



HAL
open science

Report de puce par frittage d'argent - mise en oeuvre et analyse

Amandine Masson, Wissam Sabbah, Raphaël Riva, Cyril Buttay, Stephane Azzopardi, Hervé Morel, Dominique Planson, Régis Meuret

► To cite this version:

Amandine Masson, Wissam Sabbah, Raphaël Riva, Cyril Buttay, Stephane Azzopardi, et al.. Report de puce par frittage d'argent - mise en oeuvre et analyse. 14ème EPF, Jul 2012, Bordeaux, France. pp.CD (ref 61). hal-00729156

HAL Id: hal-00729156

<https://hal.science/hal-00729156v1>

Submitted on 7 Sep 2012

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.

Report de puce par frittage d'argent – mise en œuvre et analyse

Amandine MASSON¹, Wissam SABBAH², Raphaël RIVA¹, Cyril BUTTAY¹,
Stéphane AZZOPARDI³, Hervé MOREL¹, Dominique PLANSON¹, Régis MEURET²

¹Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Laboratoire Ampère, UMR 5005, France

²Hispano-Suiza, Safran Group, Réau, France

³Université de Bordeaux, IMS, UMR5218, F-33400 Talence, France

Résumé

Le frittage d'argent est un candidat prometteur pour remplacer les brasures haute température au plomb. Il offre en effet de meilleures performances thermiques, électriques, fonctionne à plus haute température. Plusieurs solutions existent actuellement, basée sur des particules d'argent de tailles différentes et l'ajout d'additifs de frittage. Ces solutions diffèrent par leur procédés de mise en œuvre.

Cet article présente un état de l'art des différentes techniques, puis détaille la mise en œuvre de l'une d'entre elles, basée sur des nanoparticules. Un point particulier est mis en évidence : la finition métallique des substrats DBC. Cette finition a un effet majeur sur la qualité du joint fritté, en particulier avec une finition "Ni-Au" : dans certains cas, l'attache est excellente (tenue supérieure à 50 MPa), alors que dans d'autres, elle est inférieure à 10 MPa.

I INTRODUCTION

La quasi totalité des puces de puissance est solidarisée à son substrat par des brasures (dans la plupart des cas, il s'agit de brasures à forte teneur en plomb ou HMP pour High Melting Point). De nombreux travaux visent à remplacer ces brasures, que ce soit pour des raisons de toxicité (passage au *sans plomb*), de fiabilité ou pour augmenter les températures de fonctionnement. Une des solutions les plus prometteuses est le report de puce par frittage d'argent. La structure classique d'un module de puissance est donnée figure 1.

En effet, l'attache de puce, en plus de sa fonction mécanique, doit également posséder une bonne conductivité thermique et électrique. En conséquence, seuls des matériaux métalliques (métaux ou alliages) permettent d'atteindre les niveaux de performances requis, ce qui n'est pas le cas des différentes colles (conductrices ou non) utilisées en microélectronique.

Les premiers travaux sur le frittage remontent à la fin des années 80, chez infineon [1]. Depuis 2000, on assiste à une effervescence de la recherche sur le sujet, avec l'introduction de pâte d'argent à particules nanométriques [2], la mise sur le marché de modules de puissances assemblés par frittage [3]...

Dans la première partie de cet article, nous allons faire un état de l'art du report de puce par frittage. Nous en verrons ensuite la mise en œuvre pratique avec des pâtes d'argent à base de nano-particules (section III) et nous discuterons de l'effet de la surface du substrat sur la qualité de l'attache (dernière partie).

II PRINCIPE DU REPORT PAR FRITTAGE

Le frittage est « le passage d'un compact pulvérulent à un matériau cohérent sous l'action de la chaleur » [4]. Autrement dit, c'est la consolidation d'une poudre en une pièce unique. Contrairement à la brasure, cette consolidation se fait sans changement de phase. Les liaisons entre particules sont gouvernées par des mécanismes de diffusion pour former un matériau d'abord poreux, puis pour réduire cette porosité (voir figure 2).

