
Refroidissement des semi-conducteurs de puissance par substrat métallique enchâssé

Jean-Claude Guignard*, Michel Guillet* et Fabrice Wascheul**

* *LINA Laboratoire d'Instrumentation Numérique et Analogique
IUT 4, Boulevard Lavoisier
BP42018
49016 Angers cedex 01*

** *GYS
ZI – Boulevard des Loges
BP4159
53941 Saint Berthevin
Laval cedex*

jean-claude.guignard@univ-angers.fr ; michel.guillet@univ-angers.fr ;
f.wascheul@gys.fr

Section de rattachement : 63

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ. Le procédé SME (Substrat Métallique Enchâssé) permet d'optimiser la dissipation des composants électroniques de puissance en interposant un substrat métallique entre la semelle du composant et son dissipateur. Comparativement au SMI (Substrat Métallique Isolé), couramment utilisé pour ce genre d'application, le SME n'isole pas le composant du dissipateur mais il permet de réduire sensiblement la taille de ce dernier. Des maquettes ont été réalisées, testées et qualifiées thermiquement à partir de mesures de température et de photos infrarouges. Le procédé SME a été testé électriquement et thermiquement sur un prototype d'onduleur, 100 V, 300 A. Cette réalisation a permis de mettre en évidence plusieurs avantages supplémentaires du SME qui se sont révélés particulièrement intéressants quand le courant est élevé.

MOTS-CLÉS :

Dissipateur thermique, substrat métallique, SMI, substrat métallique isolé, semi-conducteurs de puissance, Boîtier DPAK, boîtier D2PAK, convertisseur, onduleur, résistance thermique.

1. Introduction

La dissipation thermique des composants de puissance est une fonction qui prend de plus en plus d'importance dans les convertisseurs statiques qui sont la base des équipements d'électronique de puissance tels que : les alimentations, les onduleurs, les chargeurs de batteries, etc. Bien que les composants électroniques soient de plus en plus miniaturisés, leurs pertes thermiques diminuent sensiblement moins vite. Il en résulte que la fonction dissipation thermique occupe une proportion du volume de plus en plus importante, dans les équipements.

Le procédé SME (Substrat Métallique Enchâssé) développé par le laboratoire LINA, en collaboration avec l'entreprise GYS, permet d'optimiser la dissipation de la chaleur produite par les composants électroniques de puissance, en particulier les semi-conducteurs. Deux raisons font que cette technologie peut améliorer sensiblement la fiabilité des équipements : en réduisant la température de jonction des semi-conducteurs et en assurant un assemblage mécanique simple et extrêmement robuste.

Ce procédé permet aussi de réduire le volume, la masse et le coût du dissipateur thermique et ainsi, de l'équipement lui-même.

Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet étendu à l'international par une PCT, et reçu le 1^{er} prix d'un « Appel à Idées Innovantes » organisé par Angers Technopole.

2. Etat de l'art

Grâce à son industrialisation et à sa miniaturisation, l'usage des composants CMS (Composants Montés en Surface) est pratiquement généralisé pour les applications électroniques de faible puissance, numériques ou analogiques, surtout, quand les quantités à produire sont importantes. Pour les applications de puissance, le passage aux composants CMS est plus difficile, principalement à cause de la difficulté à réaliser la jonction thermique entre le boîtier du semi-conducteur de puissance et son dissipateur. Trois solutions sont le plus souvent utilisées : dissipateur imprimé, SMI et SILPAD.

2.1. Dissipateur imprimé

Ce procédé consiste à souder la semelle du semi-conducteur de puissance (boîtier DPAK, D2PAK...) sur une surface de cuivre du circuit imprimé qui sert de dissipateur. Dans le cas d'un circuit bifaces ou multicouches, l'autre face extérieure peut aussi être utilisée (figure 1). A cause de la faible section de cuivre, la conduction thermique est limitée : une surface dépassant 2 x 2 cm devient inutile. La puissance dissipée se limite à quelques watts, ainsi, le semi-conducteur ne peut pas être utilisé au maximum de ses performances.

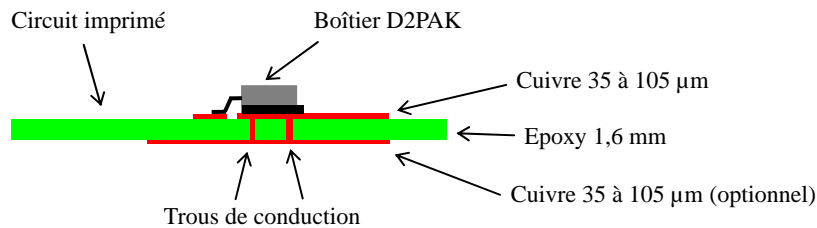


Figure 1 . Dissipateur imprimé d'un boîtier D2PAK

2.2. Procédé SMI (Substrat Métallique Isolé)

Très industrialisée, cette technologie consiste à utiliser un sandwich de même épaisseur que le circuit imprimé (1,6 mm) mais constitué différemment (figure 2). Au lieu d'être en époxy, l'épaisseur principale est en aluminium d'environ 1,5 mm, surmontée d'une couche isolante en céramique d'environ 100 µm (éventuellement en époxy) et d'une couche de cuivre routable de 35 à 300 µm.

