



HAL
open science

Interface photothermique à base de nanoantennes thermoplasmoniques pour la récupération d'énergie infrarouge solaire au sein de dispositifs hybrides photovoltaïques-thermoélectriques

Sébastien Hanauer, Inès Massiot, Adnen Mlayah, Emmanuelle Daran, Sélyan Beldjoudi, Alexander Dmitriev, Ihar Faniayeu, Jean Baptiste Doucet, Franck Carcenac

► To cite this version:

Sébastien Hanauer, Inès Massiot, Adnen Mlayah, Emmanuelle Daran, Sélyan Beldjoudi, et al.. Interface photothermique à base de nanoantennes thermoplasmoniques pour la récupération d'énergie infrarouge solaire au sein de dispositifs hybrides photovoltaïques-thermoélectriques. Journées Plénières du Groupe de Recherche NAME (NANoMaterials for Energy applications), Oct 2022, Lyon, France. hal-04128261

HAL Id: hal-04128261

<https://hal.science/hal-04128261>

Submitted on 15 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.

Interface photothermique à base de nanoantennes thermoplasmoniques pour la récupération d'énergie infrarouge solaire au sein de dispositifs hybrides photovoltaïques-thermoélectriques

Sébastien HANAUER^{1*}, Inès MASSIOT¹, Adnen MLAYAH¹, Sélyan BELDJOUUDI¹, Franck CARCENAC¹, Jean-Baptiste DOUCET¹, Emmanuelle DARAN¹, Ihar FANIAYEU² et Alexander DMITRIEV²

¹ LAAS-CNRS, Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, 31400 Toulouse, France

² Department of Physics, University of Gothenburg, 41296 Göteborg, Sweden

*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 interface a vocation à être intégrée au sein de dispositifs de cogénération photovoltaïque-thermoélectrique, afin d'augmenter l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité. Nous présenterons en particulier la réalisation de premiers démonstrateurs d'une interface photothermique à base de nanoantennes en Ni, conduisant à un échauffement de +6,1 °C.

I. CONTEXTE ET MOTIVATIONS

Alors que le rendement énergétique des cellules photovoltaïques (PV) mono-jonction s'approche des 30 % [1], les limitations intrinsèques de ces dispositifs rendent leur amélioration de plus en plus difficile. En effet, par le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque, les photons dont l'énergie est trop faible pour franchir la bande interdite du semiconducteur ne sont pas absorbés, tandis que les photons de haute énergie sont en partie thermalisés, ce qui a pour effet d'augmenter la température de la cellule et de réduire son efficacité de conversion. Pour pallier ces limitations, il est possible d'adjoindre un générateur thermoélectrique (TEG) à la cellule photovoltaïque afin de tirer profit de l'excédent de chaleur [2-4]. Cependant, même dans ce cas, les photons de basse énergie non absorbés par la cellule PV ne sont pas utilisés, alors qu'ils représentent 35% de l'énergie solaire disponible pour une cellule à base de GaAs. Ainsi, afin de maximiser le rendement de dispositifs hybrides photovoltaïque-thermoélectriques (PV-TE), une approche consiste à ajouter une interface photothermique à haute absorption infrarouge entre la cellule PV et le TEG, afin de convertir les photons non absorbés par la cellule en chaleur pouvant être exploitée par le TEG [5-7].

Dans ce contexte, notre approche repose sur l'utilisation de nanoantennes plasmoniques pour optimiser les performances de conversion photothermique du rayonnement solaire infrarouge. L'objet des travaux que nous présentons est la conception d'une telle interface photothermique afin de l'intégrer à terme au sein de dispositifs de cogénération PV-

TE incluant une cellule solaire GaAs. Afin de remplir son rôle de façon optimale, cette interface doit donc posséder une haute absorption optique dans le domaine 0.875 – 2.5 μm , ainsi qu'une bonne conversion photothermique. Il est également nécessaire qu'elle soit électriquement isolante mais thermiquement conductrice, afin de favoriser l'extraction de chaleur de la cellule PV vers le TEG.

