

Diriger les flux de chaleur nanométriques dans les métamatériaux à base de nanocristaux

Aujourd'hui, les nanocristaux s'imposent massivement comme une solution polyvalente pour la fabrication d'une nouvelle génération de dispositifs opto-électroniques comme les LEDs, les photodétecteurs ou encore les cellules photovoltaïques. De récents travaux suggèrent même que les assemblages ordonnés de nanoparticules, connus sous le nom de supercristaux ou métamatériaux, présentent une gamme encore plus vaste de propriétés émergentes allant de la mécanique à la thermoélectricité en passant même par des fonctionnalités catalytiques. Cependant, la chaleur générée lors de l'utilisation de tels dispositifs est susceptible de provoquer des instabilités physiques et chimiques menant à la dégradation du matériau actif et donc de ses performances. En collaboration avec le LPS, l'institut MONARIS et l'université de Hambourg, des membres de l'équipe Physico-chimie et dynamique des surfaces de l'INSP montrent qu'il est possible de contrôler les flux de chaleur à l'échelle nanométrique dans ces métamatériaux en jouant sur la forme et l'organisation des nanocristaux qui les composent. Cette découverte ouvre la voie à de nouvelles méthodes de gestion thermique promettant d'accroître la robustesse et l'efficacité de ces supercristaux.

Grâce à une technique de thermo-réflectance résolue à la fois dans l'espace et en temps, il a été possible d'imager le flux de chaleur se propageant dans des supercristaux de nano-sphères, nano-bâtonnets et nano-bipyramides d'or. Ces mesures ont été corrélées avec des images de microscopie électronique à balayage permettant de visualiser directement l'impact de structures complexes et de défauts sur les propriétés thermiques à l'échelle nanométrique (Figure 1). L'étude d'arrangements ordonnés et incurvés de nano-bâtonnets ainsi que de joints de grain a révélé que le transport thermique est anisotrope. La chaleur se propage plus rapidement dans la direction parallèle au grand axe des nanoparticules et peut donc être guidée au sein même du métamatériau.

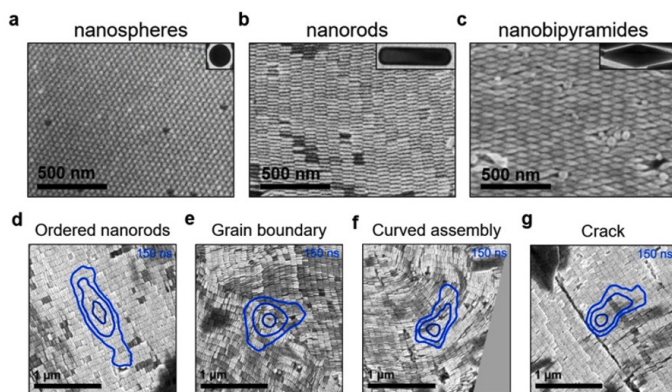


Figure 1

Images des échantillons et visualisation du flux de chaleur. (a-c) Images de microscopie électronique à balayage (SEM) d'un échantillon (a) de nano-sphères, (b) de nano-bâtonnets de rapport d'aspect 4:1 et (c) de nano-bipyramides de rapport d'aspect 3.2. (d-g) Mesures corrélatives superposant une image SEM avec le flux thermique mesuré 150 nanosecondes après excitation (d) dans un assemblage ordonné de nano-bâtonnets, (e) sur un joint de grain séparant deux supercristaux composés de bâtonnets d'orientations différentes, (f) dans un assemblage incurvé et (g) près d'une fracture.

Des simulations par éléments finis et des modèles de résistances équivalentes ont permis d'établir la façon dont les différents paramètres thermiques et géométriques gouvernent l'émergence de cette anisotropie. Dans cette étude, l'équipe de chercheurs montre que le degré d'anisotropie peut expérimentalement être contrôlé en modifiant le rapport d'aspect des nanocristaux (Figure 2). Une anisotropie dont la magnitude dépasse le rapport d'aspect peut même être obtenue en optimisant la forme et l'arrangement des nanoparticules, en remplaçant par exemple les bâtonnets par des bipyramides.

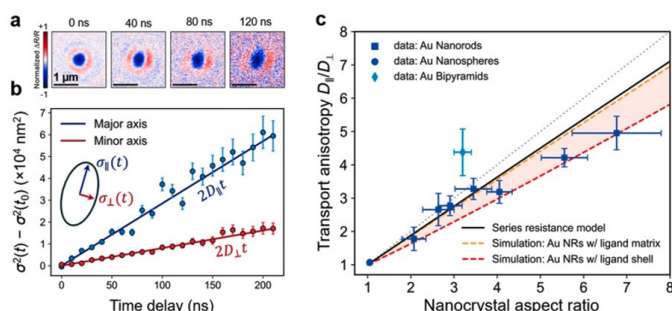


Figure 2

Contrôle de l'anisotropie grâce au rapport d'aspect. (a) Série temporelle d'images obtenues par thermoréflectance dans un échantillon de nano-bâtonnets de rapport d'aspect 4:1. (b) Évolution temporelle des variances des petits et grands axes de la gaussienne elliptique ajustée sur le profil thermique en (a). (c) Rapport des coefficients de diffusion thermique selon les directions parallèles et perpendiculaires au grand axe des nanoparticules (anisotropie) en fonction du rapport d'aspect.

Les principes établis dans cette étude peuvent être étendus à d'autres métamatériaux basés sur des nanocristaux de formes et compositions différentes. Elle ouvre la voie à de nouvelles techniques de dissipation thermique en utilisant directement le matériau actif et en gardant le contrôle sur les effets optiques et électroniques dépendant du confinement quantique.

Référence

"Anisotropic Thermal Transport in Tunable Self-Assembled Nanocrystal Supercrystals"

Matias Feldman, Charles Vernier, Rahul Nag, Juan Barrios-Capuchino, **Sébastien Royer**, **Hervé Cruguel**, **Emmanuelle Lacaze**, **Emmanuel Lhuillier**, **Danièle Fournier**, Florian Schulz, Cyrille Hamon, Hervé Portalès, **James K. Utterback**.

ACS Nano 18, 34341–34352 (2024)

<https://doi.org/10.1021/acsnano.4c12991>

Contact

james.utterback(at)insp.jussieu.fr