

Thermocompression de cuivre poreux réalisée par dépôt électrochimique pour l'assemblage des composants semiconducteurs de puissance

Goulven JANOD^{1,2}, Lucas CHACHAY², Jonathan SCHOENLEBER³, Yvan AVENAS¹, Didier BOUWARD², Rémi DAUDIN², Jean-Michel MISSIAEN², Marie-Pierre GIGANDET³, Jean-Yves Hihn³, Rabih KHAZAKA⁴

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, SIMAP, 38000 Grenoble, France

³Univ. Franche-Comté, CNRS, UTINAM UMR6213, 25030 Besançon, France

⁴Safran SA, Safran Tech, 1 rue des jeunes bois, Châteaufort, CS 80112

RESUME – Poussée par les applications dans le domaine de la mobilité électrique, l'électronique de puissance doit aujourd'hui faire face au défi de pouvoir fonctionner à des température élevées (200°C) qui s'avèrent limitantes pour la fiabilité notamment des brasures classiquement utilisées entre substrat et composants. Une nouvelle méthode d'accroche par thermocompression de dépôts électrochimiques de cuivre poreux est présentée dans ces travaux. Les accroches réalisées sont testées thermiquement et montrent des résultats meilleurs que des brasures. L'influence des paramètres de thermocompression (temps, température et pression) est aussi investiguée grâce à des caractérisations en microscopies acoustique et optique. Les résultats montrent qu'il est possible d'améliorer la qualité de l'accroche en ajustant les paramètres de thermocompression.

Mots-clés — Électronique de puissance, Gestion thermique, Accroche de puces, Accroche en cuivre

1. INTRODUCTION

En électronique de puissance, la tendance actuelle est à l'augmentation des densités de puissance. Cela permet d'envisager des modules de puissance plus légers et moins volumineux pour répondre à la demande croissante d'électrification des systèmes, notamment dans le milieu de la mobilité. Cependant, de par cette densification, la gestion thermique des composants et de leur environnement devient un problème majeur. Aujourd'hui, l'accroche entre puces semiconductrices et substrats est généralement réalisée en utilisant des brasures. Les alliages de brasure ont des températures de fusion comprises entre 180 et 350°C. Dans les applications pour la mobilité, les modules de puissances doivent pouvoir fonctionner durablement à des températures avoisinant les 200°C. La proximité de ces deux températures affecte significativement les propriétés mécaniques des brasures. En effet, il est conseillé d'avoir une température d'utilisation qui ne dépasse pas 0.5 fois la température de fusion (en Kelvin) d'un matériau pour ne pas détériorer significativement les propriétés mécaniques des joints [1]. Dans le cas des brasures, cette limite est largement dépassée, puisque selon les applications et le type exact de pâte à braser utilisée, la température d'utilisation se situe autour de 0,8 fois la température de fusion [2]. De plus, des cavités peuvent se créer dans les brasures, dues à la présence de gaz emprisonné [3]. Cela en fait une des causes principales des problèmes de fiabilité rencontrés par les modules de puissances [4].

De nouvelles techniques d'accroche sont aujourd'hui proposées, telles que le frittage de pâtes d'argent [5], la soudure en phase liquide transitoire (TLPB, pour *Transient Liquid Phase Bonding* en anglais) [6], ou encore les accroches à base de cuivre, par exemple avec l'utilisation de nanofils cuivre [7]–[9]. Ces techniques ont l'avantage de présenter de meilleures tenues en température, avec des températures de fusion supérieures à 600°C pour le frittage et pour certains alliages de TLPB. Par conséquent, les propriétés mécaniques de l'accroche sont moins affectées. Le procédé de frittage consiste à chauffer une poudre pour la consolider et la densifier. Il peut être amélioré par l'application d'une pression. Aujourd'hui, le frittage d'argent est plus développé que celui du cuivre car ce dernier présente des problèmes d'oxydation [10]. Cependant, le coût des poudres d'argent (environ 100 fois supérieur à celui des poudres de cuivre), associé à la criticité du matériau [11], ainsi qu'aux problèmes d'électromigration liés à la l'argent [4] font que le frittage du cuivre regagne en intérêt. De plus, celui-ci est déjà particulièrement intégré dans les modules de puissance (pistes pour le passage du courant, métallisations, dissipateurs), et limiter le nombre de matériaux permet de régler d'autres problèmes de fiabilité liés aux intermétalliques [4]. C'est d'ailleurs l'un des problèmes de la technique TLPB, qui repose sur la formation d'un intermétallique au niveau du contact composant/substrat. L'utilisation de nanofils de cuivre permet d'éviter les problèmes cités précédemment. Cette technique d'accroche se base sur la croissance électrochimique d'un réseau de nanofils sur une des deux ou sur chacune des deux faces à assembler [8]. Lorsque les deux faces sont recouvertes, elles peuvent être pressées entre elles à température ambiante, ainsi les réseaux de nanofils s'entremêlent, ce qui génère l'accroche. Des tenues en cisaillement de 1 MPa sont obtenues expérimentalement dans ce cas-là [8]. Lorsqu'une seule face est recouverte de nanofils, il est nécessaire de monter en température (dans une gamme raisonnable pour l'électronique de puissance, c'est-à-dire 250 – 350°C) pour activer des phénomènes plus proches du frittage. Des résistances au cisaillement supérieures à 10 MPa peuvent alors être atteintes [9]. Cette technique d'accroche est prometteuse mais nécessite l'utilisation d'une membrane sacrificielle [7]. Dans les articles cités, le comportement mécanique des accroches par nanofils est étudié, mais pas le comportement thermique.