II. CONCEPTION, FABRICATION ET CARACTERISATION D'UNE INTERFACE PHOTOTHERMIQUE NANOSTRUCTUREE

A. Simulations électromagnétiques de nanoantennes isolées

Nous présenterons les résultats de simulations numériques menées par la méthode DDA (Approximation dipolaire discrète) sur des nanoantennes isolées pour étudier l'impact de la composition, de la géométrie et des dimensions des nanoantennes sur leurs propriétés optiques. Nous montrerons, par le calcul de la puissance absorbée dans la gamme solaire infrarouge, comment ces résultats permettent d'identifier les structures les plus favorables vis-à-vis de l'application visée.

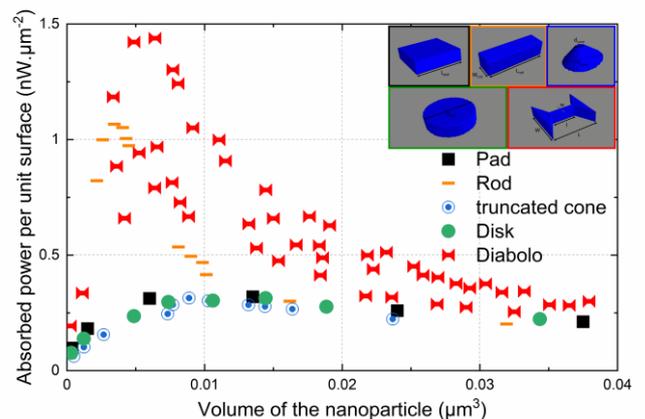


FIGURE 1. PUISSANCE SOLAIRE ABSORBÉE SUR LA GAMME 0,875-2,5 μm , NORMALISÉE PAR LA SURFACE, POUR DES NANOANTENNES EN NICKEL DE DIFFÉRENTES FORMES ET DIMENSIONS, CALCULÉE AVEC DDSCAT [8]; INSERT : SCHEMAS DES CIBLES UTILISÉES POUR LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES.

B. Fabrication et caractérisation d'une interface photothermique

Nous avons réalisé expérimentalement deux démonstrateurs différents d'une interface photothermique. Le premier est basé sur un arrangement périodique de nano-antennes de géométrie diabololo, précédemment identifiées comme prometteuses par les simulations électromagnétiques, et a été fabriqué par lithographie électronique. Nous nous appuyerons sur les mesures MEB et AFM pour discuter de l'impact des défauts de fabrication sur les propriétés optiques des nanoantennes (Fig. 2).

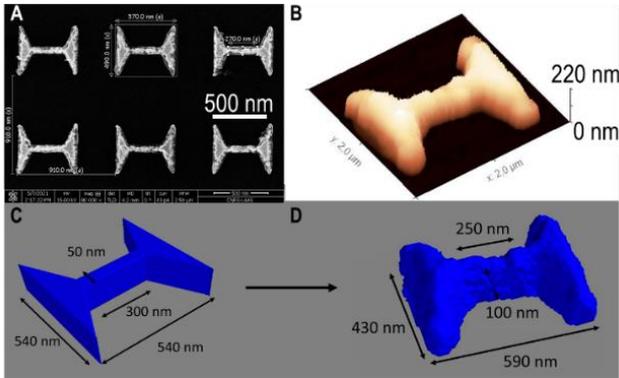


FIGURE 2. IMAGES MEB (A) ET AFM (B) DE DIABOLOLOS EN NICKEL SUR SUBSTRAT DE SILICIUM; CIBLES DE SIMULATION PARFAITE (C) ET REALISTE (D) RECONSTRUITE A PARTIR DU PROFIL AFM.

Le second démonstrateur, réalisé par lithographie colloïdale sur une surface de plus d'1 cm² (Fig. 3A), présente un arrangement désordonné de nanoantennes en Ni de géométrie conique, déposé sur un substrat de verre préalablement recouvert d'une couche d'argent et d'alumine (Fig. 3B). Nous présenterons les caractérisations optique (spectroscopie à transformée de Fourier) et thermique (thermométrie infrarouge) de ce démonstrateur. Nous avons ainsi mesuré un échauffement prometteur de +6,1 °C par rapport au substrat nu, dans des conditions d'illumination proches de celles de l'application visée (Fig. 3C).

