

Vincent Bley, Laboratoire Laplace
Cyril Buttay, Laboratoire Ampère
Mickaël Petit, Laboratoire SATIE

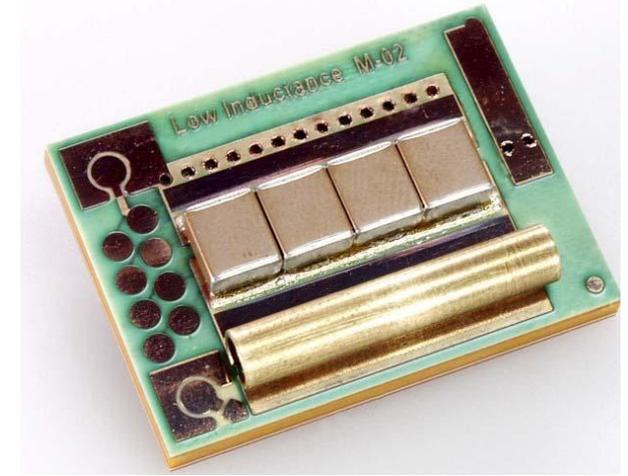
Etat de l'art de l'intégration en électronique de puissance et axes de recherches associés

Intégration PCB

Avantages du circuit imprimé (PCB)

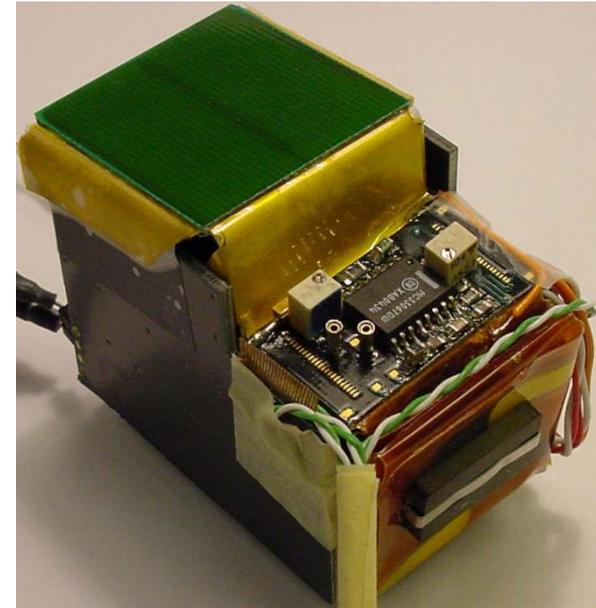
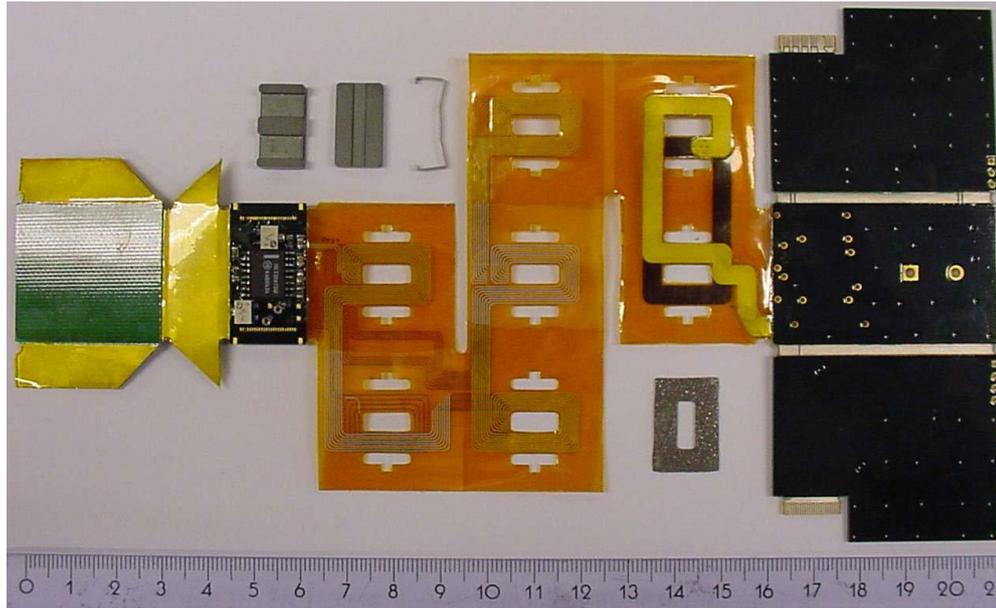
Le circuit imprimé offre:

- Une grande densité de connexions
 - Multicouche,
 - Pas fin (pistes de 25 μm en HDI)
- De faibles inductances
 - Faibles dimensions
 - Structure "busbar"
- Une grande souplesse de conception
 - "sur mesures"
 - Outils de conception disponibles
- Une fabrication collective



E. Hoene, "Ultra Low Inductance Package for SiC" ECPE workshop on power boards, 2012

Solution flex-rigid

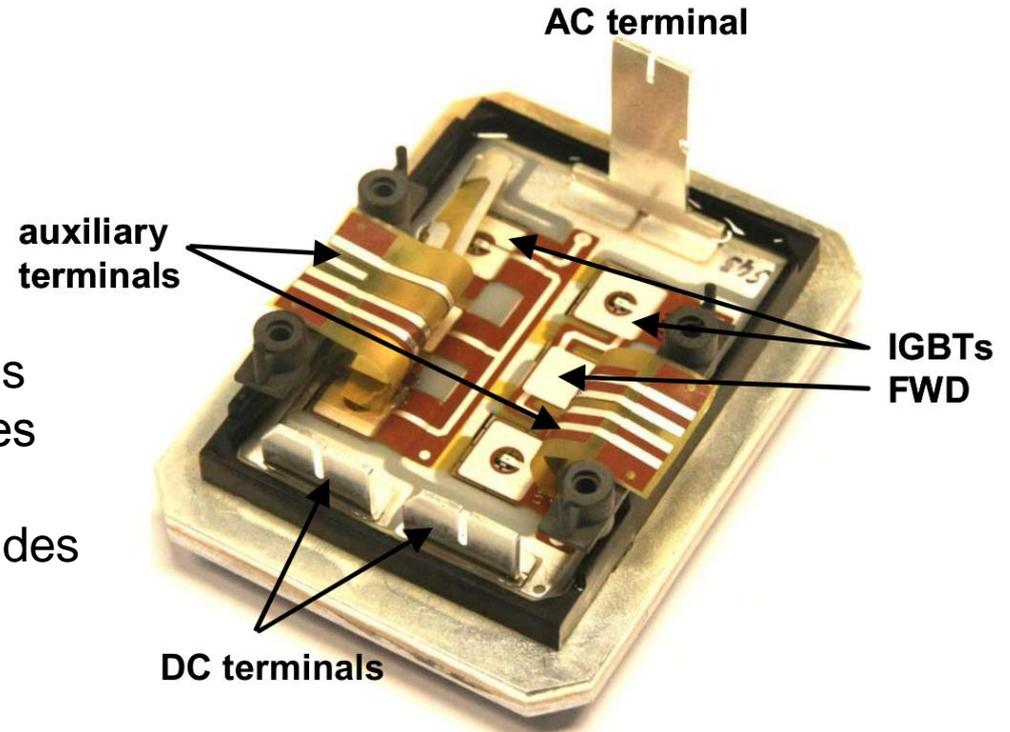


E. de Jong, E. de Jong, B. Ferreira, and P. Bauer, "Toward the Next Level of PCB Usage in Power Electronic Converters," *Power Electronics*, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 6, pp. 3151–3163, 2008;
 B. Ferreira, "PCB Integration Technology Overview," in ECPE Seminar "Power PCBs and Busbars", (Delft), 2008.

- PCB flexible pour les enroulements
- PCB replié autour des composants encombrants (condensateurs)
- La gestion thermique n'est pas forcément simple.

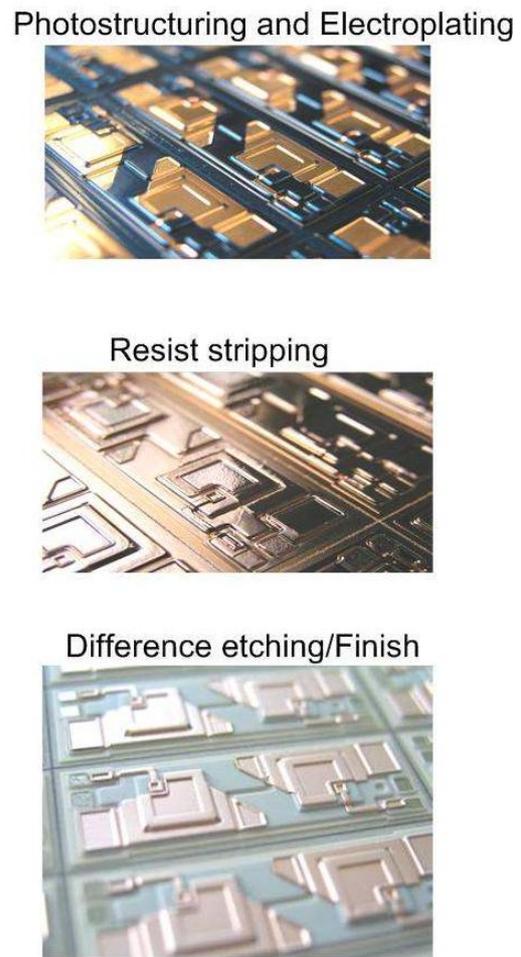
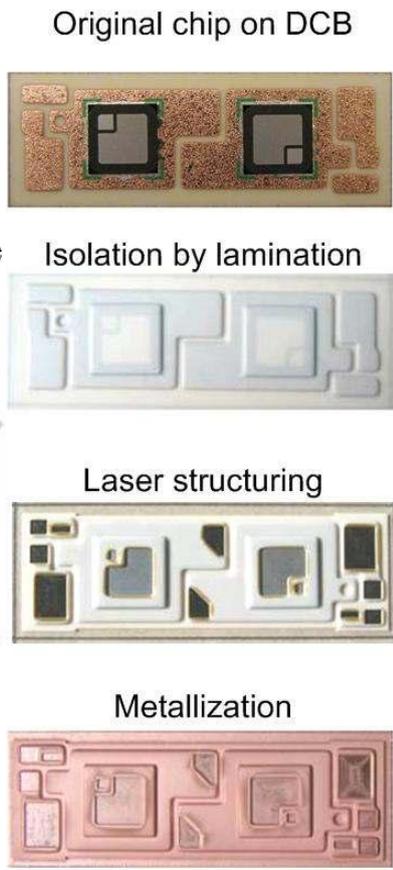
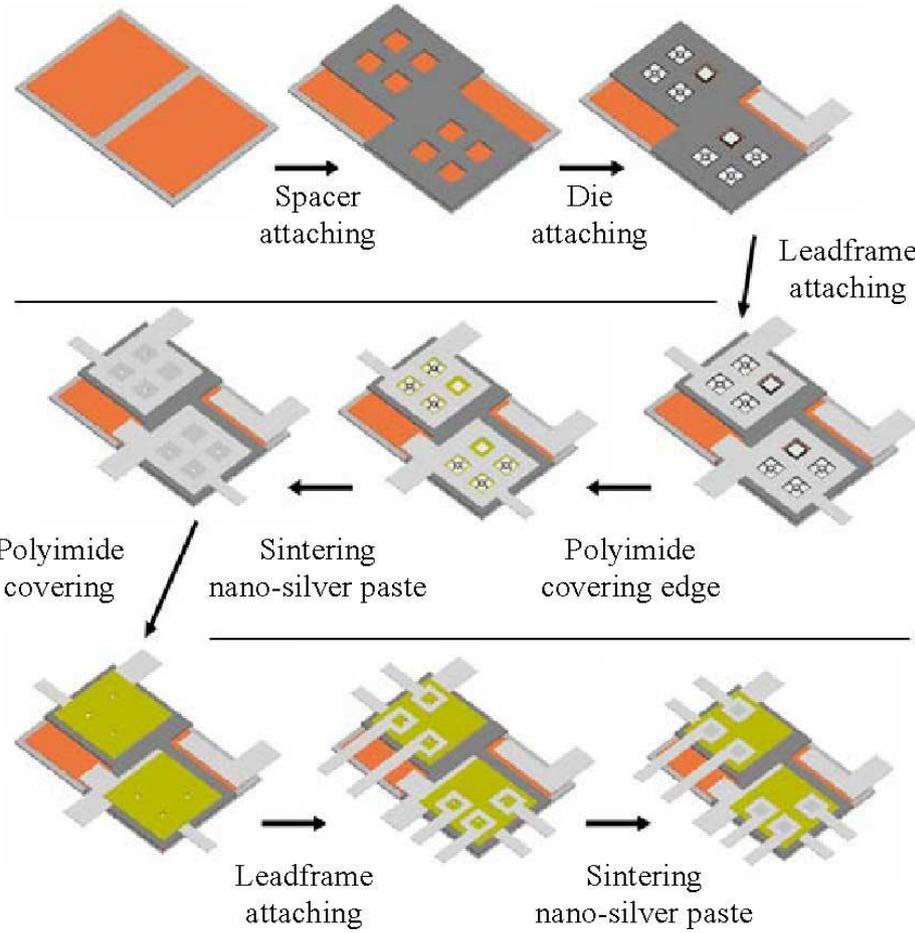
Solution flex-DBC

- PCB flexible à la place des bondings
- Montage d'autres fonctions possibles (drivers)
- Montage sur puces nues nécessite des finitions spécifiques.



