

Méta-matériaux à base de Black Silicon : caractérisation des échanges thermiques et énergétiques aux interfaces

Co-encadrants : Georges Hamaoui et Elyes Nefzaoui
Directeur de thèse : Philippe Basset
Laboratoire ESYCOM / ED MSTIC

Contexte

Les efforts de gestion de la chaleur visant à contrôler et à réduire les pertes thermiques dans les nouveaux composants électroniques nécessitent l'élaboration de nouveaux matériaux micro/nano-structurés dont il est possible de contrôler les propriétés comme la diffusivité, l'effusivité thermiques ou la résistance/conductance thermique d'interface^{1,2} afin d'améliorer les performances et la fiabilité des systèmes.^{3,4} Le but est d'améliorer les performances des systèmes électroniques en intervenant aux échelles nano- et micro- métriques, les niveaux de dissipation de chaleur à ces petites échelles pouvant être extrêmement élevés. Par ailleurs, les applications de récupération d'énergie thermique ou de refroidissement nécessitent également une gestion de l'énergie à l'échelle nanométrique.⁵ Le développement de techniques expérimentales⁶ appropriées est alors essentiel pour mesurer, comprendre et maîtriser les propriétés thermophysiques de ces nouveaux matériaux, ainsi que leurs couplages.

Le Black Silicon (BSi), matériau au cœur de cette thèse, est le résultat d'une structuration « bottom-up » du silicium à l'échelle sub-micronique sur laquelle le laboratoire ESYCOM travaille depuis de nombreuses années.⁷⁻⁹ En particulier, en raison de sa morphologie spécifique, il est bien connu pour son excellente absorption de près de 100% de la lumière visible incidente.^{8,9} Le BSi a aussi des propriétés de conversion photothermique solaire^{10,14} et des propriétés d'antireflet à la fois dans le visible et l'infrarouge^{11,12} qui peuvent conférer des possibilités de rectification dans des systèmes innovants pour les applications de dissipation thermique. Ses propriétés optiques fascinantes^{10,13,14} lui permettent d'être une cible privilégiée pour optimiser le transfert thermique radiatif.^{7,13} Il a aussi attiré l'attention en thermoélectricité.¹⁵ De plus, les propriétés originales de ce matériau sont contrôlables en faisant varier plusieurs paramètres morphologiques (profondeur de gravure, rapport d'aspect des nanostructures) et électroniques (dopage) notamment.⁷⁻⁹

Sujet de la thèse

Alors que la littérature scientifique s'est jusqu'à présent essentiellement focalisée sur les propriétés optiques du BSi, nous nous intéresserons dans cette thèse exploratoire à ses propriétés thermiques et radiatives. Cette thèse s'inscrit dans la continuité d'un projet exploratoire I-Site FUTURE « CATBSI » qui arrive à terme en août 2022 et qui a donné des résultats préliminaires encourageants en ce qui concerne les propriétés conductives du BSi. Deux objectifs scientifiques et technologiques doivent être abordés pour répondre à cette problématique :

1) Fabrication de nouveaux types de métamatériaux basés soit sur : i) des couches minces (de quelques nano à quelques micromètres) en BSi sur des substrats à base de semi-conducteurs, polymères ou bien de matériaux à changement de phase ; soit sur ii) des nanocomposites à base de BSi avec des nano-inclusions de nanotubes de carbone, de graphène et de diamant. Ce type de fonctionnalisation s'est d'ailleurs déjà révélé adapté pour l'amélioration des propriétés optiques.¹⁶ La fabrication des matériaux à base de BSi sera principalement réalisée dans les salles blanches de l'Université Gustave Eiffel/ESIEE Paris.