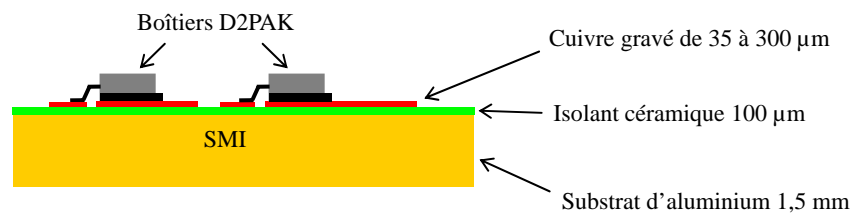


Figure 2 . SMI (Substrat Métallique Isolé) équipé de 2 D2PAK

La surface de cuivre du SMI est gravée de la même manière qu'un circuit imprimé, puis équipée de composants essentiellement CMS (pas de trous). Un connecteur CMS assure les entrées / sorties. Des colonnettes filetées, le plus souvent hexagonales peuvent être soudées pour connecter les courants forts. La face d'aluminium du SMI est collée sur un dissipateur généralement constitué d'un profilé d'aluminium. Le SMI est ensuite monté sur le circuit imprimé où sont assemblées les autres fonctions de l'équipement. Il est soudé perpendiculairement (figure 3) au circuit imprimé ou vissé parallèlement à ce dernier par des colonnettes.

La chaleur produite par les semi-conducteurs se propage de leur puce vers le dissipateur en traversant les couches successives du SMI : cuivre, céramique et aluminium pour atteindre le dissipateur.

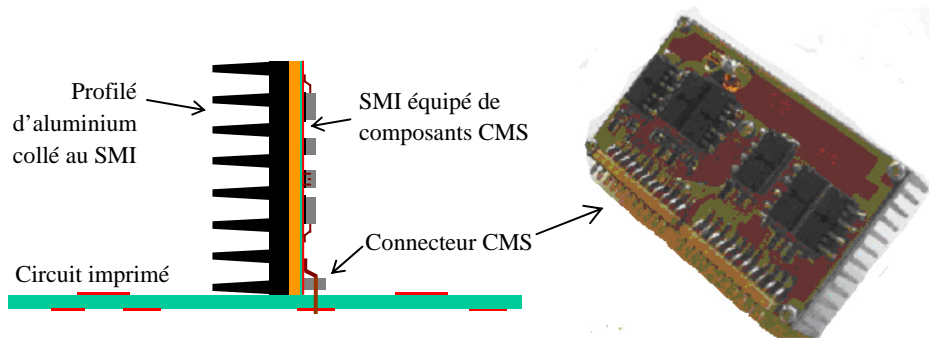


Figure 3 . Exemple de SMI soudé perpendiculairement sur un circuit imprimé

La résistance thermique des couches métalliques d'un SMI est faible ; en revanche, malgré sa faible épaisseur, celle de la céramique isolante est sensiblement plus élevée. Il en résulte que cette couche limite la dissipation de chaleur des semi-conducteurs.

2.3. Procédé SILPAD

Ce procédé consiste à souder l'ailette du boîtier CMS de puissance (D2PAK...) sur une surface de circuit imprimé percée de nombreux trous métallisés qui conduisent la chaleur vers l'autre face où un SILPAD la transmet à un dissipateur d'aluminium. La tenue mécanique de l'ensemble est assurée par le collage du SILPAD sur ses deux faces.

3. Procédé SME (Substrat Métallique Enchâssé)

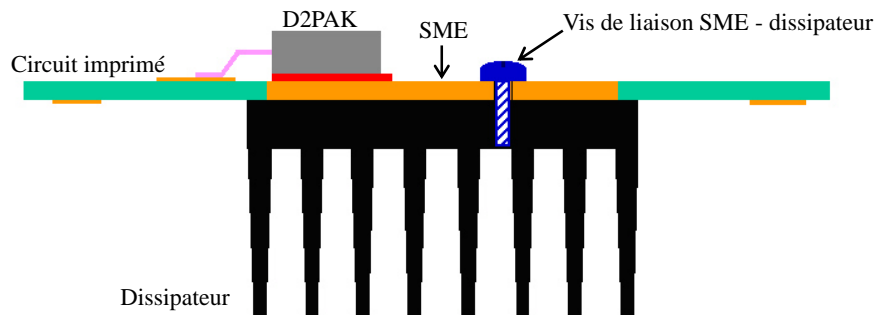
Le SME est une pièce métallique en cuivre de l'épaisseur du circuit imprimé (1,5 mm) sur laquelle est soudée la semelle des semi-conducteurs de puissance, en boîtiers CMS tels que SOT223, DPAK, D2PAK, D3PAK... Les pattes dépassant à l'extérieur. Ainsi équipé, le SME est enchâssé dans l'épaisseur du circuit imprimé et ses pattes extérieures sont soudées par refusion en même temps que les autres composants du circuit imprimé (figure 4).