T. Stockmeier et al. "SKiN: Double side sintering technology for new packages", ISPD 2011

Solutions « type PCB »



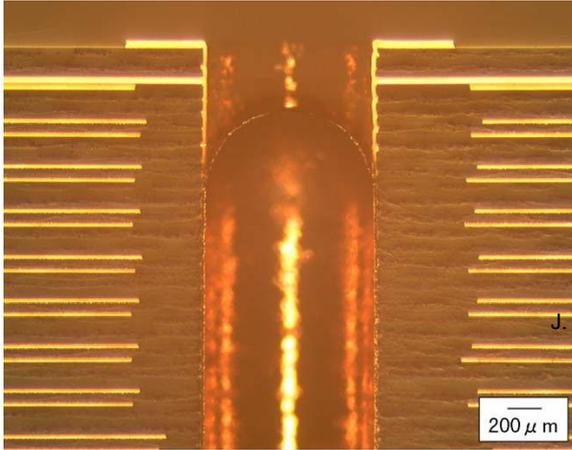
P. Ning et al. "A novel high-temperature planar package for SiC multichip phase-leg power module", IEEE Trans on PE vol 25, 2010, 25, 2059

Weidner, et al. "Planar Interconnect Technology for Power Module System Integration", CIPS 2012

Isolation Kapton/Epoxy (CPES).

"SiPLIT" (Siemens)

Intégration de passifs dans le PCB



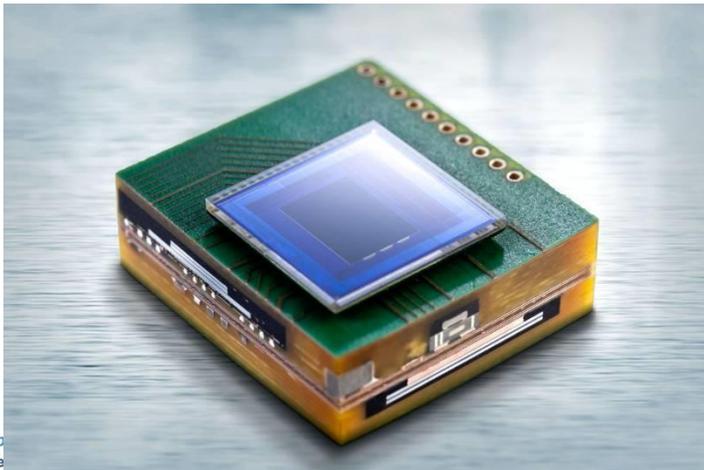
- Technologie standard
- 10 pF – 5 nF/cm², suivant la tension
- Principalement destiné à la microélectronique

J. Andresakis, "Embedded Capacitors," presentation, Oak-Mitsui Technologies, nov 2005.



- Intégration de couches capacitives et magnétiques
- Démonstrateur 60 W

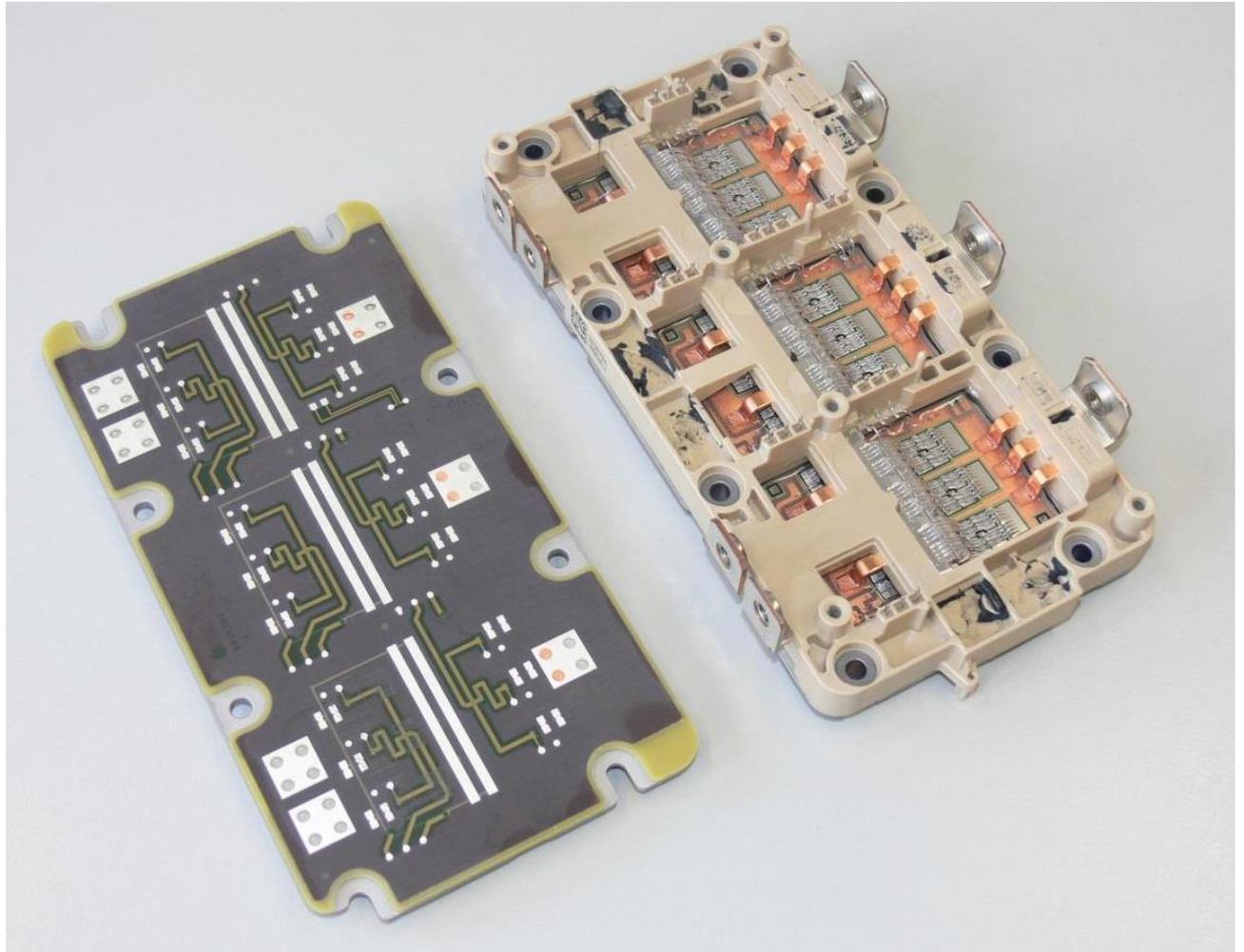
E. Waffenschmidt, et al., "Design Method and Material Technologies for Passives in Printed Circuit Board Embedded Circuits," IEEE Trans on Power Electr., vol. 20, pp. 576–584, may 2005



- Intégration de composants packagés dans le circuit imprimé
- Donne accès à de plus fortes valeurs/tensions de service

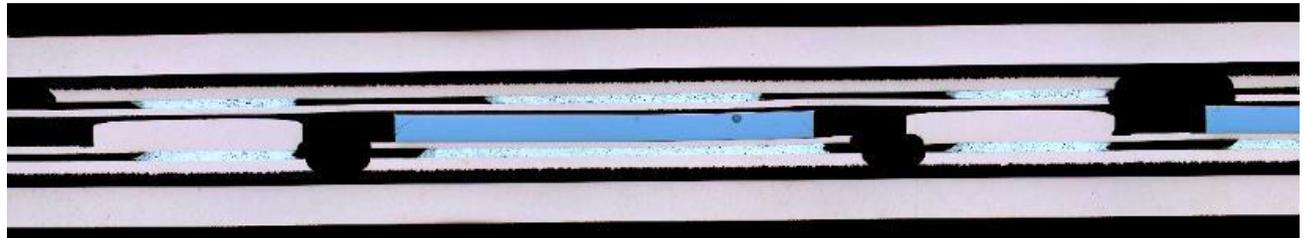
Source: Fraunhofer IZM, project MoMiCa.

Enfouissement de puces pour la forte puissance (50 kW)



A. Ostmann "Evolution and Future of Embedded Technology" NMI-IMAPS Workshop 2016

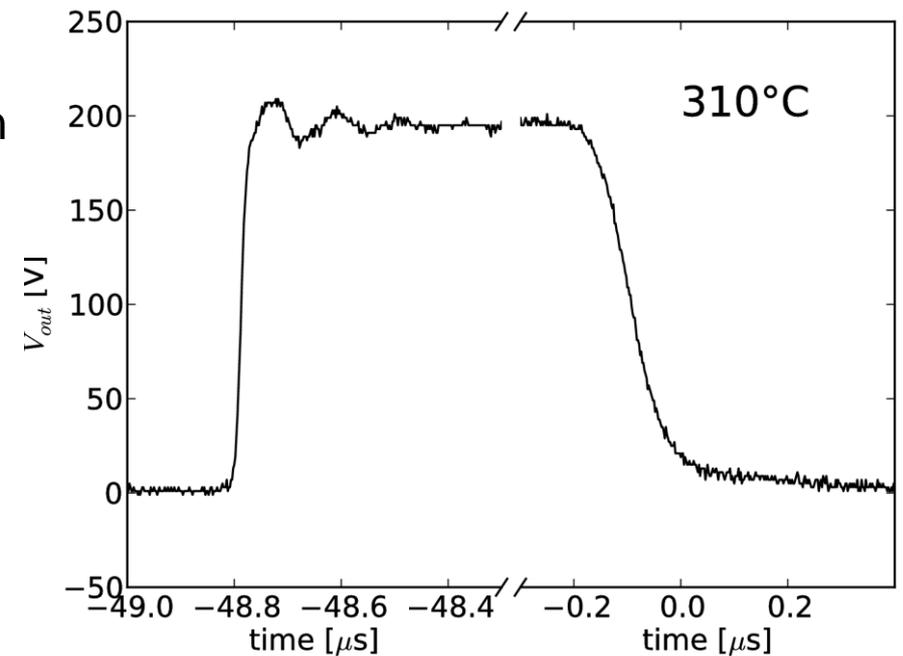
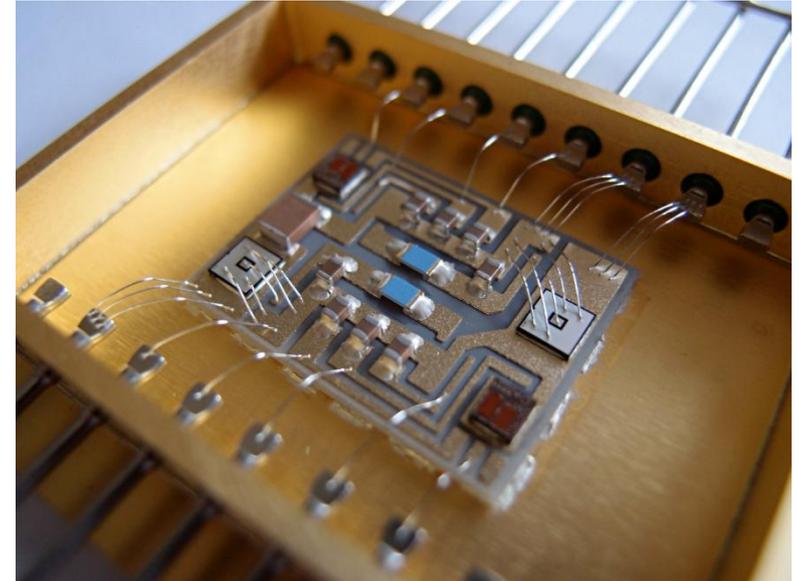
Frittage/laminage simultané



