



**HAL**  
open science

## Circulateurs Compatibles CMS en Technologie LTCC en Bande Ku

Norbert Parker, Camilla Kärnfelt, Richard Lebourgeois, Laurent Roussel,  
Vincent Laur, Rose-Marie Sauvage, V. Castel

► **To cite this version:**

Norbert Parker, Camilla Kärnfelt, Richard Lebourgeois, Laurent Roussel, Vincent Laur, et al.. Circulateurs Compatibles CMS en Technologie LTCC en Bande Ku. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins, France. pp.22-25. hal-04619686

**HAL Id: hal-04619686**

**<https://hal.science/hal-04619686>**

Submitted on 21 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.

# Circulateurs Compatibles CMS en Technologie LTCC en Bande Ku

N. Parker<sup>1</sup>, C. Kärfelt<sup>2</sup>, R. Lebourgeois<sup>3</sup>, Laurent Roussel<sup>4</sup>, V. Laur<sup>1</sup>, RM. Sauvage<sup>4</sup> et V. Castel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Bretagne Occidentale, Lab-STICC, Brest, France

<sup>2</sup> IMT Atlantique, Lab-STICC, UMR CNRS 6285, F-29238 Brest, France

<sup>3</sup> Thales Research and Technology, Palaiseau, France

<sup>4</sup> Thales Land and Air Systems, Elancourt, France

<sup>5</sup> Direction Générale de l'Armement, Paris

norbert.parker@univ-brest.fr

**Résumé** – L'objectif de ces travaux est de simplifier l'intégration des circulateurs tout en réduisant leurs coûts. Pour ce faire, les circulateurs sont réalisés en technologie LTCC de façon collective et sont compatibles avec un report type CMS. Deux ferrites, un grenat et un spinelle, sont utilisés pour dimensionner et réaliser deux circulateurs à jonction-Y. Dans les deux cas, de bonnes performances ont été mesurées avec pour le circulateur sur grenat, des pertes d'insertion minimales de 0,48 dB et 2,38 GHz de bande passante à -18 dB et pour le circulateur sur spinelle, des pertes d'insertion minimales de 0,47 dB également et 5,68 GHz de bande passante à -18 dB. Ces travaux démontrent pour la première fois la possibilité de réaliser des composants non-réciproques reportables en technologie LTCC.

## 1. Introduction

Les principaux problèmes liés à l'utilisation de circulateurs à jonction-Y sont leur coût, leurs dimensions importantes et les difficultés technologiques liées à leur intégration dans un système. Pour diminuer le coût de ces dispositifs, une solution déjà explorée dans la littérature est l'utilisation de la technologie Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) [1]–[5]. L'avantage de cette technologie de fabrication est de simplifier la fabrication compliquée de ces composants (usinage de céramique, collage...) et d'obtenir directement un substrat monolithique.

Lors de précédents travaux [6], nous avons montré qu'il était possible d'obtenir de bonnes performances avec de faibles pertes. La présente étude cherche ainsi à exploiter cette technologie pour réduire les deux autres principaux défauts mentionnés précédemment, à savoir la compacité et l'intégrabilité. L'utilisation de matériaux à forte permittivité permettra de réduire les dimensions tandis que l'aspect 2,5D de la technologie permettra d'intégrer au substrat une connectique de report compatible avec la technologie Composant Monté en Surface ou CMS.

La structure de circulateur et le report étudié sont illustrés en Figure 1. La métallisation sera en topologie micro-ruban et sera réalisée en argent. Un seul aimant posé sur un spacer diélectrique sera utilisé pour polariser le ferrite.

Le composant est constitué d'un diélectrique à forte permittivité (accueillant la connectique CMS et les lignes

d'accès) et d'un disque de ferrite situé sous le résonateur circulaire central. Les compositions de ferrite utilisées, un ferrite grenat et un ferrite spinelle, sont celles développées précédemment [6]. Le ferrite grenat a une aimantation à saturation modérée mais une permittivité élevée. Le ferrite spinelle a, en revanche, une aimantation élevée et une permittivité plus modérée.

