



HAL
open science

Développement d'un filtre SIW multicouche en technologie LTCC High K en bande S

Ruben R Guerrero, Benjamin Potelon, Eric Rius, Ludovic Carpentier, Lidwine Raynaud, Jean-Claude Azzara

► **To cite this version:**

Ruben R Guerrero, Benjamin Potelon, Eric Rius, Ludovic Carpentier, Lidwine Raynaud, et al.. Développement d'un filtre SIW multicouche en technologie LTCC High K en bande S. XIXèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France. hal-01700579

HAL Id: hal-01700579

<https://hal.science/hal-01700579v1>

Submitted on 4 Feb 2018

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.

Développement d'un filtre SIW multicouche en technologie LTCC High K en bande S

Ruben Guerrero^{1,2}, Benjamin Potelon^{1,2}, Eric Rius^{1,2}, Ludovic Carpentier³, Lidwine Raynaud⁴, Jean-Claude Azzara⁴.

¹ Univ. Bretagne Occidentale, Lab-STICC, 6 avenue Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3

² Lab-STICC UMR CNRS 3192, CS 93837 – 29238 Brest Cedex

³ Cnes, 18 avenue Edouard Belin, 31 401 Toulouse CEDEX 9

⁴ Thales Alenia Space France, 26 avenue J.F. Champollion, BP33787, 31037 Toulouse
rguerrero@univ-brest.fr

Résumé

Cet article présente le design et la mise en œuvre d'un filtre SIW en bande S, d'ordre 12, utilisant la technologie High K LTCC. Il s'agit de proposer un filtre 3D miniature sur la base de cavités SIW réalisés à partir de couches LTCC à haute permittivité. On souhaite ici profiter de la forte constante diélectrique et de la possibilité d'empiler les cavités pour limiter l'empreinte de la structure. On souhaite aussi travailler sur des cavités volumiques pour atteindre de bons facteurs de qualité. La solution proposée permet de répondre à un gabarit de filtrage exigeant pour une application spatiale, qui présente une forte rejection hors bande et un niveau faible de pertes d'insertion et d'ondulation dans la bande passante.

1. Introduction

Dans les systèmes de télécommunications actuels il y a un intérêt croissant pour le développement de nouvelles technologies de filtres de taille réduite qui offrent des performances élevées en termes de pertes d'insertion, pour répondre aux besoins exigeants du domaine spatial. Au sein des systèmes de communication situés dans la charge utile des satellites, cohabitent des composants actifs et passifs. La compacité de ces derniers et notamment des filtres est devenue une préoccupation importante, dont l'empreinte totale et le poids sont des données cruciales [1].

Dans cette perspective, la technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) apporte des caractéristiques intéressantes telles qu'un facteur de qualité à vide élevé, non atteignable avec des résonateurs microruban classiques, et facilite l'intégration avec les autres composants, en particulier les MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuits). Le filtre à concevoir est prévu pour fonctionner dans la bande S, avec une BPR (Bande passante relative) d'environ 20%. Cependant, à ces fréquences, la structure peut occuper une surface considérable, à cause de la longueur d'onde élevée. Comme alternative à cette situation, deux techniques sont proposées : l'utilisation d'un substrat de haute permittivité et l'emploi de la technologie LTCC (Low

Temperature Co-fired Ceramic) pour empiler les cavités. La solution développée ici combine les 2 aspects et offre ainsi une excellente capacité de réduction de l'encombrement dans les trois dimensions, de bonnes performances électriques ainsi qu'une grande souplesse de design par rapport aux technologies planaires conventionnelles.

L'objectif de ce papier est de montrer la mise en œuvre d'un filtre SIW d'ordre 12 en bande S sur la base des caractéristiques mentionnées.

2. Filtre SIW empilé verticalement en technologie LTCC High K

2.a. Généralités de la technologie LTCC.

La technologie LTCC a gagné en popularité en raison de sa capacité à la miniaturisation des dispositifs électroniques et composants des systèmes de micro-ondes actuels [2]. Elle consiste en l'empilement de plusieurs couches de substrat, où chacun d'eux est passé par plusieurs processus planes. Les bandes de substrat sont percées, sérigraphiées et découpées séparément. Par la suite, ils sont empilés, laminés et co-cuits à des températures voisines de 900 ° C. Le processus est caractérisé parce que le produit final se comporte comme s'il y avait seulement une couche de substrat unique, sans dégrader les propriétés électriques entre les couches Figure 1 décrit le processus de fabrication d'un circuit LTCC [3].