Si les mécanismes de diffusion sont activés par la chaleur, il n'est pas besoin, comme pour la brasure, d'atteindre le point de fusion du matériau. En conséquence, le frittage a lieu à une température qui peut être modérée : dans le cas de l'argent, la température de fusion est de 961°C, alors que les procédés de frittage que nous allons voir se déroulent à moins de 300°C. On voit ainsi que les températures de fabrication et d'utilisation sont décorréliées : une brasure n'a de tenue mécanique qu'en dessous de sa température de fusion, qui est aussi sa température de fabrication.

En contrepartie, comme tout le procédé de frittage a lieu à l'état solide, on n'observe pas de mouvements de matière macroscopiques tels que le mouillage ou les déplacements par capillarité qui se produisent durant la refusion d'une brasure. Ces mécanismes sont très utiles pour venir compenser d'éventuelles irrégularités de surface entre les pièces à joindre (ou des irrégularités dans le dépôt de pâte à braser). Cela signifie que les étapes de préparation avant frittage devront être particulièrement soignées.

Parmi les métaux disponibles pour réaliser le report par frittage, l'argent concentre la plupart des avantages

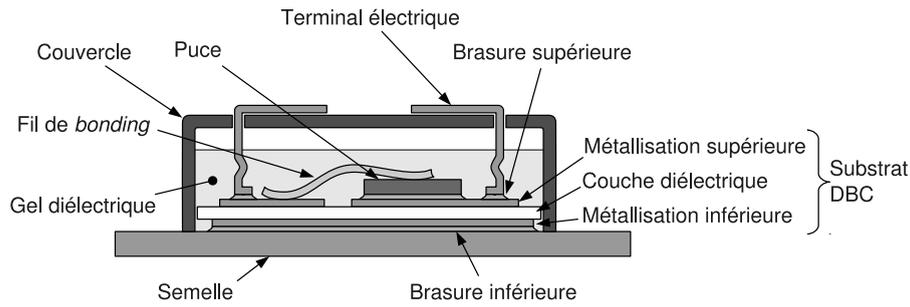


FIGURE 1: Structure (vue en coupe) d'un module de puissance. Nous nous concentrerons ici sur l'assemblage puce-substrat céramique métallisé.

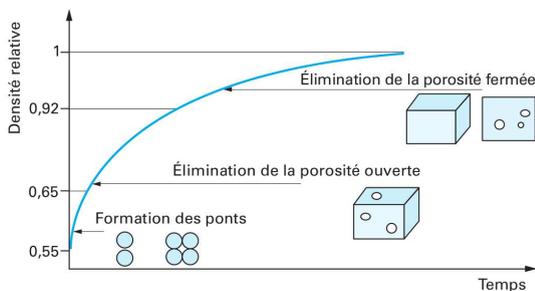


FIGURE 2: Évolution de la densité relative durant le frittage [4].

(il est également très utilisé dans les alliages de brasure) : c'est lui qui possède les meilleures conductivités thermique et électrique de tous les métaux (respectivement $429 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et 63 S.m^{-1}). Il est de plus non toxique et peu sensible à l'oxydation, permettant de réaliser le frittage sous air.

Trois paramètres principaux gouvernent le frittage : la température du procédé, la durée de maintien à cette température, et la charge (pression) appliquée sur les particules. En effet, l'exercice d'une pression sur les particules crée entre elles des contacts plus intimes qui accélèrent les mécanismes de diffusion. Néanmoins, les équipements de fabrication (fours) que l'on trouve actuellement dans l'industrie électronique ne permettent pas d'appliquer de pression mécanique sur les modules à assembler. On observe donc deux évolutions distinctes de la technologie de report de puce par frittage : l'une repose sur l'application d'une pression mécanique pour obtenir un frittage plus complet, l'autre sur un frittage naturel (sans charge), pour pouvoir utiliser les équipements existants et réduire les coûts de production.

II.1 Frittage sous pression

Cette technique est la plus avancée puisqu'elle est utilisée sur les chaînes de production de Semikron [3]. Son développement remonte à plus de 20 ans, avec une technologie brevetée en 1989 [5]. Son avantage est d'utiliser des particules d'argent de taille micrométrique ($15 \mu\text{m}$ dans le cas de [5]), relativement simple à produire. La température d'assemblage est relativement modérée

(240°C), par contre la pression appliquée sur les puces est forte, de l'ordre de 40 MPa [3]. Cela correspond à une force de 4000 N sur une puce de $10 \times 10 \text{ mm}^2$. L'outillage utilisé pour appliquer la pression doit donc être particulièrement soigné pour ne pas détruire les puces [6].