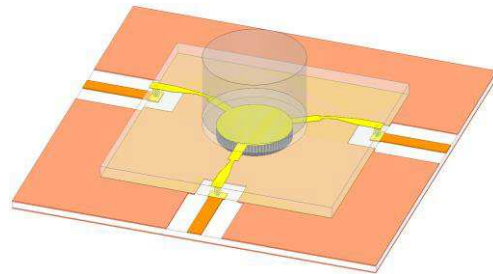


Figure 1. Structure du circulateur et du substrat de report

## 2. Design des composants

Les propriétés diélectriques et magnétiques des matériaux sélectionnés sont données dans le Tableau 1. Ces caractéristiques matériaux ont été utilisées pour dimensionner deux circulateurs en bande Ku. L'aimant permanent utilisé pour polariser le ferrite est un aimant Samarium-Cobalt Magsy référence YXG-28. Son diamètre est de 3 mm et sa hauteur est de 2 mm. Il sera posé sur un spacer en téflon de 300  $\mu\text{m}$ .

Le logiciel de simulation utilisé est le solveur électromagnétique Ansys HFSS. La carte de champ magnétique interne au ferrite, généré par l'aimant permanent, sera déterminée par le solveur magnétostatique Ansys Maxwell3D. Cela permettra la prise en compte de la non-uniformité du champ statique interne au ferrite.

Le design des transitions CMS et de la jonction-Y sont réalisées séparément et sont ensuite combinés pour la simulation du composant reporté.

Matériau	$\epsilon_r$	$\tan\delta$	$4\pi M_s$ (G)	$\Delta H$ (Oe)
Grenat	21	$3 \cdot 10^{-3}$	1900	100
Spinelle	13	$1 \cdot 10^{-3}$	3800	100
VLF220Aq4	21	$10^{-3}$	-	-
Teflon <sup>TM</sup>	2,1	$1 \cdot 10^{-3}$	-	-

Tableau 1. Propriétés matériaux

### 2.a. Dimensionnement de la transition CMS

La connexion des deux faces du composant nécessaire à la réalisation de transitions CMS est généralement réalisée à l'aide d'un via situé proche du bord du composant tel que, lors de la découpe finale de celui-ci, un demi-via métallisé soit situé sur le bord. Cette configuration est illustrée en Figure 2.

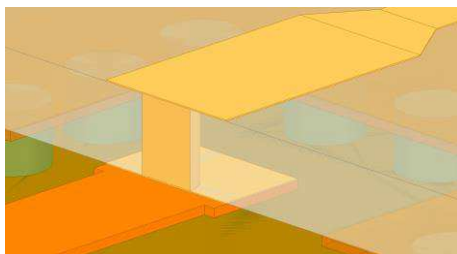


Figure 2. Transition CMS à base de demi-via

Cependant, cette topologie de transition n'est pas compatible avec la technologie de fabrication LTCC. Il est nécessaire d'adapter cette transition au process de fabrication, en particulier au niveau du type de via utilisé.

L'épaisseur du composant reporté est fixée à 352  $\mu\text{m}$ . Cette valeur correspond à un empilement de quatre couches de matériau. La connexion entre les deux faces est réalisée par un via d'un diamètre de 100  $\mu\text{m}$ . La technologie de fabrication nécessite que chaque couche soit métallisée indépendamment avant d'être assemblées. La bonne métallisation des vias de chaque couche est assurée par un motif de métallisation circulaire de 200  $\mu\text{m}$  de diamètre. Ainsi, la topologie de transition développée est constituée d'un via sur lequel se trouve des cercles métallisés à l'interface entre chacune des couches (Figure 3).

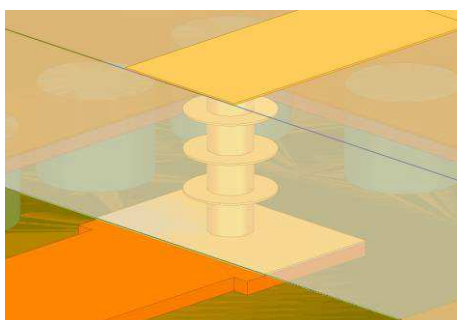


Figure 3. Transition CMS adaptée à la technologie LTCC

À l'issue du dimensionnement de la transition, une adaptation supérieure à 20 dB a été obtenue sur la bande de fréquence d'intérêt pour les circulateurs étudiés (~15-21 GHz). Le substrat de report est en Rogers 4003.