Dans cet article, une technique d'accroche par thermocompression de dépôt électrochimique de cuivre poreux

déposé sur le substrat est investiguée. La première partie décrit la thermocompression des dépôts ainsi que les caractérisations réalisées : tests thermiques et microscopie optique et acoustique. Ensuite, les résultats de ces caractérisations sont présentés et comparés avec les propriétés des brasures classiques. Différents paramètres de thermocompression sont également testés, pour étudier leur influence. Enfin, les perspectives de ces travaux viennent ponctuer cet article.

2. CONSTRUCTION DES ECHANTILLONS TESTES ET METHODES D'ANALYSE

Pour effectuer les différents tests, des échantillons spécifiques sont élaborés. Ils sont constitués d'un substrat céramique en nitre d'aluminium (AlN) métallisé cuivre (« DBC », pour *Direct Bonding Copper*). Sur la métallisation de ce substrat, un dépôt électrochimique de cuivre poreux est réalisé puis quatre diodes (ref. 5SLY 12E1200) sont thermocompressées ensemble par-dessus. Les dimensions des différents éléments sont présentées dans le Tableau 1, ainsi que leurs principales propriétés thermiques à température ambiante. Ces propriétés seront utilisées pour des simulations numériques.

Tableau 1 : Dimensions et propriétés des différents éléments utilisés dans les échantillons

	Diode	Méttalisation	Céramique
Epaisseur (mm)	0.35	0.13	1.0
Surface (mm×mm)	6.3×6.3	25×25	27×27
Conductivité thermique (W/m/K)	117	385	170
Capacité thermique massique (J/kg/K)	700	385	725
Masse volumique (kg/m ³)	2330	8930	3300

2.1. Dépôts électrochimiques

Les dépôts électrochimiques sont réalisés par une technique de croissance dynamique de bulles d'hydrogène (DHBT, pour *Dynamic Hydrogen Bubble Template*). Deux électrodes sont placées dans un bain de cuivre acide. En contrôlant la densité de courant appliquée, il est possible d'obtenir une double réduction à la cathode, à la fois des ions cuivre se transformant en cuivre métallique et des ions H⁺ formant des bulles de dihydrogène. Ainsi, du cuivre est déposé autour des bulles d'hydrogène, ce qui donne la porosité au dépôt, une fois que celles-ci se sont échappées. En contrôlant le courant circulant entre les électrodes, il est possible de générer des pores de tailles différentes et maîtrisées [12], [13]. Pour ce travail, des dépôts de 30s à 300 A/dm² sont sélectionnés. La métallisation cuivre du substrat AlN est utilisée directement comme cathode. Un dépôt obtenu est présenté sur la Figure 1. Il apparaît oxydé. Pour éviter tous problèmes liés à cette oxydation les dépôts sont ensuite placés dans un four à 500°C pendant 1h sous atmosphère réductrice (95% He, 5% H₂) avant la thermocompression.

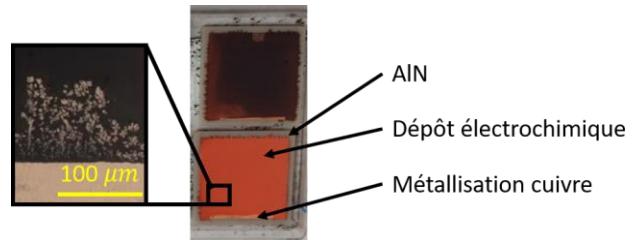


Figure 1 : Dépôts DHBT avant et après réduction, directement effectués sur un substrat en AlN avec métallisation cuivre. L'insert présente également une vue en coupe au microscope optique du dépôt.

