



**HAL**  
open science

## **Circulateurs compacts en bande Ku en technologie LTCC**

Norbert Parker-Soues, Nicolas Ryon, Lilia Qassym, Camilla Kärnfelt, Vincent Castel, Richard Lebourgeois, Rose-Marie Sauvage, Vincent Laur

► **To cite this version:**

Norbert Parker-Soues, Nicolas Ryon, Lilia Qassym, Camilla Kärnfelt, Vincent Castel, et al.. Circulateurs compacts en bande Ku en technologie LTCC. JCMM 2020 : 16èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Nov 2020, Toulouse, France. . hal-03132024

**HAL Id: hal-03132024**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-03132024v1>**

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.

## Circulateurs compacts en bande Ku en technologie LTCC

N. Parker-Soues<sup>1</sup>, N. Ryon<sup>2</sup>, L. Qassym<sup>3</sup>, C. Kärfelt<sup>2</sup>, V. Castel<sup>2</sup>, R. Lebourgeois<sup>3</sup> RM. Sauvage<sup>4</sup> et V. Laur<sup>1</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>Direction Générale de l'Armement, Paris

norbert.parker@univ-brest.fr

**Résumé** — Cette étude vise à réduire les coûts de fabrication des circulateurs en utilisant la technologie LTCC. Un ferrite grenat et un ferrite spinelle compatibles LTCC ont été développés. Leurs performances seront évaluées au travers de la comparaison, en simulation, de deux circulateurs conçus à partir de ces matériaux. L'encombrement de la jonction est similaire pour les deux ferrites. Les performances sont clairement à l'avantage du ferrite spinelle avec une bande passante plus élevée et des pertes moindres. Cependant, le cofrittage du ferrite spinelle avec le diélectrique se révèle plus compliqué que dans le cas du ferrite grenat.

### I. INTRODUCTION

Les composants à ferrite passifs, tels que les circulateurs et isolateurs, sont généralement des composants chers et encombrants de par leur technologie et procédé de fabrication. Ces composants restent cependant omniprésents dans les systèmes de détection et de suivi de cible, qui plus est dans le cas des nouvelles architectures d'antennes à balayage électronique (Active Electronically Scanned Array : AESA) où chacun des éléments du réseau se doit d'être individuellement pilotable. Le schéma (Fig. 1) ci-dessous présente la structure générale d'un circulateur micro-ruban, objet de ce document.

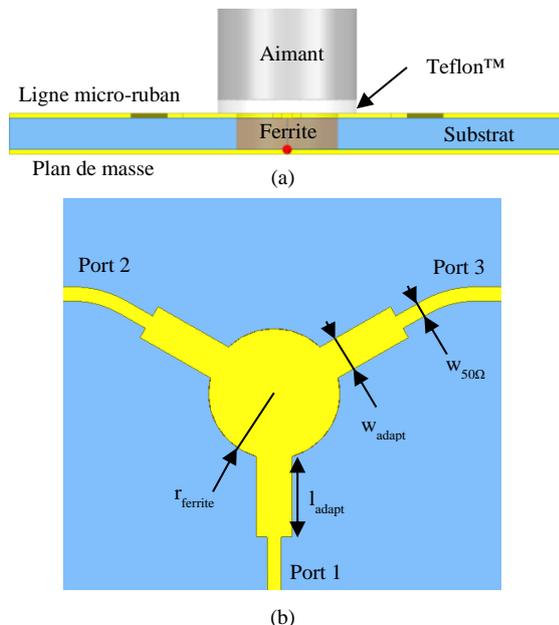


Fig. 1. Structure d'un circulateur en technologie micro-ruban  
(a) Vue en coupe selon un plan vertical  
(b) Vue de dessus avec les dimensions

L'adaptation des matériaux ferrimagnétiques, à l'origine du comportement non réciproque des circulateurs, au

procédé de fabrication Low-Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) devrait permettre à terme une réduction du coût du dispositif en permettant une fabrication simplifiée en s'affranchissant de procédés hybrides (usinage, utilisation de colle) et en permettant une production collective.

Ce travail a déjà été réalisé dans un projet précédent en bande X (8-12 GHz) [1]. L'étude présentée ici s'appuie sur cette expérience pour investiguer une montée en fréquence et réaliser des circulateurs en technologie LTCC en bande Ku (12-18 GHz). Deux types de ferrites compatibles LTCC, un ferrite grenat et un ferrite spinelle, ont été développés. Ces ferrites sont également compatibles avec le VLF220Q3, diélectrique qui sera utilisé par la suite. Le ferrite grenat présente une aimantation à saturation deux fois plus faible que le ferrite spinelle mais dispose d'une permittivité plus élevée. L'objectif de ce travail est d'identifier les forces et faiblesses de chacun des deux ferrites en évaluant et en comparant les performances des circulateurs conçus à partir de ces matériaux.