### 2.b. Dimensionnement de la jonction-Y

Le type de circulateur utilisé est un circulateur à jonction-Y avec au centre un résonateur circulaire. L'adaptation d'impédance est réalisée sur chaque accès par une ligne d'adaptation quart d'onde. Le diamètre initial du résonateur est pré-dimensionné en utilisant la théorie de Bosma [7]. La valeur de champ interne au ferrite, considéré uniforme dans un premier temps, est égale à la valeur obtenue par la simulation magnétostatique au centre du cylindre de ferrite.

### 2.c. Performances du circulateur CMS

La structure simulée est illustrée en Figure 1. Le substrat sur lequel est reporté le composant est le même que précédemment, du Rogers 4003. L'ajout des transitions aux trois accès a nécessité de minimes ajustements sur l'adaptation d'impédance du résonateur. Les designs de circulateurs utilisés ont des dimensions externes de 7x7 mm<sup>2</sup>. Le substrat de report est un carré de 11 mm de côté et de 203  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

Les plans de références de la simulation sont ramenés au niveau des transitions CMS via une procédure de dé-embedding.

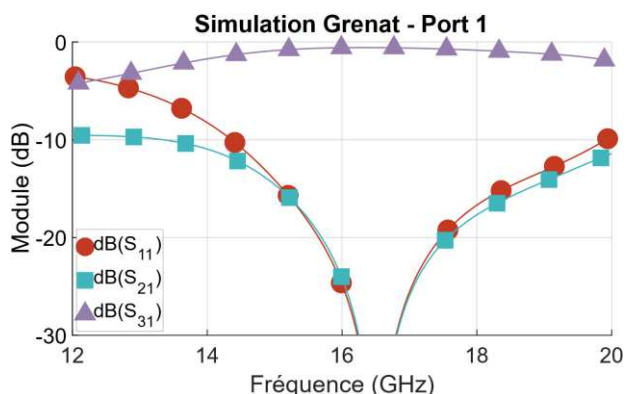


Figure 4. Simulation du circulateur sur Grenat

Les paramètres S simulés du circulateur LTCC reporté CMS sur Grenat sont données en Figure 4. Les pertes d'insertion minimales sont de 0,5 dB à 16,25 GHz. La bande passante à -18 dB est de 2,26 GHz centrée autour de 16,62 GHz (BPR > 13,5%) avec des pertes d'insertion maximales de 0,69 dB sur la bande.

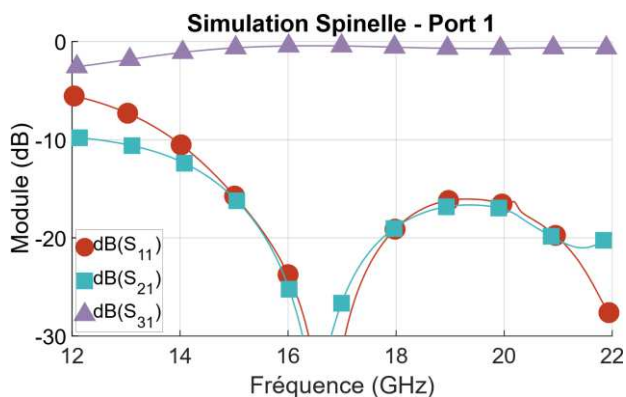


Figure 5. Simulation du circulateur sur Grenat

Les performances simulées du circulateur LTCC reporté CMS sur Spinelite sont données dans la Figure 5. Les pertes d'insertion minimales sont de 0,47 dB à 16,22 GHz. La bande passante à -18 dB est de 3,16 GHz centrée autour de 16,85 GHz (BPR > 18,7%) avec des pertes d'insertion maximales de 0,64 dB sur la bande.

