

Etude expérimentale d'un interposeur thermique à changement de phase pour le management thermique de composants électroniques

Christophe KINKELIN^{1,2,3*}, Stéphane LIPS^{1,2,3}, Frédéric LEFEVRE^{1,2,3}
Ulrich SOUPREMANIEN⁴, Vincent REMONDIERE⁴, Jean DIJON⁴, Hélène
LE POCHÉ⁴, Emmanuel OLLIER⁴, Maelle CAMPOS⁴, Anne-Laure SEILER⁴

¹Université de Lyon, CNRS

²INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

³Université Lyon 1, UMR5008, CETHIL, F-69622, France

⁴CEA LITEN, 17, rue des martyrs, F-38054 Grenoble Cedex 9, France

* (auteur correspondant : christophe.kinkelin@insa-lyon.fr)

Résumé - Le système thermique étudié dans cet article a pour vocation d'écarter les pics de température liés au fonctionnement transitoire des composants électroniques. Deux prototypes constitués d'un substrat en silicium intégrant des nanotubes de carbone, l'un contenant un matériau à changement de phase (MCP), l'autre non, sont sollicités thermiquement par un laser et filmés par une caméra infrarouge en face arrière. La sensibilité du banc d'essai est suffisante pour mettre en évidence une quantité de MCP très faible par rapport à la masse totale du système.

Nomenclature

c_p capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
 G conductance thermique globale, $W.K^{-1}$
 m masse, kg
 \dot{Q} flux thermique, W
 t temps, s
 T température, K

Indices et exposants
abs absorbé par l'échantillon
amb ambiant
cha chauffage
eq équivalent
m moyenne
ref refroidissement
Si silicium

1. Introduction

La miniaturisation continue des systèmes électroniques et l'augmentation régulière de leurs performances engendrent des densités de flux thermique croissantes qu'il est nécessaire d'évacuer afin de maintenir la température des composants électroniques sous une valeur maximale admissible. Dans des applications pour lesquelles ces systèmes fonctionnent de manière transitoire, des fluctuations importantes de la température peuvent apparaître et contribuer ainsi à réduire la durée de vie des composants électroniques. Pour de telles situations, un système de management thermique écrétant la température du composant en-dessous de sa valeur limite est nécessaire.

Insérer des matériaux à changement de phase (MCP) dans une cavité en contact avec le composant électronique permet d'assurer cette fonction d'écarter de la température grâce à leur chaleur latente de fusion élevée. Les MCP sont par exemple employés dans le stockage de l'énergie solaire thermique, la régulation thermique des bâtiments, la protection thermique de produits sensibles (denrées alimentaires, produits pharmaceutiques et médicaux, etc.) ainsi que dans le management thermique de l'électronique [1], [2]. Ils constituent une solution passive simple et légère pour la gestion des flux thermiques transitoires dans les appareils électroniques.

Cependant, la faible conductivité thermique des MCP usuels est un facteur limitant pour les applications nécessitant un temps de réponse court. En effet, plus la distance entre le front de changement de phase solide-liquide et les parois de la cavité contenant le MCP augmente, plus la puissance thermique échangeable avec le MCP diminue. Dans la littérature, un nombre conséquent d'études traitent de l'augmentation de la conductivité thermique des MCP par l'adjonction de matière à forte conductivité thermique, sous la forme d'une matrice [3] ou de particules dispersées au sein du MCP [4]. Si la plupart de ces études montrent une augmentation limitée de la conductivité thermique, de bons résultats sont obtenus avec des matrices en graphite, avec une conductivité thermique de 20 à 130 fois supérieure à celle du MCP pur [5]. D'autres études expérimentales montrent que l'orientation des structures conductrices (comme des fibres de carbone) parallèlement au flux thermique améliore la conductivité thermique par rapport à des fibres disposées aléatoirement dans le MCP [6].