### II. SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION DES FERRITES

Les ferrites utilisés dans cette étude ont été synthétisés par voie solide. Les grandes étapes sont décrites ci-dessous :

- Pesée et broyage des matières premières
- Calcination : traitement thermique au cours duquel se forme la phase
- Second broyage : augmentation de la réactivité des poudres
- Mise en forme (pressage axial ou isostatique, coulage en bande...)

Comme exposé précédemment, deux types de ferrites ont été étudiés :

- Les ferrites grenat, dérivés du grenat d'yttrium fer (YIG pour Yttrium Iron Garnet)
- Les spinelles, dérivés du ferrite de nickel-zinc.

#### A. Les grenats

La formulation de base de notre étude est le  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Il est possible d'adapter les propriétés de ce grenat grâce à des substitutions dans les sites particuliers de sa structure cristallographique (occupés par les ions  $Fe^{3+}$  - sites tétraédriques  $\Delta$  et octaédriques  $\square$  et  $Y^{3+}$  - sites dodécaédriques). Dans le cas de la réalisation de circulateur fonctionnant en bande Ku, les substitutions vont permettre

de jouer sur la valeur de l'aimantation à saturation, sur la permittivité et sur la température de frittage.

L'ion  $Fe^{3+}$  possède 5 électrons célibataires sur sa couche 3d, son moment magnétique sera donc de  $5 \mu_B$  à  $0^\circ K$ . L'ion yttrium en site dodécaédrique ne possède pas d'électrons célibataires sur ses couches supérieures. L'aimantation du YIG, d'environ 1800 G, peut donc se résumer de la façon suivante :



Fig. 2. Schéma d'aimantation du YIG

Pour augmenter  $M_s$ , il faut donc diminuer le moment magnétique en site octaédrique. En substituant le fer par un ion non-magnétique, comme le zirconium, qui se place préférentiellement en site octaédrique, l'aimantation à saturation peut être contrôlée. En choisissant judicieusement le taux de fer substitué par du zirconium, on atteint 1900 G (valeur d'aimantation à saturation visée pour le grenat).

La température de frittage initiale du YIG se situe aux alentours de  $1450^\circ C$ . Lors de précédents travaux, il a été démontré que les substitutions de l'ion yttrium par des ions bismuth et cuivre permettent de diminuer la température de frittage à environ  $950^\circ C$ . De plus l'utilisation de l'ion bismuth, ion à forte polarisabilité, permet d'augmenter de manière significative la permittivité (de 15 pour le YIG à 21 pour notre matériau).

Pour envisager un cofrittage avec de l'argent, il est nécessaire de diminuer d'avantage la température de frittage. Grâce à l'ajout d'un fondant sur la poudre calcinée, la température de frittage a été abaissée à  $900^\circ C$ .

### B. Spinnelle

Le spinelle étudié ici est un ferrite de Nickel-Zinc ( $NiZnFeO$ ). Du cuivre est ajouté comme substituant en site octaédrique afin d'ajuster la température de frittage. Couplé à l'utilisation d'oxyde de bismuth fondant (ajouté entre la phase de calcination et de frittage), la température de frittage atteint moins de  $950^\circ C$ .

En faisant varier le ratio entre les taux de substitutions du nickel et du zinc, il est possible d'ajuster l'aimantation à saturation. Le graphe ci-dessous montre la variation de l'aimantation à saturation en fonction du taux de zinc.

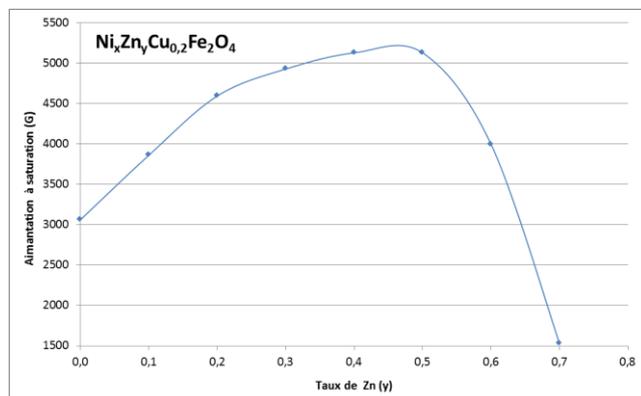


Fig. 3. Variation de l'aimantation à saturation en fonction du taux de zinc

Il existe, pour toute valeur de l'aimantation à saturation comprise en 3000 et 5000 G, deux compositions possibles. Dans le cadre de l'étude, l'aimantation recherchée est d'environ 3800 G. Deux formulations ont donc été retenues. Ces deux spinelles ont des propriétés très semblables, ils seront nommés Spinnelle3800 dans la suite de l'article. Le choix entre ces deux matériaux sera fait suite aux tests de cofrittage.