2.2. Thermocompression

L'assemblage est placé entre les mors d'une machine de thermocompression. Un schéma de principe de cette machine est présenté sur la Figure 2. Pendant un essai, le mors supérieur descend au contact des diodes, jusqu'à appliquer une faible charge (10% de la pression complète, fournie dans le Tableau 2). Etant donnée la faible épaisseur des dépôts de cuivre ($\approx 20 \mu\text{m}$ après thermocompression), il est nécessaire que les mors soient bien parallèles pour que la charge se répartisse équitablement sur les 4 diodes. A cet effet, une rotule est positionnée sous le mors inférieur. L'ensemble est ensuite chauffé sous vide dynamique pour éviter toute oxydation, après trois balayages à l'argon hydrogéné. Pendant toute la durée de l'essai, la pression dans la machine de thermocompression est inférieure à 10⁻¹ mbar. Puis, quand la température voulue est atteinte et stabilisée, la pression complète est appliquée, pendant le temps voulu.

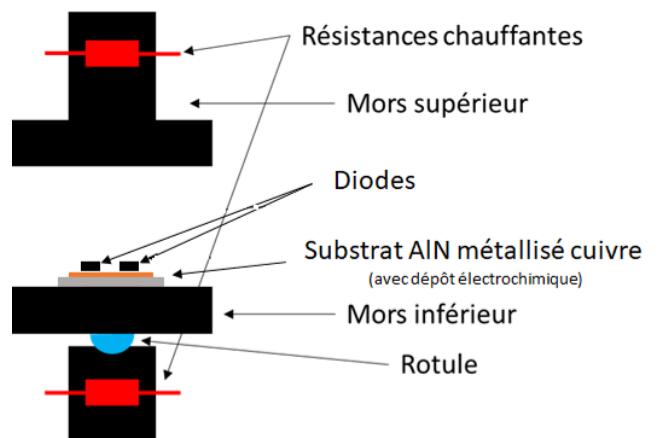


Figure 2 : Schéma de principe de la thermocompression.

Les différents paramètres de thermocompression sont détaillés dans le Tableau 2, avec en rouge les valeurs modifiées par rapport à l'échantillon A de référence. Pour chaque échantillon, ce sont donc quatre diodes qui sont thermocompressées dans des conditions similaires. Cela permet d'avoir plus de données pour assurer les résultats présentés. En effet, les quatre diodes sont scannées par microscopie acoustique et testées thermiquement. Ces caractérisations sont détaillées dans les prochains paragraphes.

Tableau 2 : Paramètres de thermocompression utilisés

Echantillon	Température (°C)	Temps (min)	Pression (MPa)
A (référence)	300	30	20
B	250	30	20
C	350	30	20
D	300	15	20
E	300	60	20
F	300	30	10
G	300	30	30
Blanc (sans dépôt)	300	30	20

Les échantillons B et C permettent de juger de l'influence de la température. Les échantillons D et E donnent des informations sur l'influence du temps de thermocompression. Quant aux échantillons F et G, ils permettent d'évaluer l'influence de la pression, dans des gammes classiquement utilisées pour le frittage d'argent. Un échantillon sans dépôt est également réalisé : les diodes sont directement thermocompressées sur le DBC, dans les conditions de l'échantillon référence A. Cet échantillon permettra d'analyser l'importance de la présence du dépôt électrochimique.

2.3. Microscopie acoustique (SAM)

Afin d'analyser la qualité du contact, et notamment pour savoir si des délaminations sont présentes après la thermocompression entre le dépôt et le substrat ou entre le dépôt et les diodes, des clichés en microscopie acoustique (SAM) sont réalisés sur les quatre diodes, pour tous les échantillons. Cette méthode permet de bien mettre en évidence les inhomogénéités qui peuvent ressortir sur la surface des contacts.

2.4. Test d'impulsion thermique mis en place

La caractérisation thermique de l'accroche des diodes qui est présentée consiste à injecter un fort courant (80 A) pendant un temps court (quelques dizaines de ms) dans celles-ci, puis à mesurer l'élévation de température qui en résulte. Une élévation de température plus faible est signe d'une meilleure qualité thermique d'accroche. L'élévation de température est obtenue à partir de la mesure du paramètre thermosensible V_f de la diode, préalablement calibré. L'impulsion de courant utilisée pour caractériser l'accroche doit à la fois être suffisamment longue pour générer une élévation de température significative (plusieurs dizaines de degrés), et suffisamment courte pour ne permettre de caractériser que l'environnement thermique proche de la diode. Pour évaluer la durée optimale de l'impulsion de courant à envoyer, des simulations thermiques transitoires ont été effectuées à l'aide du logiciel Flotherm. La géométrie de l'assemblage est construite dans le logiciel, avec les différentes propriétés listées dans le Tableau 1, et une puissance thermique de 200 W est générée par le composant, simulant les pertes au passage du courant. L'impédance thermique de l'assemblage est enregistrée au cours du temps, et calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Z_{th}(t) = \frac{T(t) - T_0}{P_{dissipée}} \quad (1)$$

avec $T(t)$ la température moyenne du composant à l'instant t , T_0 sa température initiale et $P_{dissipée}$ la puissance thermique générée par le passage du courant dans le composant.