La plupart des techniques d'amélioration de la conductivité thermique des MCP ont été développées pour le domaine du stockage de l'énergie thermique. Dans le domaine de l'électronique, l'effet de l'intégration de réservoirs simples de MCP sur l'évolution de la température d'une puce électronique a été étudié [7]. Une solution simple pour augmenter la surface d'échange avec le MCP consiste à l'insérer entre les ailettes d'un radiateur traditionnel en aluminium [8], mais les cellules de MCP ainsi formées ont une taille trop importante, ce qui limite le flux thermique échangeable avec le MCP. Un réseau de micro-réservoirs de MCP a été mis en oeuvre dans un substrat de silicium, mais avec une capacité thermique surfacique très faible [9]. Les développements technologiques les plus aboutis pour augmenter la conductivité thermique locale dans les systèmes électroniques concernent les matériaux thermiques d'interface (TIMs) mais ils n'intègrent pas de fonction de stockage d'énergie. Dans cet article, une méthodologie de caractérisation d'un interposeur thermique incluant cette fonction est développée. Des résultats préliminaires obtenus à l'aide de prototypes non optimisés sont présentés et mettent en lumière les capacités du banc de caractérisation développé pour l'étude de ces systèmes.

2. Interposeur thermique : principe et échantillons testés

L'interposeur thermique proposé a pour objectif d'écrêter les pics de température d'un composant électronique en régime transitoire. Il est constitué d'un substrat en silicium contenant un réseau de nanotubes de carbone (NTC) rempli de MCP solide-liquide (figure 1). Les NTC relient les deux faces en silicium et assurent ainsi une bonne conduction de la puissance dissipée par le composant électronique vers la source froide, tandis que le MCP permet d'absorber l'énergie lors des pics de sollicitation thermique. Cette énergie est restituée lorsque la puissance thermique dissipée par le composant électronique est plus faible. Cette structure hybride NTC-MCP a donc vocation à augmenter l'inertie thermique du système pour limiter sa variation de température tout en maintenant une bonne conductance thermique, le tout dans un volume total limité. Ces systèmes sont développés dans le cadre du projet THERMA3D, cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche et porté par le CEA-Liten [10].

Dans cette étude, deux prototypes préliminaires « avec MCP » et « sans MCP » sont testés. Ces deux prototypes sont constitués d'une première plaque de silicium d'épaisseur 550 μm dont une zone centrale carrée est recouverte de NTC de longueur 100 μm environ. La croissance de ces NTC est réalisée sur une couche mince catalytique déposée au préalable sur la plaque de silicium. Un adhésif double-face d'épaisseur 100 μm entoure les NTC pour le scellement ultérieur du système (figure 1). Sur une deuxième plaque de silicium d'épaisseur 550 μm est déposée une couche mince métallique d'épaisseur 1 μm destinée à poinçonner les pointes des NTC de la première plaque. Pour l'échantillon « avec MCP », 2,9 mg de paraffine

à l'état solide sont déposés sur le réseau de NTC, puis portés à 100°C. En fondant, la paraffine pénètre dans le réseau de NTC. L'échantillon « sans MCP » ne reçoit pas de paraffine. Les deux plaques ainsi préparées sont assemblées l'une avec l'autre par pression à chaud.

Certaines dimensions diffèrent légèrement entre ces deux premiers échantillons prototypes (surface des plaques de silicium, de la zone couverte par les NTC, de la zone couverte par l'adhésif, etc.). L'échantillon « sans MCP » a donc une masse légèrement supérieure à celle de l'échantillon « avec MCP ». On notera que la quantité de MCP introduite dans l'échantillon « avec MCP » est très faible car elle ne représente qu'environ 1% de la masse totale. Ces premiers systèmes servent à tester les capacités du banc de caractérisation thermique. Leur processus de fabrication est trop sommaire pour atteindre les performances attendues et des échantillons plus aboutis sont en cours de réalisation.

La figure 2 présente une analyse DSC (Differential Scanning Calorimetry) effectuée pour le MCP de l'étude, une paraffine avec une distribution d'atomes de carbone comprise entre C30 et C48 et possédant une chaleur latente de fusion de 210 J.g⁻¹ (type PCM 89 de chez KAPLAN). Cette paraffine n'étant pas un corps pur, son changement de phase s'étale principalement entre 60°C et 91 °C pour la fusion et entre 84°C et 56 °C pour la solidification. Le MCP présente une surfusion d'environ 7 K.

