

# CELLULE SOLAIRE EN TANDEM PEROVSKITE/SILICIUM AVEC UNE INGENIERIE NANOPHOTONIQUE

## Laboratoire d'accueil :

Institut des Nanotechnologies de Lyon, INL, UMR 5270

## Directeurs de thèse :

Hai Son Nguyen, Maître de Conférences ECL  
 Erwann Fourmond, Maître de Conférences INSA  
 Christian SEASSAL, Directeur de Recherche CNRS

## Composition de l'équipe encadrante :

Alain FAVE, Maître de Conférences INSA  
 Emmanuel DROUARD, Maître de Conférences ECL

**Mots-clé :** Photovoltaïque, Nanophotonique, pérovskite, cellule tandem

### 1. Contexte scientifique

Aujourd'hui, le solaire photovoltaïque est en plein développement avec le potentiel de fournir à moyen et à long terme une part significative de la production mondiale d'électricité. Cependant, la quasi-totalité de l'industrie du photovoltaïque s'articule autour des cellules solaires à base de silicium cristallin dont le record de rendement a atteint récemment 25.6% [1] - très proche de la limite intrinsèque « pragmatique » de 26% pour une cellule solaire de silicium cristallin à simple jonction [2]. Une des perspectives pour améliorer le rendement est de combiner le silicium cristallin avec un autre matériau dans une structure en tandem afin d'obtenir une cellule d'efficacité supérieure à 30% [3]. Au cours de ces trois dernières années, les organométalliques de la famille des pérovskites sont apparus comme un choix prometteur pour constituer le milieu absorbant d'une cellule photovoltaïque, avec une efficacité de conversion pouvant atteindre désormais 20.1% et des méthodes de fabrications compatibles avec la technologie silicium [4, 5, 6]. Cela place les pérovskites en tant que premier choix pour les cellules solaires en tandem avec le silicium [3]. En effet, en tant que matériau actif, la pérovskite absorbe la lumière dans la gamme de longueur d'onde visible au moins dix fois plus que le silicium cristallin, tandis que le silicium cristallin est capable d'absorber la lumière jusque dans le proche infra-rouge. Un des verrous importants à lever pour optimiser le rendement d'une telle cellule est la recherche d'un « miroir intelligent » inséré entre les deux étages du tandem, et qui soit réfléchissant pour la lumière au-dessus du gap de la pérovskite (i.e. 800nm) mais transparent pour la lumière de longueur d'onde plus grande (voir Fig.1) [3,19,20].

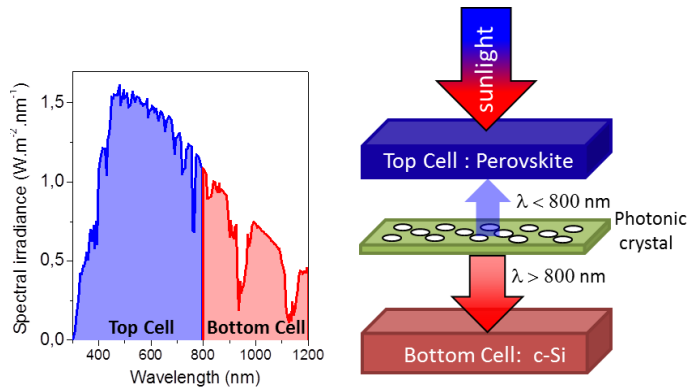


Fig 1. Schéma d'une cellule solaire tandem pérovskite/silicium avec l'implémentation d'une structure de

### 2. Projet de thèse

Dans le cadre de ce travail de thèse, l'objectif est de mettre en évidence, à la fois sur la conception et la réalisation d'un démonstrateur, l'augmentation du rendement d'une cellule tandem à 4 terminaux [3] grâce à l'implémentation des structures nanophotonique. Il s'agit de développer une structure de cristaux photoniques jouant le rôle de « miroir intelligent », qui permette d'optimiser simultanément l'absorption dans la pérovskite et dans le silicium cristallin. Ce sujet de thèse s'effectuera en collaboration avec le laboratoire Aimé Cotton (LAC) de

l'Ecole Normale Supérieure de Cachan (ENS Cachan), reconnu pour son expertise sur les pérovskites. Il se déroulera à

l'institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), au sein des deux équipes Nanophotonique et Photovoltaïque, reconnues pour les applications de la nanophotonique au photovoltaïque [7,8] ainsi que les savoir-faire dans le domaine de cellule solaire à base de silicium cristallin [9,10]. Les travaux de recherche prévus consisteront à concevoir, à fabriquer et à tester des cellules solaires fondés sur de nouveaux concepts, en exploitant trois leviers principaux :

