

Récupération d'énergie : la piste des couches épaisses de gadolinium flexibles et suspendues

L'essor des matériaux à effet magnétocalorique a permis d'ouvrir un nouveau domaine d'application, celui de la conversion d'énergie thermique dans des systèmes électromécaniques à l'échelle micrométrique (MEMS). Il s'agit d'exploiter le changement des propriétés thermiques d'un composé en réponse à l'application ou à la suppression d'un champ magnétique. Plus spécifiquement, certains matériaux mis sous la forme de couches minces suspendues, c'est-à-dire isolées du substrat, offrent la possibilité d'utiliser un effet magnétocalorique efficace dans des micro-réfrigérateurs –ou des micro-réchauffeurs. Des membres de l'équipe « Croissance et propriétés de systèmes hybrides en couches minces » de l'INSP et de l'équipe « Matériaux Magnétiques pour l'Energie » du SATIE (ENS Paris-Saclay) ont collaboré pour produire MEMS incluant un film suspendu de Gadolinium dont les caractéristiques sont telles qu'ils pourraient devenir une référence dans le domaine de la magnétocalorique en tant que microsystèmes actifs pour la récupération d'énergie.

Que cela soit dans un réfrigérateur, ou bien dans un système de récupération de chaleur perdue, les fluides échangeurs ainsi que les moteurs utilisés pour actionner le déplacement du matériau actif dans le champ magnétique, constituent autant de verrous sur la route qui mène vers la miniaturisation. Par contre, des couches magnétocaloriques isolées du substrat et suspendues rendent possibles des conceptions innovantes où le matériau magnétique revêt en même temps le rôle d'actionneur (par la force magnétique qui le déplace), d'échangeur de chaleur (par contact directe avec les réservoirs), ainsi que de substance calorifique (par le changement de température ΔT_{adia} induit par le gradient de champ). A titre d'exemple, une conception mettant en œuvre une couche isolée dans un dispositif de récupération thermique travaillant sur un cycle de Brayton magnétique (deux transformation adiabatiques et deux iso-champ) est illustrée en figure 1. Ici, une partie du travail fourni par le cycle est transformé en énergie électrique grâce à la déformation de bras piézoélectriques.

Les couches suspendues ne doivent pas seulement présenter des propriétés magnétocaloriques comparables à celles du matériau massif, mais aussi une bonne diffusivité thermique et un bon état des surfaces afin de pouvoir rendre les échanges de chaleurs rapides et efficaces. De plus, flexibilité et stabilité des propriétés magnétiques sous contrainte mécanique seront des propriétés nécessaires à la mise en œuvre du matériau dans des dispositifs à l'échelle microscopique où le flux de chaleur doit avoir lieu principalement par contact thermique direct solide-solide.

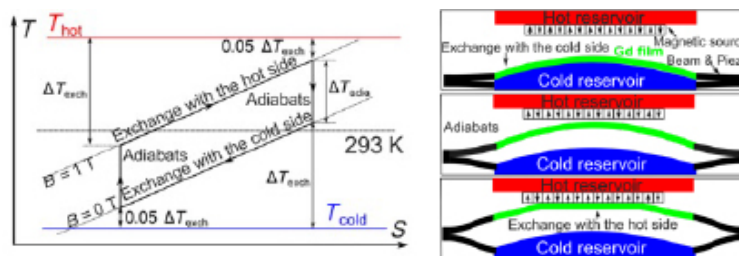


Figure 1

Gauche : représentation schématique du dispositif. Le cadre central montre le déplacement de la couche qui a lieu de façon suffisamment rapide pour être considéré adiabatique. Le gradient de champ tout au long de ce déplacement induit le changement de température du Gd, ΔT_{adia} (voir les adiabatiques verticales dans le cadre à droite), paramètre qui détermine la puissance et l'efficacité de l'ensemble du cycle. En haut et en bas la couche est en contact direct avec les réservoirs ; la couche échange de la chaleur à champ constant. La sollicitation des bras piézoélectriques génère une puissance électrique.

Droite : cycle thermodynamique de fonctionnement. L'amplitude des deux transformations adiabatiques (lignes verticales) est limitée par la valeur de ΔT_{adia} du matériau, soit de ses propriétés magnétocaloriques.

Finalement, ductilité et flexibilité du matériau actif sont ici des propriétés fondamentales afin de faciliter le déplacement rapide entre les deux réservoirs (les transformations adiabatiques du cycle de Brayton de la Fig.1), ainsi que pour garantir un contact thermique plus efficace pendant les deux transformations à champ constant.

Avec ce cahier de charge, des couches de gadolinium (Gd) de 17 μm d'épaisseur ont été déposées, par pulvérisation cathodique, sur un substrat de silicium avec des couches oxydées thermiquement. Afin de détacher le film de Gd du substrat sans l'endommager, nous avons poussé le film contre une surface convexe après une coupe superficielle sur la face libre du substrat (voir figure 2a). Après cette opération, les couches suspendues présentent des propriétés magnétocaloriques préservées par rapport au matériau massif. De plus, la couche suspendue est flexible (voir figure 2b) et ses propriétés magnétiques ne sont guère modifiées par l'application d'une déformation. Il convient de mentionner que l'épaisseur, la température de croissance et le choix de la couche tampon ont été des éléments clés pour obtenir des films autoportants de grande taille (35 x 35 mm^2). Finalement, les mesures de diffraction des rayons X montrent un film de haute qualité avec des paramètres de réseau en accord avec ceux du Gd massif. L'analyse AFM montre une surface lisse, dont la rugosité moyenne ne dépasse jamais les 11 nm.

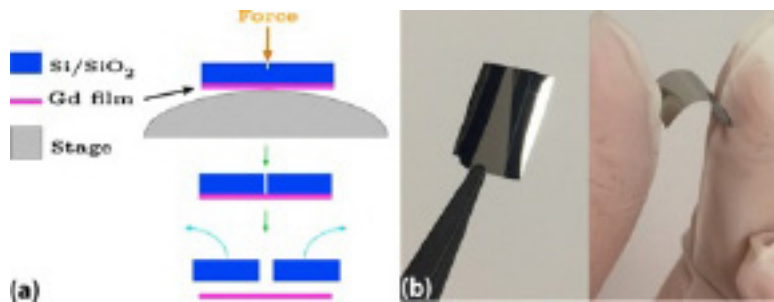


Figure 2

Schéma de la procédure de séparation du substrat et du film Gd (a) et photo du film autoportant Gd (b).

Un modèle thermodynamique à temps fini a permis d'estimer que les couches magnétocaloriques produites à l'INSP permettraient au micro-générateur de la Fig.1 d'atteindre de performances de récupération d'énergie thermique compétitives par rapport aux dispositifs thermoélectriques, surtout pour des gradients de température petits. La puissance électrique permettrait ainsi d'alimenter des petits systèmes autonomes pour des applications bio-médicales, des capteurs ou pour l'Internet des objets.

Référence

"Magnetocaloric Effect in Flexible, Free-Standing Gadolinium Thick Films for Energy Conversion Applications"
Doan Nguyen Ba, Yunlin Zheng, Loic Becerra, Massimiliano Marangolo, Morgan Almanza, and Martino LoBue
Physical Review Applied 15, 064045 (2021)

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03264108/>

Contacts

Doan Nguyen Ba : badoan2309@gmail.com

Max Marangolo : massimiliano.marangolo@insp.jussieu.fr