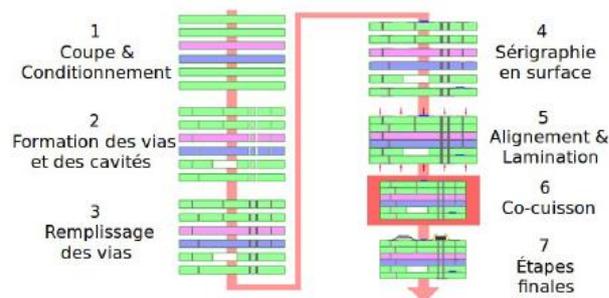


Figure 1. Processus de fabrication d'un circuit en technologie LTCC

Pour le processus de conception et la fabrication, un substrat de haute permittivité compatible avec le processus LTCC sera employé. C'est le Heraeus Heratape @CT765, fabriqué par Heraeus (Allemagne). Il a une permittivité de $\epsilon_r = 68,7$ et une tangente de pertes de $\tan\delta = 1,73e^{-3}$. Ce substrat est produit dans des couches de 50 μm (37,5 μm après cuisson). Via Electronics® a été la fonderie choisie, en vertu de ses capacités pour offrir une précision de classe industrielle pour la fabrication des prototypes. Les règles de conceptions considérées pour le développement des circuits sont consignées dans le guide de design LTCC fourni par la fonderie choisie [4]. Parmi eux, le diamètre des vias est de $\varnothing = 160 \mu\text{m}$, l'écart minimal entre vias est de $2.5\varnothing$ et la largeur minimale des lignes est de 30 μm . Ces règles doivent être prises en compte notamment pour le design des cavités et de la ligne d'accès du filtre.

2.b. Design de la cavité.

La conception du filtre SIW commence avec la détermination du mode de résonance fondamental des cavités et ses dimensions (longueur, largeur et hauteur). Le mode TE_{101} a été choisi, ce qui correspond à une cavité de forme carrée et permet de réduire son encombrement total. La largeur a et la longueur l de la cavité ont été calculées par les équations suivantes [5] :

$$f_r = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\frac{1}{(2a)^2} + \frac{1}{(2l)^2}} \quad (1)$$

$$l = \frac{c}{f_r} \sqrt{\frac{1}{2\epsilon_r}} \quad (2)$$

Ici $l = a$, car la cavité a une forme carrée. Pour le design $l = 10.66 \text{ mm}$ a été obtenu en prenant compte la valeur de la fréquence de résonance de la cavité. Par ailleurs, la hauteur des cavités dépend du nombre de couches du substrat dans chaque cavité, laquelle est en relation directe avec le facteur de qualité à vide Q_u à travers son facteur de forme. Le facteur de qualité à vide est lié au facteur de qualité du diélectrique Q_d et au facteur de qualité du conducteur Q_c selon l'équation :

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_c} \quad (3)$$

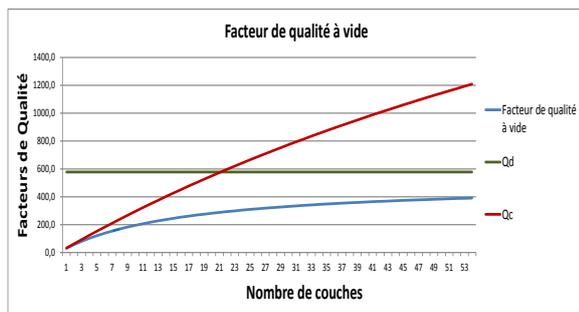


Figure 2. Facteur de qualité à vide d'une cavité en fonction de nombre de couches.

La figure 2 montre l'évolution du Q_u en fonction du nombre de couches du substrat. La grandeur Q_d ne peut pas être modifiée car elle dépend des pertes de substrat inhérentes au matériau. Cependant, la grandeur Q_c peut être optimisée en augmentant l'épaisseur du substrat, afin d'améliorer la valeur de Q_u .

2.c. Ordre du filtre.

