



**HAL**  
open science

## Étude d'un filtre volumique SIW en technologie LTCC sur un substrat de forte permittivité en bande X

Jonathan Garreau, Benjamin Potelon, Eric Rius, Jean-François Favennec,  
Cédric Quendo, Cécile Caille, Céline Frinault, Jean-Claude Azzara, Lidwine  
Bortoli

► **To cite this version:**

Jonathan Garreau, Benjamin Potelon, Eric Rius, Jean-François Favennec, Cédric Quendo, et al..  
Étude d'un filtre volumique SIW en technologie LTCC sur un substrat de forte permittivité en bande  
X. 17èmes Journées Nationales Microondes, May 2011, Brest, France. pp.4F-9. hal-00669552

**HAL Id: hal-00669552**

**<https://hal.science/hal-00669552>**

Submitted on 13 Feb 2012

**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.

## Étude d'un filtre volumique SIW en technologie LTCC sur un substrat de forte permittivité en bande X

Jonathan Garreau<sup>1,2</sup>, Benjamin Potelon<sup>1,2</sup>, Eric Rius<sup>1,2</sup>, Jean-François Favennec<sup>1,2</sup>, Cédric Quendo<sup>1,2</sup>, Cécile Caille<sup>3</sup>, Céline Frinault<sup>3</sup>, Jean-Claude Azzara<sup>3</sup>, Lidwine Bortoli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université Européenne de Bretagne, France

<sup>2</sup>Université de Brest ; CNRS, UMR 3192 Lab-STICC, 6 avenue Le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest cedex 3

<sup>3</sup>Thales Alenia Space France, 26 avenue J.F. Champollion, BP33787, 31037 Toulouse

jonathan.garreau@univ-brest.fr : correspondant principal

### Résumé

La technologie SIW apporte un gain en terme de facteur de qualité par rapport aux technologies planaires. Sa facilité d'intégration avec ces dernières, ainsi que son coût de production sont autant d'atouts qui la rendent attractive. Son encombrement reste en revanche l'un de ses principal défaut. Ce document présente ici la combinaison de deux solutions pour y remédier : L'utilisation d'une technologie multicouche pour empiler les cavités et réduire ainsi l'empreinte. L'utilisation d'un substrat de haute permittivité afin de réduire les dimensions selon les 3 axes. Ces solutions sont testées ici sur un filtre d'ordre 6 en bande X.

### 1. Introduction

La compacité des dispositifs et l'augmentation de leur facteur de qualité sont deux critères qui apportent des améliorations dans le domaine du filtrage hyperfréquence. L'utilisation du SIW (Substrate Integrated Waveguide) [1] permet de profiter des faibles épaisseurs de substrats utilisés en technologies planaires tout en profitant d'un facteur de qualité plus élevé apporté par les modes de résonance volumiques. Cependant, l'encombrement d'un filtre SIW reste un défaut majeur vis à vis des technologies planaires [2]. Afin de remédier à cela, l'une des solutions est d'empiler les cavités grâce à une technologie multicouche telle que le LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic). Cette dernière offre aujourd'hui une précision tout à fait acceptable pour une utilisation en onde millimétrique. Elle peut de plus s'appliquer à des substrats de haute permittivité [3], apportant une réduction supplémentaire des dimensions.

Nous nous proposons d'étudier les possibilités offertes par l'association de ces deux techniques dans le cadre de la conception d'un filtre SIW.

### 2. Technologie et dimensionnement

#### 2.a. Technologie et règles de conception

La technologie LTCC consiste en un empilement de couches de céramique co-cuites sous pression à une température d'environ 900°C. La Figure 1 donne une vue détaillée du procédé de fabrication. Les couches sont

percées et sérigraphiées séparément avant d'être superposées, laminées puis cuites ensemble. Cet aspect multicouche offre de nombreuses possibilités d'intégration en trois dimensions. Son faible coût de production est aussi un atout qui rend cette technologie de plus en plus attrayante pour les industriels.