### III. MODÉLISATION DES CIRCULATEURS

Les propriétés diélectriques et magnétiques des matériaux sélectionnés sont disponibles dans le Tableau I. Ces propriétés matériaux ont été utilisées pour dimensionner deux circulateurs en bande Ku, métallisés avec de l'or, seul matériau actuellement compatible avec les deux ferrites développés. La théorie de Bosma [2] a été appliquée pour pré-dimensionner les jonctions simulées. Afin d'augmenter la bande passante, des lignes quart d'onde ont également été ajoutées au design simulé dans le solveur Ansys HFSS. Par la suite, des optimisations ont été réalisées pour ajuster plus précisément les dimensions en réalisant des simulations multiphysiques. Le solveur HFSS importe alors la carte de champ magnétique interne au ferrite calculée par le solveur magnéto-statique Ansys Maxwell3D. L'aimant utilisé pour polariser le circulateur est un aimant Magsy YXG-28 d'une hauteur de 2 mm et d'un diamètre de 3 mm.

Dans un souci de réduction des coûts de prototypage, un diamètre de jonction commun pour les deux circulateurs a été fixé à partir des premières simulations.

TABLEAU I. PROPRIETES MATERIAUX

Matériau	$\epsilon_r$	$\tan\delta$	$4\pi M_s$ (G)	$\Delta H$ (Oe)
Grenat1900	21	$3.10^{-3}$	1900 G	100
Spinnelle3800	13	$1.10^{-3}$	3800 G	100
VLF220Q3	21	$10^{-3}$	-	-
Teflon <sup>TM</sup>	2,1	$1.10^{-3}$	-	-

### IV. RESULTATS DE SIMULATIONS

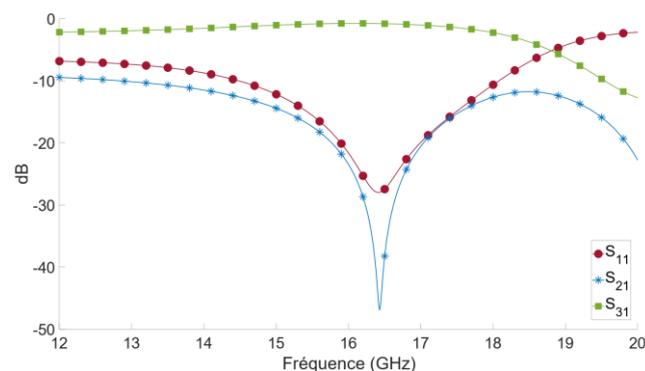


Fig. 4. Paramètres S simulés du circulateur sur Grenat1900

La Fig. 4 présente les paramètres S simulés pour un circulateur basé sur le ferrite Grenat1900 optimisé pour un fonctionnement autour de 16,5 GHz. Entre 15,4 GHz et 17,5 GHz, les pertes d'insertion sont inférieures à 1,4 dB. Dans cette bande, l'adaptation et l'isolation restent également supérieures à 15 dB pour une bande passante

relative de 13 %. Entre 15,9 GHz et 17 GHz, les pertes d'insertion sont inférieures à 1 dB avec une adaptation et une isolation toutes deux supérieures à 20 dB pour une bande passante relative de 6.6 %.

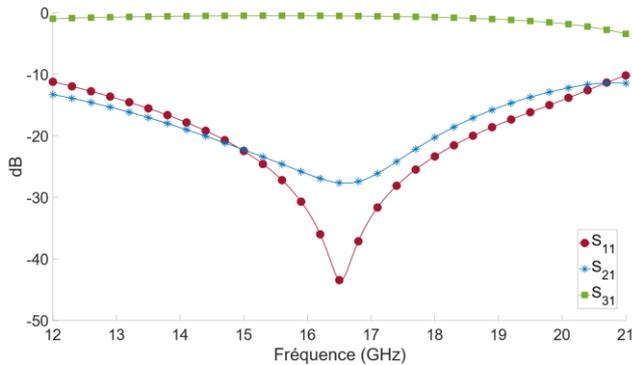


Fig. 5. Paramètres S simulés du circulateur sur Spinnelle3800

La Fig. 5 présente les paramètres S simulés pour un circulateur basé sur le ferrite Spinnelle3800 optimisé pour un fonctionnement autour de 16,5 GHz. Entre 13,3 GHz et 19,1 GHz, les pertes d'insertion sont inférieures à 1,12 dB. Dans cette bande, l'adaptation et l'isolation restent également supérieures à 15 dB pour une bande passante relative de 35,8 %. Entre 14,6 GHz et 18 GHz, les pertes d'insertion sont inférieures à 0,74 dB avec une adaptation et une isolation toutes deux supérieures à 20 dB pour une bande passante relative de 20,9 %.

