LUMIERE LENTE ET RAPIDE DANS LES CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES: VERS DES REGLES DE DESIGN

Loïc Lalouat[1,2], He Ding[1,2], Ngoc Vu Hoang[1,2], Hai-Son Nguyen[1,2], Régis Orobtchouk[1,3], Alain Fave[1,3], Fabien Mandorlo[1,3], Christian Seassal[1,2], Emmanuel Drouard[1,2]

[1] *Université de Lyon, Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL) UMR 5270 CNRS-INSA-ECL-UCBL*
[2] *Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France*
[3] *INSA Lyon, Villeurbanne, France*

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses études ont montré l'intérêt d'intégrer des nanostructures photoniques au sein de cellules photovoltaïques (PV) en couches minces, qu'elles soient inorganiques ou organiques. La gamme de structures nanophotoniques étudiées est très large, elles peuvent être constituées de motifs périodiques ou aléatoires, diélectriques ou métalliques. Des méthodologies dédiées ont été développées pour simuler les propriétés optiques, voire optoélectroniques de cellules dotées de ces structures. De plus, des procédés spécifiques de nanostructuration, à faible coût et compatibles avec les grandes surfaces, ont été mis au point pour intégrer ces structures au sein de véritables dispositifs PV. Ces travaux ont récemment porté leurs fruits avec les premiers dispositifs montrant une augmentation nette du rendement de conversion du fait d'une ingénierie nanophotonique [1]. L'intérêt de ces structures porte tout particulièrement sur l'augmentation du courant photogénéré, et donc du rendement qui en résulte (si les autres paramètres, notamment le Voc, ne sont pas altérés par la nanostructuration). Ainsi, il est crucial que le couplage et le piégeage de la lumière incidente soient aussi efficaces que possible. Plusieurs auteurs ont proposé des valeurs limites de l'efficacité d'absorption, qui sont autant de cibles à atteindre, et qui permettent de quantifier les pertes optiques qu'il est nécessaire d'éliminer. Par contre, il reste à établir les stratégies globales à mettre en œuvre pour approcher, voire dépasser ces limites, ainsi que les règles générales de design de cellules à ingénierie nanophotonique. Dans cette communication, nous présenterons une vision globale de l'ingénierie nanophotonique, qui consiste à exploiter la très grande diversité de modes optiques qui peuvent exister dans des milieux micro et nanostructurés.

Dans un premier temps, après avoir rappelé le potentiel des modes de lumière lente et leur rôle clé dans le piégeage optique aux grandes longueurs d'onde (faibles absorptions), nous montrerons comment concevoir une structure photonique capable d'optimiser la densité spectrale de modes. On peut relever, à l'aide d'une approche phénoménologique simple telle que la théorie des modes couplés, que l'augmentation de la densité spectrale de modes se fait au détriment du couplage de chaque mode à l'onde incidente, donc de l'absorption intégrée de chaque mode. Un optimum doit ainsi être déterminé, compte tenu également des matériaux considérés. Une telle optimisation est facilitée dans des structures photoniques complexes (structures multi-périodiques fondés sur la répétition de grandes « supercellules »), dont la densité spectrale de modes est plus importante, et en respectant quelques règles de design dans les espaces direct et/ou réciproque. Ainsi, les fréquences spatiales doivent être telles que la lumière est peu diffractée dans l'air et davantage dans le matériau actif, avec pour corollaire d'éviter les « agrégats » de motifs élémentaires [2-3]. Afin d'atteindre un rendement d'absorption élevé sur l'ensemble du spectre, il est nécessaire d'exploiter en plus d'autres familles de modes optiques. En particulier, l'absorption efficace aux courtes longueurs d'onde est facilitée par l'utilisation de modes « rapides », guidés verticalement et canalisés dans les nanostructures photoniques [4]. Enfin, afin de sélectionner les meilleures supercellules, il est possible d'exploiter des algorithmes originaux permettant d'éliminer les structures redondantes, et de sonder une plus large gamme de paramètres [5]. Nous illustrerons cette démarche de design et d'optimisation dans le cas de deux types de dispositifs. Nous présenterons d'abord des cellules PV à base de couches minces de silicium cristallin structurées avec des motifs ordonnés ou désordonnés. Ensuite, nous montrerons que la combinaison de modes lents et de modes rapides permet de contrôler à la fois l'absorption dans l'UV et l'émission dans le rouge, afin d'intégrer une structure de conversion spectrale très efficace sur une cellule silicium.

[1] Voir par exemple : K. Ishizaki et al, *Opt. Express* **23**, A1040 (2015); M. S. Branham et al, *Adv. Mater.* **27**, 2268, 2015.
[2] C. Seassal et al, *SPIE Newsroom*, Solar & Alternative Energy, 14 July 2016
[3] He Ding et al, *Opt. Express* **24**, A650 (2016)
[4] G. Gomard et al, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 051119 (2014)
[5] J. Liu et al, *Opt. Express* **24**, 1133 (2016)