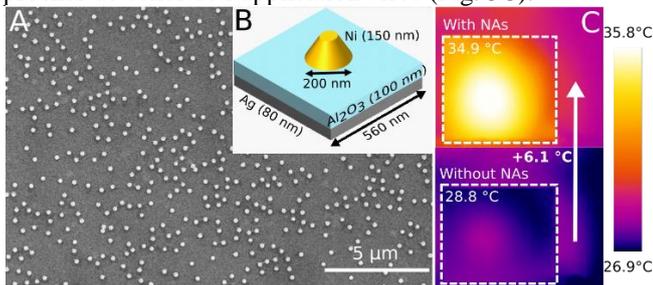


FIGURE 3. A : IMAGE MEB DU DEMONSTRATEUR REALISE PAR LITHOGRAPHIE COLLOÏDALE. B : SCHEMA DU DEMONSTRATEUR REPRESENTANT UN NANOCONE EN NI SUR SUBSTRAT AG/AL₂O₃. C : IMAGES THERMIQUES DE LA FACE ARRIERE DE L'INTERFACE PHOTOTHERMIQUE ET DU SUBSTRAT DE REFERENCE, DONT LA FACE AVANT EST ILLUMINEE PAR UN SIMULATEUR SOLAIRE (AM 1.5G 0,875-2,5 μM).

III. VERS UNE MODELISATION OPTO-THERMIQUE DE L'INTERFACE PHOTOTHERMIQUE

Pour finir, nous montrerons que la prise en compte du substrat dans les simulations optiques permet d'obtenir un bon accord avec les spectres d'absorption expérimentaux réalisés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. Ces résultats ont été utilisés comme paramètre d'entrée d'un modèle thermique analytique pour estimer l'échauffement produit sous illumination solaire infrarouge par des échantillons recouverts de nanoantennes de différentes formes et dimensions, en faisant varier le taux de recouvrement surfacique. Ce modèle pourra être étendu pour inclure une cellule PV ainsi qu'un TEG, et ainsi calculer la température à tout point du système complet.

IV. CONCLUSION

En conclusion, nous montrerons comment les études numériques et expérimentales réalisées permettent d'ouvrir la voie vers l'intégration de nanoantennes thermoplasmoniques au sein de dispositifs de cogénération PV-TE. Nous discuterons en particulier de la prise en compte des défauts de fabrication, de l'impact du substrat et du matériau d'encapsulation des nanoantennes.

REMERCIEMENTS

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] NREL, "NREL best research-cell efficiencies chart", <http://nrel.gov>, 2022.
- [2] B. Lorenzi, M. Acciarri and D. Narducci, "Analysis of Thermal Losses for a Variety of Single-Junction Photovoltaic Cells: An Interesting Means of Thermoelectric Heat Recovery", *J. El. Mat.*, Vol. 44, No. 6, 1809-1813, 2014.
- [3] B. Lorenzi, P. Mariani, A. Reale, A. Di Carlo, G. Chen and D. Narducci, "Practical development of efficient thermoelectric-photovoltaic hybrid systems based on wide-gap solar cells", *Applied Energy*, Vol. 300, 117343, 2021.
- [4] G. Contento, B. Lorenzi, A. Rizzo and D. Narducci, "Efficiency enhancement of a-Si and CZTS solar cells using different thermoelectric hybridization strategies", *Energy*, Vol. 131, 230-238, 2017.
- [5] 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, No. 12, 11830-11839, 2015.
- [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, No. 4, 2381-2386, 2019.
- [7] Y. Park, K. Cho, S. Yang, T. Park, S. Park, H. 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, No 7, 8124-8129, 2020.
- [8] B.T. Draine & P.J. Flatau, "Discrete dipole approximation for scattering calculations", *J. Opt. Soc. Am. A*, 11, 1491-1499 (1994).