

Procédés de dépôt sous vide conforme de matériau pérovskite pour l'élaboration de cellules solaires tandem pérovskite/silicium hautement efficaces

Solenn Berson

CEA LITEN, Grenoble

Au cours des dix dernières années, les cellules solaires tandem à base de matériaux pérovskites halogénés (PK) ont montré des résultats prometteurs, dépassant les limites théoriques des cellules solaires en silicium (Si) à simple jonction. Bien que des rendements de conversion d'énergie supérieur à 34 % aient été démontrés par plusieurs équipes de recherche, de nombreux défis doivent être relevés pour transférer les dispositifs photovoltaïques de 1 cm² à l'échelle laboratoire vers des surfaces plus grandes. Dans cette perspective, le dépôt en phase vapeur de la couche absorbante semble prometteur pour élaborer une pérovskite conforme et de haute qualité sur des plaquettes de silicium industrielles texturées. Dans la littérature, les principales techniques compatibles industriellement pour la croissance de la couche PK peuvent être divisées en deux axes : i) le dépôt PK par des techniques de dépôt entièrement par phase vapeur et ii) le dépôt PK par des procédés hybrides, mélange de procédés sous vide et humides.

Au CEA, nous avons pu atteindre des rendements >30 % pour des tandem PK/Si élaborées sur une surface active de 9 cm² avec un procédé à l'échelle laboratoire. Ces résultats ont été obtenus sur des plaquettes de silicium CMP, dont le coût n'est pas compatible avec les exigences industrielles. De nouveaux procédés doivent être développés pour permettre notamment le dépôt de couches de pérovskite sur des plaquettes Cz texturées ou polies chimiquement.

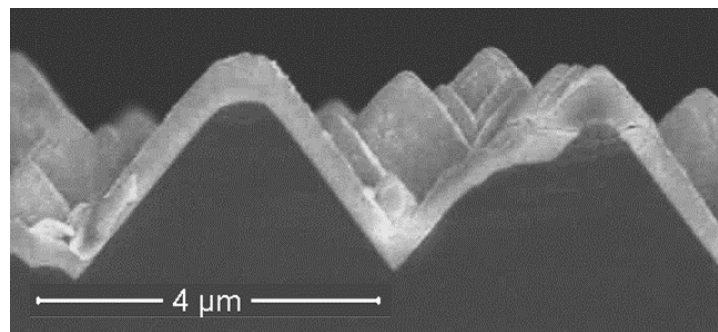
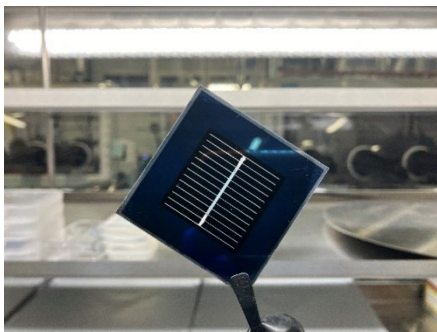


Figure 1. Photo d'une cellule tandem Pérovskite/silicium sur substrat 5x5cm² (à gauche) ; image MEB en coupe d'une couche pérovskite conforme déposée par voie sous vide sur sous cellule silicium (à droite) (© CEA)

Dans une première partie, nous avons proposé le dépôt laser pulsé (PLD) comme méthode sous vide prometteuse pour fabriquer des pérovskites inorganiques uniformes sur des substrats de 707 cm² (surface > G12). Plusieurs couches de contact (ITO, SnO₂ et NiO_x) ont dans un premier temps été développées par PLD, puis nous avons démontré le dépôt de CsPbI₂Br et CsPbI₃ sur des plaquettes de 300 mm, présentant des maxima de photoluminescence (PL) à $\lambda=648$ nm (~1,91 eV) et 700 nm (~1,77 eV) se rapprochant des gaps souhaités pour les tandem. Les films présentent une excellente uniformité : déviation de 0,8 % pour l'épaisseur et 0,2 % pour la longueur d'onde PL. L'intégration finale en dispositif photovoltaïque et les mesures de performance sont en cours. L'objectif est pour l'avenir d'augmenter le taux de croissance actuel de 8 nm/min à 20 Hz à 125 nm/min en utilisant un système PLD industriel fonctionnant à 300 Hz, soulignant ainsi davantage la PLD comme une voie prometteuse pour la fabrication de cellules solaires à base de pérovskite à grande échelle.

Dans une deuxième partie, nous avons développé un procédé de dépôt hybride combinant co-évaporation thermique, sublimation en espace confiné (CSS) et étape de solvant pour l'élaboration d'une couche de pérovskite organique-inorganique. À l'aide de différentes techniques de caractérisation (diffraction des rayons X, spectroscopie de photoélectrons X, microscope électronique à balayage, etc.), les propriétés structurales et chimiques de la matrice inorganique ont été étudiées ; l'objectif étant de comprendre comment l'homogénéité, la porosité et la composition de la première couche affectent la croissance du film PK final. Simultanément, les facteurs clés influençant le mécanisme de cristallisation lors de la deuxième étape humide ont été identifiés. Le CEA a pu ainsi élaborer une cellule tandem PK/Si sur des plaquettes silicium nanotexturées Cz industrielles avec une efficacité de 25 % sur une surface active de 9 cm², combinant co-évaporation et conversion humide.

La dernière partie a été consacrée à l'évaluation de la stabilité de l'architecture tandem PK/Si en conditions extérieures et de vieillissement accéléré. La modification et l'optimisation de la couche d'interface de type p ont conduit à une forte amélioration de la stabilité des dispositifs avec des performances maintenues sur 6 mois fonctionnement en conditions réelles de fonctionnement.

Acknowledgements:

CEA, Carnot Energy, une partie des travaux sur le procédé hybride a bénéficié d'une aide de l'état générée par l'Agence Nationale de la Recherche pour France 2030 et référencée 22-PETA-00005 (PEPR TASE IOTA). Financement et collaboration de 3SUN.