- **La conception et la réalisation des structures de cristaux photoniques** . L'implémentation des structures de cristaux photoniques au sein des structures multicouches diélectriques permettant de contrôler la réflectivité, l'absorption et la transmission de lumière sur une gamme spectrale déterminée, et sur une gamme d'angles d'incidence très étendue. Ces contrôles sont obtenus grâce aux couplages résonants entre la lumière incidente et les modes de Bloch lents du cristal photonique [11]. L'équipe Nanophotonique de l'INL a été parmi les premiers groupes à démontrer tout l'intérêt des cristaux photoniques pour les cellules solaires photovoltaïques silicium [7,8]. Dans le cadre de ce projet, les structures de cristaux photoniques seront optimisées pour jouer le rôle du « miroir intelligent » mentionné dans le contexte scientifique. La conception des cristaux photoniques sera effectuée en exploitant les outils de simulation électromagnétiques disponibles au sein de l'INL (FDTD et RCWA). Les résultats préliminaires de simulation ont montré effectivement une augmentation théorique de 4% du rendement absolu de la cellule tandem d'un design simplifié. Les structures seront ensuite réalisées sur la plateforme technologique NanoLyon de l'INL, en utilisant plus particulièrement des moyens de nanolithographie (lithographie électronique et lithographie interférentiel) et de gravure ionique réactive disponibles au laboratoire.
- **Le dépôt des couches de pérovskites**. L'accordabilité du gap de la pérovskite de 1.5 eV jusqu'à 2.3 eV permet d'optimiser les propriétés optiques du matériau, en particulier d'avoir un gap de 1.7 eV – valeur optimale pour un tandem avec silicium cristallin. Une collaboration étroite avec le LAC de l'ENS Cachan sera un atout important pour la synthèse et l'adaptation des matériaux pérovskites, en particulier l'ingénierie du gap de pérovskite maîtrisée par au LAC [12,13]. Les dépôts des pérovskites seront ensuite réalisés sur la plateforme NanoLyon. Comme les résonances optiques introduites par les cristaux photoniques sont très sensibles à l'épaisseur optique des couches, l'homogénéité de la couche pérovskite déposée est un point crucial. Pour cela, nous envisageons d'adopter la méthode de dépôt séquentielle afin de contrôler le dépôt du composant inorganique et organique d'une manière séparément, ainsi qu'une meilleure homogénéité et cristallisation de la couche pérovskite [14]. Les expertises de l'INL sur le dépôt des matériaux organiques [15, 18], avec les bûts dédiés au NanoLyon, joueront un rôle important pour la réussite de cette tâche.
- **L'optimisation de la cellule inférieure en silicium** permet de maximiser l'absorption de cette cellule dans la gamme de longueur d'onde de proche infra-rouge et infrarouge. Le savoir-faire de l'équipe Photovoltaïque de l'INL dans le domaine du photovoltaïque en silicium cristallin et/ou en couche mince sera un atout pour réaliser cette cellule. L'intégration de la cellule pérovskite sur la cellule silicium sera faite par une méthode de report dans liquide développé lors du post-doctorat de Hai Son Nguyen, en collaboration avec l'ENS Cachan dans le cadre du projet ANR PEROCAI [16]. Il sera donc possible d'optimiser et de caractériser indépendamment chaque cellule avant de les assembler en tandem. Enfin, les caractéristiques des structures et cellules réalisés seront mesurées à l'aide des bancs de réponse spectrale et de simulateur solaire disponibles à l'INL.

### 3. Plan de travail

- **Premier année :**
  - Simulation de la structure photonique « miroir intelligent » : L'équipe Photonique de l'INL possède une expertise reconnue sur la nanostructuration des surfaces pour l'optimisation de la collecte des photons pour applications photovoltaïque; elle dispose de tous les moyens de simulations et réalisation pour ce genre de structure.
  - Développement et optimisation des dépôts de pérovskites, par technique de dépôt séquentiel : Ces dépôts se feront à l'INL, en s'appuyant sur l'expertise du LAC. Des échanges entre les deux laboratoires permettront

d'optimiser en particulier la structure de gap du matériau, pour une adéquation maximale avec la structure photonique.

- **Deuxième année :**

- Réalisation de la structure photonique, grâce aux outils de l'INL (nano-lithographie et salle blanche).
- Étude du couplage physicochimique de la structure pérovskite avec le « miroir » photonique.
- Choix et développement de la cellule sous-jacente en silicium. L'équipe photovoltaïque de l'INL possède une expertise reconnue sur les technologies de cellules en silicium cristallin, que ce soit sur des cellules en silicium massif de type industriel, mais aussi sur des couches minces épitaxiées.

- **Troisième année :**

- Assemblage des structures précédemment réalisées pour la caractérisation et l'optimisation de la structure tandem pérovskites/miroir/silicium.

#### 4. Profil du candidat

Le candidat doit avoir des connaissances et des bases solides de science des matériaux, technologie couche mince, et/ou micro-nanotechnologie, avec la motivation pour les travaux technologiques et expérimentaux.