## V. TESTS DE COFRITTAGE

Des tests de cofrittage ont été réalisés en vue de la conception de prototypes. L'association entre le VLF220Q3 et le Spinnelle3800 n'est pas encore exploitable mais celle entre le VLF220Q3 et le Grenat1900 a été réalisée. Pour cofritter ces deux matériaux, il a été nécessaire de laminier les deux matériaux séparément, de percer le VLF220Q3 et de poinçonner le Grenat1900, de les associer puis de laminier l'ensemble avant de cofritter. La méthode est illustrée sur la Fig. 6. Les deux matériaux ont un rétrécissement latéral différent lors du frittage, 15 % pour le VLF220Q3 et 10% pour le Grenat1900. Il a donc fallu compenser pour cette différence lors du perçage du trou et lors de la découpe du disque pour arriver à un résultat correct.

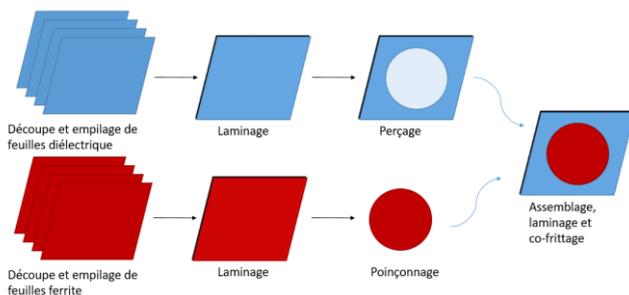


Fig. 6. Méthode pour associer les matériaux diélectrique et ferrite

Les paramètres de laminage étaient de 10 MPa pendant 20 minutes à 75 °C. La pression de 10 MPa est plus faible et le temps de laminage est plus long que ce qui est employé normalement pour le LTCC (21 MPa et 10 minutes à 70°C).

Cependant, ces paramètres ont permis d'associer les deux matériaux correctement. Le frittage consistait en une montée en température progressive jusqu'à 950°C où l'échantillon y était maintenu 2 heures. La Fig. 7 présente le résultat ainsi que sa vue en coupe. L'insert de ferrite est bien centré et aucun délaminage n'est observable, ni pour le Grenat1900, ni pour le VLF220Q3. L'interface entre les deux matériaux est bien définie et aucun gap n'est présent.

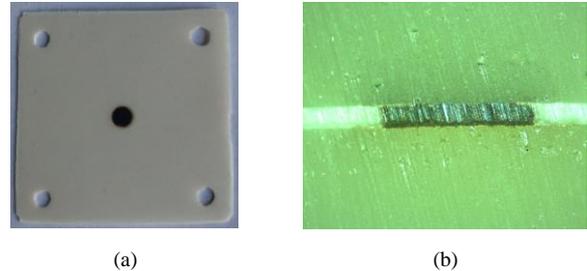


Fig. 7. Assemblage VLF 220 avec insert de Grenat1900  
(a) Vue de dessus  
(b) Vue en coupe

## VI. COMPARAISON DES SOLUTIONS

En faisant abstraction des problématiques de cofrittage, la solution basée sur le Spinnelle3800 semble plus prometteuse puisque présentant des pertes d'insertion plus faibles ainsi qu'une bande passante largement supérieure à la solution basée sur le Grenat1900. Pour ce qui est de l'encombrement, les deux solutions sont équivalentes avec des dimensions de jonctions similaires, même avant de fixer une contrainte sur le rayon de façon à faciliter la fabrication des prototypes. Néanmoins, la longueur des lignes d'adaptation est sensiblement plus longue pour le Grenat1900 (88 % supérieure à celle du circulateur utilisant le Spinnelle3800) ce qui impacte l'encombrement final du composant.

## VII. PERSPECTIVES

Les premiers démonstrateurs devraient être finalisés prochainement. Les résultats obtenus en simulation devraient être vérifiés en laboratoire.

Un nouveau type de ferrite basé sur le Grenat1900 disposant d'une aimantation à saturation plus faible mais compatible pour un cofrittage avec l'argent, donc à plus faible température, a été développé récemment. Cette nouvelle solution matériau ne permettra pas d'atteindre des bandes passantes importantes en raison d'une aimantation faible. Néanmoins, dans le cas d'applications à faible bande passante, cette option pourrait permettre de réduire encore le coût du dispositif.

## REFERENCES

- [1] L. Qassym, V. Laur, R. Lebourgeois and P. Queffelec, "Ferrimagnetic garnets for Low Temperature Co-fired Ceramics microwave circulators", in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 750-752, Juin 2018.
- [2] H. Bosma, "On stripline Y-circulation at UHF", *IEEE Trans. Microw. Th. Techn.*, pp. 61-72, 1964.