HAL
open science

Circulateur planaire ultra-compact en bande Q

N Noutehou, C Patris, D Névo, R Lebourgeois, O Vendier, P Quéffélec, J L Roux, Vincent Laur

To cite this version:

N Noutehou, C Patris, D Névo, R Lebourgeois, O Vendier, et al.. Circulateur planaire ultra-compact en bande Q. JNM, May 2019, Caen, France. hal-03131762

HAL Id: hal-03131762

https://hal.univ-brest.fr/hal-03131762v1

Submitted on 4 Feb 2021

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.

Circulateur planaire ultra-compact en bande Q

N. Noutehou(1), C. Patris(2), D. Névo(2), R. Lebourgeois(3), O. Vendier(2), P. Quéffélec(1), J.L. Roux(4), and V. Laur(1)

(1)*Lab-STICC, University of Brest, Brest, France*
Email: Vincent.laur@univ-brest.fr

(2)*Thales Alenia Space, Toulouse, France*

(3)*Thales Research and Technology, Palaiseau, France*

(4)*CNES, Toulouse, France*

Résumé *– Dans cet article, un circulateur auto-polarisé en technologie microruban fonctionnant en bande Q a été conçu, réalisé et caractérisé. Ce composant intègre un hexaferrite pré-orienté permettant de travailler à la rémanence, et ainsi, de s'affranchir de l'aimant permanent. A la différence des résultats publiés dans la littérature, l'utilisation d'hexaferrites de strontium substitués permet de travailler à une fréquence proche de 40 GHz sans impacter fortement les pertes d'insertion du dispositif. En mesure, il a été démontré que cette technologie permettait de réaliser des circulateurs ultra-compacts, d'une masse inférieure à 3 mg, avec des performances électromagnétiques remarquables (pertes d'insertion = 0,45 dB à 35,8 GHz) à l'état de l'art de cette technologie.*

1. Introduction

Les circulateurs et les isolateurs hyperfréquences sont des composants fréquemment utilisés dans les front-end radiofréquences. Ils permettent par exemple de protéger les dispositifs contre les désadaptations d'impédance. Ces composants sont également intégrés aux systèmes full-duplex lorsqu'une seule antenne est utilisée pour une émission-réception simultanée. Cependant, ils sont principalement fabriqués par des technologies hybrides (disques de ferrite insérés dans un diélectrique en structure triplaque ou microruban) ce qui impacte fortement leur coût. De plus, leur encombrement est important en raison des aimants permanents nécessaires pour polariser les disques de ferrite. Ce constat est particulièrement vrai en bandes millimétriques. En effet, à ces fréquences, il est nécessaire d'utiliser des aimants générant des champs très importants pour approcher la fréquence de résonance gyromagnétique du ferrite de la fréquence de fonctionnement du circulateur. A titre d'exemple, un circulateur planaire commercial fonctionnant en bande Ka (36-38 GHz) intègre un aimant de 3,8 mm d'épaisseur alors que l'épaisseur du substrat de ferrite est uniquement de 0,2 mm (Figure 1). L'épaisseur totale du circulateur dépend ainsi à 95% de l'aimant.

Ainsi, la production en série de circulateurs compacts à faible coût reste une thématique d'actualité pour laquelle de nouvelles idées et technologies sont nécessaires pour améliorer l'intégration de ces dispositifs. S'affranchir des aimants apparaît comme un moyen de réduire la taille des circulateurs. Ces composants, appelés circulateurs auto-polarisés, nécessitent l'utilisation d'hexaferrites pré-orientées telles que les hexaferrites de baryum ou de strontium pré-orientés. Ces matériaux permettent de conserver une forte aimantation sans appliquer de champ magnétique.

