

Procédé hybride d'impression 3D d'un isolateur en bande C

V. Laur¹, J.P. Gouavogui¹, B. Balde¹

¹Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, F-29200 Brest, France
vincent.laur@univ-brest.fr

Résumé – Cet article présente la conception et la réalisation d'un isolateur planaire en bande C (6 GHz) dans une technologie d'impression multi-matériaux. Le composant est réalisé en une seule étape par la co-impression d'un diélectrique (substrat du circulateur), d'un absorbant (charge) et par l'insertion d'un disque de ferrite durant l'impression. Dans un premier temps, la charge et le circulateur ont été dimensionnés séparément puis assemblés pour concevoir l'isolateur. Des pertes de 1,32 dB sur une bande passante de 12% ont été mesurées sur ce composant. Ce procédé hybride multi-matériaux ouvre la voie à la conception et à la fabrication de systèmes à bas coût et faible masse plus complexes intégrant plusieurs fonctions d'un front-end.

1. Introduction

Les circulateurs et isolateurs sont des composants cruciaux dans un grand nombre de systèmes. Dans les systèmes dits Full-Duplex, le circulateur assure la fonction de duplexage (séparation des signaux émis et transmis). Bon nombre d'isolateurs sont également conçus en connectant un des ports du circulateur à une charge. Le composant est alors utilisé pour protéger le système contre des signaux parasites liés à des désadaptations au sein du système ou à des agressions électromagnétiques (EM).

Durant les dernières décennies, en raison de la miniaturisation croissante des systèmes de télécommunications, les concepteurs ont progressivement délaissé les circulateurs dans les architectures au profit de filtres duplexeurs ou de commutateurs. Cependant, ces solutions alternatives ont un impact sur l'encombrement spectral ou la complexité des systèmes. Ainsi, de nombreux travaux de recherche sont aujourd'hui conduits pour diminuer la taille, le coût et la masse de ces composants en travaillant sur la topologie des composants (PCB multicouches [1], SIW [2]), la nature des matériaux à l'origine de la non-réciprocité (nanofils [3], hexaferrites pré-orientés [4]) ou les procédés de fabrication (LTCC [5]).

Dans cet article, nous nous intéressons à la faisabilité de fabrication d'un isolateur par impression 3D filaire, Fused Deposition Modeling (FDM). Ce procédé flexible permet de produire des composants à bas coût et à faible masse par la mise en forme de polymères et de composites. A ce jour, l'impression 3D ne permet pas la mise en forme de ferrite présentant des propriétés compatibles avec la réalisation d'un circulateur. Ainsi,

notre approche a consisté à optimiser une topologie permettant l'intégration d'un disque de ferrite durant l'impression FDM. Dans cet article, la méthodologie de conception amenant à une topologie d'isolateur compatible avec les contraintes de fabrication sera d'abord présentée. Dans une deuxième partie, la réalisation et les mesures du composant seront détaillées.

2. Contraintes de fabrication et conception

Le procédé de réalisation utilisé est la FDM qui consiste à fabriquer le composant par dépôt successif d'un polymère fondu avec des épaisseurs typiques de couche allant de 50 à 300 μm . Dans cette étude, la hauteur du substrat a été fixée à 1,6 mm avec des épaisseurs de couche de 200 μm . Le composant sera donc réalisé par l'impression de 8 couches successives.

La fabrication de la charge nécessite d'utiliser un matériau à pertes diélectriques ou magnétiques. Dans notre cas, un PLA chargé par des particules de carbone de la société Proto-Pasta, noté PLA-C, a été sélectionné. Dans la bande de fréquence d'intérêt (2-10 GHz), sa permittivité varie de 41,7 à 18,7 et ses pertes diélectriques décroissent de 2,11 à 1,27. Un PLA a été choisi comme substrat du circulateur ($\epsilon_r = 2,48$ et $\tan\delta = 4,6 \cdot 10^{-3}$).