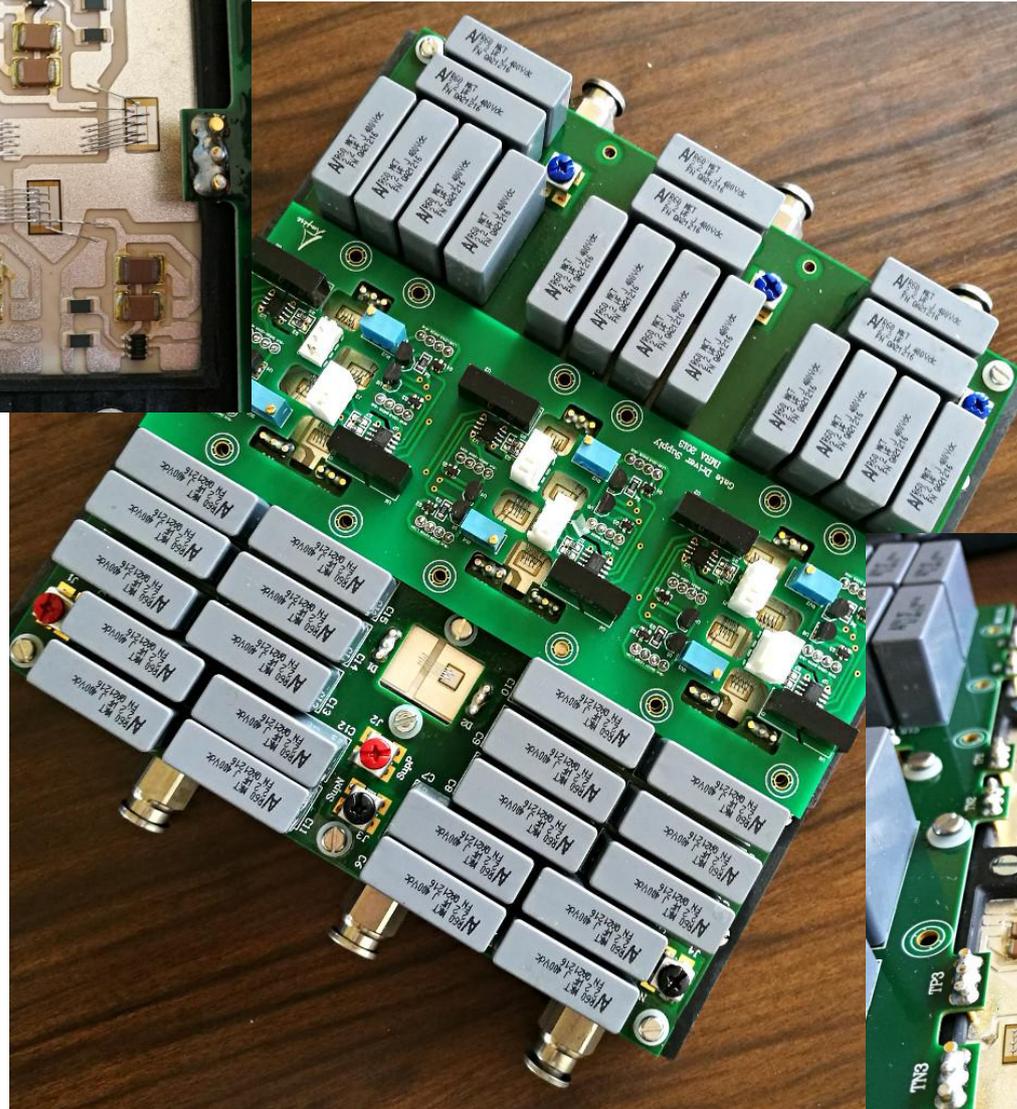
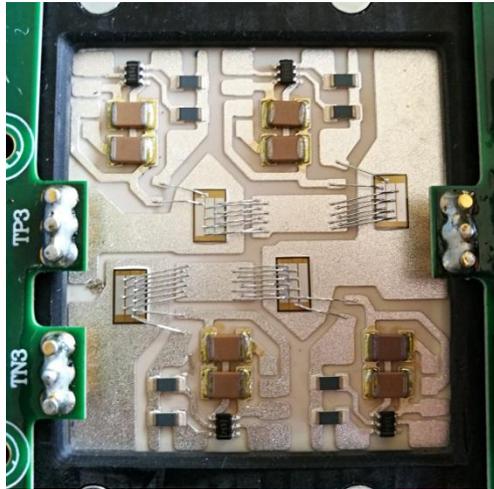
Intégration Hybride

Intégration de drivers près des puces

- Bras d'onduleur à base de JFETs
- Technologie "tout fritté"
- Driver SOI haute température
 - Alimentations et transmission signal en zone froide
- Capacité DC intégrée (540V)
- Testé jusqu'à 310° C (au-delà mise en sécurité des drivers)



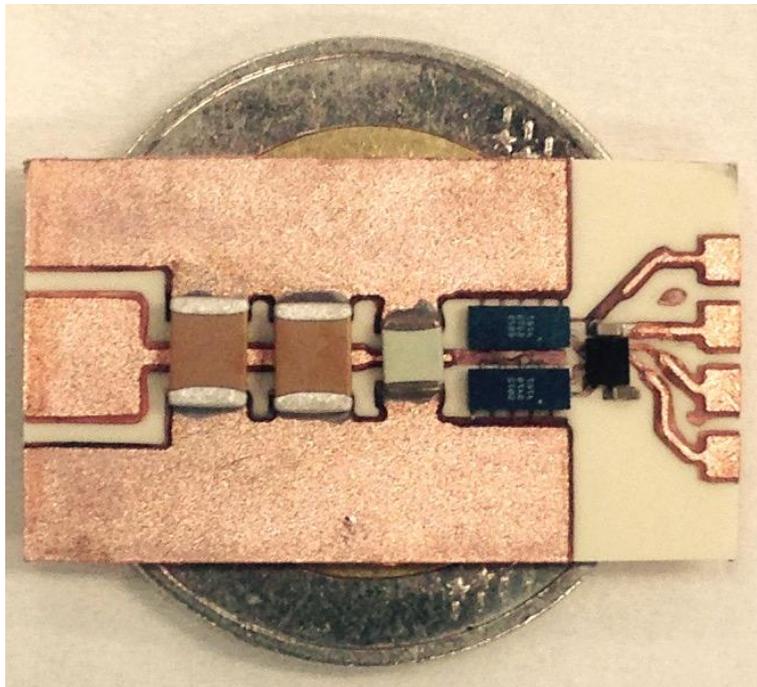
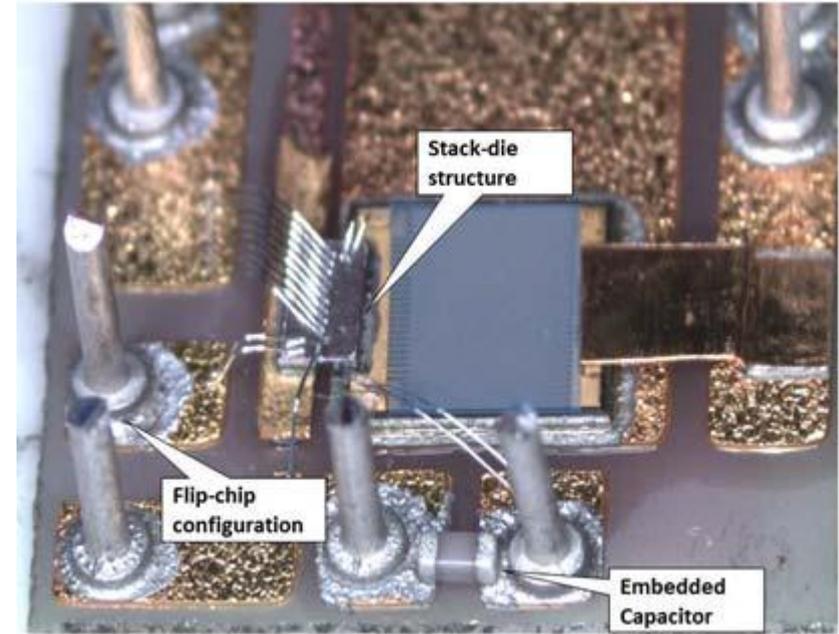
Exemple: Onduleur Q-ZSI triphasé à MOSFETs SiC.
 Refroidissement direct par eau, composants frittés
 Routage faiblement inductif (Non testé...)



Intégration de drivers près des puces - GaN

Source: Lee, F. C. et al "A New Package of High-Voltage Cascode Gallium Nitride Device for High-Frequency Applications" (IWIPP 2015)

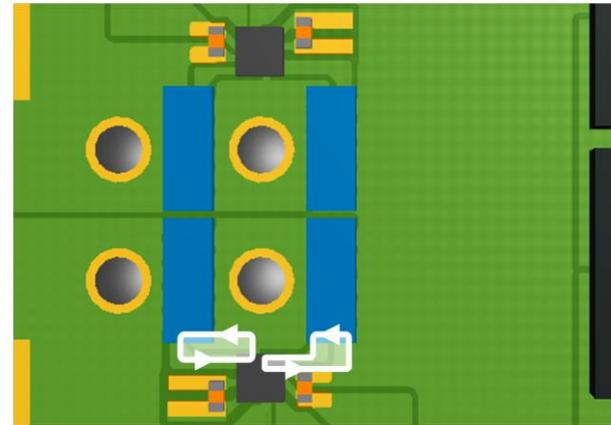
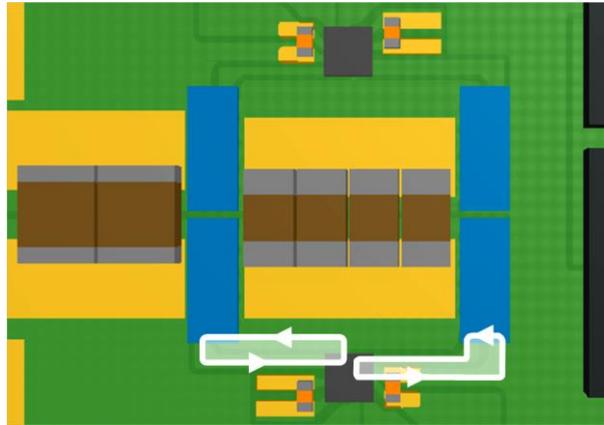
Intégration Mosfet Si/HeMT GaN puce sur puce
 En structure cascode



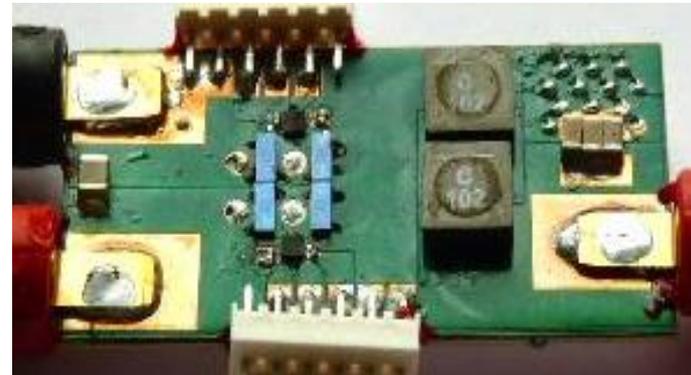
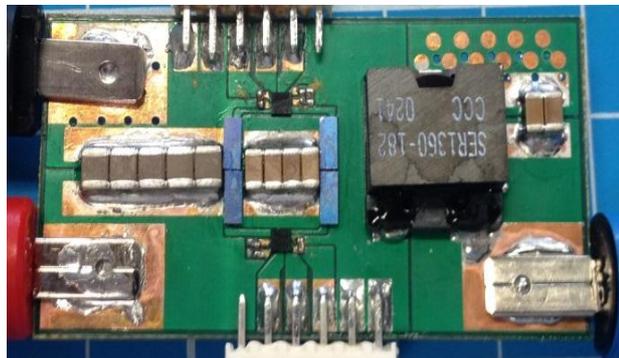
Gestion thermique par DBC: résistance thermique 4 fois plus faible que sur PCB

C. Yu et al. Thermal management and electromagnetic analysis for GaN devices packaging on DBC substrate, IEEE letters on PE, 2016

Integrated dc-dc based-GaN converter with screen printed capacitors allowing double side cooling. [O. Goulard](#); [N. Videau](#); [T. Meynard](#); [T. B. Doan](#); [T. Lebey](#); [V. Bley](#); [E. Sarraute](#) *IECON 2014*