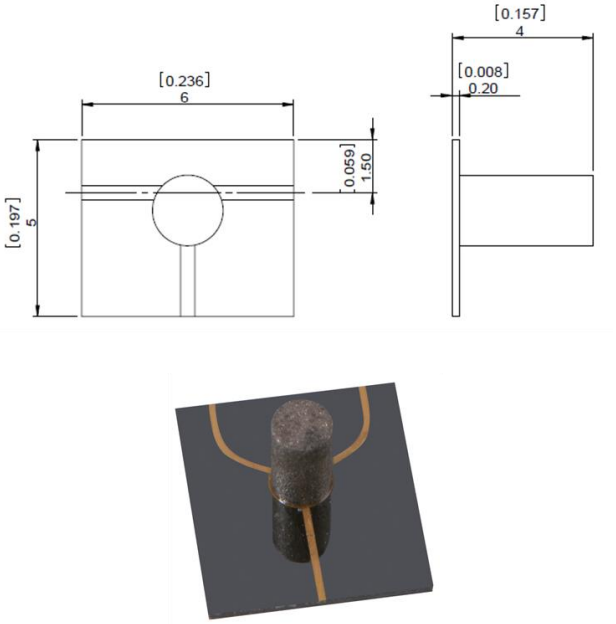

Figure 1 : Circulateur à base de ferrite doux fonctionnant dans la bande 36-38 GHz. [X] : dimensions en inch et X : dimensions en mm.

Durant les dernières décennies, plusieurs études ont été menées sur ces dispositifs. Ces études basées principalement sur l'utilisation d'hexaferrites de strontium, ont conduit à la réalisation de circulateurs à des fréquences allant de la bande Ku à la bande Ka [1]-[7]. Ces matériaux durs présentent un champ d'anisotropie d'environ 18 kOe qui conduit à une résonance gyromagnétique comprise entre 40 et 50 GHz en fonction de la forme de l'échantillon. Toutefois, dans les circulateurs auto-polarisés réels, le facteur de forme des échantillons de ferrite insérés dans le dispositif définit la fréquence de résonance gyromagnétique au

voisinage de 40 GHz et limite les performances des circulateurs auto-polarisés dans cette gamme de fréquences. Ceci limite l'application de cette technologie aux futurs systèmes en bandes Q et V. Cependant, il est possible par substitution cationique de modifier les propriétés de ces ferrites, et notamment leur champ d'anisotropie.

Dans cet article, nous présenterons dans un premier temps les propriétés des matériaux qui seront utilisés pour la conception de circulateurs auto-polarisés. Puis, la conception et les mesures du circulateur auto-polarisé ultra-compact seront détaillées.

2. Propriétés des matériaux

Dans la littérature, les circulateurs fonctionnant autour de 40 GHz présentent des performances impactées, notamment les pertes d'insertion, par la proximité de la résonance gyromagnétique naturelle des hexaferrites de strontium. Comme évoqué précédemment, une des solutions pour réaliser des circulateurs auto-polarisés à cette fréquence consiste à utiliser un hexaferrite de strontium de type M (SrM) substitué avec un champ d'anisotropie plus élevé de façon à repousser la résonance à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence de travail du composant. Dans un article précédent, nous avons étudié les propriétés de trois matériaux différents pour ces applications : un SrM pur et deux SrM substitués [8]-[10].

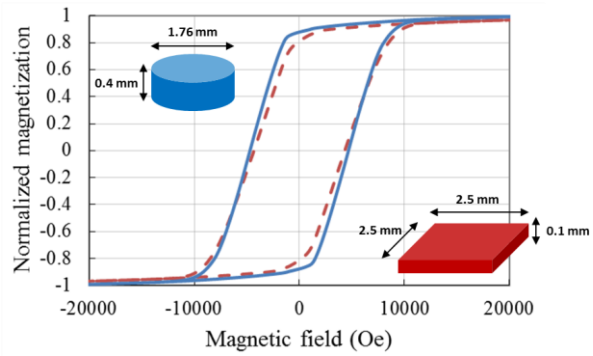

Figure 2 : Comparaison des cycles d'hystérésis d'un disque et d'une plaquette de ferrite présentant des facteurs respectifs de 0,23 et 0,04.

Ces études préliminaires nous ont permis de sélectionner une composition pour les applications en bande Q et de démontrer qu'un circulateur auto-polarisé en technologie guide d'onde rectangulaire peut présenter en l'absence d'aimants des pertes d'insertion faibles (0,4 dB à 38,9 GHz). Ce ferrite présente un champ d'anisotropie H_k important, une aimantation à saturation M_s élevée et un rapport d'aimantation rémanente sur aimantation à saturation M_r/M_s proche de l'unité. Il convient de noter que cette valeur de M_r/M_s = 0,88 a été mesurée sur un petit cylindre présentant un facteur de forme (épaisseur divisée par diamètre) de 0,23. Par la suite, nous avons cherché à démontrer que ces matériaux pouvaient être utilisés pour la réalisation de circulateurs auto-polarisés planaires.

