



HAL
open science

Conception d'un boîtier multicouche LTCC intégrant un Oscillateur MMIC

Khodor Hussein Rida, Camilla Kärnfelt, Alain Peden, Guy Chuiton, Pascal Coant, Jean-Philippe Coupez, Herbert Zirath, Rumen Kozhuharov

► **To cite this version:**

Khodor Hussein Rida, Camilla Kärnfelt, Alain Peden, Guy Chuiton, Pascal Coant, et al.. Conception d'un boîtier multicouche LTCC intégrant un Oscillateur MMIC. JNM 2013: 18èmes Journées Nationales Microondes, May 2013, Paris, France. hal-00845217

HAL Id: hal-00845217

<https://hal.science/hal-00845217>

Submitted on 3 Jun 2024

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.

Conception d'un boîtier multicouche LTCC intégrant un Oscillateur MMIC

Khodor RIDA¹, Camilla KÄRNFELT¹, Alain PEDEN¹, Guy CHUITON¹, Pascal COANT¹, Jean-Philippe COUPEZ¹, Herbert ZIRATH² et Rumen KOZHUHAROV²

¹Lab-STICC, Télécom Bretagne, Technopôle Brest-Iroise - CS 83818 - 29238 Brest Cedex 3 – France

²Microwave Electronics Laboratory, Dept. Microtechnology and Nanoscience, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suède

Résumé

La technologie à base de céramiques cuites à basse température (LTCC) offre une grande flexibilité dans la réalisation des boîtiers hyperfréquences grâce à sa capacité d'intégration des éléments passifs à l'intérieur des substrats et au report des composants actifs en puce ou en boîtier et qui peuvent être montés en surface.

Ce papier décrit la conception, la réalisation et la validation d'un boîtier en technologie multicouche LTCC intégrant un circuit oscillateur en technologie MMIC.

1. Introduction

Aujourd'hui, les produits hyperfréquences sont présents dans de nombreux domaines d'applications aussi bien grand public que dédiées (militaire, espace, santé,...). Le développement de nouveaux produits est caractérisé par un besoin de miniaturisation, d'amélioration des performances et de réduction des coûts.

L'utilisation de la technologie LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) pour la conception de modules radiofréquence (RF) est devenue très populaire du fait de ses faibles pertes, sa densité d'intégration élevée et sa grande fiabilité [1]. Cette technologie permet d'associer plusieurs couches de matériaux céramiques cuites afin de véhiculer sur différents niveaux les signaux électriques (DC, RF...), offrant ainsi une réduction de la taille et du coût [2].

Dans ce papier, nous décrivons la conception, la réalisation et la validation d'un boîtier en technologie LTCC. Il intègre un oscillateur réalisé en technologie MMIC et dont la bande de fonctionnement en fréquence est de 2 GHz (10.6-12.6 GHz).

2. L'OCT

L'oscillateur à intégrer dans le boîtier en LTCC est fourni par « Microwave Electronics Laboratory » de l'université de Chalmers, Göteborg, Suède. Cet oscillateur contrôlé en tension (OCT) a été conçu sur la base de la topologie présentée en [3] et est fabriqué en technologie AsGa. Il présente une sortie RF et trois entrées DC (base, collecteur et varactor) dédiées à l'alimentation de l'oscillateur. Sa puissance de sortie est

de l'ordre de 5 dBm avec un bruit de phase de -105 dBc/Hz (à 100 kHz) sur toute la bande de fréquence. La taille de la puce est 1872 μm x 1972 μm sur un substrat d'épaisseur 75 μm . La Figure 1 représente la mesure de la bande de fréquence et la puissance de l'OCT en fonction de la tension du varactor.