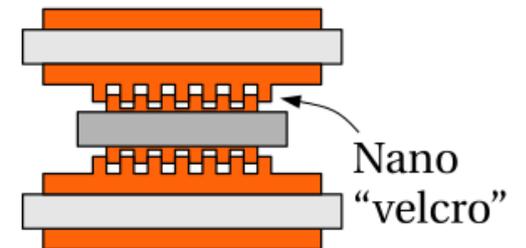
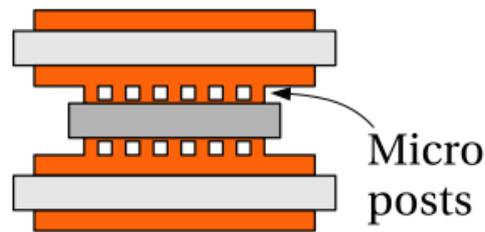
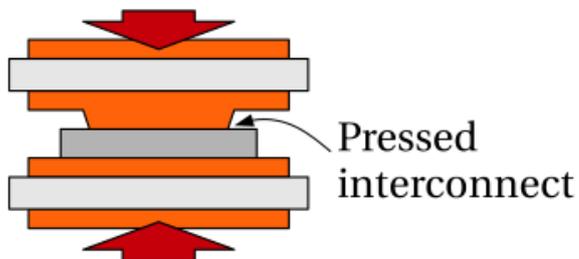
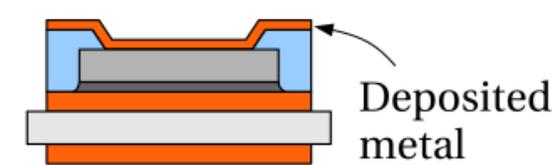
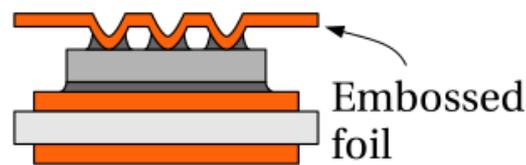
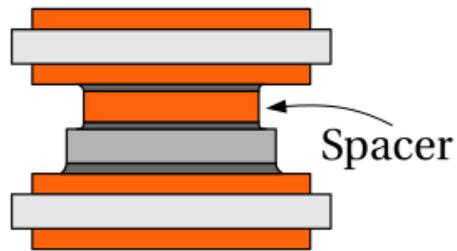
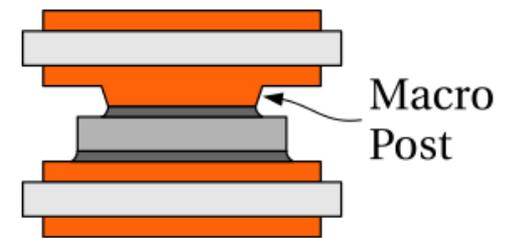
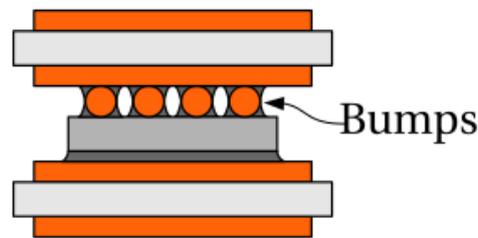
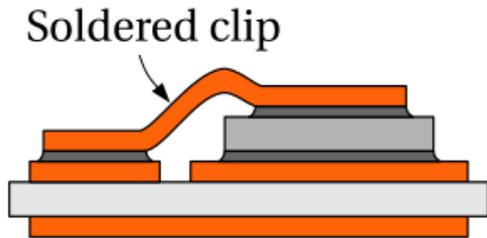
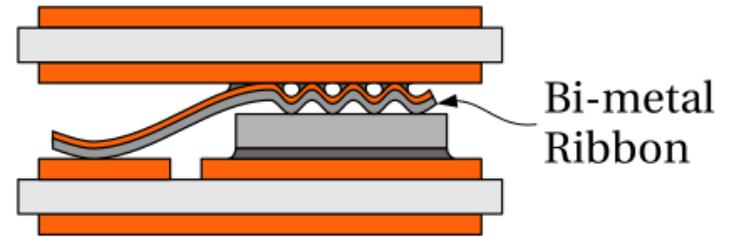
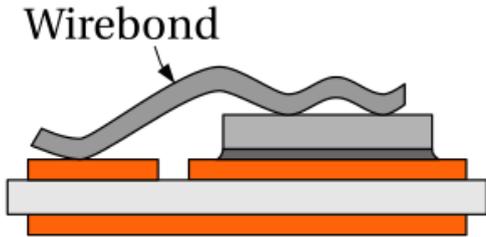


Réduction de l'inductance de la maille de commande de l'ordre de 30% ($4,5A/ns$ \rightarrow $4,5V/nH$!!)



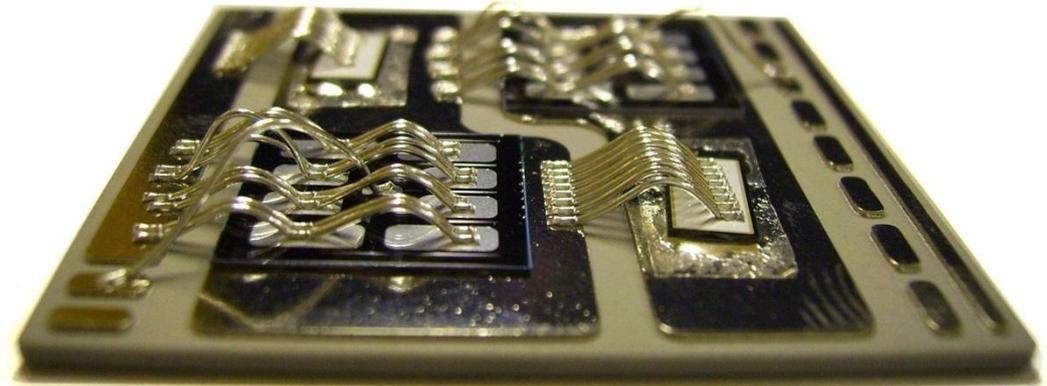
Prise de contact semiconducteurs

Prises de contact

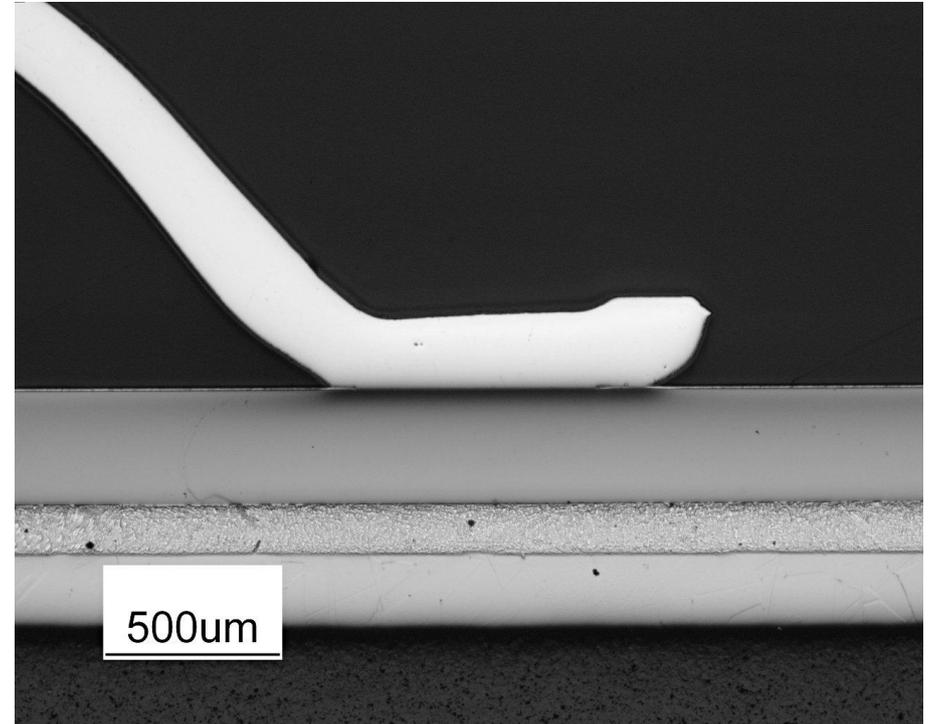


Logos of partner institutions: cnrs, le cnam Conservatoire national des arts et métiers, UNIVERSITÉ de Cergy-Pontoise, ES rennes, IFSTAR, UNIVERSITÉ PARIS SUD, La Spinele, 1957 - Germaine Richier

Wirebonding

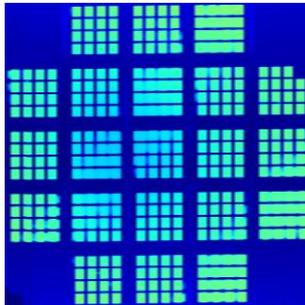
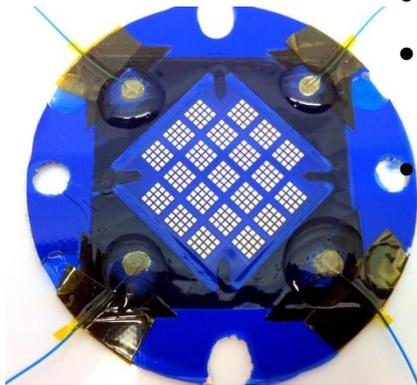
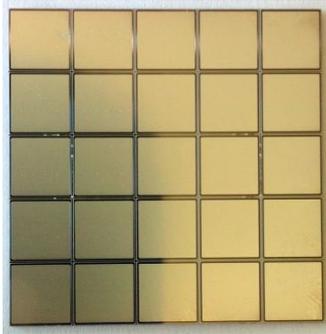


- La grande majorité des puces est conçue pour le câblage aluminium
 - Finition aluminium
- Incompatibilité avec:
 - Brasure
 - Frittage
 - électrodéposition

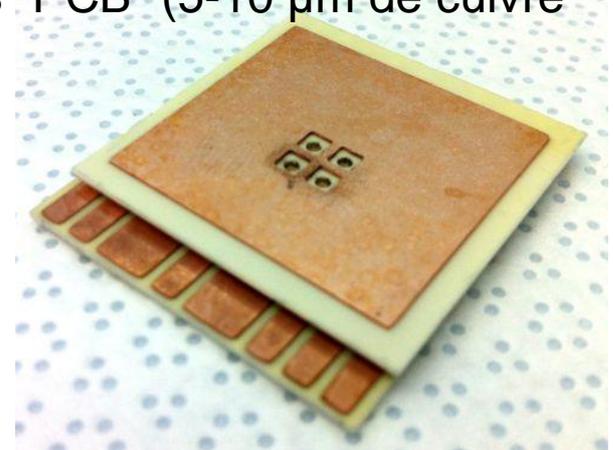


Logos of partner institutions: cnrs, le cnam Conservatoire national des arts et métiers, UNIVERSITÉ de Cergy-Pontoise, ES rennes, IFSTTAR, UNIVERSITÉ PARIS SUD, and La Spéiale, 1957 - Germaine Richier.

Électrodéposition sur puces

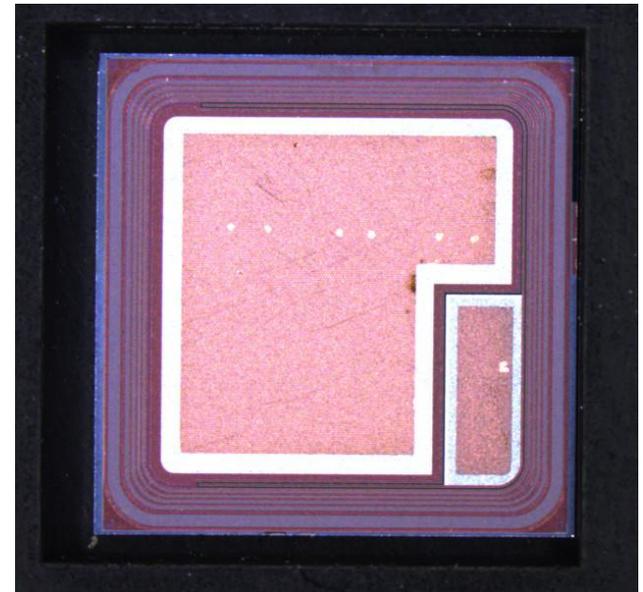
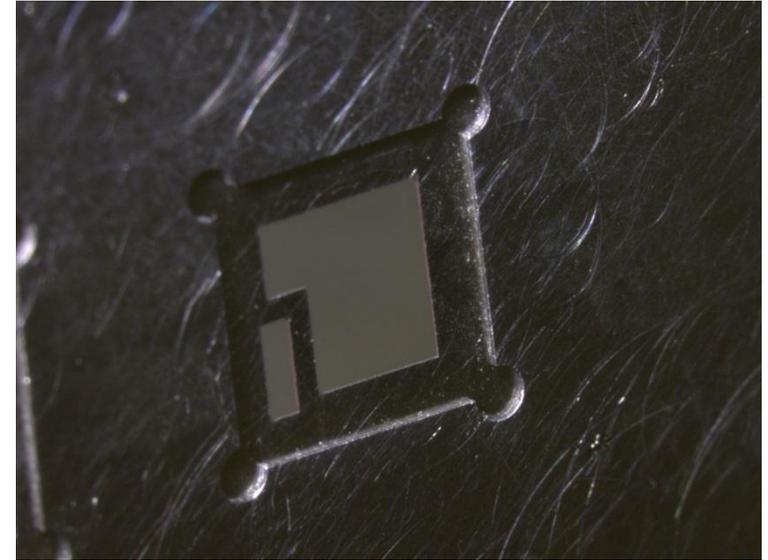


- Dépôt d'une couche d'accroche Ti/Cu (50nm/150nm)
- Masquage spécifique (ici sur des diodes)
- Électrodéposition
- Retrait du film photosensible, gravure des couches d'accroche
- Découpe
- Assemblage
- Également possible en voie humide: dépôts "electroless"
 - Pas besoin de masquage
 - Mais toujours à l'échelle du *wafer*...
 - Nécessaire pour les procédés "PCB" (5-10 μm de cuivre requis)



