



**HAL**  
open science

# Conception et intégration d'une interface photothermique nanostructurée au sein de dispositifs de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique

Sébastien Hanauer, Adnen Mlayah, Sélyan Beldjoudi, Ihar Faniaye, Alexandre Dmitriev, Inès Massiot, Franck Carcenac, Jean Baptiste Doucet

## ► To cite this version:

Sébastien Hanauer, Adnen Mlayah, Sélyan Beldjoudi, Ihar Faniaye, Alexandre Dmitriev, et al.. Conception et intégration d'une interface photothermique nanostructurée au sein de dispositifs de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique. Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage de l'Energie (JNRSE 2023), Jun 2023, Paris, France. hal-04127933

**HAL Id: hal-04127933**

**<https://hal.science/hal-04127933>**

Submitted on 14 Jun 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Conception et intégration d'une interface photothermique nanostructurée au sein de dispositifs de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique

Sébastien HANAUER<sup>1</sup>, Inès MASSIOT<sup>1</sup>, Adnen MLAYAH<sup>1</sup>, Franck CARCENAC<sup>1</sup>, Jean-Baptiste DOUCET<sup>1</sup>, Sélyan BELDJOUDI<sup>1</sup>, Ihar FANIAYEU<sup>2</sup>, Alexandre DMITRIEV<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup>LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse, France,  
<sup>2</sup>Department of Physics, University of Gothenburg, 41296 Gothenburg, Sweden  
*Corresponding author e-mail: shanauer@laas.fr*

**Abstract**—L'objectif du travail présenté ici est de développer une interface photothermique composée de nanoantennes capables d'absorber le rayonnement solaire infrarouge pour le convertir en chaleur. Cette étude s'étend de la conception des nanoantennes individuelles par simulations électromagnétiques à la réalisation expérimentale d'interfaces photothermiques nanostructurées montrant un échauffement de plus de 7°C sous le rayonnement solaire infrarouge. Cette interface a vocation à être intégrée au sein de dispositifs de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique, afin d'en augmenter l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité. Nous présentons donc ici un outil de modélisation multiphysique destiné à étudier l'impact d'une telle interface sur les performances du système photovoltaïque-thermoélectrique.

**Index Terms**—photovoltaïque, thermoélectrique, photothermique, nanostructures

## I. CONTEXTE ET OBJECTIF

Les performances des cellules photovoltaïque (PV) mono-jonctions sont limitées par des pertes intrinsèques, dont les principales sont la thermalisation des photons de haute énergie, qui a pour effet d'augmenter la température de la cellule et d'en réduire le rendement, et la non-absorption des photons de basse énergie. Afin d'exploiter ces pertes, une approche consiste à combiner la cellule solaire avec un générateur thermoélectrique (TEG), un dispositif capable de convertir un flux de chaleur en énergie électrique [1]. Les gains en rendement démontrés par ces systèmes hybrides photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TE) sont notables mais encore faibles, ce qui est notamment dû aux faibles rendements des générateurs thermoélectrique. Plusieurs travaux ont commencé à s'intéresser à l'interface physique entre la cellule PV et le TEG, dont les propriétés (en particulier optiques et thermiques) peuvent avoir un fort impact sur le rendement global du système. Il a ainsi été montré que réduire la résistance thermique de cette interface permettrait d'améliorer l'extraction de chaleur depuis la cellule PV vers le TEG [2], [3]. Pour aller plus loin dans le couplage entre la cellule PV et le TEG, une approche émergente consiste à intégrer une couche photothermique, destinée à absorber l'énergie des photons infrarouges transmis à travers la cellule solaire et à la convertir en énergie thermique pouvant être

exploitée par le TEG [4]–[7]. Nous proposons ici de concevoir une interface photothermique munie de nanoantennes thermo-plasmoniques, et d'étudier l'impact de son intégration au sein d'un système PV-TE sur les performances de ce dernier, le schéma de principe d'un tel système étant présenté en figure 1. L'utilisation de nanoantennes permet d'accorder le spectre d'absorption de l'interface au spectre lumineux transmis par la cellule PV, tout en maintenant une faible épaisseur et, ainsi, une faible résistance thermique.