Enfin, la fabrication du circulateur nécessite d'utiliser une céramique magnétique (ferrite). Si des études ont montré la faisabilité d'utiliser des technologies d'impression 3D pour déposer des composites chargés par des particules de ferrite [6]-[7], des céramiques de qualité suffisante (haute densité, absence de défauts) pour réaliser un composant hyperfréquence non réciproque ne peuvent pas encore être obtenues à partir de ces techniques de mise en forme, même après avoir subi un traitement thermique. Ainsi, notre approche a été d'intégrer un disque de ferrite dans le substrat diélectrique durant le procédé d'impression. Etant donné la fréquence centrale visée (6 GHz), l'aimantation à saturation du ferrite M_s doit être inférieure à f/γ pour minimiser les pertes dans le cas d'un fonctionnement à champ faible ($f = 6000$ MHz la fréquence centrale et $\gamma = 2,8$ MHz/Oe le rapport gyromagnétique). Nous avons ainsi sélectionné un grenat Y101 de la société Exxelia Temex ($M_s = 1820$ G, $\Delta H_{\text{eff}} = 3$ Oe, $\epsilon_r = 15$, $\tan\delta = 2 \cdot 10^{-4}$). De façon à anticiper une intégration du disque de ferrite durant l'impression, la hauteur du ferrite est de 0,8 mm de façon à ce que deux couches de PLA soient imprimées en-dessous et au-dessus du disque de ferrite.

La charge est réalisée en intégrant l'absorbant sous la forme d'un biseau dans la hauteur du substrat (Figure 1). Des conceptions et mesures préliminaires ont permis de valider la charge seule en démontrant un niveau suffisant d'absorption de 21,1 dB à 6 GHz.

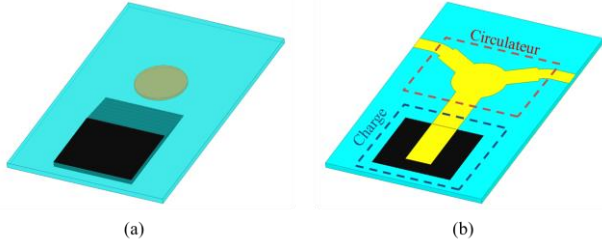


Figure 1. Illustrations (a) du substrat bi-matière avec ferrite intégré et (b) de la topologie de l'isolateur.

Le circulateur a d'abord été dimensionné seul par une approche effective en considérant durant la conception un résonateur composite constitué d'un disque de ferrite de rayon r_f et de hauteur h_f encapsulé dans un substrat de PLA de hauteur totale h_s (Figure 2) [8]. Il a été optimisé pour un fonctionnement en champ faible avec un champ interne homogène de 500 Oe.

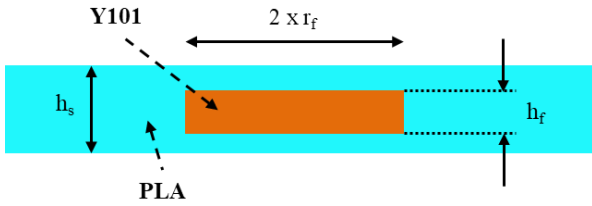


Figure 2. Illustration du disque de ferrite encapsulé dans un substrat diélectrique de PLA.

Pour concevoir l'isolateur, le circulateur et la charge ont été assemblés pour aboutir à la topologie présentée à la Figure 1.b dont les dimensions totales sont 8 cm x 5 cm x 1,6 mm. L'optimisation globale du composant soumis à un champ magnétique interne uniforme $H_{int} = 500$ Oe conduit à un rayon de ferrite optimal $r_f = 7,73$ mm pour une hauteur $h_f = 0,8$ mm imposée par les contraintes technologiques.

En pratique, le disque de ferrite est aimanté par un aimant permanent qui doit être sélectionné en tenant compte des effets démagnétisants liés au facteur de forme du disque de ferrite (h_f/r_f). Dans le cas d'un disque, la valeur du coefficient démagnétisant peut être calculée par la relation suivante :

$$N_z = 1 - \left(\frac{h_f}{2r_f} \right) \left[1 + \left(\frac{h_f}{2r_f} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (1)$$