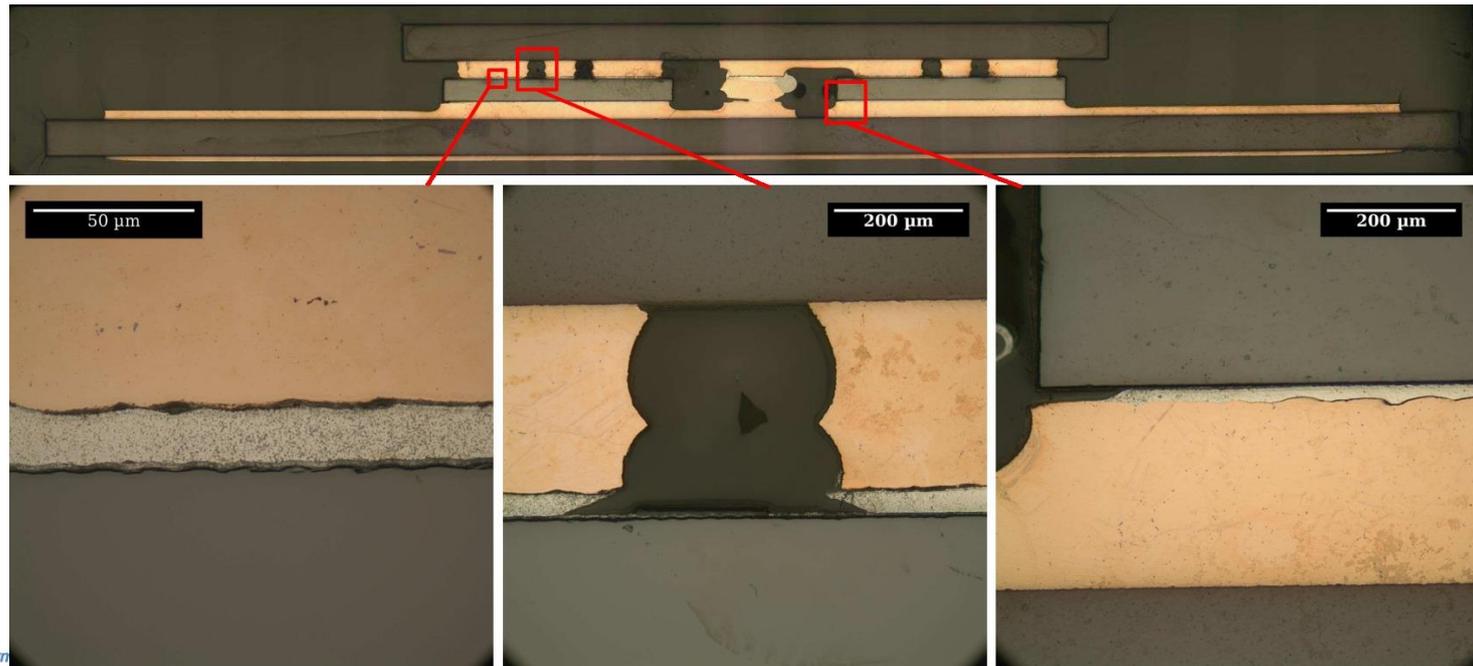
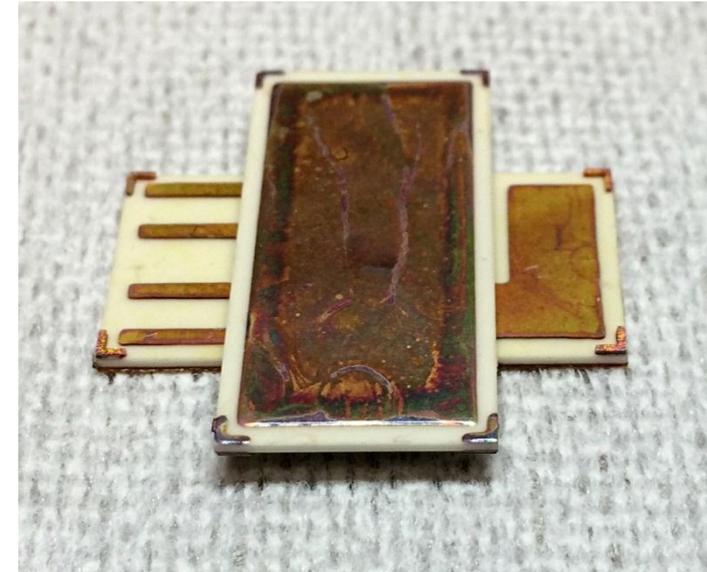
Évaporation sur puces

- Pochoir métallique avec renforcement pour le centrage des puces
- Maintien à l'adhésif
- Bien adapté au traitement de puces découpées (lots de 20-30 puces)
- Outillage peu cher (400€)
- Dépôts par évaporation bien directionnels
- Dépôt minces (moins du micron)
 - Ti/Ag: bien adapté au frittage, tenue > 20MPa
 - Ti/Cu pour enfouissement PCB, pas encore au point



Frittage double face – exemple

- “module” demi pont, 25x25mm
- Gravure “maison” des DBC
 - Petit contact de grille sur les puces JFET
 - Résolution 200 µm nécessaire
 - Épaisseur de cuivre 300 µm
- Frittage puces double face.



Intégration Composants Passifs

Intégration Composants Passifs

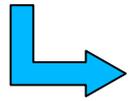
- I. Les objectifs principaux de l'intégration

- II. Matériaux & moyen de mise en œuvre à notre disposition

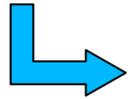
Objectifs principaux de l'intégration

Objectif majeur :

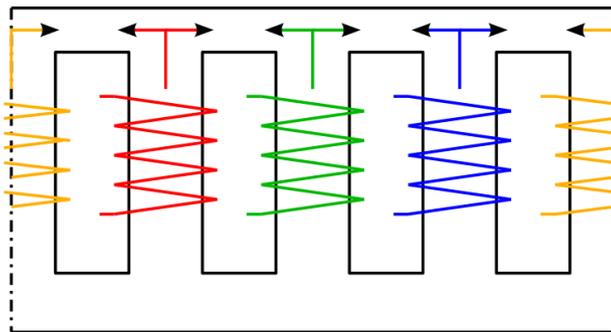
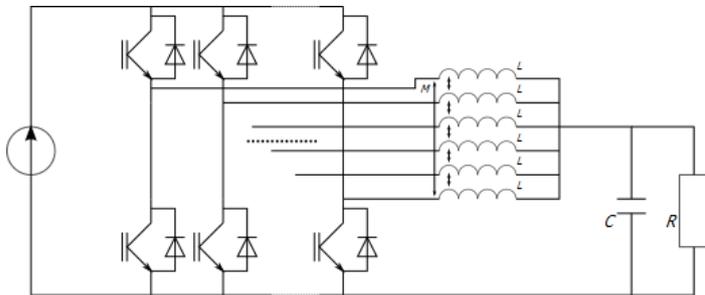
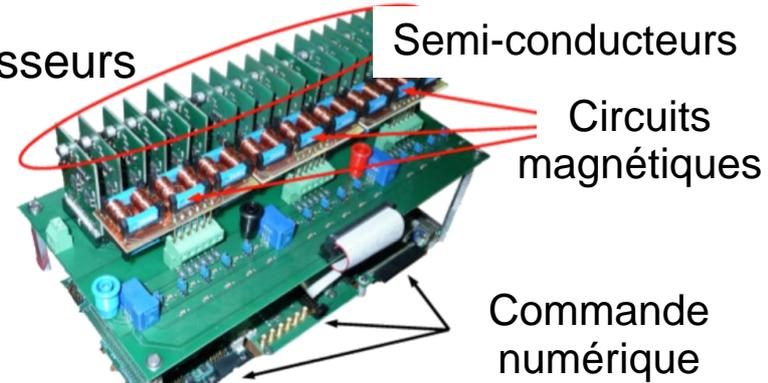
Augmenter la puissance massique et volumique des convertisseurs



Utilisation de structures multicellulaires couplées magnétiquement



Composant essentiel :
 Le **COUPLEUR MAGNETIQUE**



Ce dernier est caractérisé par :

- Inductances magnétisantes => ripple de courant par phases
- Inductances de fuites => ripple de courant

Son fonctionnement est limité par :

- La « bande passante » du matériau magnétique
- Les capacités parasites

Son fonctionnement est limité par :

- La « bande passante » du matériau magnétique
- Les capacités parasites

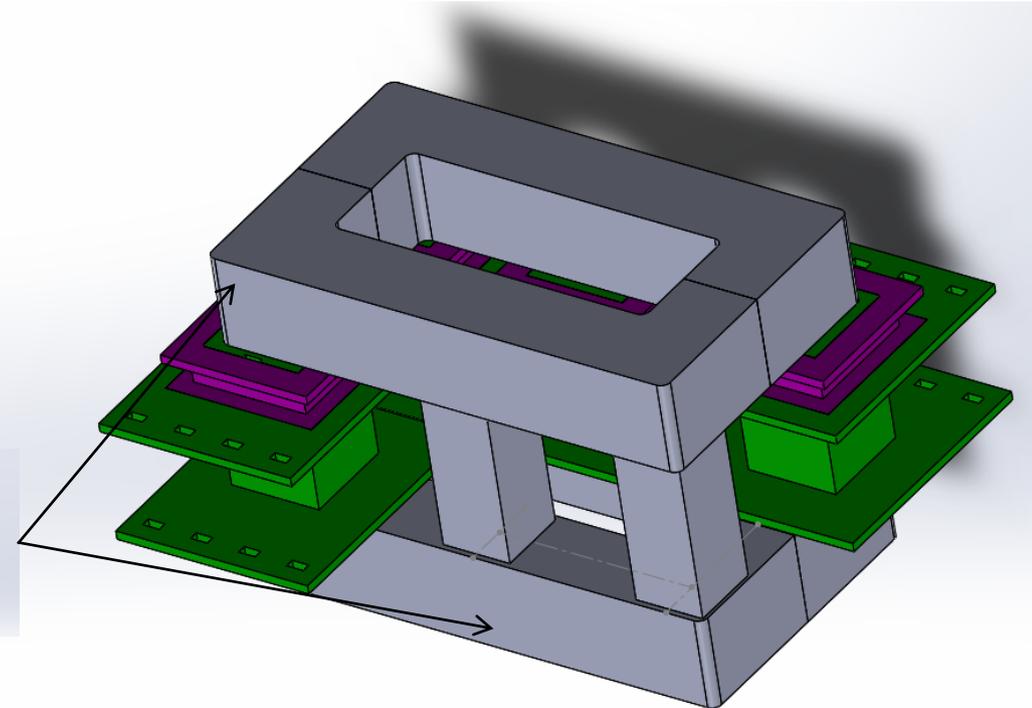
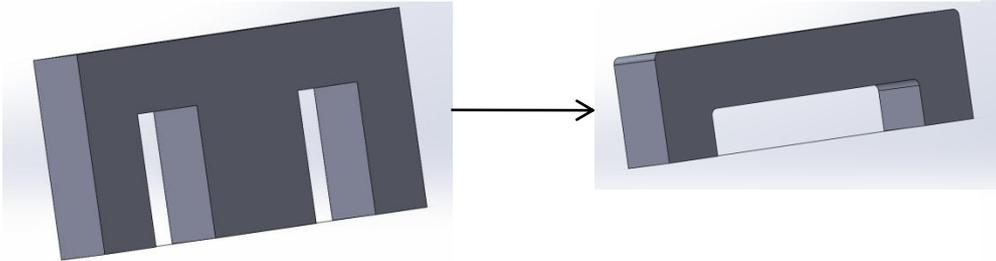
Conditions de bon fonctionnement :

- Tous les branches doivent être identiques :
- **REPETABILITE**

Objectifs principaux de l'intégration

Réalisation « classique » d'un composant magnétique

- Etat de départ : Formes commerciales U, I, E,.....
- Mise en forme du profil de départ
 - Découpe à scie diamant
 - Découpe au fil
 - ...
 - Collage



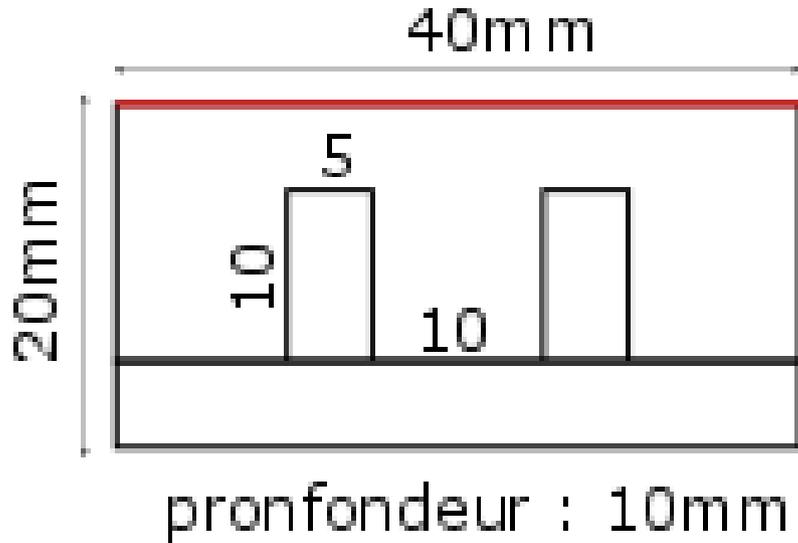
- Réalisation d'un support de bobinage
 - Impression 3D
 - Coulée sous vide
- Bobinage « à la main »