Dans le cas d'une plaque de ferrite présentant un facteur de forme de 0,04, utilisée comme substrat du circulateur, cette valeur diminue légèrement (M_r/M_s = 0,83) mais reste compatible avec la réalisation d'un circulateur auto-polarisé aux alentours de 40 GHz (Figure 2). Les propriétés de ce matériau utilisées dans les simulations sont détaillées dans le tableau 1. Ces propriétés ont permis d'obtenir un bon accord simulation/mesure dans le cas d'un circulateur en guide d'onde rectangulaire [9].

M_S (G)	H_k (kOe)	M_r/M_S	ΔH (Oe)	ε_r
4140	19,75	0,83	400	21

Tableau 1. Propriétés de l'hexaferrite sélectionné.

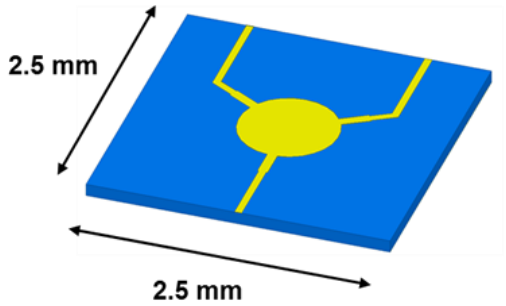

Figure 3 : Modèle de simulation du circulateur auto-polarisé en technologie microruban.

3. Méthodologies de conception

Le logiciel Ansys HFSS a été utilisé pour concevoir un circulateur microruban. Le dispositif est constitué d'une jonction-Y sur un substrat de ferrite de 0,1 mm x 2,5 mm x 2,5 mm. Dans le cas d'un hexaferrite pré-orienté (axe z), il a été montré dans [8]-[9] que le modèle de Polder peut être utilisé pour prédire les propriétés hyperfréquences de tels matériaux en modifiant les paramètres d'entrée comme suit :

$$H_{int} = H_k - N_z \times M_r \quad (1)$$

$$M_z = M_r \quad (2)$$

où H_{int} est le champ interne de la ferrite, H_k le champ d'anisotropie, N_z le coefficient démagnétisant suivant z (dépendant du facteur de forme) et M_r l'aimantation rémanente.

Dans un premier temps, le modèle de Bosma a été utilisé pour calculer le diamètre du résonateur et la largeur des lignes d'alimentation pour une fréquence de travail de 38 GHz. Ensuite, des lignes quart d'onde ont été ajoutées à la jonction-Y et des optimisations ont été effectuées afin d'améliorer les performances globales du dispositif (Figure 3). Les paramètres S simulés sont illustrés sur la Figure 5. Le circulateur présente des pertes d'insertion minimales de 1,13 dB à 37,8 GHz. L'isolation et l'adaptation restent supérieures à 15 dB entre 36,7 GHz et 39,6 GHz, soit une bande passante relative de 7,7%.

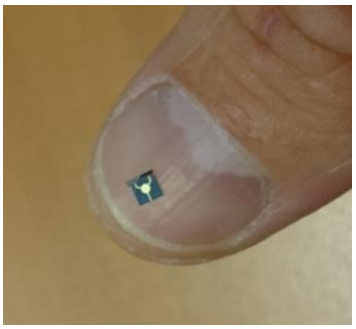

Figure 4 : Photographie du circulateur planaire auto-polarisé en bande Q.

4. Réalisation et mesure

Le circulateur présenté à la Figure 3 a été réalisé. Des plaques de ferrite ont été fabriquées et polies sur les deux faces. Ensuite, un procédé de métallisation standard a été utilisé pour réaliser les motifs métalliques (Figure 4). Le composant a été aimanté à l'aide d'un électro-aimant avant la mesure. La mesure hyperfréquence a été réalisée à l'aide d'une station sous pointes.

Les mesures, présentées sur la Figure 4, montrent un léger décalage en fréquence par rapport aux simulations. Néanmoins, des pertes d'insertion très faibles (0,45 dB à 35,8 GHz) ont été mesurées. A cette fréquence, l'isolation est de 17 dB et l'adaptation est de 27 dB. La bande passante relative mesurée est de 6,3%.

L'origine du décalage en fréquence est encore à l'étude. Il pourrait provenir d'une mauvaise évaluation du couple (H_k, ε_r). En effet, les rétro-simulations montrent qu'un fonctionnement centré à 35,8 GHz peut être obtenu pour un champ d'anisotropie de 18900 Oe et une permittivité de 23.