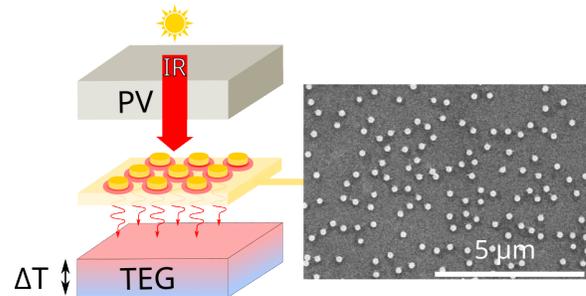


Fig. 1. Schéma de principe d'un système photovoltaïque-thermoélectrique intégrant une interface nanostructurée photothermique. Extrait de [8].

Nous présenterons l'étude de conception et d'intégration d'une interface photothermique nanostructurée au sein de systèmes de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique, structurée en trois volets, la conception numérique de nanoantennes isolées pour l'absorption infrarouge solaire, la réalisation de démonstrateurs d'interfaces photothermiques à l'aide de techniques de nanofabrication afin de caractériser leur échauffement sous illumination et enfin la mise au point d'un outil numérique multiphysique dont le rôle est d'évaluer l'impact des interfaces réalisées sur la puissance électrique générée par un dispositif PV-TE.

## II. SIMULATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES SUR NANOPARTICULES ISOLÉES

Avant même de fabriquer les premières structures, nous avons réalisé une étude numérique afin d'identifier les nanoantennes les plus prometteuses pour l'absorption infrarouge

solaire. Dans cette optique, nous avons utilisé la méthode de l'approximation des dipôles discrets pour simuler l'absorption de différents types de particules, en faisant varier leur composition, géométrie et dimensions. Suite à cette étude, nous avons identifié la géométrie de diabolo comme étant plus efficace pour l'application visée car faisant montre d'une bonne superposition entre le spectre solaire infrarouge incident et le spectre d'absorption de la particule.

### III. FABRICATION ET CARACTÉRISATION D'INTERFACES PHOTOTHERMIQUES NANOSTRUCTURÉES

Nous avons ensuite fabriqué et caractérisé par thermographie infrarouge sous illumination par un simulateur solaire des démonstrateurs d'interfaces photothermiques nanostructurées présentés sur la figure 2A-C. Des arrangements de nanocônes tronqués faits de différents métaux ont été fabriqués par lithographie colloïdale.

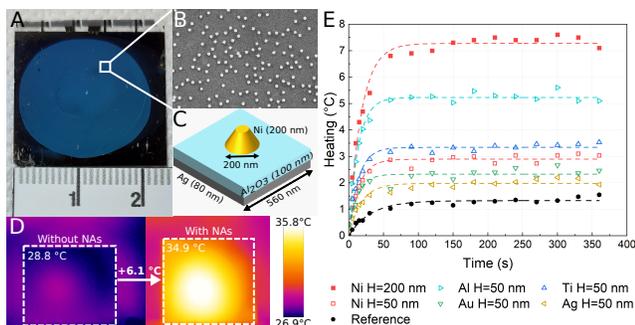


Fig. 2. Réalisation d'une interface nanostructurée fabriquée par lithographie colloïdale : (A) photographie, (B) image MEB et (C) schéma. (D) Thermogrammes montrant la différence de température obtenue entre un échantillon de référence sans nanoantennes et un échantillon recouvert de nanocones de nickel de 200 nm d'épaisseur, sous illumination infrarouge par un simulateur solaire. (E) Evolution de l'échauffement d'interfaces photothermiques pour différentes composition et épaisseurs de nanoantennes. Extrait de [8].

Comme indiqué sur la figure 2E, des nanoparticules de différentes compositions et épaisseurs ont été étudiées. Dans tous les cas, l'échauffement final de l'échantillon est supérieur à celui de la référence, avec des hausses de température allant de 2°C à 7.1 °C. Pour aller plus loin, l'échauffement par particule a été estimé à partir de mesures de la densité surfacique de nanoantennes réalisées en se basant sur des observations MEB. Cela a permis de mettre en évidence que l'optimisation de la température globale d'une interface photothermique nanostructurée requiert de combiner une forte densité de nanoantennes et une forte capacité d'absorption et de conversion photothermique par les nanoantennes individuellement.