Une résistance thermique de contact est simulée entre la métallisation du substrat et le composant. La valeur de cette résistance est changée dans une gamme attendue des résultats (de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ à $10 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$), pour observer à partir de quelle durée ce contact influence le comportement thermique. A titre de comparaison, une brasure « parfaite » (sans cavité) d'une épaisseur de $50 \mu\text{m}$ représente une résistance de contact d'environ $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Les résultats de ses simulations, présentés sur la Figure 3, montrent que la résistance thermique associée au contact entre le composant et le substrat a une influence dès les premières millisecondes d'impulsion. En dessous de 10 ms, il est cependant difficile de différencier 2 valeurs de résistance thermique entre elles. En revanche, au-delà de 25 ms d'impulsion, les différences entre les courbes n'évoluent plus. Il n'y a donc pas d'intérêt à sélectionner une impulsion plus longue, d'autant qu'il faut éviter de caractériser l'environnement éloigné de la diode, ce qui pourrait « noyer » l'impact de la résistance de contact. Comme compromis, une impulsion de 15 ms, générant environ 200 W de puissance thermique, a été sélectionnée. Malgré ce choix, il est à noter que l'impédance thermique n'est pas représentative que du contact, mais aussi de la diode et du substrat. C'est pourquoi, dans l'analyse des résultats, il est nécessaire de prendre en compte qu'une faible différence sur l'impédance thermique peut s'avérer être un gain considérable sur la partie « contact ».

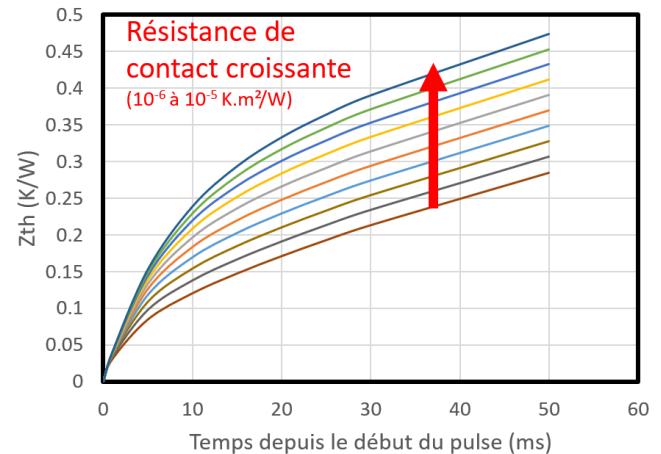


Figure 3 : Impédances thermiques simulées avec la variation de la résistance de contact.

Pour le test expérimental, les substrats DBC sont positionnés sur un circuit imprimé, comme montré sur la Figure 4. Des rubans de câblage permettent de relier les faces supérieures et inférieures des diodes aux pistes de cuivre du circuit imprimé. La mesure de la tension V_f , paramètre thermosensible de la diode, est effectuée au plus proche de chaque diode afin de limiter la variation de tension liée au passage du courant de puissance. Le test est réalisé à l'aide de l'analyseur thermique Phase 12B de Analysis tech.

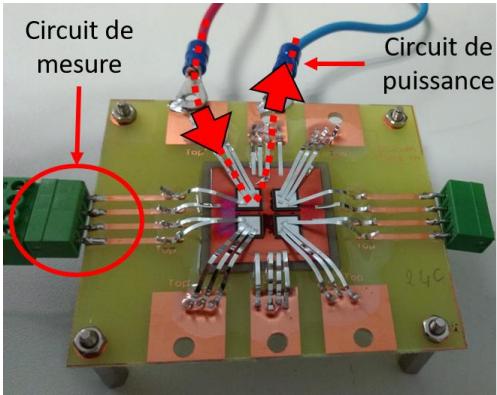


Figure 4 : Photographie d'un échantillon testé

2.5. Brasure de comparaison

Dans le but de comparer thermiquement la thermocompression à une technique d'accroche déjà connue, un échantillon avec des composants brasés à la pâte Sn63Pb37 a aussi été fabriqué. Pour s'assurer de la bonne qualité des brasures obtenues, cet échantillon a été photographié aux rayons X pour détecter la présence de cavités. L'image obtenue est montrée sur la Figure 5. Quelques cavités sont observables en blanc sous chaque diode, mais dans des proportions qui restent assez faibles pour considérer que les brasures sont de bonne qualité. En effet, une analyse d'image donne la fraction surfacique de cavité entre 2 et 8% selon les diodes.