## 3. Fabrication

Dans le but d'améliorer et de simplifier la fabrication des circulateurs, une méthode de construction de dispositifs, basée sur un empilage de couche de matériau et d'un frittage de l'ensemble, connue sous le nom de LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) a été

utilisée. Cette méthode permet d'intégrer plus de fonctionnalités dans le dispositif, comme par exemple des pistes à l'intérieur de la structure, ou des trous (vias) métallisés avec des plots de soudure pour en faire un composant CMS. Un autre avantage de cette technologie est qu'une multitude de dispositifs différents peuvent être réalisés simultanément.

L'objectif est de réaliser des circulateurs aux dimensions de  $7\text{ mm} \times 7\text{ mm} \times 0,352\text{ mm}$ . La surface maximale disponible pour fabriquer des prototypes LTCC, avec l'équipement utilisé, est  $34\text{ mm} \times 34\text{ mm}$ . Ainsi, cette grande surface permet la fabrication de seize circulateurs en une seule fois.

Le détail des opérations réalisées dans le cadre de la fabrication des circulateurs est le suivant :

1. Découpe des trous d'alignement et d'inserts au laser
2. Remplissage des trous vias avec de l'encre métallique
3. Empilage des couches et insertion des inserts ferrites
4. Laminage
5. Sérigraphie du plan de masse et de la jonction-Y avec de l'encre métallique
6. Découpe
7. Frittage

Les Figure 6 est Figure 7 illustrent deux des étapes de la fabrication des circulateurs listées ci-dessus.

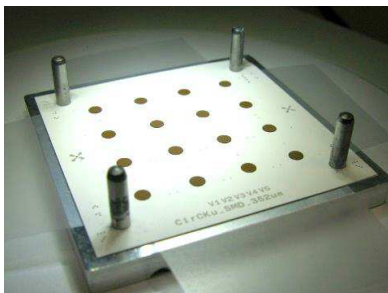


Figure 6. Empilage des différentes couches et inserts

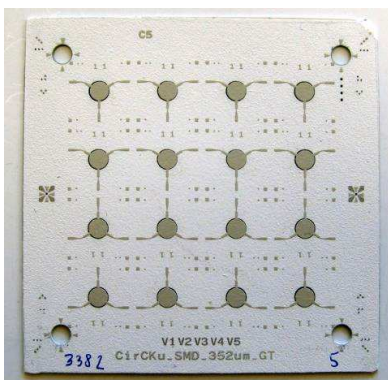


Figure 7. Sérigraphie des jonctions-Y après laminage

Pour obtenir une transition CMS avec de bonnes performances électromagnétiques, l'épaisseur du composant reporté doit rester faible. Ainsi, pour éviter tout problème de déformation lors du frittage, du fait de cette faible épaisseur, une plaque d'alumine est positionnée sur l'assemblage de couches pendant la cuisson. Deux films de Separation Powder Sheet (ou SPS) sont insérés entre les deux faces extérieures de l'assemblage et les plaques d'alumine pour éviter que la métallisation s'accroche aux plaques de cuisson.

## 4. Report

Afin de rigidifier le circuit de test (manipulation et serrage des connecteurs), l'empilage définitif est complété par d'autres couches RO4003 afin d'obtenir une épaisseur totale de l'ordre de 1 mm. Une symétrie de construction suivant une préconisation de fabrication est employée. L'objectif est d'éviter la déformation du substrat de report lors des processus d'assemblage. La finition est réalisée en ENIG ( $\text{Ni}7\mu\text{m}/\text{Au}<0,1\mu\text{m}$ ). Cette finition permet de faciliter le report des composants en optimisant l'interface intermétallique. La contrepartie est une perte en ligne non négligeable. L'ordre de grandeur des pertes en lignes à 16 GHz est de 0,55 dB/cm.