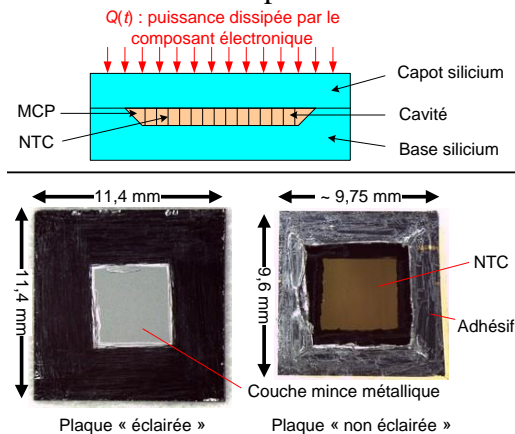


Figure 1. Schéma d'un interposeur thermique (en haut) et photos des plaques constitutives de l'échantillon « avec MCP » (en bas)

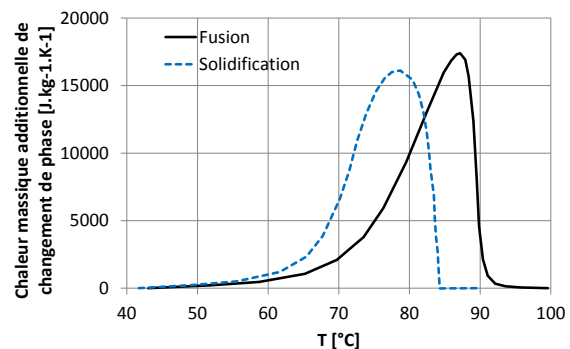


Figure 2. Chaleurs massiques additionnelles correspondant à la fusion et à la solidification du MCP, obtenues à partir de la DSC

3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est une version améliorée de la méthode flash comportant un laser pour le chauffage de l'échantillon et une caméra infrarouge (IR) pour la mesure de sa température de surface (figure 3). Le faisceau laser éclaire la face comportant la puce de plus grande dimension (face éclairée) et la caméra filme la face non-éclairée.

Les propriétés radiatives du silicium varient beaucoup en fonction de la longueur d'onde, ce qui complique la méthode de caractérisation thermique. Le silicium est transparent pour les longueurs d'ondes supérieures à 1,1 μm. La face non éclairée a donc été recouverte de 12 couches de peinture noire « Jelt noir mat 700°C ». En effet, la caméra IR utilisée pour la mesure de température (de type FLIR SC7600) est sensible sur une plage de 2,5 à 5,5 μm. Ces 12 couches représentent une épaisseur d'environ 40 μm de peinture qui constitue une couche opaque et permet la mesure du rayonnement IR émis par l'échantillon. Pour limiter l'influence de la peinture, la face éclairée par le laser n'est pas peinte.

Pour le chauffage, un laser de type nLight Pearl TKS de longueur d'onde 808 nm a été choisi car le silicium est optiquement épais pour cette longueur d'onde. Sa puissance optique en sortie est réglable entre 0 et 30 W. Différents types de sollicitation peuvent être appliqués

(créneau, rampe, sinusoïde, ...), ce qui est utile pour caractériser expérimentalement les paramètres du système à l'aide de techniques inverses. Le faisceau laser éclaire l'échantillon avec une densité de puissance qui peut être considérée comme homogène. Les deux échantillons ont des plaques « éclairées » de mêmes dimensions, de sorte que la fraction du faisceau laser qu'ils interceptent est la même.

Le laser, l'échantillon et la caméra IR sont intégrés dans une enceinte constituée de panneaux en tôle d'aluminium anodisée en noir montés sur des profilés en aluminium. Cette enceinte optiquement étanche permet de garantir des conditions d'ambiance homogènes.

4. Résultats expérimentaux

4.1. Réponse de l'interposeur à une sollicitation thermique de type créneau

Pour le MCP choisi, la quasi-totalité du changement de phase solide-liquide a lieu entre 60°C et 90°C (figure 2). La sollicitation laser a donc été choisie de manière à réaliser les étapes suivantes :

- 1) 1^{ère} chauffe (10 s) de l'échantillon de la température ambiante jusqu'à une température supérieure à 90°C.
- 2) 1^{er} refroidissement (20 s) de l'échantillon en-dessous de 60°C.
- 3) 2^{ème} chauffe (6,1 s) de l'échantillon à plus de 90°C.
- 4) 2^{ème} refroidissement, en-dessous de 50°C.