II.2 Frittage sous pression faible ou nulle

La cinétique du frittage est gouvernée par la loi de Herring [4] : deux poudres constituées de particules de tailles respectives r_1 et r_2 parviendront au même niveau de frittage dans des durées t_1 et t_2 liées par la relation suivante :

$$\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^m = \frac{t_2}{t_1} \quad (1)$$

Où m est une constante entière (2 à 4) liée au mécanisme de déplacement de matière durant le frittage (transport gazeux, diffusion en volume, en surface...). Il apparaît donc que de petites particules vont fritter beaucoup plus facilement. Il devient alors possible de réduire la température de frittage ou la pression appliquée. À l'extrême, des particules de quelques nanomètres de rayon seulement peuvent être si réactives qu'elles vont fritter à température ambiante et sans pression [7].

Plusieurs fabricants proposent des pâtes à base de nanoparticules. Citons NBETech (Nanotach [2]), Cookson (Argomax) et Henkel (SSP2000). Toutes sont conçues pour un frittage à une température de 250 à 300°C , sous une pression modérée ($<5 \text{ MPa}$) à nulle (frittage naturel, dans un four)

II.3 Composition des pâtes d'argent

En plus de l'argent (sous forme de micro ou nanoparticules), les pâtes contiennent des éléments organiques qui ont trois fonctions :

- liant : pour donner une cohésion à la pâte, permettre une application par sérigraphie ;
- dispersant : ce composant recouvre les particules d'argent et les sépare les unes des autres, pour les empêcher de fritter avant qu'on ne le veuille ;
- diluant : pour fixer la viscosité de la pâte.

TABLE 1: Paramètres d'assemblage

Série	dépôt	substrat	pression
A, A'	50 μm	DBC brut	6 MPa
B	50 μm	DBC brut	6 MPa
C	50 μm	DBC fini Au	6 MPa
D	50 μm	Si ₃ N ₄ fini Au	6 MPa
E	50 μm	DBC poli	6 MPa
F	100 μm	DBC brut	6 MPa
J	50 μm	DBC brut	0.7 MPa
N	50+50 μm	DBC poli	6 MPa
O	50+50 μm	DBC brut	6 MPa
T	50+50 μm	Si ₃ N ₄ fini Au	6 MPa

À cela peuvent s'ajouter des additifs destinés à accélérer le frittage. Ces éléments organiques doivent être retirés par une phase dite de séchage ou déliantage avant que la phase de frittage ne débute.

III MISE EN ŒUVRE D'UNE PÂTE À BASE DE NANOPARTICULES

Les travaux menés au CPES (Center for Power Electronic Systems), au Virginia Tech (USA), ont débouché sur la commercialisation d'une pâte d'argent à base de particules de taille nanométrique [2]. Ce produit présente l'avantage d'être bien décrit dans la littérature scientifique (la composition est même donnée en détails dans un brevet [8]), c'est pourquoi il a été sélectionné pour la présente étude. Sa dénomination commerciale est Nanotach, et il est vendu par la société NBE Tech.

Les travaux menés à Ampère [9] ont consisté, à partir de la littérature existante, à trouver le mode opératoire permettant de réaliser des attaches de puce de qualité contrôlée. Pour cela, nous avons fait varier plusieurs paramètres (table 1) : épaisseur du dépôt de pâte, type de substrat céramique métallisé, pression d'appui. Les autres paramètres de l'assemblage (valeur et durée des différentes étapes du profil de température) proviennent des travaux du CPES [10].

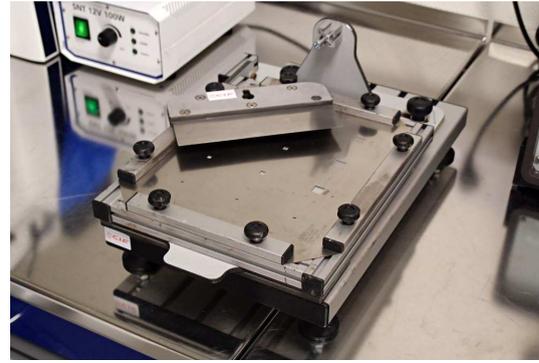
Des essais préliminaires ont montré qu'une pression minimale était nécessaire pour obtenir une bonne adhésion des puces sur leur substrat, contrairement à ce qu'indiquait le fournisseur : la notice de la pâte stipule en effet que pour les puces de taille inférieure à $3 \times 3 \text{ mm}^2$, aucune pression n'est requise.