Le SME et le circuit imprimé sont ensuite vissés sur le dissipateur qui assure la tenue mécanique de l'ensemble. Le SME peut aussi être collé au dissipateur de la même

manière qu'un SMI. Via les vis de fixation, le dissipateur peut aussi servir de conducteur pour relier les ailettes des composants de puissance, soit vers l'extérieur, soit vers le circuit imprimé.

Si plusieurs semi-conducteurs sont utilisés à des potentiels différents, ils ne peuvent pas être isolés entre eux, il faut alors utiliser plusieurs dissipateurs et SME.

Ce procédé pourrait aussi être utilisé avec des boîtiers traversants (TO220, TO247...) en vissant leur ailette de refroidissement, dans le dissipateur, à travers le SME et en cambrant les autres pattes pour les souder sur le circuit imprimé.



Au-delà des extrémités du SME, d'autres vis fixent le circuit imprimé au dissipateur (figure 7)

Figure 4 . Enchâssement d'un SME dans un circuit imprimé et montage sur dissipateur

3.1. Avantages thermiques du SME

L'enchâssement du SME dans le circuit imprimé permet de monter les semi-conducteurs de puissance d'une nouvelle façon : l'ailette de refroidissement est soudée sur le SME et les pattes sur le circuit imprimé. Par rapport au SMI, le SME supprime la couche isolante entre le semi-conducteur et son dissipateur, ce qui réduit sensiblement la résistance thermique. Il en résulte les avantages suivants :

- Réduction importante du volume du dissipateur
- Réduction de la température de jonction des composants
- Amélioration sensible du couplage thermique entre les semi-conducteurs
- Réduction du nombre de semi-conducteurs en parallèle
- Possibilité d'ajouter un dissipateur côté composants

3.2. Avantages liés au procédé

Le SMI a une gamme de fabrication propre, tandis que le SME se rapproche du procédé classique de fabrication d'un circuit imprimé. Indépendamment de la fabrication du circuit imprimé, il en résulte :

- Suppression du connecteur CMS du SMI (figure 3)
- Amélioration sensible de la robustesse de l'ensemble (excellente tenue aux chocs et vibrations)
- Connexion fort courant directement sur le SME ou le dissipateur (suppression des colonnettes). Ce qui s'avère particulièrement intéressant dans le cas de courants élevés
- Simplification du routage (2 faces du circuit imprimé + connexion fort courant sur SME au lieu d'une seule face sur le SMI)
- Réduction de la résistance de contact électrique et de l'inductance de câblage

4. Qualification thermique du SME

4.1. Résistance thermique

Des mesures thermiques et tests comparatifs ont été effectués à partir de transistors MOSFET en boîtier D2PAK montés respectivement sur SMI et SME. Ils ont donné les valeurs de résistances thermiques suivantes :

- SMI : $R_{th} = 1,2 \text{ K/W}$
- SME : $R_{th} = 0,5 \text{ K/W}$

Soit, pour le SME, une valeur environ 60% inférieure à celle du SMI, ce qui autorise une réduction sensible du dissipateur et du nombre de composants en parallèle.

4.2. Caractérisation en infrarouge

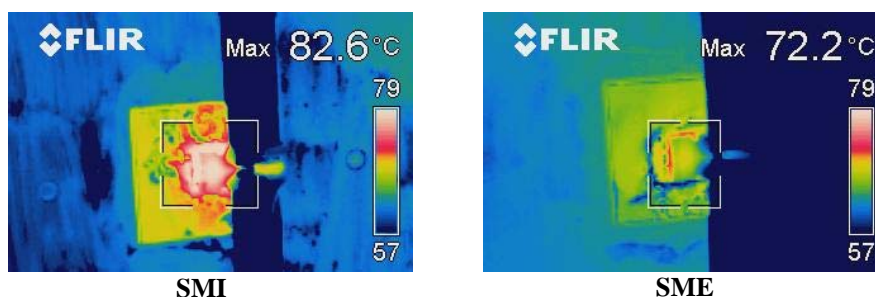


Figure 5 . Photos IR prises à puissance égale sur SMI et SME

Ces photos mettent en évidence une beaucoup plus faible résistance thermique du SME comparativement au SMI. D'autre part, dans le SME, la conduction thermique est surtout verticale, il en résulte que la surface du SME ne dépend que du nombre de semi-conducteurs et de la surface du dissipateur.