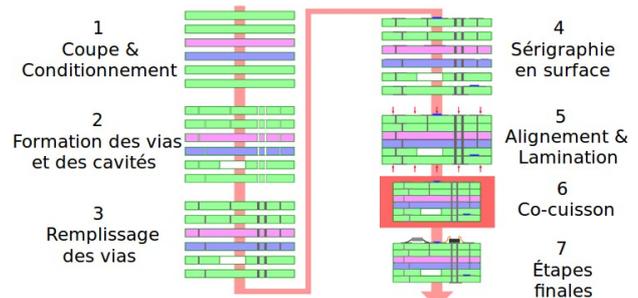


Figure 1. Procédé de fabrication LTCC

Nous avons choisi de travailler avec le centre de recherche technique gouvernemental finlandais *VTT Electronics*. Il propose, entre autre, l'utilisation du substrat LTCC Tape CT765 fabriqué par *Heraeus* (Allemagne). Sa permittivité annoncée est de 68,7 à 2,5 GHz et sa tangente de pertes de 1,73e-3. L'épaisseur d'une couche après cuisson est de 84 µm. Le métal compatible avec ce substrat est de l'argent, dont l'épaisseur de dépôt est de 15 µm. Le diamètre minimal de perçage est de 150 µm et l'écart inter-via minimal à respecter est de  $2,5 \times \Phi$ , soit 375 µm. Ces règles de conception imposent donc la disposition des vias délimitant les cavités. Or, ces paramètres influent sur le facteur de qualité du dispositif, notamment en raison des pertes par rayonnement [4].

#### 2.b. Dimensionnement et facteur de qualité

Les outils de synthèse pour le développement d'un filtre en cavités SIW sont les mêmes que ceux utilisés dans le cas de technologies volumiques classiques [1]. Le but étant ici de réduire au maximum l'encombrement du filtre, nous choisissons le mode de résonance fondamental  $TE_{101}$ . Les longueurs et largeurs des cavités dépendent alors directement de la fréquence de résonance désirée, et sont déterminées par les équations 1 et 2.

$$a > \frac{\lambda_c}{2} \quad (1)$$

$$l = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{f_r \sqrt{\epsilon_r}}{c} \right)^2 - \left( \frac{1}{2a} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Où  $a$  et  $l$  sont respectivement les largeur et longueur de la cavité,  $\lambda_c$  la longueur d'onde de coupure du mode  $TE_{10}$  du tronçon de guide constituant la cavité, et  $\epsilon_r$  la permittivité du substrat. Une fois la largeur  $a$  fixée, la longueur  $l$  dépend de la fréquence de résonance propre  $f_r$  de la cavité. Nous choisissons les valeurs suivantes :  $a = 3,2 \text{ mm}$ ,  $l = 3,8 \text{ mm}$  pour une fréquence de résonance  $f_r = 7,33 \text{ GHz}$ .

En revanche, l'épaisseur d'une couche de substrat est un paramètre que l'on ne peut pas modifier dans le cas du SIW. La technologie LTCC permet cependant d'empiler plusieurs couches et d'augmenter ainsi l'épaisseur des cavités. Or celle-ci a une influence sur le facteur de qualité d'une cavité, à travers son facteur de forme. Les équations 3, 4 et 5 permettent d'obtenir la valeur du facteur de qualité à vide d'une cavité parallélépipédique résonant en mode  $TE_{101}$  ( $Q_{pr}$ ).

$$\frac{1}{Q_{pr}} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_j} \quad (3)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (4)$$

$$Q_j = \frac{\lambda_r}{\delta_s} \cdot F \quad (5)$$

$$F = \frac{alh}{2} \frac{\left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{h^2} \right)^{3/2}}{\frac{h}{a^2}(a+2l) + \frac{a}{h^2}(h+2l)} \quad (6)$$