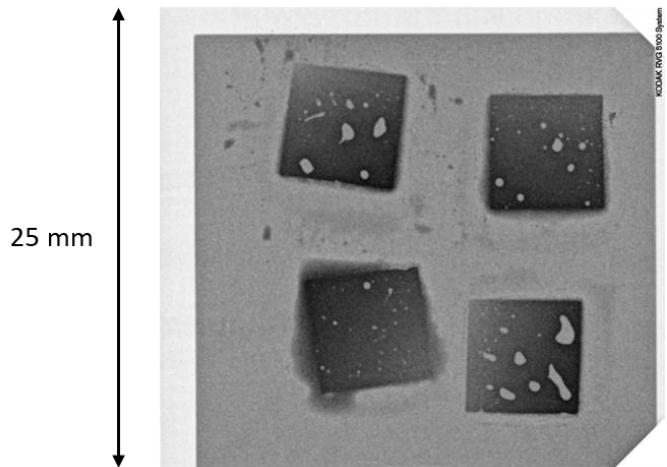


Figure 5 : Image aux rayons X des composants brasés.

2.6. Microscopie optique

Pour observer les contacts créés par les dépôts thermocompressés, une diode parmi les quatre présentes sur chaque échantillon est découpée puis observée au microscope optique. La diode découpée est enrobée dans une résine à froid et sans pression pour ne pas affecter la microstructure du contact. Elle est ensuite polie sur des tapis de polissage allant jusqu'à une solution diamantée 1 µm. Les images sont ensuite acquises par un microscope optique Olympus DSX500. Des mesures d'épaisseur de dépôts thermocompressés sont ensuite réalisées à partir des images. A partir de ces images il est possible de déduire une porosité résiduelle dans le dépôt. Cependant, avec les difficultés de polissage liées au cuivre (et notamment l'effet de beurrage), il semble que calculer cette porosité ne serait que très peu précis. Pour cette raison, les images sont simplement comparées entre elles sans chercher à évaluer la porosité résiduelle.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Homogénéité de la thermocompression

Un des premiers éléments à vérifier avant de pouvoir plus précisément analyser les résultats est l'homogénéité de la thermocompression. En effet, en positionnant 4 diodes sur le substrat, des problèmes de parallélisme entre les deux mors peuvent apparaître, malgré l'utilisation de la rotule. Cela engendrerait une répartition inhomogène de la pression appliquée, et donc un contact différent entre les quatre diodes. Les images de SAM sont présentées sur la Figure 6, avec la même orientation pour toutes par rapport au positionnement dans la machine de thermocompression. Une image de SAM sombre correspond à une zone densifiée. A l'inverse, une délamination au niveau du contact, se caractérisant par un espace vide ou sous air, sera vu sur l'image SAM par une zone plus claire. Il ne se dégage pas de tendance particulière quant à une position qui serait meilleure ou moins bonne que les autres : la thermocompression semble homogène. Cependant, sur ces images de SAM, quelques diodes semblent présenter des délaminations : une sur l'échantillon E, une autre sur le G, mais surtout les quatre diodes de l'échantillon blanc, pour lesquelles la délamination est la plus marquée. En effet pour cet échantillon, une analyse d'image montre qu'il y a à minima 60% du contact qui est délaminié. Cela montre l'importance du dépôt de cuivre poreux qui permet de corriger les aspérités présentes sur le substrat ou sur les diodes. Ainsi, sur l'échantillon blanc, le contact se fait seulement par certains points de contact et non sur toute la surface, comme le montre la Figure 8.

L'homogénéité de la thermocompression se vérifie sur les résultats de tests thermiques présentés sur la Figure 7. Quelques disparités peuvent être observées entre chaque diode, mais les écarts restent relativement faibles. Les résultats de l'échantillon blanc sont nettement moins bons que les autres, ce qui est en accord avec les observations faites au SAM et en microscopie optique. En revanche, les diodes qui pouvaient sembler moins bonnes sur les échantillons E et G au SAM ne présentent pas de résultats thermiques particulièrement différents. Ainsi, l'analyse des échantillons par microscopie acoustique semble permettre d'identifier les contacts qui sont thermiquement nettement moins bons que les autres. En revanche, cette méthode d'analyse ne permet pas de différencier deux échantillons relativement proches.