#### Références:

- [1] <http://news.panasonic.com/press/news/official.data/data.dir/2014/04/en140410-4/en140410-4.html>
- [2] R. M. Swanson, "Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells," *Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005*, (IEEE, 2005), pp. 889-894.
- [3] N. N. Lal, T. P. White, and K. R. Catchpole, "Optics and Light Trapping for Tandem," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1380–1386, 2014.
- [4] R. F. Service, "Turning Up the Light," *Science*, vol. 342, pp. 794-797, Nov 2013.
- [5] F. Cadu A, "Pérovskite – La prochain revolution solaire," *Science&techniques*, , pp. 96-98, Oct 2014.
- [6] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, "The emergence of perovskite solar cells," *Nature photonics*, vol. 8, pp. 506-514, 2014.
- [7] Y. Park, E. Drouard, O. E. Daif, X. Letartre, P. Viktorovitch, A. Fave, A. Kaminski, M. Lemiti, and C. Seassal, "Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells," *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 14312–14321, Aug 2009.
- [8] G. Gomard, X. Meng, E. Drouard, K. El Hajjam, E. Gerelli, R. Peretti, A. Fave, R. Orobtschouk, M. Lemiti, and C. Seassal, "Light harvesting by planar photonic crystals in solar cells: the case of amorphous silicon," *Journal of Optics*, vol. 14, no. 2, p. 024011, 2012.
- [9] I. Jozwik, P. Papet, A. Kaminski, E. Fourmond, F. Calmon, and M. Lemiti, "Interdigitated back contact solar cells with SiO<sub>2</sub> and SiN back surface passivation," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 354, no. 35–39, pp. 4341–4344, 2008.
- [10] P. Papet, O. Nychyporuk, A. Kaminski, M. Lemiti, "Realization of self-aligned back-contact solar cells", *Electrochemical and Solid-State Letters*, vol.11, Issue 5, 2008, H114-H117.
- [11] X. Letartre, J. Mouette, J. L. Leclercq, P. Rojo Romeo, C. Seassal, and P. Viktorovitch, " Switching Devices With Spatial and Spectral Resolution Combining Photonic Crystal and MOEMS Structures," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 7, pp. 1691–1698, Jul 2003.
- [12] S. Zhang, P. Audebert, Yi Wei, A. Al Choueiry, G. Lanty, A. Bréhier, L. Galmiche, G. Clavier, C. Boissière, J.S. Lauret, E. Deleporte, " Preparations and Characterizations of Luminescent Two Dimensional Organic-inorganic Perovskite Semiconductors," *Materials*, vol. 3, no. 5, pp. 3385–3406, 2010.

- [13] G. Lanty, K. Jemli, Yi Wei, J. Leymarie, J. Even, J.-S. Lauret, E. Deleporte, " Room temperature optically tunability and inhomogeneous broadening in 2D-layered organic-inorganic perovskite pseudobinary alloys," *J. Phys Chem. Lett*, vol. 5, pp. 3958–3963, 2014.
- [14] J. Burschka, N. Pellet, S-J. Moon, R. Humphry-Baker, P. Gao, M. K. Nazeeruddin and M. Grätzel, "Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells," *Nature*, vol. 499, pp.316-320, Jul 2013.
- [15] D Vaufreya, M Ben Khalifaa, M.P Beslanda, C Sandub, M.G Blanchinb, V Teodorescub, J.A Rogerb, and J Tardy, "Reactive ion etching of sol-gel-processed SnO<sub>2</sub> transparent conducting oxide as a new material for organic light emitting diodes," *Synthetic Metals*, vol. 127, no 1-3, pp.207-211, Mar 2002
- [16] Z. Han, H. S. Nguyen, F. Réveret, K. Abdel-Baki, J.S Lauret, J. Bloch , S. Bouchoule and E.Deleporte, " Top-Mirror Migration for the fabrication of High-Q Planar Microcavities containing Fragile Active Materials," *Applied Physics Express*, vol 6, p. 106701, 2013.
- [17] C. Renevier, E. Fourmond, M. Forster, S. Parola, M. Le Coz, and E. Picard, "Lifetime Degradation on n-type Wafers with Boron-diffused and SiO<sub>2</sub>/SiN-passivated Surface," *Energy Procedia*, vol. 55, no. 280–286, pp. 280–286, 2014.
- [18] J. Tardy, M. Erouel, A. L. Deman, A. Gagnaire, V. Teodorescu, M. G. Blanchin, B. Canut, A. Barau, and M. Zaharescu, "Organic thin film transistors with HfO<sub>2</sub> high-k gate dielectric grown by anodic oxidation or deposited by sol-gel," *Microelectron. Reliab.*, vol. 47, no. 2–3, pp. 372–377, Feb. 2007.
- [19] Schneider, Bennett W. Lal, Niraj N. Baker-Finch, Simeon and White, Thomas P., "Pyramidal surface textures for light trapping and antireflection in perovskite-on-silicon tandem solar cells," *Optics Express*, vol. 22, no. S6, pp. A1422. 2014
- [20] P. Löper, B. Niesen, M. Bjoern, S-J. Moon, S.M. De Nicolas, J. Holovsky, Z. Remes, M. Ledinsky, F.J. Haug, J.H. Yum, S. De Wolf and C. Ballif, "Organic – Inorganic Halide Perovskites : Perspectives for Silicon-Based Tandem Solar Cells," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 6, pp. 1545–1551, Feb.2014 .