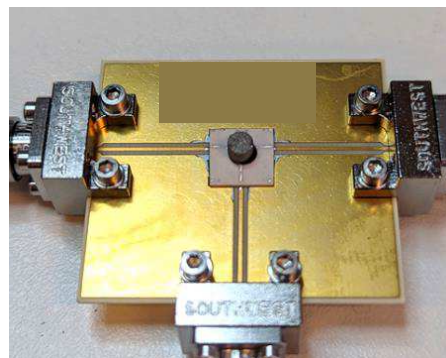


Figure 8. Circulateur reporté

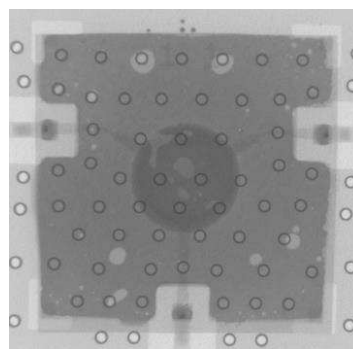


Figure 9. Vue aux rayons X du circulateur reporté

L'inspection visuelle aux rayons-X a permis de valider le processus de brasage des démonstrateurs avec un ratio de manque de soudure par rapport à la surface du plan de masse très satisfaisant.

## 5. Mesures

L'analyseur de réseau utilisé pour les mesures est un ZVA-67 de Rohde & Schwartz permettant une mesure sur trois ports. Les démonstrateurs sont connectés à l'aide de connecteurs Southwest Microwave référence 292-07A-6. La calibration est réalisée à l'aide d'un kit de calibration TRL spécifique pour ramener le plan de mesure à l'extrémité du composant CMS reporté.

Les performances du port 1 du circulateur sur Grenat reporté sont données sur la Figure 10. Le composant présente des pertes d'insertion minimales de 0,48 dB à 14,48 GHz. La bande passante à -18 dB est supérieure à celle attendue avec une largeur de 2,38 GHz centrée autour de 15,17 GHz ( $\text{BP}\% > 15,6\%$ ) avec des pertes d'insertion maximales de 0,8 dB. Un décalage fréquentiel vers les basses fréquences d'environ 1,5 GHz est observé.

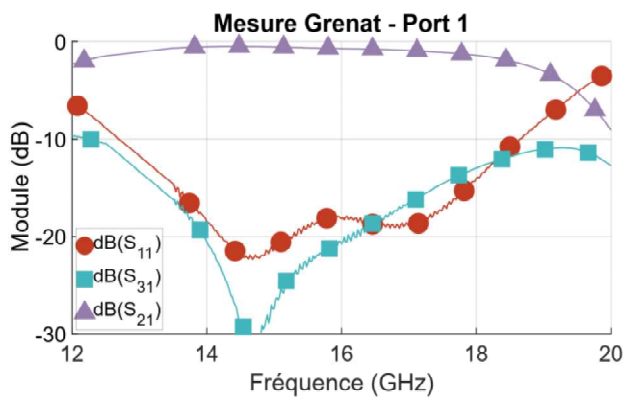


Figure 10. Mesure du circulateur sur Grenat

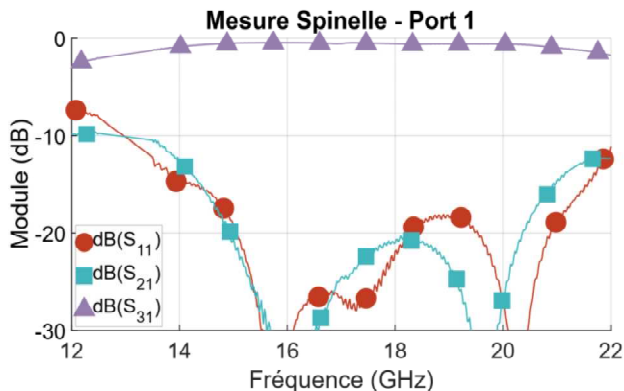


Figure 11. Mesure du circulateur sur Spinelles

Les performances du port 1 du circulateur sur Spinelles reporté sont données sur la Figure 11. Le composant présente des pertes d'insertion minimales de 0,47 dB à 15,88 GHz. La bande passante à -18 dB est largement supérieure à celle attendue avec une largeur de 5,68 GHz centrée autour de 17,7 GHz (BP% = 32%) et des pertes d'insertion maximales de 0,73 dB.