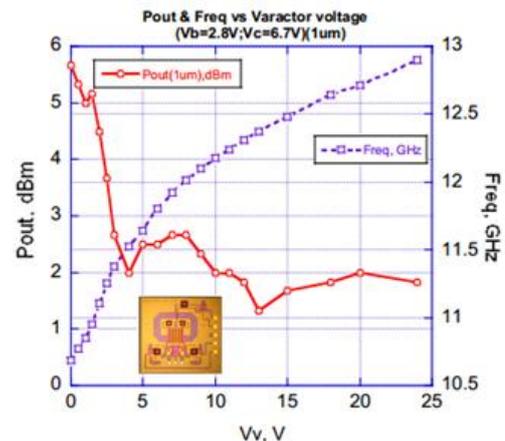


Figure 1. Bande de fréquence et puissance de sortie de l'OCT en fonction de la tension du varactor

3. La technologie LTCC

La technologie LTCC, très peu développée en France, est aujourd'hui validée au département Microondes de Télécom Bretagne dans le but de fabriquer des modules RF multicouche. Cette technologie permet la structuration en 3D à partir des feuilles de céramique-verre laminées ensemble et cuites en une seule étape. Le principe de fabrication de circuits en LTCC est illustré dans la Figure 2 [4]. Les couches LTCC sont tout d'abord découpées en formes carrées puis percées à l'aide d'un laser. Des cavités ou d'autres formes complexes peuvent être créées dans cette étape. Les trous sont métallisés pour assurer l'interconnexion verticale entre les couches. Ces trous sont remplis et les différentes lignes de transmission sont déposées par sérigraphie sur chaque couche. Ensuite, les couches sont empilées et pressées pour en faire une structure 3D. Finalement, le circuit est cuit selon un profil défini jusqu'à 850 °C pour avoir un seul bloc.

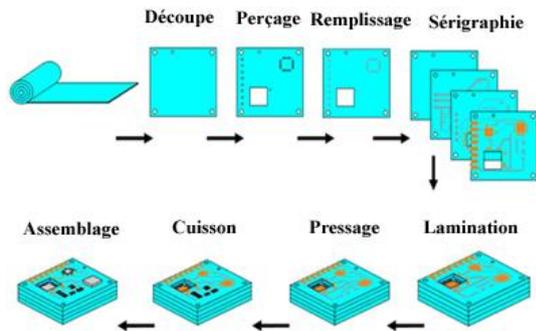


Figure 2. Principe de fabrication de circuits LTCC

Les propriétés physiques (permittivité, pertes diélectriques, épaisseur des couches, conductivité thermique...) des matériaux pour le LTCC varient selon leur composition. Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques de quelques exemples de matériaux disponibles sur le marché.

Propriétés physiques	Dupont 951	ESL 41110	Ferro A6S	Heraeus CT2000
ϵ_r (@ 1MHz)	7.8	4.6	5.9	9.1
$\tan \delta$ (@ 1MHz)	0.0015	0.0018	0.0013	0.00227
Retrait xy / z %	13 / 20	12 / 15	16 / 22	10 / 21

Tableau 1. Caractéristiques principales de quelques matériaux LTCC

Le substrat ESL41110 a été sélectionné pour nos applications du fait de sa faible valeur de permittivité par rapport aux autres matériaux. Cette valeur nous permet d'obtenir des lignes plus larges et ainsi réduire la complexité de fabrication lors de la sérigraphie des conducteurs. De plus, elle permet de minimiser les effets de couplage entre les différents éléments du circuit, et d'éviter l'excitation des modes supérieures à des fréquences très élevées [5]. D'autre part, l'or ESL802 est utilisé comme matériau conducteur pour le remplissage des vias et l'or ESL803 pour le dépôt des conducteurs (lignes, plans de masse,...).

4. Conception et simulation

Le boîtier conçu est composé de 8 couches de substrat ESL41110. Comme le représente la Figure 3, l'interconnexion entre la puce MMIC et le boîtier est effectué par des fils d'or (Wire Bonds) de diamètre de 25 μm . La puce est placée au niveau de la 4^{ème} couche dans une cavité pour minimiser la longueur des fils. Afin de délivrer la puissance maximale de la puce vers le boîtier et éliminer les effets parasites indésirables des interconnexions, un réseau d'adaptation semi-localisé est réalisé au niveau de la connexion des fils d'or [6].