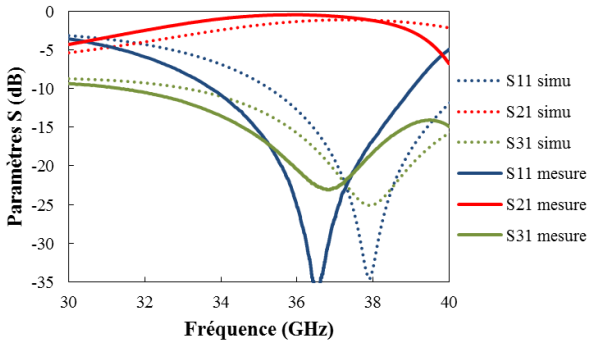

Figure 5 : Comparaison simulation et mesure du circulateur auto-polarisé en technologie microruban intégrant un hexaferrite de strontium substitué.

Ces matériaux pré-orientés possèdent une permittivité anisotrope. La valeur plus élevée de la permittivité pourrait provenir d'une interaction plus forte avec la permittivité dans le plan du substrat par rapport au circulateur en guide d'onde rectangulaire. La valeur de champ d'anisotropie plus faible peut s'expliquer par un désalignement des moments magnétiques plus importants dans le substrat mince (comparé à un disque possédant un facteur de forme plus élevé) en raison de champs démagnétisants plus élevés.

L'évolution des performances du circulateur en fonction de la température a également été évaluée (Figure 6). Le composant présente une stabilité thermique relativement satisfaisante. En effet, à la fréquence de 35,8 GHz, une augmentation des pertes d'insertion de 0,15 dB est observée à +60°C par rapport à la mesure à température ambiante. Dans la gamme de température étudiée (-15°C - +60°C), l'isolation et l'adaptation restent supérieures à 15 dB à la fréquence centrale de fonctionnement malgré une dégradation plus marquée de l'isolation. Il est important de noter que, contrairement à un isolateur classique, la dérive des propriétés magnétiques (aimantation, champ d'anisotropie) ne peut être compensée par un aimant.

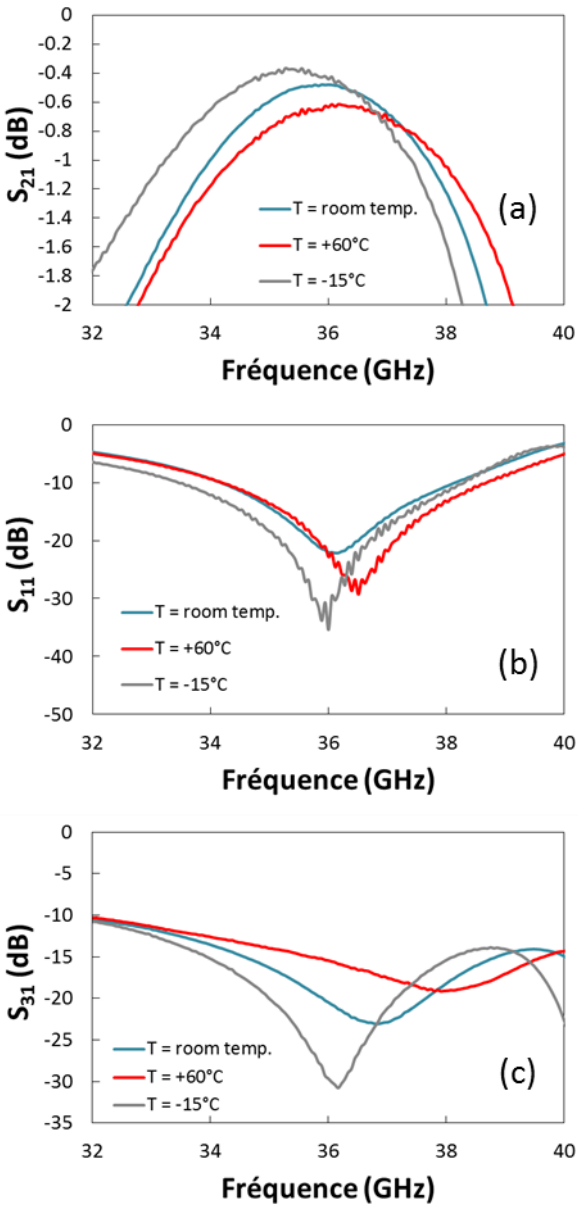

Figure 6 : Evolution des performances du circulateur en fonction de la température : (a) pertes d'insertion, (b) adaptation et (c) isolation.