Mauvaise maîtrise :

- Des entrefers
- Des capacités parasites

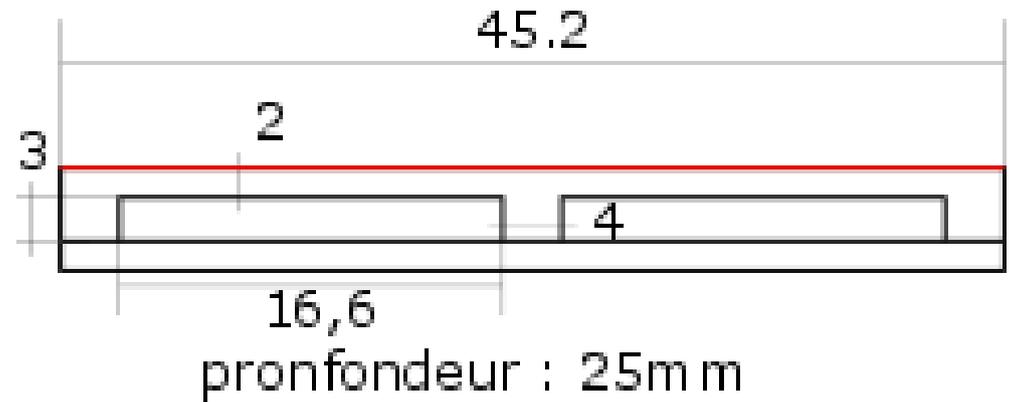
Objectifs principaux de l'intégration

Amélioration de la gestion thermique



Surface d'échange par le dessus :

400 mm²



Surface d'échange par le dessus :

1130 mm²

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances électrodéposées

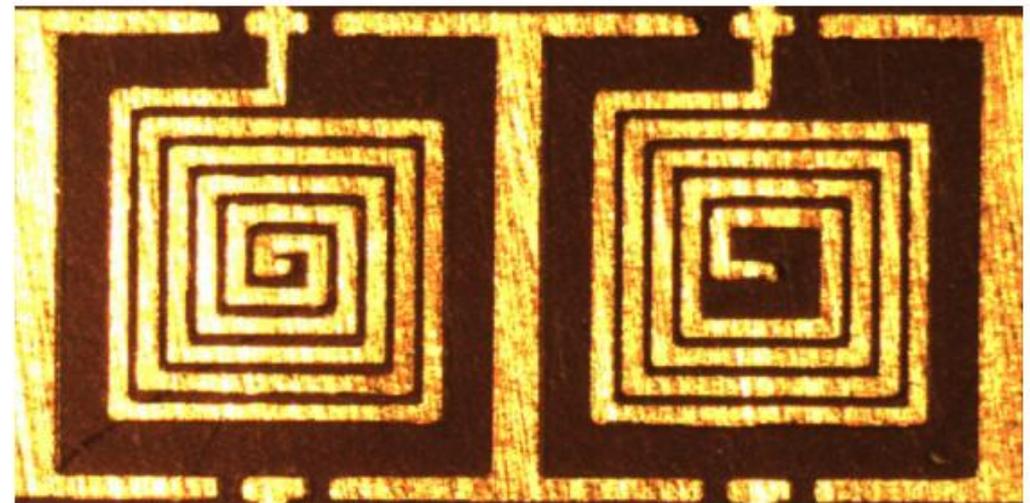
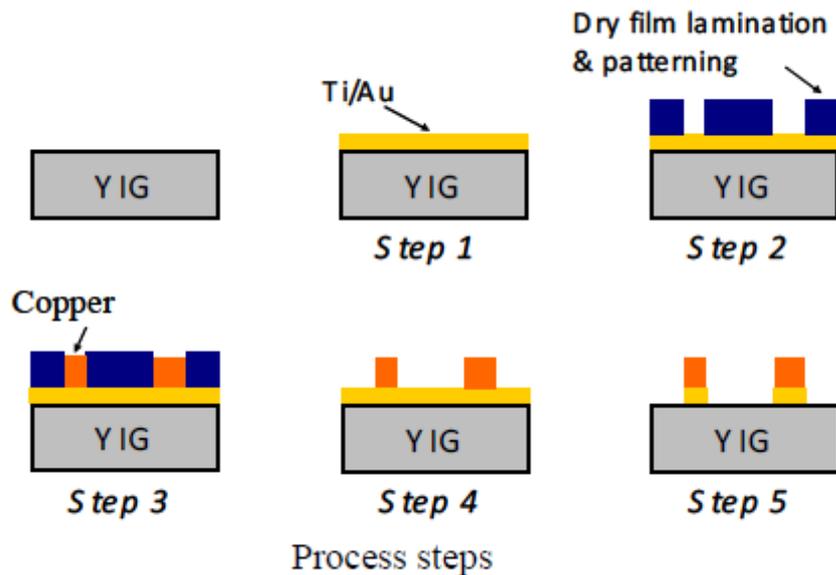


Fig. 8: Fabricated inductance with optimal designs.

Matériau utilisé : YIG (grenat de fer et d'Yttrium)

Conducteur : cuivre (100 μ m)

Nb de spires : 4

Inductance surfacique : 12nH/mm²

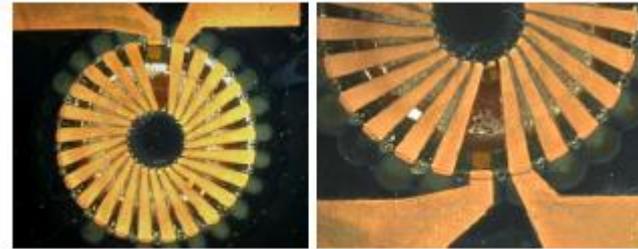
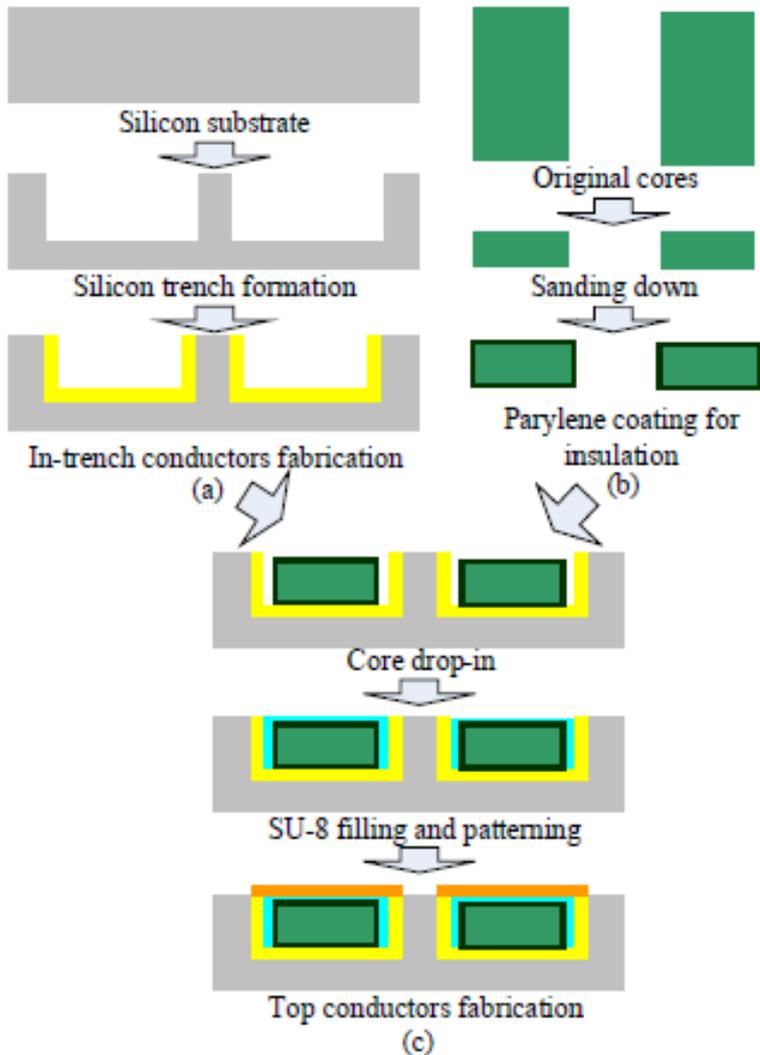
Puissance visée : qq W

Fréquence max : 100MHz

[1] C. Martin *et al.*, « Planar inductors for high frequency DC-DC converters using microwave magnetic material », 2009, p. 1890-1894.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances électrodéposées sur Silicium



Matériau utilisé : Poudre de Fer (Micrometals)
 Conducteur : or (100µm)
 Nb de spires : 27
 Inductance : 300nH/5mm de diamètre
 Puissance visée : qq W
 Fréquence max : 10MHz

[2] X. Yu, J. Kim, F. Herrault, et M. G. Allen, « Silicon-embedded toroidal inductors with magnetic cores: Design methodology and experimental validation », 2014, p. 763-767

Figure 1. Fabrication process of silicon-embedded inductors with dropped-in magnetic cores.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances à matériau magnétique déposé « électroless »

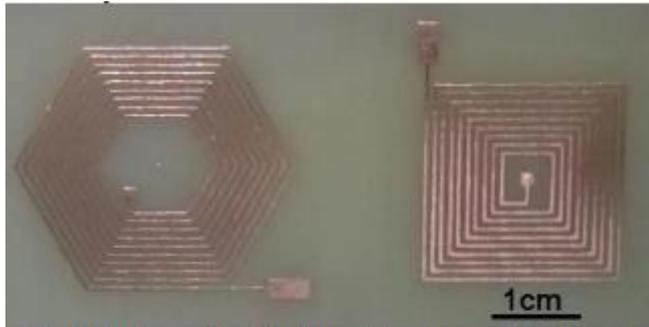


Fig.1 Photographs of patterned hexagon and rectangle copper inductor



Fig.2 PCB integrated inductors with directly-plated Ni-P magnetic core covered on conductive copper lines

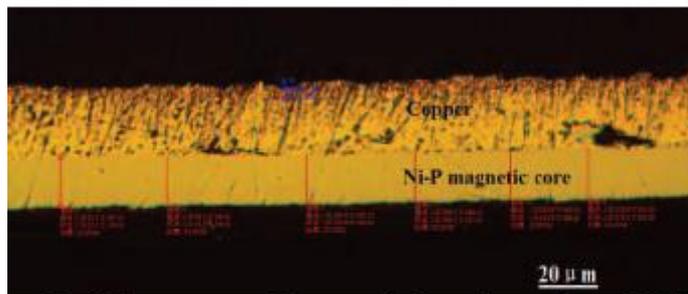


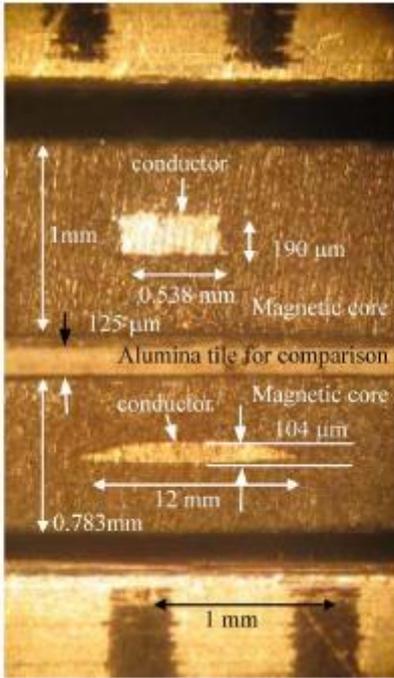
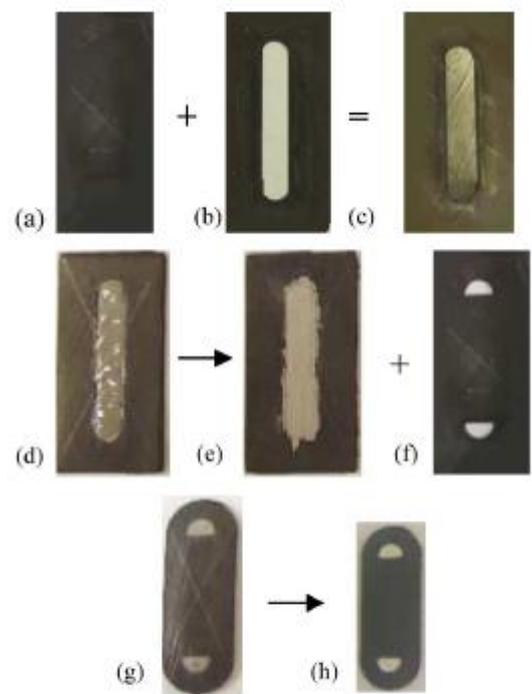
Fig.3 Cross-section photograph of conductive lines of PCB inductor with Ni-P magnetic core

Matériau utilisé : Nickel-Phosphore (Ni-P) : $14\mu\text{m}$
Conducteur : Cu ($10\mu\text{m}$)
Nb de spires : 10
Inductance : $600\text{nH}/1\text{cm}^2$
Puissance visée : qq W
Fréquence max: 1kHz

[3] G. Zhou *et al.*, « Directly electroless-plating Ni-P thin-film to fabricate magnetic core of integrated inductor for printed circuit board », 2016, p. 1-3.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances LTCC : Low Temperature Cofired Ceramic



Matériau utilisé : LTCC Ferrite
 Conducteur : Ag/Pt
 Nb de spires : 10
 Puissance visée : qq 10W
 Fréquence max: 1,3MHz

Avantage du LTCC
 CTE comparable à celui du silicium
 Résistivité thermique plus faible que le PCB

Fig. 8. LTCC inductor fabrication procedure: (a) bottom layer, (b) middle layer, (c) laminate bottom and middle layers (d) fill slot with conductor paste, (e) dry conductor paste at 80 °C, laminate (e) with top layer (f) (g) Fill slots with conductor paste and laser cut into desired shape, and (h) inductor after sintering.