Où  $\lambda_r$  est la longueur d'onde en espace libre correspondant à la fréquence de résonance de la cavité,  $\delta_s$  est la profondeur de pénétration dans les parois du métal (épaisseur de peau) et  $F$  le facteur de forme de la cavité [5]. C'est dans ce facteur de forme qu'intervient l'épaisseur du résonateur  $h$ . Les grandeurs  $Q_d$  et  $Q_j$  correspondent à la qualité de la cavité liée aux pertes dans le diélectrique et celle liée aux pertes ohmiques respectivement. La Figure 2 montre l'évolution de ces trois facteurs de qualité, pour une cavité résonant en mode  $TE_{101}$  à 7,33 GHz. Nous avons choisi d'utiliser 5 couches de substrat LTCC pour réaliser une épaisseur SIW  $h = 420 \mu\text{m}$ , afin d'obtenir un facteur de qualité à vide supérieur à 200. Nous allons vérifier ces performances sur un filtre en bande X. Nous utilisons pour cela des spécifications spatiales centrées à 7,33 GHz, de bande passante relative de 5 % avec une ondulation maximale dans la bande  $L_{Ar} = 0,1 \text{ dB}$ . Une réjection  $L_{As}$  d'au moins 40 dB devra être atteinte à 500 MHz de part et d'autre de la fréquence centrale.

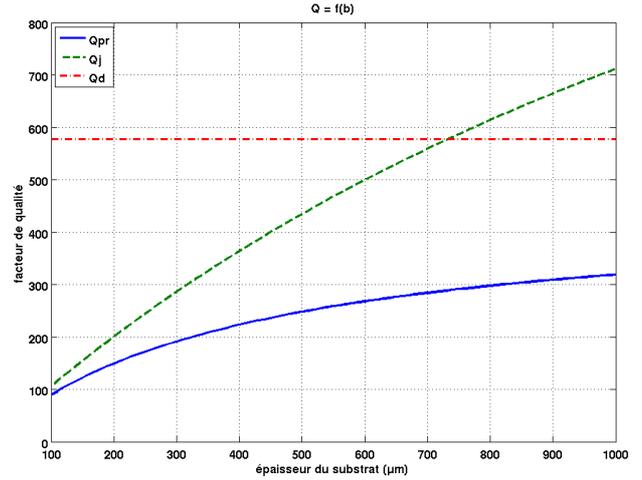


Figure 2. Facteurs de qualité d'une cavité en fonction de son épaisseur

### 3. Conception et topologie

#### 3.a. Ordre du filtre

À partir de l'équation 7 applicable dans le cas d'une synthèse de Chebychev [6], on déduit que la fonction de filtrage peut être réalisée avec un filtre d'ordre supérieur ou égal à 5.

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0,1L_{As}} - 1}{10^{0,1L_{Ar}} - 1}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (7)$$

Où  $\Omega_s$  est la fréquence normalisée par rapport à la fréquence de coupure du prototype passe-bas. Par soucis de symétrie de topologie, l'ordre pair directement supérieur, soit  $n = 6$ , est privilégié.

#### 3.b. Topologie

Les dimensions d'une cavité résonant en mode  $TE_{101}$  à 7,33 GHz ont été définies au paragraphe 2.b. Le but est ici de tester les possibilités offertes par un empilement de cavités SIW. Cependant, il est nécessaire d'avoir les ports d'accès sur un même plan, ce qui implique un repliement vertical et symétrique du filtre. De plus, la forte permittivité du substrat réduit considérablement les dimensions des cavités. Afin de limiter au maximum le couplage direct entre les motifs d'excitation du filtre en les éloignant, les cavités 1, 2, 5 et 6 sont maintenues sur un même plan. La Figure 3 montre une vue en coupe simplifiée de la topologie avec la numérotation des cavités.