III.1 Mode opératoire

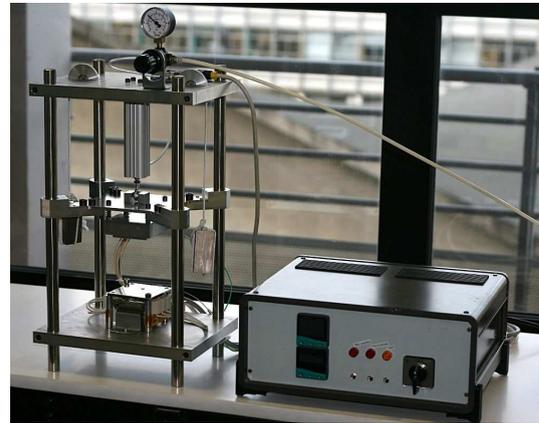
Le véhicule de test utilisé ici est constitué d'un substrat céramique métallisé (type DBC), sur lequel une puce est reportée par frittage.

Les puces choisies sont des diodes SiC non fonctionnelles (rebut de production) produits par la société SiCED, d'une taille de $2,7 \times 2,7 \text{ mm}^2$. 4 types de substrats ont été testés :

- du DBC (Direct Bonded Copper), avec des métallisations en cuivre nu



(a)



(b)

FIGURE 3: Les équipements utilisés pour déposer la pâte (a) et appliquer le profil thermique (b)

- le même, avec les métallisations polies pour en réduire la rugosité
- des substrats Si₃N₄ dont le cuivre est recouvert d'une finition Ni/Au
- des substrat DBC avec une finition Ni/Au

Les différentes configurations testées sont décrites dans le tableau 1. Pour chacune d'elles, la pâte d'argent a été appliquée sur le substrat par sérigraphie (figure 3(a)), en utilisant un écran de 50 ou 100 μm d'épaisseur. La puce a été placée sur le dépôt de pâte, puis l'ensemble a été placé sur le plateau chauffant d'une presse développée spécifiquement (figure 3(b)).

Le profil de température appliqué a été choisi en fonction de la littérature [10]. Il est visible figure 5.

L'ensemble du procédé est réalisé sous air (pas d'atmosphère protectrice), et la pression définie dans le tableau 1 est appliquée continuellement.

L'évaluation des résultats se fait, pour chaque configuration (série) de la table 1, selon deux critères :

- 5 véhicules de test (au moins) sont soumis à un test de cisaillement (figure 4), et la contrainte nécessaire à l'arrachement de la puce est mesurée. L'objectif est d'avoir une contrainte élevée, mais également que les résultats soient proches pour toutes les puces d'une même série (bonne reproductibilité).

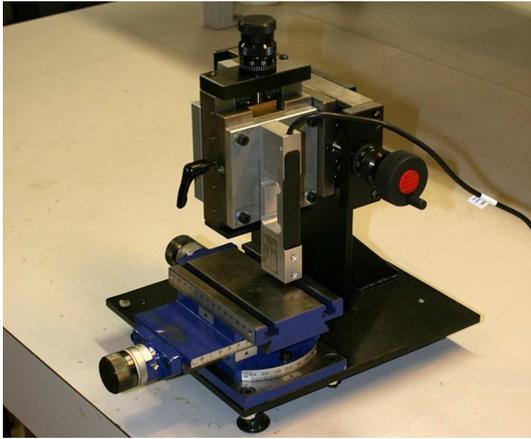


FIGURE 4: Système de mesure de la tenue mécanique de l'attache

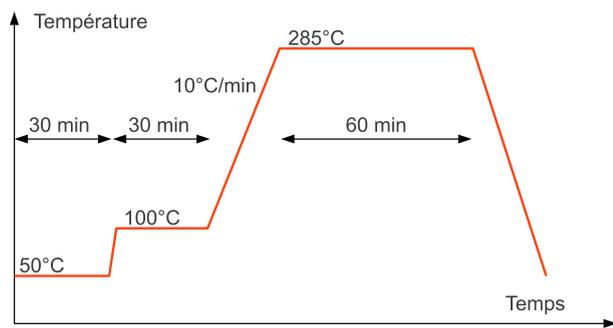


FIGURE 5: Le profil de température utilisé pour le frittage

- un véhicule est découpé et préparé pour une observation au microscope. L'objectif est de rechercher d'éventuelles irrégularités (vides, fissures) dans le joint d'argent, et d'en mesurer son épaisseur.