Comme la plaque « éclairée » de chaque échantillon est plus grande que la plaque « non éclairée », il est possible d'obtenir simultanément le champ de température sur la plaque « non éclairée » et sur le bord de la plaque « éclairée ». Etant donné la grande diffusivité thermique du silicium et les faibles vitesses de montée en température ($< 20 \text{ K.s}^{-1}$), la température au sein de chaque plaque de silicium peut être considérée comme uniforme à chaque instant. L'évolution temporelle des températures des deux plaques est présentée sur la figure 4. Ces températures sont déterminées en calculant la moyenne spatiale des champs respectifs des zones « 1 » et « 2 » mesurées par la caméra IR. Le flux laser imposé est identique pour chaque échantillon, mais il est difficile de comparer directement l'évolution temporelle de leurs températures du fait de leurs dimensions et donc de leur capacité thermique totale différentes. De plus, l'influence de la présence de MCP n'est pas facilement visible sur les courbes présentées sur la figure 4.

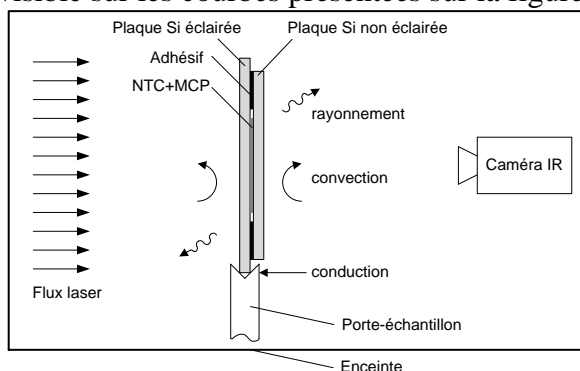


Figure 3. Schéma du principe de mesure

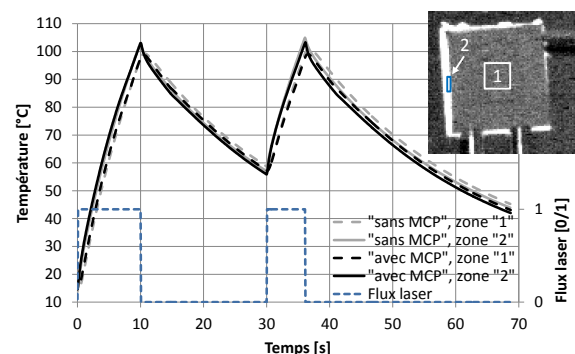


Figure 4. Evolution des températures de plaque éclairée (zone « 2 ») et non éclairée (zone « 1 »)

4.2. Analyse de la signature thermique du changement de phase

La figure 5 présente l'évolution de la dérivée temporelle de la température moyenne des échantillons « sans MCP » et « avec MCP » en fonction du temps. La température moyenne

T_m est définie comme la moyenne des températures des deux plaques de silicium pondérée par leurs masses respectives, les autres masses (NTC, MCP, adhésif, peinture noire, dépôts en couches minces) étant ici négligées. L'influence du MCP (flèches) y est clairement visible : on observe une baisse de la vitesse de montée en température au niveau du pic de fusion du MCP. L'effet du changement de phase est légèrement moins visible lors du refroidissement de l'échantillon car la descente en température est plus lente que la montée en température. La solidification du MCP s'étalant sur un temps plus long que sa fusion, la puissance libérée par la solidification du MCP est donc inférieure à la puissance absorbée par la fusion. La différence entre les dérivées des températures moyennes « avec MCP » et « sans MCP » s'en trouve réduite.

La vitesse de variation de T_m dépend principalement du flux thermique de refroidissement transféré de l'échantillon vers l'environnement, lui-même dépendant principalement de T_m . La figure 6 présente donc la dérivée temporelle de T_m en fonction de T_m . Cette représentation est une courbe caractéristique du comportement de chaque interposeur et met en évidence la présence du MCP. Pour chaque échantillon, les deux courbes de chauffe et les deux courbes de refroidissement se superposent en régime établi (lorsque la différence de température entre plaque « éclairée » et « non éclairée » est constante), ce qui montre la reproductibilité de la mesure. Les transitions (parties verticales des courbes) entre courbes de chauffe et de refroidissement ne se superposent pas parfaitement car les températures atteintes en fin de première et de deuxième chauffe et en fin de premier refroidissement ne sont pas tout à fait identiques.