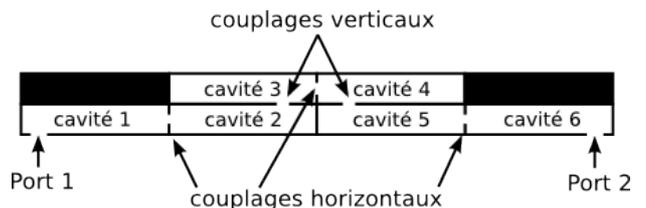


Figure 3. Vue en coupe simplifiée de la topologie

### 3.c. Couplages

La matrice de couplage présentée ci-dessous permet d'atteindre les spécifications fixées au paragraphe 2.b. avec un ordre 6. Elle est obtenue en appliquant une démarche de conception de filtre classique à partir des valeurs d'inverseurs d'impédance [6] pour un filtre passe-bande.

$$(m) = \begin{pmatrix} 0 & 1.463 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.463 & 0 & 0.039 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.039 & 0 & 0.029 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.029 & 0 & 0.028 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.028 & 0 & 0.029 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.029 & 0 & 0.039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.039 & 0 & 1.463 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.463 & 0 \end{pmatrix}$$

La topologie présentée Figure 3 impose des couplages horizontaux par iris (entre les cavités 1 et 2, ainsi qu'entre les cavités 5 et 6). Ceux-ci étant placés à des maximums de champs magnétique, les couplages réalisés sont donc de nature à dominante magnétique. Les couplages verticaux sont eux réalisés par une fente dans le plan métallique de séparation des cavités. Afin de conserver la même nature de couplage dans tout le dispositif, ces fentes sont placées le long des parois des cavités, où le champ magnétique est maximal. Ceci favorise ainsi un couplage de nature magnétique. Le filtre comporte donc deux formes de couplage. Pour chacune d'elles, des abaques (Figure 4 et Figure 5) ont été tracés permettant de déterminer directement la largeur d'ouverture d'iris (couplage horizontal) ou la longueur des fentes (couplage vertical) en fonction du coefficient de couplage désiré. La largeur des fentes est fixée à 100  $\mu\text{m}$ .

Les dimensions obtenues pour réaliser les couplages indiqués par la matrice ci-dessus sont une ouverture d'iris de 1,19 mm pour le couplage entre les cavités 1 et 2 ainsi qu'entre les cavités 5 et 6, et 1,04 mm entre les cavités 3 et 4. La longueur de fente obtenue pour les couplages verticaux est de 1,22 mm.

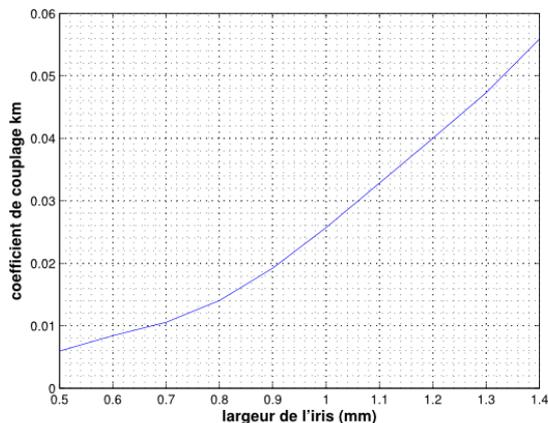


Figure 4. Abaque de couplage horizontal

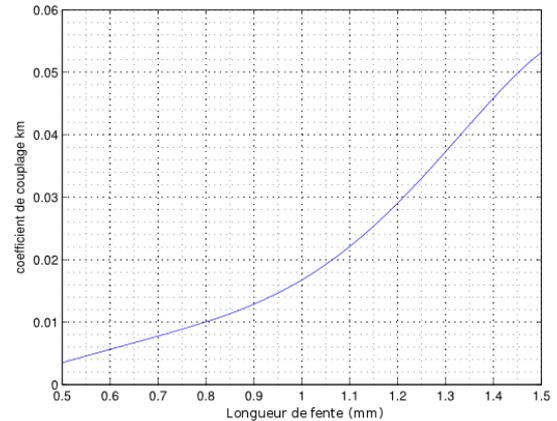


Figure 5. Abaque de couplage vertical

## 4. Design, simulations et sensibilités

### 4.a. Design

Le filtre est maintenant conçu et simulé avec le logiciel HFSS<sup>TM</sup> d'Ansoft, en respectant les dimensions définies précédemment. La Figure 6 montre une vue 3D générale du filtre. Sa longueur est de 15,7 mm et sa largeur de 4,3 mm, soit une surface de 67,51 mm<sup>2</sup> pour une épaisseur de 885  $\mu\text{m}$ .