2) Conception et mise en place de nouvelles techniques expérimentales pour la caractérisation des métamatériaux fabriqués dans la phase 1. Pour les applications thermiques (rectification, refroidissement, ou autre)¹⁷, il sera intéressant d'étudier la dépendance à la température des différentes propriétés thermophysiques des matériaux considérés. Ces propriétés étant jusqu'à présent essentiellement étudiées à température ambiante, une caractérisation systématique de leur dépendance à la température est nécessaire. L'étude de leurs propriétés

thermiques et radiatives s'appuiera sur la mise en place d'une mesure de conductivité thermique par la méthode 3-omega et d'une conception d'un banc expérimental pour la mesure d'émissivité par spectroscopie et microscopie FTIR. Les résultats expérimentaux seront ensuite combinés à des calculs analytiques ou des simulations numériques pour extraire les propriétés escomptées. L'objectif sera de fournir des solutions pour améliorer le transport de chaleur aux interfaces et ainsi contrôler les transferts thermiques (conductif et radiatif).

Profil recherché

Le/la candidat(e) devra avoir un profil de physicien(ne) et des connaissances en sciences des matériaux, optique, thermodynamique et transferts thermiques/énergétique. Des connaissances en traitement du signal, en langage Matlab/Python, du logiciel LabVIEW, ainsi qu'une expérience en simulation numérique avec la méthode des éléments finis de type *COMSOL multiphysics* seront un plus. Il (elle) doit être motivé(e) pour mener des travaux à la fois théoriques et expérimentaux (instrumentation, mesure, conception et analyse). Une bonne maîtrise de l'anglais écrit/parlé ainsi qu'une bonne aptitude au travail en équipe dans un environnement international sont indispensables. Une attention particulière sera accordée à la maturité et l'autonomie du (de la) candidat(e).

Contact

Georges Hamaoui

Enseignant-chercheur à l'ESIEE Paris et au laboratoire ESYCOM

georges.hamaoui@univ-eiffel.fr

Les candidats potentiels sont encouragés à contacter Georges Hamaoui (coordonnées ci-dessus) pour plus d'informations. Les candidatures (lettre de motivation, CV, notes de Master et lettres de recommandation) doivent être adressées à Georges Hamaoui.

Informations pratiques

Date de début et durée

Le/la candidat(e) devrait débuter le 1^{er} octobre 2022 pour une durée exacte de trois ans (36 mois).

Salaire

Le/la candidat(e) postulera sur un contrat doctoral de l'UGE financé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) pour une rémunération mensuelle d'environ 1900 euros brut par mois. Ce salaire peut être majoré d'environ 300 euros par mois si le doctorant est aussi recruté pour un poste d'assistant d'enseignement (64 heures par an).

Location géographique

Le/la candidat(e) travaillera au sein du laboratoire ESYCOM, à Champs-sur-Marne, sur le campus de Marne-la-Vallée de l'Université Gustave Eiffel. Le centre de Paris est à moins de 20 minutes en transports en commun.

Logement

L'université peut aider les doctorants étrangers à trouver un logement à un prix abordable.

Le laboratoire ESYCOM s'inscrit dans les domaines de l'ingénierie des systèmes de communication, des capteurs et des microsystèmes pour la ville, l'environnement et la personne.

Les thèmes abordés sont plus spécifiquement :

- *Les antennes et propagation en milieux complexes, les composants photoniques - micro-ondes ;*
- *Les microsystèmes pour l'analyse de l'environnement et la dépollution, pour la santé et l'interface avec le vivant ;*
- *Les micro-dispositifs de récupération d'énergie ambiante mécanique, thermique ou électromagnétique.*

Black Silicon-based meta-materials: characterization of thermal and energy exchanges at interfaces

Co-supervisors: Georges Hamaoui and Elyes Nefzaoui
Thesis director: Philippe Basset
Laboratory ESYCOM / ED MSTIC

Context

Heat management efforts aiming at controlling and reducing thermal losses in new electronic components require the development of new micro/nano-structured materials whose properties such as thermal diffusivity, thermal effusivity or the interfacial thermal resistance/conductance can be controlled^{1,2} in order to improve the performance and reliability of systems.^{3,4} The aim is to improve the performance of electronic systems by intervening at the nano- and micrometric scales, where the levels of heat dissipation at these small scales can be extremely high. In addition, applications such as thermal energy harvesting or cooling also require energy management at the nanoscale.⁵ The development of appropriate experimental techniques⁶ is therefore essential to measure, understand and control the thermophysical properties of these new materials, as well as their couplings.