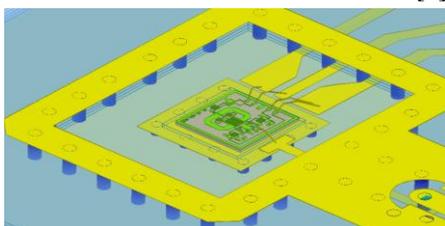


Figure 3. Puce en cavité avec les connexions de fils

Le signal de sortie de l'oscillateur est ramené en surface du boîtier grâce à une transition coplanaire vers une ligne strip-line (Figure 4) à travers une interconnexion semi-coaxiale sur 4 couches. Cette interconnexion est optimisée par le placement de vias métallisés autour du signal pour obtenir une impédance de 50 ohms. L'objectif de cette transition est de pouvoir utiliser un connecteur coaxial monté en surface (connecteur SMP). Les trous métallisés assurent la connexion entre les différents plans de masse du boîtier.

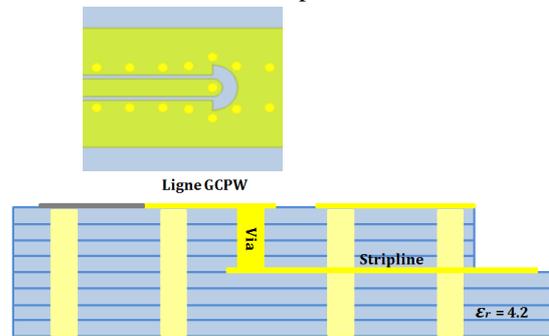


Figure 4. Vue en coupe de la transition coplanaire vers stripline

La Figure 5 représente le boîtier final incluant la sortie RF ainsi que les entrées DC de la puce MMIC. L'alliage or-platine (en gris) est utilisé pour la soudure des connecteurs.

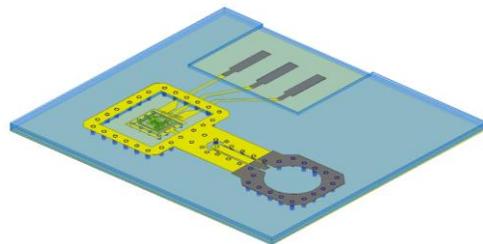


Figure 5. Boîtier final en LTCC

Le simulateur électromagnétique 3D HFSS est utilisé pour la conception du boîtier. La simulation de la partie RF est faite en configuration *back-to-back* avec un plan de symétrie en H afin de réduire le temps de simulation. Dans cette simulation, la puce est remplacée par une ligne 50 Ω . Les résultats de simulation sont présentés lors de la validation de la transition dans la dernière partie. Ces résultats montrent un coefficient de réflexion (S_{11} et S_{22}) meilleur que -20 dB entre 10.6 et 12.6 GHz. Les pertes en transmission (S_{12} et S_{21}) sont de l'ordre de 0.2 dB. La Figure 6 représente le comportement du champ électrique au niveau de la transition simulée sous HFSS.

