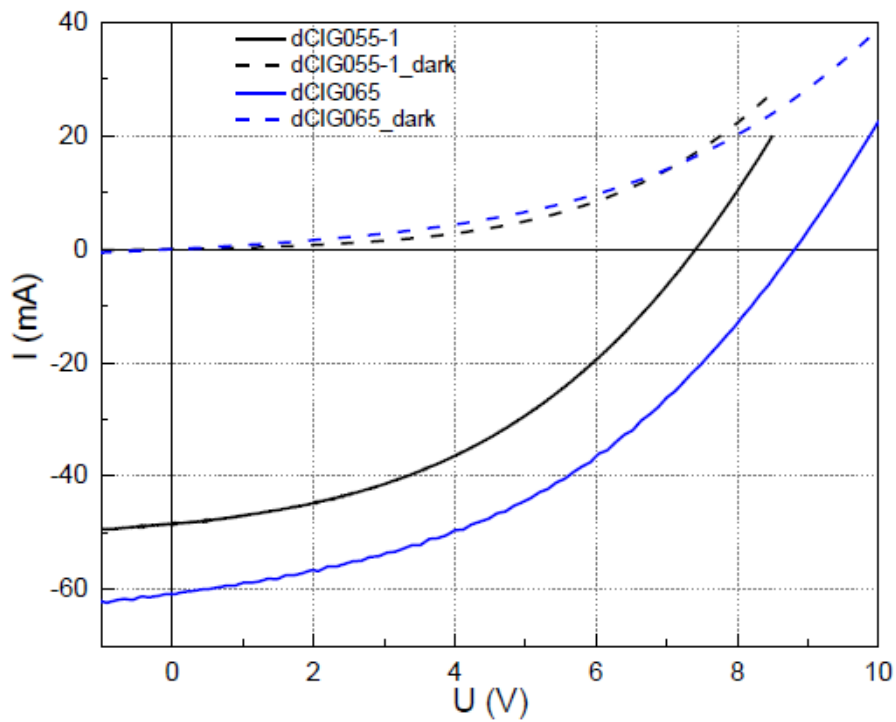


Figure 2 – Comparaison des caractéristiques I(V) pour deux échantillons d'un taux d'ouverture de 55 %. Les échantillons dCIG055 et dCIG065 présentent respectivement des cellules de 10 et 12.85 cm de hauteur

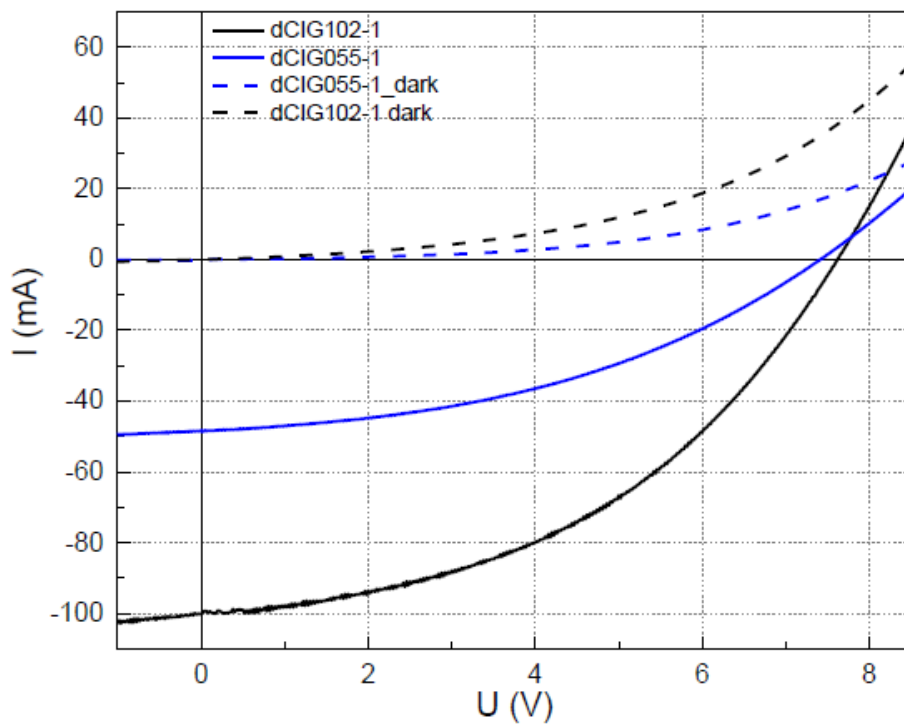


Figure 3 - Comparaison des caractéristiques I(V) pour un échantillon d'un taux d'ouverture de 55 % (dCIG055) et un échantillon sans structuration (dCIG102)