### IV. MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DU SYSTÈME COMPLET

Puisque l'interface photothermique nanostructurée a vocation à être intégrée au sein d'un dispositif de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique, il est important de prendre en compte son effet sur le système complet. Dans ce cadre, nous avons mis en place un outil numérique multiphysique basé

sur une combinaison de simulations optiques, d'équations de transport thermique et de modèles électriques. Cet outil prend en entrée les propriétés structurales, optiques, thermiques et électriques d'une cellule PV, d'un générateur thermoélectrique et d'une interface photothermique, pour calculer la température à chaque interface du système, ainsi que la puissance électrique générée par la cellule PV et le générateur thermoélectrique.

Cette méthode permet, pour une cellule PV et un TEG donnés, d'estimer l'impact de l'ajout d'une interface photothermique sur la puissance générée par le système. Ainsi, il est possible d'optimiser l'interface, notamment en modifiant les propriétés du substrat et de l'encapsulant des nanoantennes, pour identifier les paramètres optimaux pour l'application visée.

### V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté une étude complète de développement d'une interface photothermique nanostructurée pour la conversion du rayonnement infrarouge solaire, incluant notamment la réalisation expérimentale de premiers démonstrateurs avec un échauffement sous illumination infrarouge solaire allant jusqu'à +7.1 °C. Les études numériques et expérimentales ainsi réalisées permettent d'ouvrir la voie vers l'intégration de nanoantennes thermoplasmoniques pour la réalisation de dispositifs de cogénération PV-TE à haut rendement de conversion.

### ACKNOWLEDGMENT

Ces travaux ont été soutenus par la plateforme de micro et nanotechnologies du LAAS-CNRS, membre du réseau RENATECH, ainsi que par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), sous la référence ANR-21-CE50-0003 (projet HYDRES).

### REFERENCES

- [1] B. Lorenzi, M. Acciarri, and D. Narducci, "Conditions for beneficial coupling of thermoelectric and photovoltaic devices," *Journal of Materials Research*, vol. 30, pp. 2663–2669, Sept. 2015.
- [2] Y. Park, K. Cho, S. Yang, T. Park, S. Park, H.-e. Song, S. M. Kim, and S. Kim, "Performance of Hybrid Energy Devices Consisting of Photovoltaic Cells and Thermoelectric Generators," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, pp. 8124–8129, Feb. 2020.
- [3] J. Zhang, H. Zhai, Z. Wu, Y. Wang, H. Xie, and M. Zhang, "Enhanced performance of photovoltaic–thermoelectric coupling devices with thermal interface materials," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 116–122, Nov. 2020.
- [4] T. Park, J. Na, B. Kim, Y. Kim, H. Shin, and E. Kim, "Photothermally Activated Pyroelectric Polymer Films for Harvesting of Solar Heat with a Hybrid Energy Cell Structure," *ACS Nano*, vol. 9, pp. 11830–11839, Dec. 2015.
- [5] N. Wang, L. Han, H. He, N.-H. Park, and K. Koumoto, "A novel high-performance photovoltaic–thermoelectric hybrid device," *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 9, p. 3676, 2011.
- [6] Y. J. Kim, H. Choi, C. S. Kim, G. Lee, S. Kim, J. Park, S. E. Park, and B. J. Cho, "High-Performance Monolithic Photovoltaic–Thermoelectric Hybrid Power Generator Using an Exothermic Reactive Interlayer," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 2, pp. 2381–2386, Apr. 2019.
- [7] Y. Park, K. Cho, and S. Kim, "Performance Prediction of Hybrid Energy Harvesting Devices Using Machine Learning," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, pp. 11248–11254, Mar. 2022.
- [8] S. Hanauer, I. Massiot, A. Mlayah, F. Carcenac, J.-B. Doucet, S. Beldjoudi, I. Faniayeu, and A. Dmitriev, "Photothermal Conversion of Solar Infrared Radiation by Plasmonic Nanoantennas for Photovoltaic–Thermoelectric Hybrid Devices," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 6, pp. 2128–2133, Feb. 2023.