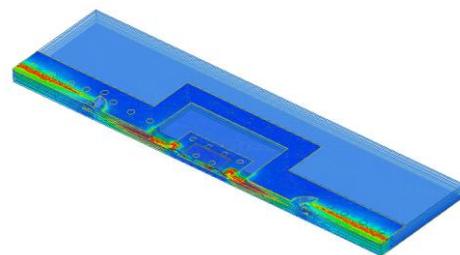


Figure 6. Champ électrique de la transition *back-to-back* simulée sous HFSS

5. Réalisation et validation

Avant la réalisation finale du boîtier représentée dans la Figure 5, et afin de la valider en termes de paramètres S , la partie RF est fabriquée tout d'abord en configuration *back-to-back* pour caractériser les différentes transitions. Les couches en LTCC sont découpées en formes carrées (50.8 x 50.8 mm) puis à l'aide d'un laser, les trous et les cavités sont percés. Ensuite, les trous sont remplis d'or ESL802 et les différentes métallisations sont déposées par sérigraphie en utilisant l'encre ESL803. Ensuite, les couches sont empilées et pressées ensemble sous une pression de 200 bars à 70 °C pendant 10 min. On note que les différentes cavités sont remplies par le matériel ESL49000 (en marron) nécessaire pour éviter leur déformation pendant le pressage. Finalement, le circuit est cuit dans un four statique selon le profil de cuisson recommandé par ESL. La Figure 7 montre le circuit avant et après cuisson. Après cuisson, le circuit est affecté d'un retrait d'une valeur de $13 \pm 1 \%$ en x et y et de $15 \pm 0.5 \%$ en z.

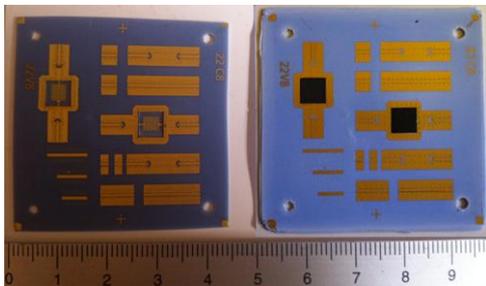


Figure 7. Partie RF du boîtier en LTCC : avant cuisson (droite) et après cuisson (gauche)

Après cuisson, les différentes parties du circuit sont découpées au niveau des accès des transitions et les fils d'or (wire bonds) de diamètre 25 μm sont interconnectés entre le réseau d'adaptation et la ligne 50 Ohms à l'intérieur de la cavité. La longueur des fils est de 700 μm . La mesure en paramètres S est réalisée entre 1 et 15 GHz en utilisant l'analyseur de réseau ANRITSU 37397C à l'aide de la cellule de mesure représentée à la Figure 8. Cette cellule, conçue au laboratoire, combine des matériaux en plastique et en mousse afin d'éviter les forces mécaniques importantes sur les circuits en LTCC qui sont relativement fragiles. Elle intègre des connecteurs coaxiaux *Soutwest Microwave* [7] fonctionnant jusqu'à 40 GHz. Des micro-positionneurs en x, y et z sont également utilisés pour ajuster le contact entre le circuit et les connecteurs.

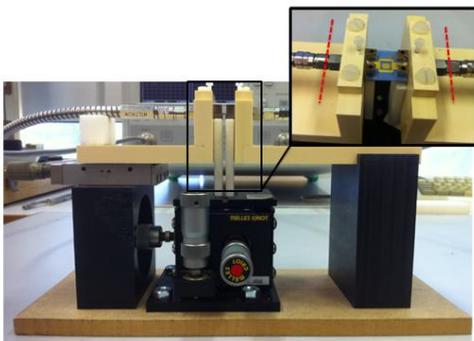


Figure 8. Cellule de mesure des circuits en LTCC

La Figure 8 représente la mesure en paramètres S de la transition *back-to-back*. Un calibrage TRL a été effectué, mais du fait des tolérances de fabrication des circuits en LTCC les résultats ne sont pas totalement satisfaisants (différence entre S_{11} et S_{22}). Un calibrage SOLT est donc réalisé avec un plan de référence situé au niveau des connecteurs coaxiaux. Les effets de ces connecteurs sont pris en compte en rétro-simulation pour la comparaison avec les mesures (voir Figure 9).

Les résultats de mesure montrent un coefficient de réflexion meilleur que -20 dB entre 10.6 et 12.6 GHz. Les pertes en transmission (S_{12} et S_{21}) mesuré à 12 GHz sont de l'ordre de 0.75 dB, incluant les pertes dans les connecteurs.