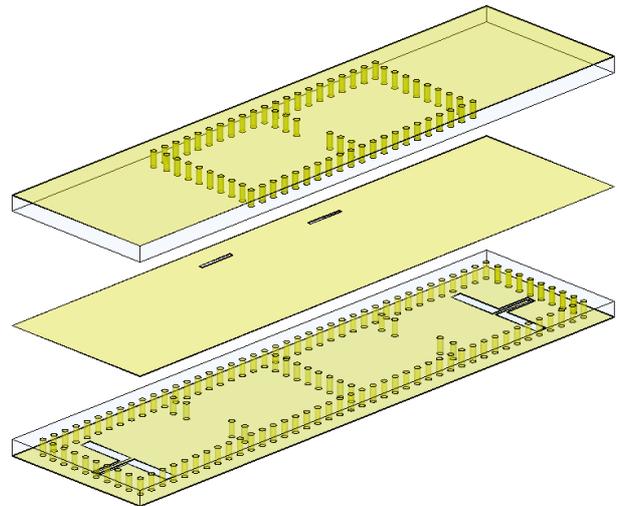


Figure 6. Vue éclatée du filtre SIW d'ordre 6 en technologie LTCC

Afin de conserver les possibilités d'intégration avec d'autres circuits planaires, tout en rendant possible la mesure sous pointes, les accès se font sur les cavités 1 et 6 par une ligne coplanaire.

#### 4.b. Simulation

La Figure 7 montre une première réponse en fréquence du filtre entre 6,2 GHz et 8,5 GHz, sans prise en compte des pertes. Une étape de réglage est donc nécessaire pour finaliser le dispositif et répondre aux spécifications.

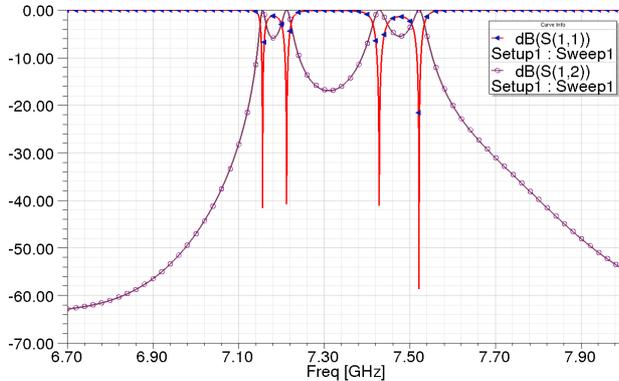


Figure 7. Réponse en fréquence sans pertes avant réglages

Ces réglages sont effectués en utilisant deux logiciels en parallèle. Le filtre idéal théorique est réalisé en éléments localisés sous le logiciel ADS d'Agilent Technologies. Des comparaisons successives entre la réponse obtenue sous HFSS™ et celle du filtre idéal sous ADS, ainsi que l'utilisation de la fonction *tuning* de ce dernier, permettent d'identifier la grandeur à modifier ainsi que son sens de variation. Par exemple, une augmentation de la fréquence de résonance des résonateurs 2 et 5 sur le filtre idéal se traduit par une réduction de la longueur des cavités correspondantes sous HFSS™. De même, une augmentation du coefficient K de l'inverseur d'impédance entre les résonateurs 3 et 4 se traduit par un élargissement de l'iris correspondant. Ces réglages conduisent à la réponse en fréquence du filtre présentée Figure 8.