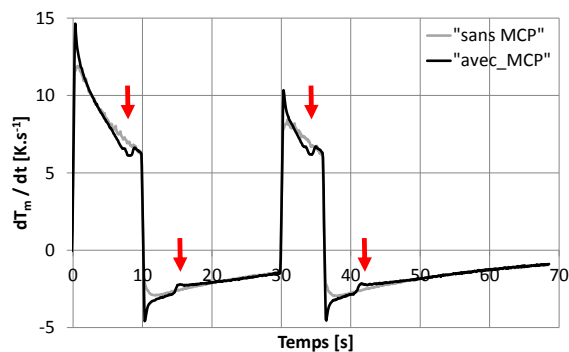


Figure 5. Dérivée temporelle de la température moyenne des échantillons « sans MCP » et « avec MCP » en fonction du temps

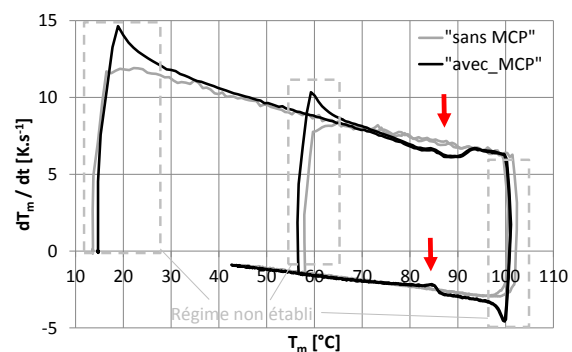


Figure 6. Dérivée temporelle de la température moyenne des échantillons en fonction de la température moyenne

Lors du chauffage de 30°C à environ 60°C, soit dans la zone où le MCP n'intervient pas, l'échantillon « avec MCP » montre une dérivée temporelle de sa température moyenne comparable à celle de l'échantillon « sans MCP » (figure 6). A partir de 60°C environ, sa dérivée temporelle devient inférieure à celle de l'échantillon « sans MCP » : la fusion du MCP ralentit la montée en température de l'échantillon « avec MCP », jusqu'à environ 92°C (flèche dans la figure 6). A la fin de la fusion du MCP vers 92°C, la vitesse de montée en température redevient comparable pour les deux échantillons jusqu'à la fin de la phase de chauffage.

De la même manière, lors du refroidissement, l'échantillon « avec MCP » montre une dérivée temporelle de sa température moyenne comparable à celle de l'échantillon sans MCP dans la zone où le MCP n'intervient pas. Sur la plage de température où le MCP se solidifie, la dérivée temporelle de l'échantillon « avec MCP » devient inférieure en valeur absolue à celle de l'échantillon « sans MCP » (flèche dans la figure 6).

Le phénomène de surfusion est visible sur la figure 6. Il correspond à la différence de température entre la fin de fusion et le début de solidification. Ici la surfusion mesurée est de

l'ordre de 7 K, conformément à la valeur mesurée par DSC. La présence du réseau de NTC au sein du MCP, et donc le changement d'échelle caractéristique de la distance entre parois par rapport à la mesure par DSC, semble ne pas avoir d'incidence sur la valeur de surfusion. Cependant la possible interaction des phénomènes de nucléation entre le MCP présent entre la zone de NTC et l'adhésif (figure 1) et le MCP présent dans la zone de NTC ne permet pas de conclure avec certitude quant à l'absence d'effet d'échelle sur la surfusion du MCP utilisé. Cet aspect fera l'objet d'une étude complémentaire avec d'autres échantillons.

4.3. Estimation de la masse de MCP

Dans cette partie, une étude théorique est menée afin d'estimer la masse de MCP introduite dans l'échantillon « avec MCP » à partir des mesures de température présentées dans les parties 4.1 et 4.2. Un bilan thermique simplifié de l'échantillon est développé à partir des hypothèses suivantes:

- La température de l'échantillon est uniforme et égale à la température moyenne $T_m(t)$.
- La température de l'environnement de l'échantillon (air ambiant, pattes de maintien et surfaces autour de l'échantillon, notamment l'enceinte) est constante et égale à T_{amb} .
- Les transferts thermiques entre l'échantillon et son environnement sont caractérisés par une conductance thermique qui ne dépend que de T_m .
- Le phénomène de surfusion est négligé.
- La capacité thermique des autres matériaux (NTC, adhésif, peinture noire, dépôts en couches minces) est négligée devant celle du substrat en silicium et du MCP.