5. Conclusion

Dans cet étude, le potentiel des hexaferrites de strontium substitués a été démontré pour la réalisation d'un circulateur auto-polarisé planaire aux alentours de 40 GHz. Des pertes d'insertion de 0,45 dB, associées à

une isolation et à une adaptation supérieures à 15 dB, peuvent être obtenues pour un circulateur microruban très compact (2,5 mm x 2,5 mm x 0,1 mm) sans utiliser d'aimants. Cette nouvelle technologie ouvre la voie au développement d'une nouvelle classe de circulateurs et d'isolateurs pouvant être facilement intégrés dans des systèmes en bande millimétrique tels que les satellites de télécommunication en bande Q.

Remerciements

Ce travail a été financé par la DGCIS dans le cadre du projet européen Euripides MM_WIN (Advanced Millimeter Wave Interconnects). Il a bénéficié également du support du CNES au travers de R&T sur la période 2015-2017. Ce travail se poursuit dans le cadre d'un autre contrat pour la période 2019-2020.

Références

[1] M.A. Tsankov and L.G. Milenova, *"Design of self-biased hexaferrite waveguide circulators"*, Journal of Applied Physics, vol. 73, no. 10, pp. 7018-7020, May 1993.

[2] X. Zuo, H. How, S. Somu and C. Vittoria, *"Self-biased circulator/isolator at millimeter wavelengths using magnetically oriented polycristalline strontium M-type hexaferrite"*, IEEE Trans. Magnetics, vol. 39, no. 5, pp. 3160-3162, September 2003.

[3] S.A. Oliver, P. Shi, W. Hu, H. How, S.W. McKnight, N.E. McGruer, P.M. Zavracky and C. Vittoria, *"Integrated self-biased hexaferrite microstrip circulators for millimeter-wavelength applications"*, IEEE Trans. Microwave Theory & Techn., vol. 49, no. 2, pp. 385-387, February 2001.

[4] N. Zeina, H. How, C. Vittoria and R. West, *"Self-biasing circul ators operating at Ka-band utilizing M-type hexagonal ferrites"*, IEEE Trans. Magnetics, vol. 28, no. 5, pp. 3219-3221, September 1992.

[5] B.K. O'Neil and J.L. Young, *"Experimental investigation of a self-biased microstrip circulator"*, IEEE Trans. Microwave Theory & Techn., vol. 57, no. 7, pp. 1669-1674, July 2009.

[6] J.A. Weiss, N.G. Watson and G.F. Dionne, *"New Uniaxial-Ferrite Millimeter-Wave Junction Circulators"*, IEEE Int. Micr. Symp., pp. 145-148, 1989.

[7] J. Wang, A. Yang, Y. Chen, Z. Chen, A. Geiler, S.M. Gillette, V.G. Harris and C. Vittoria, *"Self-biased Y-junction circulator at Ku band"*, IEEE Microwave Wireless Components Lett., vol. 21, no. 6, pp. 292-294, June 2011.

[8] V. Laur, G. Vérissimo, P. Quéffélec, L.A. Farhat, H. Alaaeddine, J.C. Reihs, E. Laroche, G. Martin, R. Lebourgeois and J.P. Ganne, *"Modeling and characterization of self-biased circulators in the mm-wave range"*, IEEE Int. Micr. Symp., 2015.

[9] V. Laur, G. Vérissimo, P. Queffelec, L.A. Farhat, H. Alaaeddine, E. Laroche, G. Martin, R. Lebourgeois, J.P. Ganne, *"Self-biased Y-junction Circulators using Lanthanum- and Cobalt-substituted Strontium hexaferrites"*, IEEE Trans. Microwave Theory & Techn., vol. 63, no. 12, pp. 4376-4381, December 2015.

[10] V. Laur, R. Lebourgeois, E. Laroche, J.L. Mattei, P. Queffelec, J.P. Ganne, G. Martin, *"Study of a low-loss self-biased circulator at 40 GHz: influence of the temperature"*, IEEE Int. Micr. Symp., 2016.