[4] M. H. Lim, J. D. van Wyk, F. C. Lee, et K. D. T. Ngo, « A Class of Ceramic-Based Chip Inductors for Hybrid Integration in Power Supplies », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, n° 3, p. 1556-1564, mai 2008.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances à base d'alliage Fer-Nickel Nanocristallin



Matériau utilisé : FeNiCrCu

Conducteur : Cu

Nb de spires : 15

Inductance : 30 μ H/

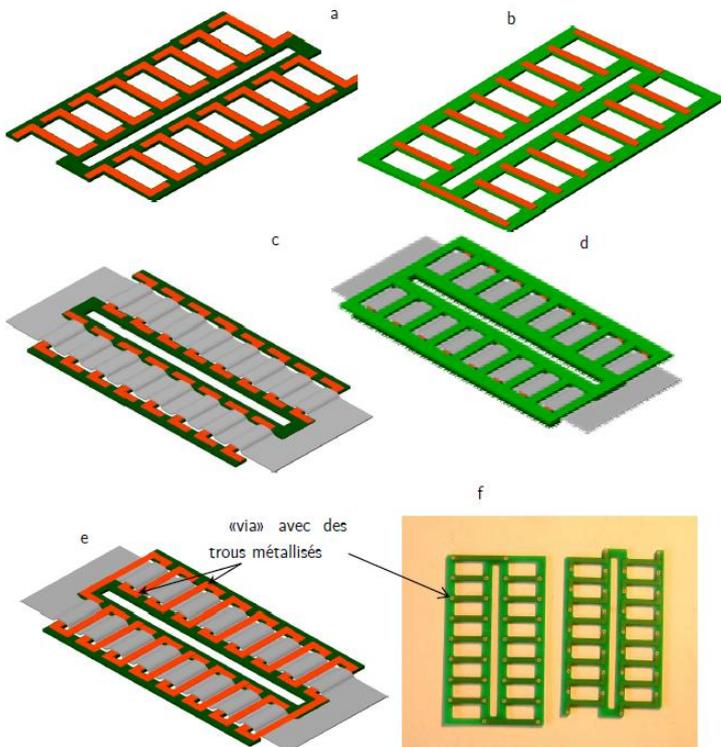
Fréquence max: 2MHz

Avantage du LTCC

CTE comparable à celui du silicium

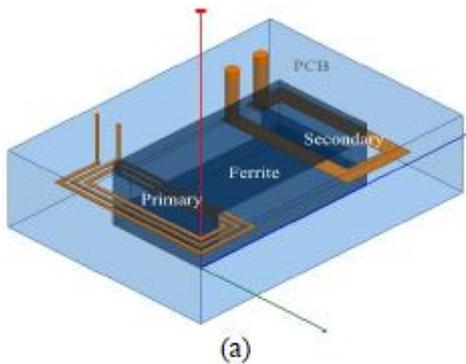
Résistivité thermique plus faible que le PCB

[5] B. Ahmadi, « Composant magnétique intégré en alliage FeNiCrCu pour l'électronique de puissance », Theses, Université de Grenoble, 2010.

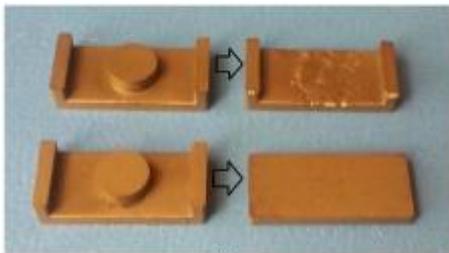


Techniques d'intégrations de composants magnétiques

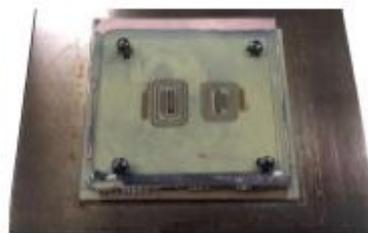
Inductances et transformateur à base de ferrites entérées



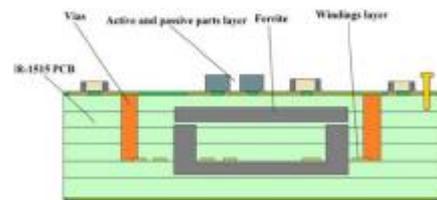
(a)



(b)



(a)



(b)

Fig. 5. (a) picture of the PCB stack before lamination [8]; (b) Schematic of power supply with coplanar windings PCB-embedded transformer.

Matériau utilisé : FeNiCrCu
 Conducteur : Cu

Fréquence max: 1MHz

Fig. 2. (a) Coplanar-windings transformer design; (b) Machine U-I shape ferrites.

[6] B. Sun *et al.*, « Two Comparison-Alternative High Temperature PCB-Embedded Transformer Designs for a 2 W Gate Driver Power Supply », in *IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE 2016)*, Milwaukee, WI, United States, 2016.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Réalisation d'un ICT

1 : Fabrication de poudre de NiZn



Figure 2-13: Mélange des poudres avec des billes zircone et de l'eau dans la jarre et la machine de broyage-mélange par attrition.

- Broyage humide
- Chamottage
- Broyage
- Séchage
- Ajout de liant

3 : Frittage : four Carbolite HTC 1500 : 1100° C

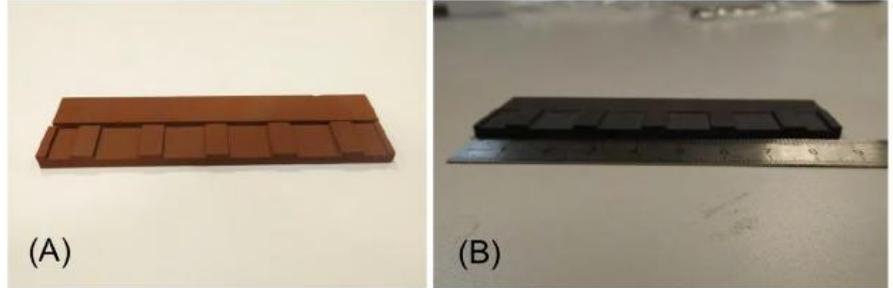


Figure 3-43 : Noyau magnétique complexe usiné manuellement par la scie à fil avant et après frittage avec une bonne dimension

2 : Pressage et usinage de poudre de NiZn

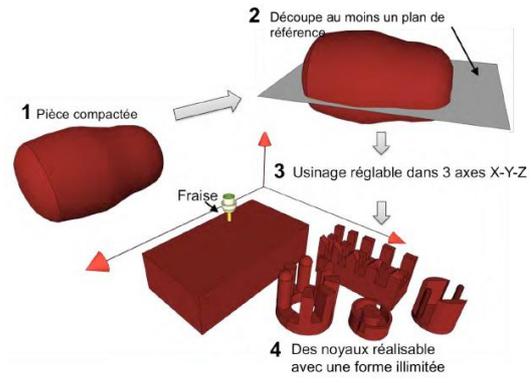


Figure 3-45 : Etape d'usinage d'une pièce compactée avec des formes usinables par un fraisage numérique 3D

- Moulage de la poudre
- Pressage isostatique
- Usinage du cru

4 : ICT terminé

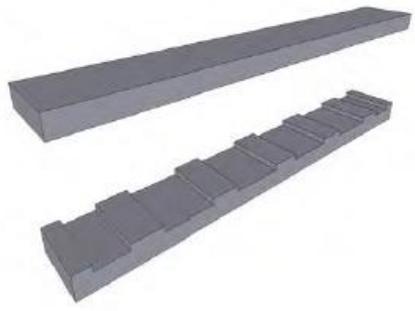


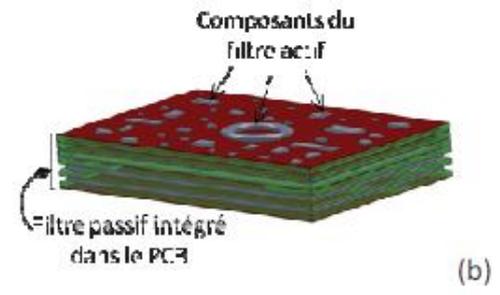
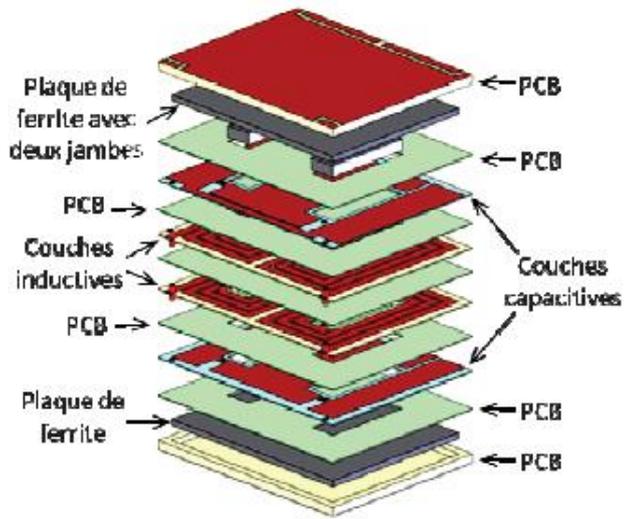
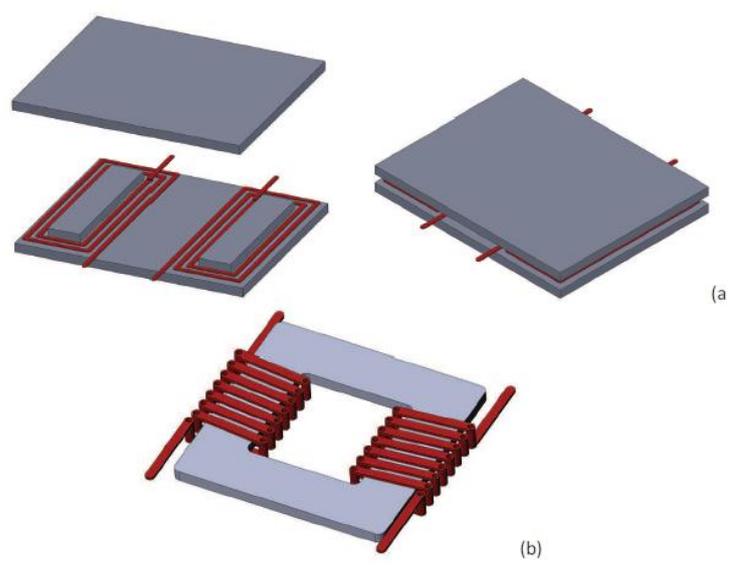
Figure 3-9 : Le noyau magnétique complexe souhaité

Matériau utilisé : NiZnCu Ferrite
 Fréquence max: qq MHz

[6] T. T. Le, « Etude du procédé de fabrication de noyaux ferrimagnétiques complexes par mise en forme isostatique : application aux transformateurs intercellulaires », phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2016.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances et transformateur à base de ferrites entérées



(b)

Figure 92 : a- Filtre CEM passif planaire multicouche et, b- Filtre CEM hybride proposé.

Matériau utilisé : Ferrite
 Conducteur : Cu

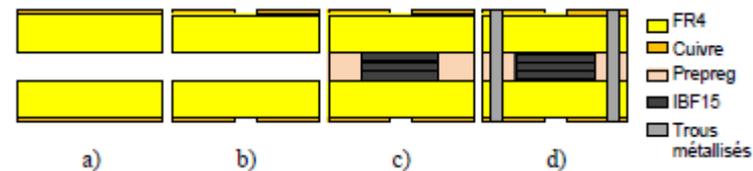
[8] M. Ali, « A new integrated architectures of hybrid EMC filter », Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2012.