Black Silicon (BSi), the material at the heart of this thesis, is the result of a "bottom-up" structuring of silicon at the sub-micron scale on which the ESYCOM laboratory has been working for many years.⁷⁻⁹ In particular, due to its specific morphology, it is well known for its excellent absorption of almost 100% of incident visible light.^{8,9} BSi also has solar photothermal conversion properties^{10,14} and anti-reflective properties in both the visible and infrared spectra^{11,12} which can provide rectification possibilities in innovative systems for heat dissipation applications. Its fascinating optical properties^{10,13,14} allow it to be a privileged target for optimizing radiative heat transfer.^{7,13} It has also attracted attention in thermoelectricity.¹⁵ In addition, the original properties of this material can be controlled by varying several morphological (etching depth, aspect ratio of nanostructures) and electronic (doping) parameters in particular.⁷⁻⁹

Thesis subject

While the scientific literature has so far mainly focused on the optical properties of BSi, we will focus in this thesis on its thermal and radiative properties for heat management in electronic components, for example. This thesis will be the continuation of an exploratory project I-Site FUTURE "CATBSI" which ends in June 2022, the preliminary results of which relating to the characterization of the conductive properties of BSi samples are encouraging.

Two scientific and technological objectives must be addressed to address this issue:

1) Fabrication of new types of metamaterials based either on i) thin layers (from a few nanometers to a few micrometers) of BSi on substrates based on semiconductors, polymers, or phase change materials; or on ii) BSi-based nanocomposites with nano-inclusions of carbon nanotubes, graphene and diamond. This type of functionalization has already proven to be suitable for improving optical properties.¹⁶ The manufacturing of BSi-based materials will mainly be carried out in the clean rooms of the University Gustave Eiffel/ESIEE Paris.

2) Design and implementation of new experimental techniques for the characterization of the meta-materials fabricated in phase 1. For thermal applications (rectification, cooling, or other),¹⁷ it will be interesting to study the temperature dependence of the different thermophysical properties of the considered materials. These properties being so far mainly studied at room temperature, a systematic characterization of their temperature dependence is necessary. The study of their thermal and optical properties will be based on the implementation of a measurement of thermal conductivity by the 3-omega method and a design of an experimental bench for the measurement of emissivity by spectroscopy and microscopy, FTIR. The experimental results will then be combined with theoretical/numerical simulations (e.g., by finite elements) to extract the expected properties. The objective

will be to provide solutions to improve heat transport at interfaces and thus control heat transfer (conductive and radiative).

Required profile

The candidate must have a physicist profile and knowledge in materials science, optics, thermodynamics and heat/energy transfers. Knowledge of signal processing, MATLAB / Python language, LabVIEW software, as well as experience in numerical simulation with the *COMSOL multiphysics* finite element method will be a plus. He (she) must be motivated to carry out both theoretical and experimental work. A good command of written / spoken English is essential, as well as a good aptitude for teamwork in an international environment.

Contact

Georges Hamaoui

Assistant Professor at ESIEE Paris and ESYCOM laboratory

georges.hamaoui@univ-eiffel.fr

Prospective applicants are encouraged to contact Georges Hamaoui (contact details above) for more information. Applications (a cover letter, a CV, Master's grades and recommendation letters) have to be sent to Georges Hamaoui.

Practical information

Starting date and duration

The PhD is expected to start on October 1st 2022 for an exact duration of three years (36 months).