III.2 Résultats et discussion

Les tenues en cisaillement mesurées sur les différents échantillons sont résumées pour chaque série sur la figure 6. Des différences nettes apparaissent suivant les configurations d'assemblage. Comme mentionné précédemment, notre objectif est d'obtenir une bonne tenue mécanique (boîte la plus haut possible sur l'axe vertical) mais également une bonne reproductibilité (points les plus regroupés possible, donc boîte et moustaches les plus petits possible).

Selon ces deux critères, deux séries « sortent du lot » : la série E (très regroupée), et la série T (très bonne tenue). Notez qu'il n'est pas possible de conclure quand à la reproductibilité de la série T, les mesures obtenues correspondant à la limite de notre banc de cisaillement et non pas à la rupture du joint d'argent.

Les coupes métallographiques de trois séries (A, E et T) sont données figure 7. Entre les séries A et E, seul le substrat diffère (DBC brut dans un cas, poli dans l'autre). On peut voir que dans les deux cas, le joint d'argent obtenu est très mince (environ $10 \mu\text{m}$ pour $50 \mu\text{m}$ de pâte déposée avant frittage). La rugosité du DBC

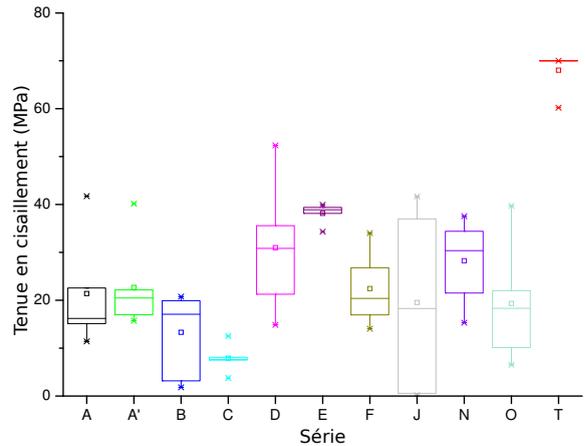


FIGURE 6: Résultats en "boîtes à moustaches" de la tenue en cisaillement de chaque série de la table 1. Les extrémités des "moustaches" représentent les valeurs extrêmes mesurées sur les échantillons, les limites de la boîte le premier et troisième quartile de la population, et le trait central la médiane. Les noms des séries (A à T) correspondent aux configurations d'essai décrites dans le tableau 1.

brut étant du même ordre de grandeur (cf figure 7(a)), des vides apparaissent dans le joint. Pour un DBC poli, beaucoup moins rugueux, le joint est homogène (cf figure 7(b)), ce qui explique la bonne reproductibilité de la série E.

Il faut noter que ces résultats ont été obtenus sur cuivre nu (pas de protection contre l'oxydation type Ni/Au), et le procédé a été réalisé sous air, donc en présence d'oxygène. Il est donc très intéressant de noter que l'oxydation du cuivre (bien visible sur les véhicules de test) n'a pas empêché une bonne adhésion des puces. Il semblerait que la pâte d'argent ait joué le rôle de barrière, limitant l'exposition à l'oxygène du cuivre situé en-dessous.

Comme nous l'avons vu, le joint d'argent obtenu sur les séries A et E est très mince et ne peut compenser la rugosité d'un DBC brut. Nous avons donc cherché à augmenter l'épaisseur de ce joint d'argent. Pour cela, nous avons essayé :

- de déposer plus de pâte avant assemblage ($100 \mu\text{m}$ contre $50 \mu\text{m}$, série F) ;
- de réduire la pression appliquée sur la puce, pour limiter le fluage de la pâte (série J) ;
- de faire un dépôt en deux étapes (dépôt de $50 \mu\text{m}$ de pâte, séchage à l'air libre, puis dépôt de $50 \mu\text{m}$ de pâte fraîche et frittage sous pression). Cette méthode est conseillée par le fabricant de la pâte pour les puces de taille supérieure à $3 \times 3 \text{ mm}^2$ (séries N, O, T).