L'ordre du filtre peut être calculé par l'équation [6]:

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0.1L_{As}}}{10^{0.1L_{Ar}}}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (4)$$

L_{As} est l'atténuation hors bande à la fréquence Ω_s , L_{Ar} est l'amplitude d'ondulation maximale et Ω_s correspond à la fréquence de coupure du prototype passe-bas. Selon le niveau de rejection requis et pour profiter d'un nombre pair de résonateurs afin d'obtenir une structure symétrique, un ordre de $n = 12$ a été sélectionné.

2.d. Topologie du filtre.

Après avoir déterminé l'ordre du filtre ainsi que les dimensions de la cavité, une analyse de la relation entre le nombre de couches de substrat employé dans chaque cavité et son effet sur la réponse électrique a été réalisée, afin d'optimiser la performance du filtre et son encombrement total. Cette analyse a été réalisée à l'aide des simulations des modèles des circuits RLC respectives, en utilisant l'outil de simulation électromagnétique ADS®. Dans telles circuits, les pertes sont modélées par la valeur de R [6].

Ensuite, en considérant une hauteur maximale de $h = 2025 \mu\text{m}$ imposée par la fonderie pour l'empilement et en profitant de la souplesse d'agencement offerte par la technologie LTCC, plusieurs topologies ont été proposées et ses performances électriques ont été vérifiées. Finalement, une topologie composée par 6 piles des cavités, dont deux cavités superposées chacune, a été sélectionnée. L'épaisseur choisi pour chaque cavité est de 27 couches de substrat, ce qui correspond à une hauteur de $h = 1012.5 \mu\text{m}$. La valeur du facteur de qualité affecté à cette hauteur est de l'ordre de 300. Les vues supérieure et transversale de la topologie sont présentées à la Figure 3.

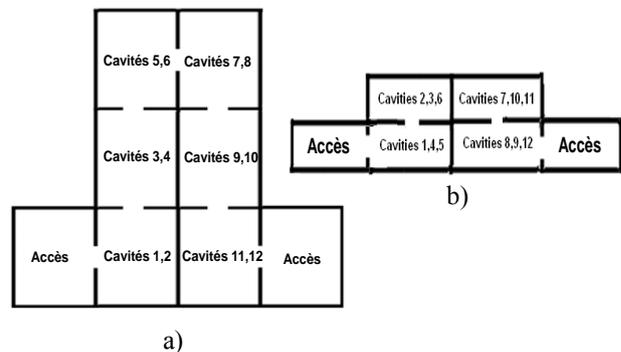


Figure 3. Disposition des cavités dans la topologie du filtre SIW a) Vue supérieure b) Vue transversal

2.e. Synthèse des couplages et de la transition d'accès.

Le processus de conception implique la caractérisation des coefficients de couplage entre les cavités et aux accès et la mise en œuvre d'une transition microruban-SIW, compatible avec des épaisseurs planaires raisonnables.

Les valeurs des coefficients de couplage sont calculées en appliquant une procédure classique pour un filtre passe-bande, en considérant une réponse Tchevyshev généralisée pour la conception [7]. Les équations suivantes ont été employées pour la démarche en ne considérant que la moitié du filtre, l'autre étant obtenue par symétrie. Par ailleurs, la matrice de couplage montrée ci-dessous consigne ses valeurs.

$$Q_E = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (5)$$

$$k_{0,1} = \frac{1}{\sqrt{Q_E FBW}} \quad (6)$$

$$k_{j, j+1} \quad j=1 \text{ à } j=n-1 = \frac{FBW}{\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (7)$$

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 1.208 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.208 & 0 & 0.190 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.190 & 0 & 0.127 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.127 & 0 & 0.116 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.116 & 0 & 0.112 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.112 & 0 & 0.110 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.110 & 0 & 0.110 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.110 & 0 & 0.110 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.110 & 0 & 0.112 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.112 & 0 & 0.116 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.116 & 0 & 0.127 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.127 & 0 & 0.190 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.190 & 0 & 1.208 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.208 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

La structure du filtre rend nécessaire l'utilisation des couplages verticaux entre les cavités superposées ainsi que des couplages horizontaux entre les cavités situées sur un même plan. Les iris horizontaux sont situés dans les zones où le champ magnétique domine. Par conséquent, les fentes verticales sont également situées le long du bord des cavités, où le champ magnétique est maximum, afin d'avoir un couplage de nature magnétique. Par ailleurs, les fentes de couplage jouent un rôle clé pour la suppression des remontées parasites dans la bande atténuée, car ils réduisent l'apparition des modes supérieurs près du mode de résonance fondamental. Ils ont été judicieusement situés et dimensionnés afin de réduire ces effets.