Salary

The candidate will apply for a doctoral contract from the UGE funded by the Ministry of Higher Education, Research and Innovation (MESRI) for a monthly gross remuneration of approximately 1900 euros per month. This salary can be increased by around 300 euros per month if the doctoral student is also recruited for a teaching assistant position (64 hours per year).

Geographical location

The candidate will work in the ESYCOM laboratory, in Champs-sur-Marne, on the Marne-la-Vallée campus of the Gustave Eiffel University. The center of Paris is less than 20 minutes by public transport.

Housing

The university can help foreign PhD students to find housing at an affordable price.

ESYCOM Laboratory works mainly in the fields of engineering of communication systems, sensors and microsystems for the city, the environment and the person.

The topics covered are more specifically:

- *Antennas and propagation in complex media, photonic components - microwaves;*
- *Microsystems for environmental analysis and pollution control, for health and the interface with living organisms;*
- *Micro-devices for recovering ambient mechanical, thermal or electromagnetic energy.*

References

- ¹ A. Gore, *An Inconvenient Truth: The Planetary Emergency of Global Warming and What We Can Do about It* (Rodale Press, 2006).
- ² E. Pop, *Nano Res.* **3**, 147 (2010).
- ³ S. Chu and A. Majumdar, *Nature* **488**, 294 (2012).
- ⁴ X.G. Zhu, S.P. Long, and D.R. Ort, *Annu Rev Plant Biol* **61**, 235 (2010).
- ⁵ S.M. Lee and D.G. Cahill, *J. Appl. Phys.* **81**, 2590 (1997).
- ⁶ D. Zhao, X. Qian, X. Gu, S.A. Jajja, and R. Yang, *J. Electron. Packag. Trans. ASME* **138**, 040802 (2016).
- ⁷ S. Sarkar, E. Nefzaoui, P. Basset, and T. Bourouina, *Far-Field Radiative Thermal Rectification with Bulk Materials* (2020).
- ⁸ K.N. Nguyen, P. Basset, F. Marty, Y. Leprince-Wang, and T. Bourouina, *J. Appl. Phys.* **113**, 194903 (2013).
- ⁹ D. Abi Saab, P. Basset, M.J. Pierotti, M.L. Trawick, and D.E. Angelescu, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 265502 (2014).
- ¹⁰ Y. Nishijima, H. Nishijima, and S. Juodkazis, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **217**, 110706 (2020).
- ¹¹ C. Wu, C.H. Crouch, L. Zhao, J.E. Carey, R. Younkin, J.A. Levinson, E. Mazur, R.M. Farrell, P. Gothoskar, and A. Karger, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1850 (2001).
- ¹² L.L. Ma, Y.C. Zhou, N. Jiang, X. Lu, J. Shao, W. Lu, J. Ge, X.M. Ding, and X.Y. Hou, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 171907 (2006).
- ¹³ S. Sarkar, A.A. Elsayed, E. Nefzaoui, J. Drevillon, P. Basset, F. Marty, M. Anwar, Y. Yu, J. Zhao, X. Yuan, Z. Liang, D. Khalil, Y.M. Sabry, and T. Bourouina, *Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.* **2019-Janua**, 860 (2019).
- ¹⁴ D. Abi-saab, *Black Silicon Optical Properties, Growth Mechanisms and Applications*, Universite Paris-Est, 2015.
- ¹⁵ G. Yuan, R. Mitdank, A. Mogilatenko, and S.F. Fischer, *J. Phys. Chem. C* **116**, 13767 (2012).
- ¹⁶ A. Saeed, A.A. Elsayed, F. Marty, E. Nefzaoui, T. Bourouina, H.A. Shawkey, Y.M. Sabry, and D.A.M. Khalil, in *Proc. Spie* (2020), p. 28.
- ¹⁷ M.Y. Wong, C.Y. Tso, T.C. Ho, and H.H. Lee, *Int. J. Heat Mass Transf.* **164**, 120607 (2021).

www.esiee.fr • www.univ-gustave-eiffel.fr • <http://esycom.cnrs.fr/>