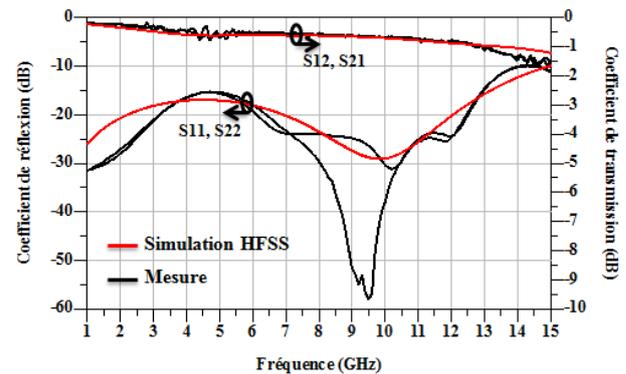


Figure 9. Mesure des paramètres S de la transition en configuration *back-to-back*

Après la validation de la partie RF, le boîtier final de l'oscillateur MMIC a été fabriqué. Un connecteur SMP est monté en surface sur la couche supérieure pour récupérer le signal issu de l'OCT. Ce boîtier inclut les accès DC destinés à l'alimentation de la puce MMIC.

Trois prototypes différents ont été conçus et fabriqués en utilisant le procédé de fabrication LTCC décrit précédemment afin d'y intégrer les capacités de découplage sur les accès DC (en plus du découplage sur la puce). Le premier prototype n'intègre aucune capacité (Figure 10 (a)), le deuxième permet le report de capacités CMS et pour le dernier (Figure 10 (b)), des capacités MIM (Métal-Isolant-Métal) sont intégrées à l'intérieur du substrat. Le matériau diélectrique ESL41060 à haute permittivité (environ 18) est utilisé pour l'isolant. La valeur des capacités réalisées est de l'ordre de 2 pF.

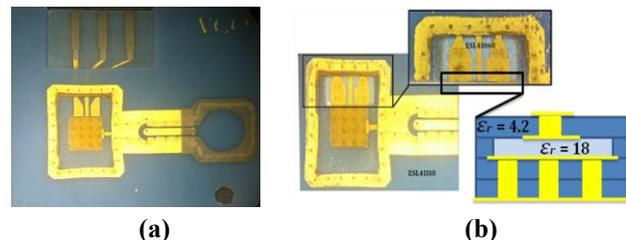


Figure 10. Boîtiers LTCC pour la puce MMIC : (a) sans capacité de découplage, (b) avec capacités intégrées à l'intérieur du substrat

Après la réalisation des boîtiers en LTCC, la puce MMIC est montée dans la cavité en utilisant une colle

conductrice H20E et une connexion par un fil d'or de diamètre 25 μm et de longueur 700 μm . Le connecteur SMP qui fonctionne jusqu'à 40 GHz ainsi que les fils cuivrés d'alimentation DC sont soudés. Finalement, le boîtier est fixé sur un bloc de mousse pour le protéger des chocs mécaniques. La figure ci-dessous représente le boîtier LTCC (sans capacité de découplage) avec l'OCT interconnectés par des fils.

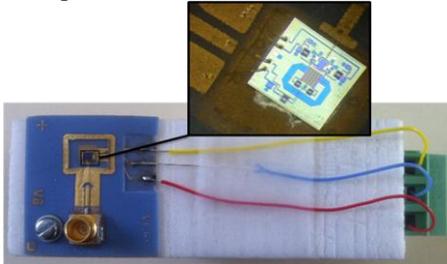


Figure 11. Boîtier en LTCC de l'OCT sans capacités

La mesure de la bande d'accord et de la puissance de l'OCT dans ce boîtier est réalisée à l'aide de l'analyseur de spectre ROHDE & SCHWARZ FSQ (20 Hz – 40 GHz). La tension de base (V_b) de l'oscillateur est de 2,77 V, la tension du collecteur est fixée à 5 V ($I_c = 35 \text{ mA}$) et la tension du varactor est variable entre 0 et 14 V.