Il apparaît (figure 6) que la série F ne diffère pas notablement de la série de référence A. En effet, la quantité de pâte supplémentaire est chassée lorsque la presse appuie sur la puce, et le joint final n'est pas plus épais. La réduction de pression (série J) se traduit par une aggravation de la dispersion, avec une tenue mécanique très

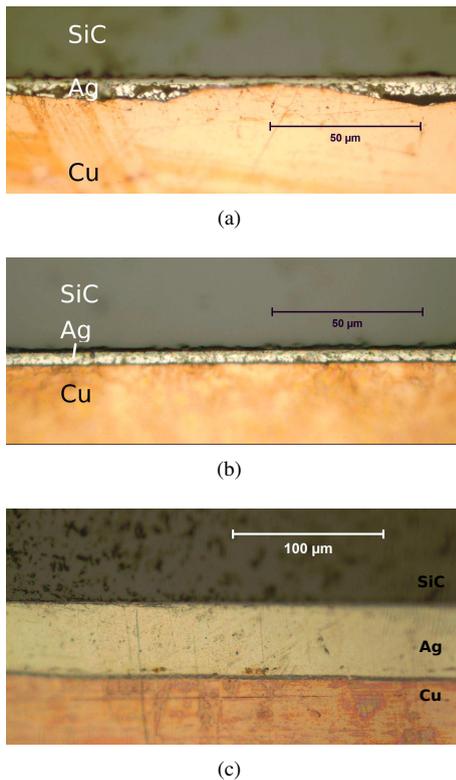


FIGURE 7: Coupes métallographiques d'assemblages obtenus pour des échantillons des séries A' (a), E (b) et T (c). Notez que l'échelle de la coupe (c) est environ double de celle des autres.

faible pour certains échantillons.

Le dépôt en deux étapes (séries N, O et T) est plus intéressant. Pour les séries N et O (substrat DBC cuivre brut et poli respectivement), il n'améliore pas les résultats vis à vis de la série A. Pour un substrat avec une finition Ni/Au, par contre (série T), l'amélioration est évidente, avec une tenue moyenne qui dépasse les capacités de notre banc de mesure (70 MPa, soit une force d'arrachement supérieure à 510 N pour une puce de $2,7 \times 2,7 \text{ mm}^2$). La différence entre ces trois séries est associée à un problème d'oxydation : lors du séchage à l'air libre, les substrats cuivrés s'oxyderaient sous le dépôt d'argent, contrairement au séchage sous pression (séries A, B, E, F et J). Le substrat qui dispose d'une finition Ni/Au n'est pas sensible à ce problème, d'où une très bonne adhérence de l'argent. Les coupes métallographiques confirment la plus grande épaisseur du joint obtenu (figure 7(c)).

IV CONSIDÉRATIONS SUR LES MÉTALLISATIONS DE SUBSTRAT

Contrairement aux procédés de brasure utilisés en électronique de puissance (fours sous vide et/ou atmosphères gazeuses contrôlées), le procédé de frittage se déroule sous air. L'oxygène est utilisé pour consumer les composés organiques présents dans la pâte [11]. En

conséquence, il faut protéger les pistes de cuivre des substrats céramiques métallisés de l'oxydation : même si nous avons pu démontrer une bonne adhérence de la pâte d'argent sur le cuivre nu, l'oxydation des conducteurs n'est pas acceptable puisqu'elle interdit d'autres étapes de connexion comme du wirebonding.

Plusieurs types de finitions métalliques ont été testés : plusieurs variantes de Nickel/or "electroless", du Nickel-or par voie électrolytique, ainsi que de l'argent. Pour les assemblages effectués à l'aide de la pâte d'argent NBE Tech, nous avons pu remarquer de larges différences, notamment entre finitions Ni/Au "electroless" de différents fabricants : par exemple, dans la figure 6, les séries C et D ont été réalisées sur des substrats Ni/Au "electroless" ayant des épaisseurs de nickel et d'or comparables (quelques microns de nickel et 50 nm d'or).

Il apparaît donc que des travaux complémentaires sont nécessaires pour pouvoir déterminer le type de finition métallique nécessaire à une bonne attache de puce par frittage.