## 6. Conclusion

Des circulateurs faibles pertes réalisés entièrement en technologie LTCC et compatibles avec la technologie de report type CMS ont été fabriqués pour la première fois. Ils ont été reportés sur un PCB en utilisant le procédé de report CMS conventionnel et mesurés.

Le bon fonctionnement de la transition CMS adaptée à la fabrication LTCC a pu être vérifié au travers de performances électromagnétiques proches de celles attendues et, au niveau technique, par un brasage réussi sur la carte de report pour les deux démonstrateurs.

Pour les deux démonstrateurs, sur ferrites Grenat et ferrite Spinelles, les pertes d'insertion mesurées sont inférieures à celles obtenues précédemment sur les démonstrateurs micro-ruban aux dimensions de  $16 \times 16 \text{ mm}^2$  [6], qui constituaient jusqu'alors l'état de l'art des circulateurs LTCC en bande Ku.

Les pertes d'insertion minimales, obtenues sur les circulateurs présentées ici, sont comparées aux pertes d'insertion minimales disponibles dans la littérature en Figure 12. Les deux circulateurs présentés se situent actuellement à l'état de l'art en termes de pertes d'insertion et ce malgré l'ajout des transitions CMS.

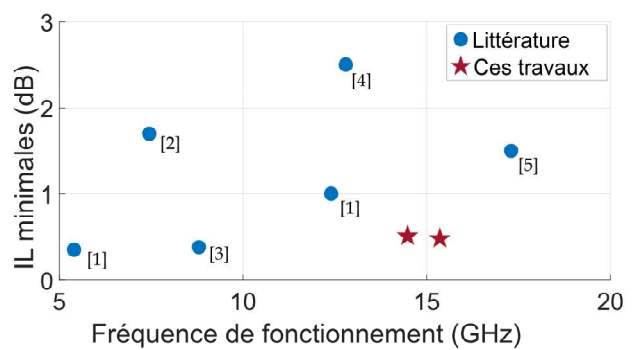


Figure 12. Comparaison avec la littérature

## 7. Remerciements

Les auteurs et autrices remercient l'Agence Innovation Défense et l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement de ces travaux.

## Références

- [1] R. van Dijk, G. van der Bent, M. Ashari, et M. McKay, « Circulator integrated in low temperature co-fired ceramics technology », in *2014 44th European Microwave Conference*, Rome: IEEE, oct. 2014, p. 1544-1547. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986744.
- [2] T. Jensen, V. Krozer, et C. Kjergaard, « Realisation of microstrip junction circulator using LTCC technology », *Electron. Lett.*, vol. 47, n° 2, p. 111, 2011, doi: 10.1049/el.2010.2419.
- [3] L. Qassym, V. Laur, R. Lebourgeois, et P. Queffelec, « Ferrimagnetic garnets for Low Temperature Co-fired Ceramics microwave circulators », in *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA: IEEE, juin 2018, p. 750-752. doi: 10.1109/MWSYM.2018.8439250.
- [4] P. R. Raj, A. Basu, et S. K. Koul, « Comparison of triangular geometries of Y-junction in co-sintered LTCC based microstrip circulator », in *2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Pavia: IEEE, sept. 2017, p. 1-3. doi: 10.1109/IMWS-AMP.2017.8247361.
- [5] S. Yang, W. Shi, H. Bai, et T. Zhang, « Circulator Integrated in LTCC with Screen Printed Co-Firing Ferrite for Space Application », in *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Chengdu: IEEE, mai 2018, p. 1-3. doi: 10.1109/ICMMT.2018.8563702.
- [6] N. Parker *et al.*, « Ku-Band Microstrip Junction Circulators Manufactured using Low Temperature Co-fired Ceramics Technology », in *2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Yokohama, Japan: IEEE, nov. 2022, p. 112-114. doi: 10.23919/APMC55665.2022.10000006.
- [7] H. Bosma, « On Stripline Y-Circulation at UHF », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 12, n° 1, p. 61-72, janv. 1964, doi: 10.1109/TMTT.1964.1125753.