Techniques d'intégrations de composants magnétiques

Inductances et transformateur à base de matériaux flexible



Fig. 4 - Photographie du prototype d'inductance



Matériau utilisé : IBF15 /

Conducteur : Cu

Nb de spires : 23

Inductance : $6,5\mu\text{H}$ / 42mm de diamètre

Fréquence max: 1MHz

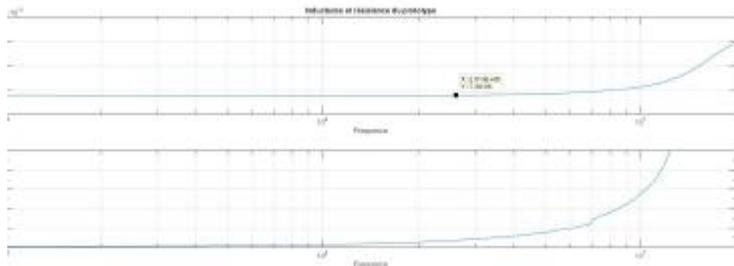
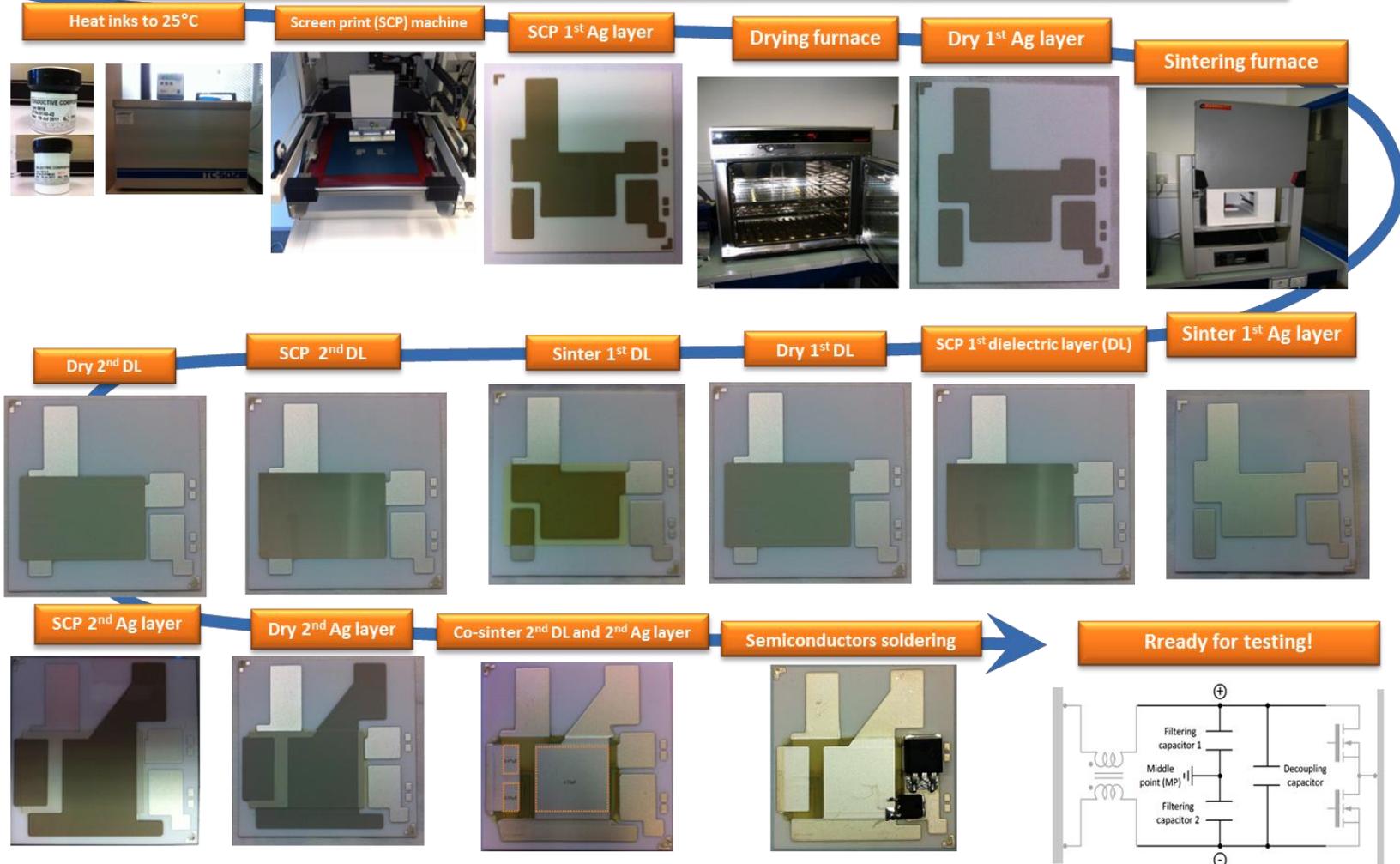


Fig. 5 - Tracé de l'inductance propre et de la résistance de bobinage en fonction de la fréquence

[9] G. Hérault, D. Labrousse, A. Mercier, et S. Lefebvre, « Intégration de circuit magnétique dans le PCB dédié à un convertisseur PFC », in *Symposium de Genie Electrique*, Grenoble, France, 2016.

Techniques d'intégrations de composants diélectrique

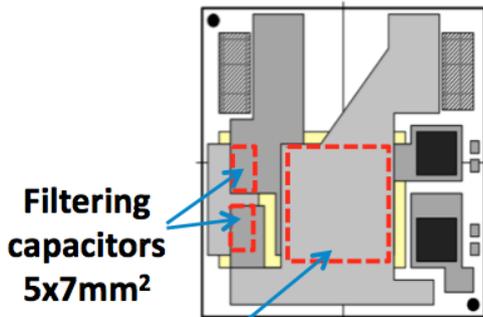
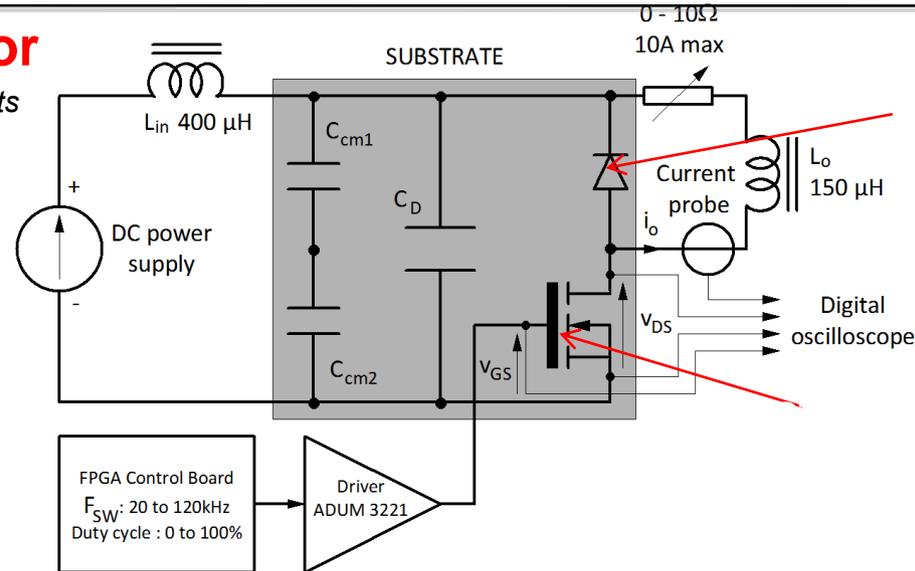
Multilayer capacitive substrate for dc-dc converter



Techniques d'intégrations de composants diélectrique

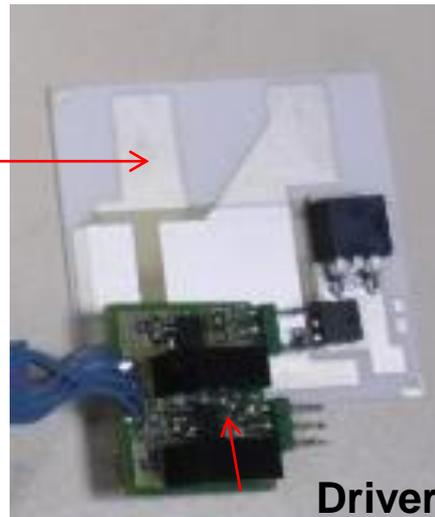
First demonstrator

(T.B. Doan '3D passive components integration for power electronic applications' Thèse, UT3 Paul Sabatier 2014)

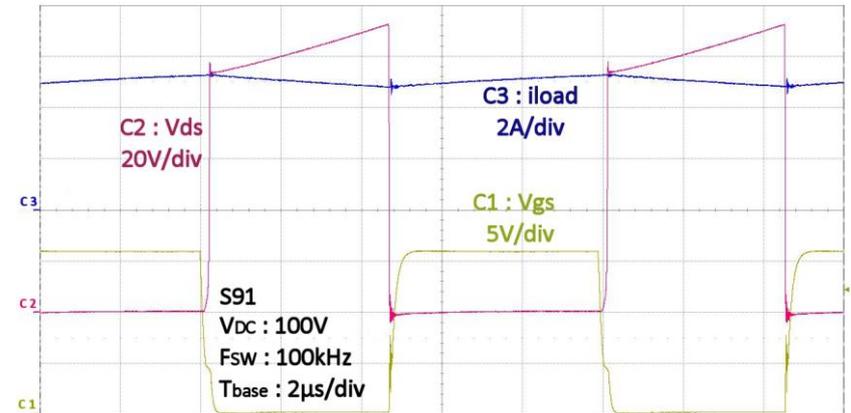


Filtering capacitors
5x7mm²

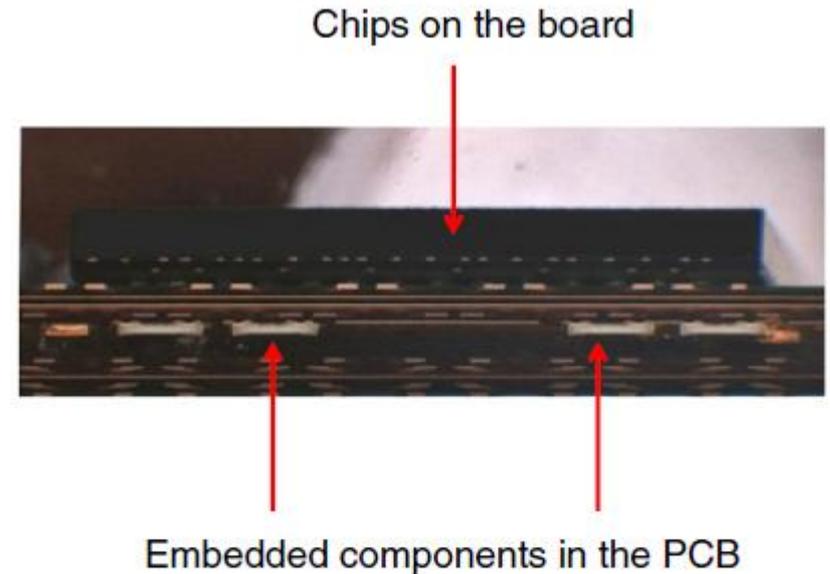
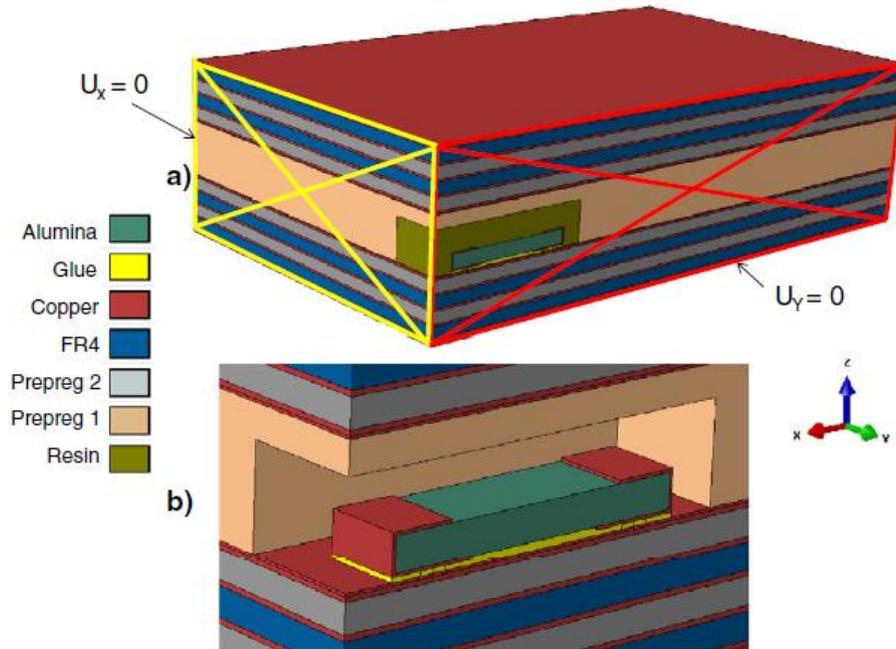
Decoupling capacitor
19x19mm²



Driver



Techniques d'intégrations de composants diélectrique



Enfouissement de condensateur CMS
 Au cœur du PCB
 -> Etude de fiabilité

[11] W. Kpobie *et al.*, « Thermo-mechanical simulation of PCB with embedded components », *Microelectron. Reliab.*, vol. 65, p. 108-130, oct. 2016.