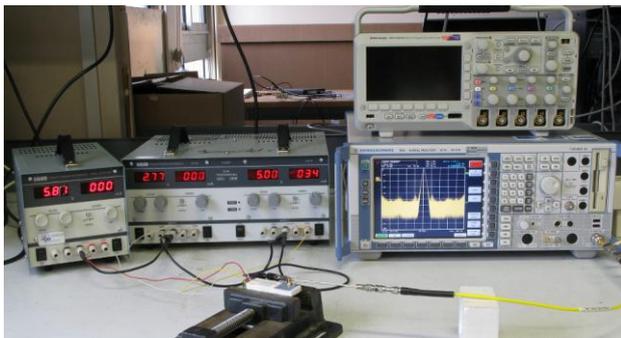


Figure 12. Configuration de la mesure de l'OCT intégrés dans un boîtier en LTCC

La Figure ci-dessous présente la bande de fréquence mesurée en fonction de la tension du varactor. La fréquence de l'oscillateur après la mise en boîtier varie entre 10.6 et 12.6 GHz. De nouvelles mesures sont en cours avec les capacités intégrées dans le boîtier LTCC.

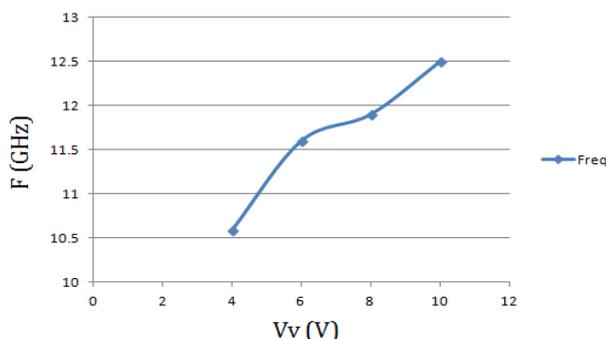


Figure 13. Fréquence mesurée de l'OCT en fonction de la tension du varactor

6. Conclusion

Cet article a présenté la conception et la réalisation d'un boîtier en technologie LTCC composé de 8 couches et intégrant un oscillateur contrôlé en tension (puce MMIC). Ce boîtier offre des performances mesurées en réflexion meilleures que -20 dB et des pertes en transmission en configuration *back-to-back* inférieures à 0.75 dB (connecteurs de mesure inclus). Le fonctionnement de l'OCT monté dans le boîtier conçu est validé avec une bande d'accord mesurée de 2 GHz à 11.6 GHz.

7. Remerciement

Nous remercions M. Serge PINEL pour son aide et son travail dans la conception et la fabrication de la cellule de mesure des circuits LTCC.

8. Bibliographie

- [1] S. Cheng, "Low Phase-Noise Integrated Voltage Controlled Oscillator Design Using LTCC Technology", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, n° 8, Aug. 2003, pp. 329-331.
- [2] L. Rigaudeau et al. "LTCC 3-D resonators applied to the design of very compact filters for Q-band applications", *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, n°6, June 2006, pp. 2620-2627.
- [3] H. Zirath, R. Kozhuharov and M. Ferndahl, "Balanced Colpitt oscillator MMICs designed for ultra-low phase noise," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 40, N 10, pp. 2077-2086 Oct., 2005
- [4] Site web PASS, Systèmes de production LTCC, <http://www.pass.com.hk/products/ltcc/equipment/index.html>.
- [5] Michael Steer, "Microwave and RF Design: A Systems Approach", SciTech Publishing Inc, November 2009
- [6] David Pozar, "Microwave engineering", Ed. J. Wiley, Hoboken, NJ, 2005.
- [7] Site web Southwest Microwave, End Launch connector (2.92 mm), <http://mpd.southwestmicrowave.com/>