Il est également important de vérifier que la pression appliquée lors du processus est homogène sur une même diode. Le Tableau 3 présente des mesures d'épaisseur de dépôt effectuées sur des images en microscopie optique telles que celles présentées sur la Figure 8. Ces mesures sont effectuées sur toute la largeur de la diode, et les valeurs minimale, maximale et moyenne sont données dans le tableau. L'écart maximum trouvé sur une même diode est de 6 µm, ce qui confirme le bon parallélisme lors de la thermocompression. Dans le cas de l'échantillon blanc (sans dépôt), les valeurs données correspondent à l'épaisseur de « vide » entre la diode et le substrat.

En comparant la Figure 5 avec les différentes images SAM de la Figure 6, il semble que la thermocompression permette une accroche plus homogène dans laquelle il n'y a pas de cavités comme dans les brasures. Cette meilleure qualité d'accroche se confirme sur les résultats thermiques présentés Figure 7, où les contacts thermocompressés sont meilleurs quelles que soient les conditions de thermocompression choisies. Les images de

microscopie optique de la Figure 8 confirment également la présence du dépôt sous toute la largeur des diodes, sans cavité. Cependant, pour ces dernières, il est à noter qu'une seule coupe a été réalisée sur chaque diode, ce qui ne permet pas de cartographier l'ensemble de la surface d'accroche.

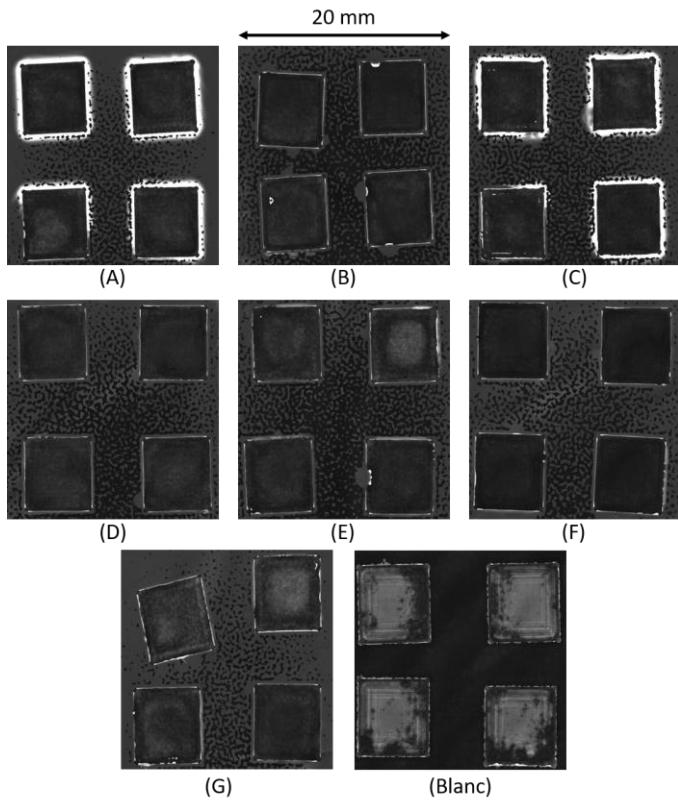


Figure 6 : Imagerie par microscopie acoustique des différents essais de thermocompression.

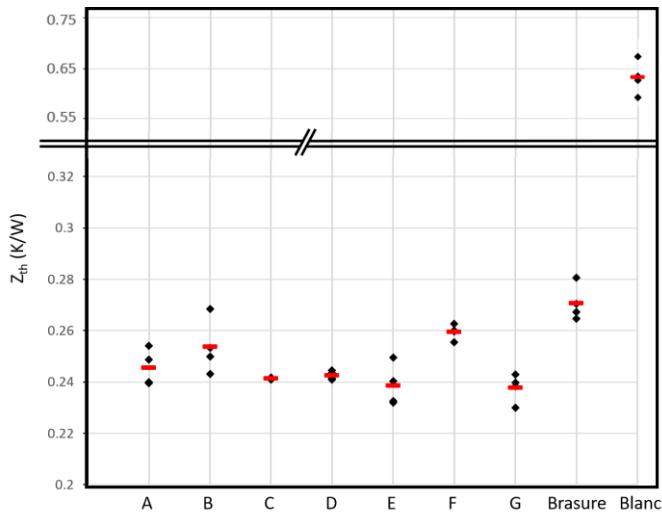


Figure 7 : Résultats des tests thermiques sur les différents échantillons. En noir, les résultats pour chaque diodes, en rouge, la moyenne.