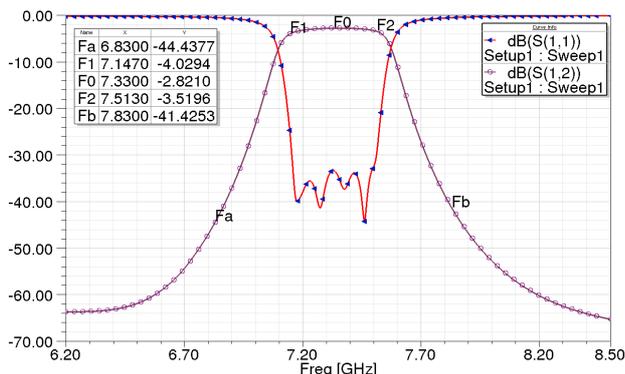


Figure 8. Réponse en fréquence après réglages

Les pertes d'insertion s'élèvent à 2,82 dB et on observe une platitude de 1,22 dB pour une bande passante relative de 5 %. De plus, la réjection hors bande est assurée.

#### 4.c. Étude de sensibilité

VTT Electronics, annonce un désalignement possible maximum entre deux couches de 15  $\mu\text{m}$ . Les simulations effectuées pour évaluer l'impact d'un tel décalage n'ont pas montré de modification significative de la réponse du

dispositif. Par ailleurs, les informations sur les valeurs de sensibilité en température du substrat, fournies par le fabricant (*Heraeus*), tendent à indiquer une variation équivalente de permittivité de l'ordre de  $\pm 0,03$  entre  $-30^\circ\text{C}$  et  $+80^\circ\text{C}$ . Cette valeur extrêmement faible implique une variation en fréquence de 1,6 MHz, soit de 0,02 %. Le point le plus critique quant à la sensibilité du dispositif réside dans l'incertitude de la valeur exacte de la permittivité. Celle-ci est annoncée à  $68,7 \pm 0,5$  à 2,5 GHz. En admettant que cette valeur soit identique à la fréquence de fonctionnement du filtre, cela impliquerait un décalage potentiel en fréquence de  $\pm 30$  MHz.

## 5. Conclusion

L'utilisation d'un substrat d'une permittivité de 68,7 nous a permis de réduire les dimensions selon les trois axes d'un facteur d'environ 2,6 par rapport à une alumine classique de permittivité 9,9. L'empilement des cavités permet une réduction de l'empreinte par 1,5 par rapport au même filtre sans empilement. Soit une réduction de l'empreinte par 8,8 par rapport à un filtre SIW sur un seul étage avec un substrat de permittivité 9,9. Les résultats de simulation montrent par ailleurs que ces réductions de taille n'impactent pas les performances du filtre, dont le facteur de qualité est proche de 200. À noter que cette valeur reste supérieure à ce qui peut être obtenu avec des technologies planaires.

Afin de confirmer les simulations, une réalisation est prévue pour juin 2011.

## 6. Bibliographie

- [1] D. Deslandes et K. Wu, « Integrated Microstrip and Rectangular Waveguide in Planar Form », IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 11, N° 2, Février 2001.
- [2] A. El Mostrah, B. Potelon, E. Rius, C. Quendo et J.F. Favennec, « C-Band Cross-Coupled SIW Filter Using a Novel Topology of Electric Coupling », Proceedings of the 40<sup>th</sup> European Microwave Conference, Septembre 2010.
- [3] L. Rigaudeau, D. Baillargeat, S. Verdeyme, M. Lahti et K. Kautio, « Mixed LTCC Ultra Compact S-Band Filter with Wide Multispurious Stopband », Proceeding of Asia-Pacific Microwave Conference 2007.
- [4] D. Deslandes et K. Wu, « Accurate Modeling, Wave Mechanisms, and Design Considerations of a Substrate Integrated Waveguide », IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, N° 6, Juin 2006.
- [5] G. Boudouris et A. Kastler, « Cavités électromagnétiques », Dunod Paris, 1971.
- [6] J. Hong et M.J. Lancaster, « Microstrip filters for RF/Microwave applications », John Wiley and Sons, 2001.