Un abaque de couplage obtenu par simulation électromagnétique a été réalisé pour chaque type de couplage, afin de transformer les valeurs des coefficients de couplage en dimensions physiques. Pour caractériser les couplages horizontaux et verticaux, une structure des résonateurs couplés a été utilisée, laquelle génère deux pics de résonance employés pour faire le calcul [6]. D'autre, l'abaque de couplage d'accès, qui fait référence à l'iris magnétique qui intègre la transition d'accès, a été

déterminé en utilisant un modèle d'un résonateur uniquement chargée et la méthode de la phase décrite en [6]. La table 1 registre les dimensions obtenues pour chaque structure de couplage.

$K_{i,i+1}$	Coefficients de couplage	Dimensions des structures de couplage [mm]
$k_{1,2}$	0.190	7,13
$k_{2,3}$	0.127	6,39
$k_{3,4}$	0.116	6,02
$k_{4,5}$	0.112	5,86
$k_{5,6}$	0.110	5,42
$k_{6,7}$	0.110	5,41

Table 1. Dimensions des structures de couplage pour le filtre SIW.

Aussi, une transition microruban-SIW a été développé, afin d'assurer la compatibilité du filtre avec les autres dispositifs cascades avec celui-ci, en considérant une impédance de port de 50 Ohms pour une largeur de ligne réalisable. La transition est constituée par deux taper (sauts d'impédance), dont la fonction est d'améliorer la transition d'impédance, et également par un guide d'ondes à largeur élargie, qui réduit la fréquence de coupure et augmente le niveau d'adaptation du filtre. Le couplage d'accès ne doit pas être enterré, c'est-à-dire, sans cavités empilées au-dessus, de façon à pouvoir réaliser facilement les mesures ou les interconnexions avec les autres dispositifs. La figure 3 présente la réponse du paramètre S_{11} de la transition développé.

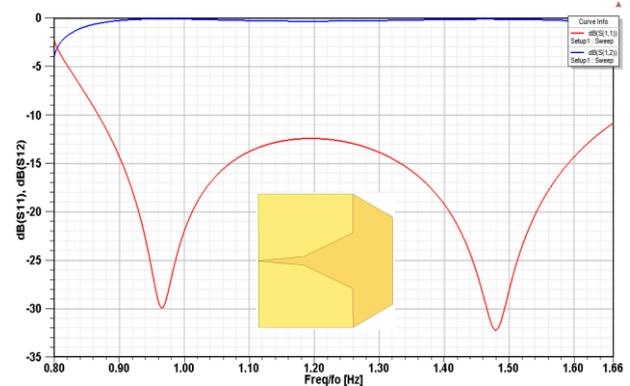


Figure 4. Réponse du paramètre S_{11} de la transition microruban-SIW.

3. Filtre SIW et résultats de simulations.

3.a. Structure physique du filtre SIW

La figure 5 montre une vue supérieure et en 3D de la masque du filtre ainsi que ses dimensions, pour une épaisseur totale de ≈ 2 mm. Le filtre a été simulé en utilisant le logiciel de simulation électromagnétique HFSSTM. Afin d'obtenir une haute isolation entre les cavités et prévenir des couplages entre résonateurs non adjacents, des arrangements des vias métalliques décalés ont été utilisées autour du filtre et de part et d'autre des iris magnétiques, tout en prenant en compte les règles de design imposées pour la fonderie. La structure du motif des vias mentionnée est présentée dans la figure 6.