3.2. Influence des paramètres de thermocompression

3.2.1. Influence de la température

Pour observer l'influence de la température, il faut regarder les différents résultats présentés pour les échantillons A (300°C), B (250°C) et C (350°C). En toute logique, le contact devrait être meilleur pour des températures plus élevées, qui favorisent la

diffusion atomique et donc la consolidation du contact. C'est effectivement ce qui est observé sur les tests thermiques de la Figure 7, avec une différence inférieure 0.02 K/W entre les trois moyennes. Les images en microscopie optique de la Figure 8 ainsi que les mesures présentées dans le Tableau 3 montrent une densification des dépôts avec l'augmentation de la température, ce qui explique la tendance des résultats obtenus. En effet, la conductivité thermique équivalente du dépôt thermocompressé est meilleure si le dépôt est dense. Comme l'épaisseur ne dépasse pas $30 \mu\text{m}$, l'impact sur les tests thermiques reste relativement limité.

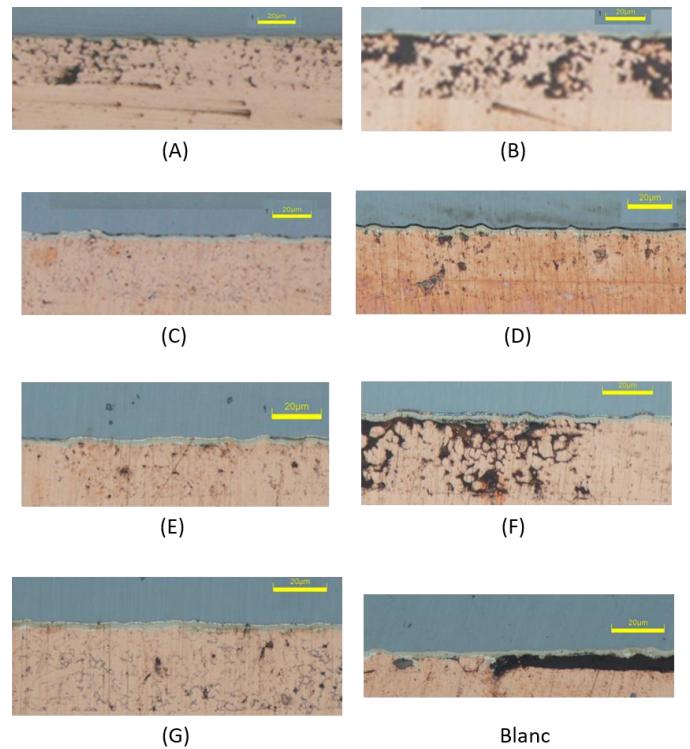


Figure 8 : Images de microscopie optique sur les différents échantillons. Pour chaque échantillon, le bas de l'image montre le substrat, et le haut montre la diode.

3.2.2. Influence du temps de thermocompression

De la même manière, la qualité des contacts devrait être améliorée avec un temps de thermocompression plus long. Ce sont ici les échantillons A (30 minutes), D (15 minutes) et E (60 minutes) qu'il faut observer. Peu de différences sont remarquées entre les échantillons tant au niveau des résultats thermiques que des microstructures, alors que c'est le paramètre parmi les trois étudiés qui varie le plus (du simple au quadruple). Comme déjà mentionné, avec les difficultés de polissage liées au cuivre, il est difficile d'évaluer la porosité à partir des images. Cependant, une densification des dépôts est tout de même mesurable, avec une épaisseur passant de $27 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$ en moyenne.

3.2.3. Influence de la pression

Le troisième paramètre de thermocompression étudié est la pression. Les résultats à observer sont ceux des échantillons A (20 MPa), F (10 MPa) et G (30 MPa). L'hypothèse faite ici est qu'une plus grande pression permet d'obtenir un meilleur contact. Elle semble se vérifier. Ce paramètre semble être celui qui a le plus d'importance parmi tous les tests réalisés. En effet, des différences supérieures à 0.02 K/W sont observées sur les tests thermiques, et, pour les trois échantillons cités, la disparité est relativement faible entre les quatre diodes testées. Les images de microstructure semblent elles aussi montrer une amélioration

du contact avec la pression. Cependant, l'épaisseur de dépôt mesurée semble être peu impactée par la pression.