V CONCLUSIONS

Le frittage d'argent est une alternative attractive à la brasure, car cette technologie permet en théorie un fonctionnement à température très élevée (supérieure à 300°C). Il faut cependant noter que ses performances doivent encore être validées, notamment au travers de tests de vieillissement. La mesure de la tenue en cisaillement présentée ici doit donc être poursuivie après vieillissement des échantillons. De même, la mesure des performances thermiques doit être effectuée dans l'état initial et après vieillissement.

L'étude réalisée a pu montrer les éléments primordiaux pour réaliser une attache de puce par frittage d'argent. Une pression modérée (6 MPa) doit être appliquée sur les puces. Pour obtenir un joint d'une épaisseur conséquente (de l'ordre de $50 \mu\text{m}$), un procédé de dépôt en deux étapes (dépôt/séchage/dépôt/frittage) est nécessaire.

Si la tenue mécanique obtenue est très satisfaisante (plus de 70 MPa), la durée du procédé devient alors rédhibitoire (plus de 4 heures, refroidissement compris). Les travaux réalisés jusqu'ici visaient la qualité de l'attache. Il nous faut donc maintenant chercher à en optimiser la durée de réalisation.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté ici a été principalement financé par la « Fondation pour la Recherche en Aéronautique et Espace » (FRAE) au travers du projet EPAHT. Les auteurs tiennent à remercier la fondation pour son aide.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Schwarzbauer and R. Kuhnert, "Novel large area joining technique for improved power device performance," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 1, pp. 93–95, jan. 1991.

- [2] G. Bai, "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, oct 2005. [Online]. Available : <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10312005-163634/unrestricted/Dissertation-GBai05.pdf>
- [3] C. Göbl, P. Beckedahl, and H. Braml, "Low temperature sinter technology Die attachment for automotive power electronic applications," in *Automotive Power Electronics*, Paris, 21–22 jun 2006, p. 5. [Online]. Available : www.semikron.com/internet/webcms/objects/pdf/APE2006_Goeb1.pdf
- [4] D. Bernache-Assollant and J.-P. Bonnet, *Frittage : aspects physico-chimiques - Partie 1 : frittage en phase solide*. Techniques de l'ingénieur, 2005, vol. AF 6 620, ch. Physique Chimie, p. 10. [Online]. Available : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/fondamentaux-en-chimie-42106210/frittage-aspects-physico-chimiques-af6620/>
- [5] H. Schwarzbauer, "Method of securing electronic components to a substrate." U.S Patent Patent 4 810 672, mar 7, 1989. [Online]. Available : <http://www.google.com/patents/about?id=ViVhAAAABAJ&dq=4810672>
- [6] C. Göbl, "Apparatus and clocked method for pressure sintering," US patent Patent US 2007/0 131 353 A1, jun 14, 2007. [Online]. Available : <http://www.google.com/patents?id=L-qhAAAABAJ&pg=PA1#v=onepage&q&f=false>
- [7] D. Wakuda, K.-S. Kim, and K. Sugauma, "Ag Nanoparticle Paste Synthesis for Room Temperature Bonding," *IEEE Transaction on Components and Packaging Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 1–6, mar 2010.
- [8] G.-Q. Lu, G. Bai, J. N. Calata, and Z. Zhang, "Nanoscale metal paste for interconnect and method of use," Blank Rome LLP, Blank Rome LLP, Washington, US Patent Application US2007/0183920 A1, aug 2007.
- [9] A. Masson, "Frittage d'une pâte de nano-poudres d'argent : une solution alternative aux brasures classiques haute température," in *Actes de la conférence Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE) 2011*, Belfort, France, dec 2011, p. 10.
- [10] T. Wang, X. Chen, G.-Q. Lu, and G.-Y. Lei, "Low-Temperature Sintering with Nano-Silver Paste in Die-Attached Interconnection," *journal of electronic materials*, vol. 36, no. 10, pp. 1333–1340, 2007.
- [11] M. Knoerr and A. Schletz, "Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles : Evaluation of Influence of Parameters Time, Temperature and Pressure on Density, Strength and Reliability," in *Proceedings of the Conference on Integrated Power Systems (CIPS)*, V. Verlag, Ed., no. 10.3, Nuremberg, Germany, mar 2010.