5. Application du SME et du procédé d'enchâssement

Le procédé SME a été mis en œuvre pour réaliser un prototype d'onduleur basse fréquence pour la soudure de l'aluminium. Alimenté par une tension continue de 100 V, il fournit des créneaux de courant de 300 A.

Les avantages du SME ont permis d'obtenir un volume particulièrement réduit, et une grande robustesse de l'ensemble. Les sorties fort courant directement vissées sur les SME ont permis de simplifier le routage du circuit imprimé où seule la connexion des sources des MOSFET subsiste sur une face (figures 6 et 7). L'autre face servant à la commande des gates et au renforcement de l'alimentation des sources.

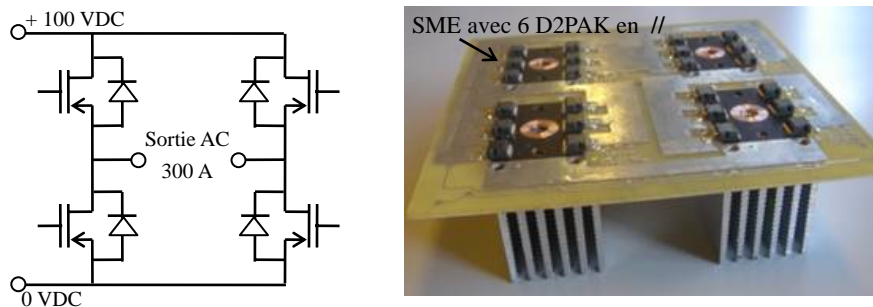


Figure 6 . Schéma de l'onduleur 100 V, 300 A et vue du prototype en cours de montage

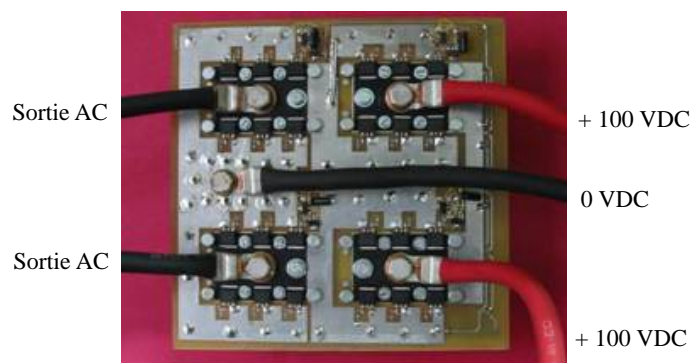


Figure 7 . Onduleur 100 V, 300 A : assemblage et entrées/sorties

| | SME | SMI | Gain |
|-------------------------------------|------------|------------|-------------|
| Puissance à dissiper | 85 W | 85 W | |
| élévation de température | 70 K | 70 K | |
| Résistance thermique du dissipateur | 2 K/W | 1,6 K/W | 25% |
| Longueur du dissipateur | 70 mm | 110 mm | 36% |
| Masse du dissipateur | 260 g | 410 g | 36% |
| Masse du convertisseur | 1,4 kg | 2 kg | 30% |

Tableau 1 . Bilan comparatif SME/SMI de l'onduleur

6. Conclusion

De conception simple et facile à mettre en œuvre, le procédé SME permet de réduire sensiblement le volume du dissipateur des composants. De plus, il garantit un assemblage particulièrement robuste et fiable des sous-ensembles d'électronique de puissance.

Bien qu'il ne permette pas d'isoler les boîtiers entre eux, le SME offre de nombreux avantages supplémentaires, tant pour le routage du circuit imprimé que lorsque la valeur élevée du courant impose la mise en parallèle de plusieurs semi-conducteurs.

Ce nouveau procédé d'assemblage des composants de puissance peut trouver de nombreuses applications dans des domaines comme le véhicule électrique, l'éclairage à LED, la soudure...

Bibliographie

Jean-Marie Dorkel, « Semi-Conducteurs de puissance Problèmes thermiques », *Techniques de l'ingénieur*, D3 112, 2003, p 1-19, D3 113, 2003, p 1-10

Brevet (PCT) : WO 03/096414 A2 date de publication internationale 20/11/2003, déposant : Université Angers, inventeurs : Jean-Claude Guignard, Michel Guillet, « Assemblage de composants de puissance sur un circuit imprimé ainsi qu'un procédé d'obtention d'un tel assemblage »

Michel Guillet, Jean-Claude Guignard, Patrice Delanchy, « Compensation thermique des miroirs de courant à MOSFET » *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol 7, n° 1-2, 2004