Avec ces hypothèses, le bilan thermique de l'échantillon s'écrit:

$$\dot{Q}_{abs} - G(T_m(t) - T_{amb}) = (mc_p)_{eq} \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

où $(mc_p)_{eq}$ est la capacité thermique équivalente de l'échantillon incluant l'effet du MCP quand il est présent. La conductance thermique globale G inclut les échanges convectifs entre l'échantillon et l'air ambiant, la conduction entre l'échantillon et les pattes de maintien et l'échange radiatif avec les surfaces environnantes (figure 3). Cette conductance globale dépend de la température T_m du fait de la nature des modes de transferts mis en jeu. \dot{Q}_{abs} est le flux laser absorbé par l'échantillon. \dot{Q}_{abs} étant nul lors du refroidissement, on peut l'estimer en comparant les phases de chauffage et de refroidissement de l'échantillon « sans MCP » :

$$\dot{Q}_{abs} = m_{Si} c_{p,Si} \left(\left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{cha} - \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{ref} \right)_{sans\ MCP} \quad (2)$$

La puissance de sortie du laser étant constante lors des phases de chauffage, et l'absorptance du silicium étant supposée constante sur la plage de température considérée pour la longueur d'onde du laser, la puissance absorbée par l'échantillon \dot{Q}_{abs} est constante. En considérant que la capacité thermique massique équivalente de l'échantillon « sans MCP » est égale à celle du silicium, le flux laser absorbé par l'échantillon « sans MCP » est estimé à $\dot{Q}_{abs} = 2,3\ W$. Les plaques « éclairées » des échantillons « avec MCP » et « sans MCP » ayant des dimensions et un état de surface identiques, le flux laser absorbé est identique pour les deux échantillons. La capacité thermique totale $(mc_p)_{eq}$ des échantillons « avec MCP » et « sans MCP » se calcule alors comme suit :

$$(mc_p)_{eq} = \frac{\dot{Q}_{abs}}{\left(\left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{cha} - \left. \frac{dT_m}{dt} \right|_{ref} \right)} \quad (3)$$

Les capacités thermiques totales estimées pour les échantillons « avec MCP » et « sans MCP » sont présentées sur la figure 7. Le fait que la capacité thermique de l'échantillon « sans MCP » augmente avec la température illustre la dépendance de la capacité thermique du silicium avec la température. Pour des températures inférieures ou supérieures à la zone de changement de phase, l'échantillon « avec MCP » présente une capacité thermique totale inférieure à celle de l'échantillon « sans MCP » du fait de sa masse légèrement inférieure.

Comme dans une mesure par DSC, il est possible de définir une « ligne de base » qui représente la capacité thermique totale qu'aurait l'échantillon sans l'effet du changement de phase. La ligne de base de l'échantillon « avec MCP » est ici déterminée en comparant les courbes suivantes :

- Echantillon « avec MCP » : capacité thermique totale mesurée.
- Echantillon « sans MCP » : capacité thermique totale mesurée multipliée par un facteur de correction constant, de manière à obtenir une capacité thermique corrigée équivalente à celle de l'échantillon « avec MCP » hors zone de changement de phase (figure 8).

La ligne de base correspond au segment ayant pour extrémités les points de séparation des courbes de capacité thermique des échantillons « avec MCP » et « sans MCP » corrigée (figure 8). Le calcul de l'aire comprise entre la courbe de capacité thermique totale de l'échantillon « avec MCP » et sa ligne de base donne une énergie de chaleur latente de 0,55 J correspondant à une masse de MCP de 2,6 mg, soit 10% de moins que les 2,9 mg effectivement introduits dans l'échantillon, ce qui confirme la validité des hypothèses formulées. La méthode d'estimation de paramètre mise en œuvre permet donc de détecter une masse de MCP de l'ordre du pourcent de la masse totale de l'échantillon.

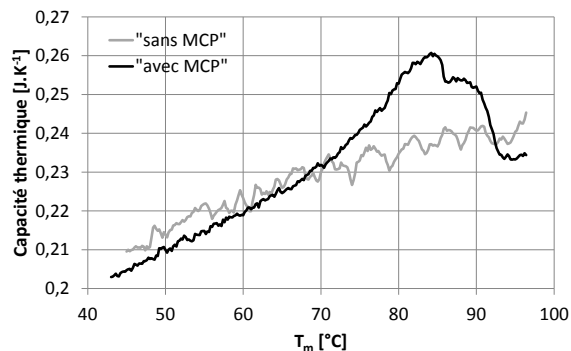


Figure 7. Capacité thermique des échantillons « avec MCP » et « sans MCP »