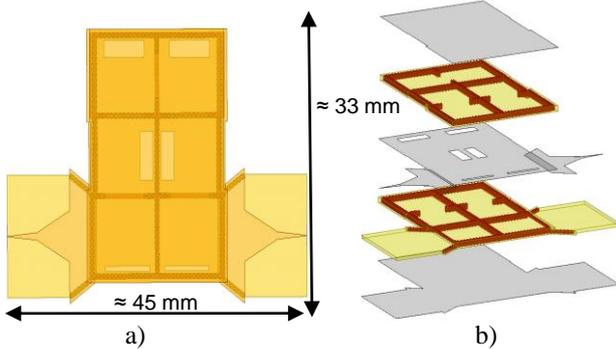


Figure 5. Filtre SIW d'ordre 12 en technologie LTCC

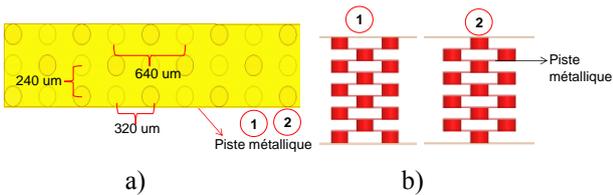


Figure 6. Structure des arrangements des vias décales
a) Vue supérieure b) Vue transversale du motif.

3.b. Résultats de simulation.

La figure 7 présente la réponse électromagnétique du filtre. Le processus de réglage consiste principalement dans l'ajustement des longueurs des cavités pour modifier ses fréquences de résonance. Un ajustement additionnel sur les iris et fentes de couplage est aussi nécessaire pour améliorer le niveau d'adaptation de la réponse électrique. Cette tâche est effectuée à l'aide du logiciel ADS™, pour la simulation du modèle idéal, et la option de réglage de HFSS™, disponible dans sa dernière version (HFSS v2015).

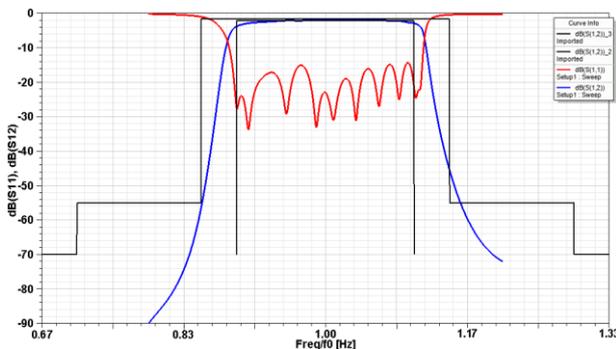


Figure 7. Simulation électromagnétique de la réponse du filtre.

Selon la réponse électrique, le niveau de pertes d'insertion est de 2 dB et la platitude est de 1.9 dB. D'autre, le niveau de rejection est supérieure à 56 et à 45 dB dans chaque côté de la bande passante. En général, les performances obtenues sont très proches du gabarit de la spécification requis.

4. Conclusion

La technologie LTCC en combinaison avec l'utilisation d'un substrat de forte permittivité offre de grandes possibilités de design et de réduction d'encombrement dans un contexte multicouche, tout cela

sans en dégrader les performances. Un filtre SIW empilé verticalement a été développé sur la base de cette technologie pour répondre à une spécification spatiale, caractérisé par un haut niveau de rejection hors bande et de faibles pertes. Les performances électriques obtenues sont satisfaisantes, principalement grâce à des facteurs de qualité élevés.

5. Bibliographie

- [1] El Mostrah, A, Potelon, B, Rius, E, Quando, C, Favennec, J, Leblond, H, « Comparative study of Two C-band SIW filter topologies for a space application » Microwave Conference (EuMC), 2012 42nd European , vol., no., pp.368,371, Oct. 29 2012-Nov. 1 2012.
- [2] Kuo-Sheng Chin et al., « LTCC Multilayered Substrate-Integrated Waveguide Filter With Enhanced Frequency Selectivity for System-in-Package Applications », Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions, vol.4, pp.664-672, April 2014.
- [3] A, KHALIL, « Technologies LTCC et stéréolithographie céramique 3D appliquées à la conception de dispositifs millimétriques et sub-millimétriques ». Doctoral thesis. Université de Limoges, 2010.
- [4] LTCC Systems and design rules, Via Electronics, Germany.
- [5] D. Deslandes, K. Wu, « Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide », IEEE Microwave Theory and Techniques, 2006, 54, pp. 2516-2526.
- [6] J.-S. Hong, « Microstrip Filters for RF/Microwave Applications », 2nd Edition. New York: J. Wiley & Sons, 2011.
- [7] Matthaei G, Young L, Jones E.M.T, « Microwave Filters, Impedance-Matching, and Coupling Structures » Artech House Books, 1980, pag. 427 - 668.