Tableau 3 : Epaisseur des dépôts après thermocompression mesurés sur les images par microscopie optique

Echantillon	A	B	C	D	E	F	G	Blanc
Epaisseur moyenne dépôt (µm)	23	30	21	27	20	30	27	7
Epaisseur min (µm)	20	29	18	24	18	29	25	6
Epaisseur max (µm)	25	31	23	30	21	33	30	8

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, une nouvelle méthode d'accroche de puce électronique par thermocompression de cuivre poreux électrodéposé est présentée. Un banc de test montre que le comportement thermique des accroches réalisées est au moins aussi bon que celui des brasures. L'intérêt de cette technique d'accroche est qu'elle est a priori plus fiable à haute température que les brasures classiques même si cela reste à démontrer. Les résultats montrent que la présence du dépôt de cuivre est primordiale pour obtenir une accroche sur toute la surface des diodes testées. Les trois paramètres principaux de la thermocompression – température, temps et pression – ont été étudiés. Il apparaît que la pression a une influence plus importante que les deux autres sur les performances thermiques, même s'il est difficile de comparer avec l'influence de la température qui ne peut pas varier dans des proportions similaires.

Pour compléter ces travaux, des tests en vieillissement à température constante et en cyclage thermique passif sont en cours de réalisation. Ils permettront d'évaluer la fiabilité de telles accroches, qui devrait être en théorie leur point fort. Pour tester leur résistance mécanique, des tests en cisaillement sont également prévus.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR pour le support financier apporté au projet Copperpack (ANR-19-CE05-0011).

6. REFERENCES

- [1] V. nhat Le, « Modélisation de la tenue en fatigue des joints de brasure dans un module de puissance », These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), 2016. Consulté le: 12 avril 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2016SACLV111>
- [2] C. Buttay, « Le Packaging en électronique de puissance ».
- [3] S. H. Tran, L. Dupont, et Z. Khatir, « Electrothermal Evaluation of Single and Multiple Solder Void Effects on Low-Voltage Si MOSFET Behavior in Forward Bias Conditions », *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 7, n° 3, p. 396-404, mars 2017, doi: 10.1109/TCMPMT.2016.2633582.
- [4] R. Khazaka, L. Mendizabal, D. Henry, et R. Hanna, « Survey of High-Temperature Reliability of Power Electronics Packaging Components », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, n° 5, p. 2456-2464, mai 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2357836.
- [5] N. Botter, R. Khazaka, Y. Avenas, J. M. Missiaen, D. Bouvard, et S. Azzopardi, « Thermal aging of power module assemblies based on ceramic heat sink and multilayers pressureless silver sintering », *Microelectron. Reliab.*, vol. 126, p. 114206, nov. 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114206.
- [6] H. Greve et F. P. McCluskey, « LT-TLPS Die Attach for High Temperature Electronic Packaging », *J. Microelectron. Electron. Packag.*, vol. 11, n° 1, p. 7-15, janv. 2014, doi: 10.4071/imaps.394.
- [7] Q. H. Luan, V. Bley, T. Lebey, B. Schlegel, et L. Menager, « Nano copper wires interconnection for three-dimensional integration in power electronics », in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, juin 2008, p. 278-281. doi: 10.1109/PESC.2008.4591940.
- [8] Vh. Nguyen et al., « Fabrication of bottom die substrate solderless interconnection based on nano copper wires », in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, sept. 2009, p. 1-9.
- [9] Z. Yu et al., « Cu-Cu Thermocompression Bonding with Cu-Nanowire Films for Power Semiconductor Die-Attach on DBC Substrates », in *2021 IEEE 23rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, déc. 2021, p. 1-7. doi: 10.1109/EPTC53413.2021.9663890.
- [10] J. Li, X. Li, L. Wang, Y.-H. Mei, et G.-Q. Lu, « A novel multiscale silver paste for die bonding on bare copper by low-temperature pressure-free sintering in air », *Mater. Des.*, vol. 140, p. 64-72, févr. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.054.
- [11] « Substances critiques et stratégiques | MineralInfo ». <https://www.mineralinfo.fr/fr/securite-des-approvisionnements-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques> (consulté le 14 avril 2023).
- [12] Y. Li, W.-Z. Jia, Y.-Y. Song, et X.-H. Xia, « Superhydrophobicity of 3D Porous Copper Films Prepared Using the Hydrogen Bubble Dynamic Template », *Chem. Mater.*, vol. 19, n° 23, p. 5758-5764, nov. 2007, doi: 10.1021/cm071738j.
- [13] J. Schoenleber, B. Fedi, M.-P. Gigandet, et J.-Y. Hihn, « Porous Copper Electroforming By Dynamic Hydrogen Bubble Template Using Continuous and Pulse Currents », *ECS Meet. Abstr.*, vol. MA2021-02, n° 19, p. 704, oct. 2021, doi: 10.1149/MA2021-0219704mtgabs.