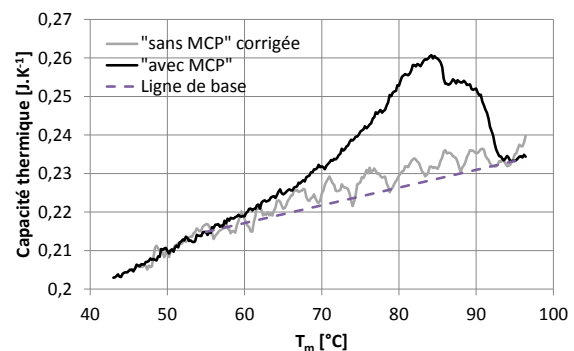


Figure 8. Capacité thermique des échantillons après correction

5. Conclusion

Deux échantillons prototypes constitués d'un substrat en silicium contenant des NTC, l'un avec MCP, l'autre sans MCP, ont été mesurés sur un banc d'essai composé d'un laser et d'une caméra infrarouge. Le laser pilotable en intensité et en fréquence impose une sollicitation thermique de type créneau à l'échantillon. Une mesure de température en face arrière est réalisée à l'aide d'une caméra IR.

Ces essais permettent de confirmer la bonne sensibilité du dispositif expérimental mis en place pour l'étude du comportement thermique de l'interposeur puisque une faible quantité de MCP (2,9 mg dans l'échantillon « avec MCP », soit environ 1% de la masse totale de l'échantillon) a été mise en évidence. La masse de MCP estimée à partir des mesures est de seulement 10% inférieure à la masse effective de MCP, ce qui montre que les hypothèses simplificatrices formulées sont correctes pour une première estimation de la masse de MCP.

Par la suite, d'autres échantillons seront réalisés avec des quantités de MCP plus importantes. Le banc expérimental présenté sera alors mis en œuvre pour estimer l'ensemble des paramètres du système par comparaison avec un modèle thermique direct. En plus de la fonction de stockage étudiée dans cet article, la fonction de transfert de chaleur de l'interposeur thermique pourra être caractérisée. Certaines propriétés physiques (surfusion, résistances de contact, conductivité thermique du milieu NTC + MCP) pourront être prises en compte plus finement.

Références

- [1] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, et H. Mehling, « Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, n° 3, p. 251-283, 2003.
- [2] S. S. Anandan et V. Ramalingam, « Thermal management of electronics: A review of literature », *Therm. Sci.*, vol. 12, n° 2, p. 5-26, 2008.
- [3] L. Fan et J. M. Khodadadi, « Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n° 1, p. 24-46, 2011.
- [4] J. M. Khodadadi, L. Fan, et H. Babaei, « Thermal conductivity enhancement of nanostructure-based colloidal suspensions utilized as phase change materials for thermal energy storage: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, p. 418-444, 2013.
- [5] A. Mills, M. Farid, J. R. Selman, et S. Al-Hallaj, « Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, n° 14, p. 1652-1661, 2006.
- [6] J. Fukai, M. Kanou, Y. Kodama, et O. Miyatake, « Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers », *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, n° 14, p. 1543-1556, 2000.
- [7] F. L. Tan et C. P. Tso, « Cooling of mobile electronic devices using phase change materials », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 24, n° 2-3, p. 159-169, 2004.
- [8] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, et A. S. Mujumdar, « Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, n° 8-9, p. 1047-1057, 2008.
- [9] C. Muratore, S. M. Aouadi, et A. A. Voevodin, « Embedded phase change material microinclusions for thermal control of surfaces », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 206, n° 23, p. 4828-4832, 2012.
- [10] E. Ollier, U. Soupremanien, V. Remondière, J. Dijon, H. Le Poche, F. Lefevre, S. Lips, C. Kinkelin, N. Rolland, P. A. Rolland, M. Zegaoui, S. Lhostis, P. Ancey, B. Descouts, et Y. Kaplan, « Thermal management of electronic devices by composite materials integrated in silicon », in *Microtherm*, Lodz, Poland, 25-28 juin 2013.

Remerciements

Ce projet a été réalisé en collaboration avec le CEA-Liten, l'IEMN, Kaplan Energy et STMicroelectronics dans le cadre du projet ANR P2N « THERMA3D » n° ANR-11-NANO-011.