Pour les dimensions de disque considérées, cette valeur est proche de l'unité ($N_z = 0,944$). Cette valeur peut alors être utilisée pour déterminer le champ extérieur H_0 nécessaire pour obtenir un champ interne $H_{int} = 500$ Oe par la relation (champ d'anisotropie négligé) :

$$H_{int} = H_0 - N_z \times M_s \quad (2)$$

Ainsi, le champ externe minimale nécessaire pour obtenir le champ interne requis au fonctionnement du circulateur est $H_{0min} = 2218$ Oe. L'amplitude du champ magnétique généré par un aimant permanent est à la fois dépendant des propriétés magnétiques statiques de l'aimant et de ses dimensions. L'équation (3) donne une approximation de l'évolution du champ magnétique généré par un aimant dans l'air où B_r est l'induction rémanente de l'aimant, h_m sa hauteur, r_m son rayon et z la distance entre la surface de l'aimant et la position où le champ est calculé.

$$H = \frac{B_r}{2} \left(\frac{h_m+z}{\sqrt{r_m^2+(h_m+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r_m^2+z^2}} \right) \quad (2)$$

Ces relations nous ont permis de sélectionner un aimant Néodyme-Fer-Bore de hauteur $h_m = 5$ mm et de rayon $r_m = 10$ mm.

Enfin, des simulations magnéto-statiques ont été menées pour déterminer la distance optimale entre le composant et l'aimant permettant d'assurer la meilleure homogénéité du champ interne au sein du disque de ferrite. En pratique, cette distance optimale a été ajustée à l'aide d'un disque en téflon.

3. Réalisation et caractérisation

La fabrication du composant a été réalisée par impression 3D FDM multi-matériaux. Le procédé est décrit sur la Figure 3.

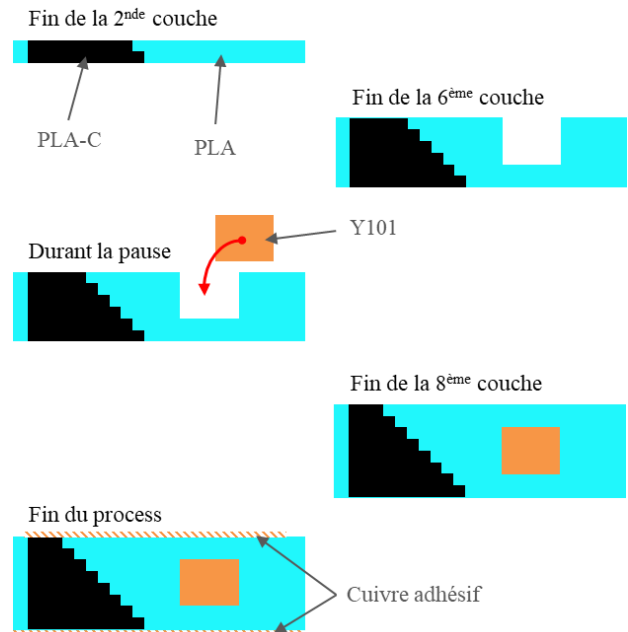


Figure 3. Illustration du procédé de fabrication.

Le fichier .gcode de l'impression du composant a été modifié manuellement pour inclure une pause durant l'impression. Durant les 6 premières couches d'impression, le substrat diélectrique (PLA) et la charge (PLA-C) ont été co-imprimés. Pendant la pause, un

disque de Y101 a été inséré dans la cavité. Enfin, deux couches de PLA ont été imprimées sur le disque de ferrite de façon à obtenir un substrat composite intégrant les trois matériaux. Le composant a été métallisé à l'aide d'un cuivre adhésif puis connecté.

Un kit Thru-Reflect-Line (TRL) dédié a été réalisé pour étalonner la mesure réalisée sur un analyseur de réseaux Rohde & Schwarz ZNB20. Le ferrite a été aimanté à l'aide d'un aimant NdFeB de rayon 10 mm et de hauteur 5 mm durant les mesures. La Figure 4 présente une comparaison des simulations et des mesures de l'isolateur dans la bande 4-8 GHz. En simulation, une bande passante relative (BPR) à -15 dB de 30,8% est obtenue avec des pertes minimales de 0,75 dB. En mesure, cette BPR est réduite à 11,9% en raison d'une adaptation plus faible que celle prédite par la simulation. Les pertes d'insertion sont minimales à 6,04 GHz ($IL_{\min} = 0,76$ dB) et restent inférieures à 1,32 dB sur la bande passante. Compte-tenu du procédé artisanal employé pour la métallisation du composant, ce démonstrateur permet de valider la faisabilité de fabrication d'un composant non réciproque par ce procédé hybride d'impression multi-matériaux.

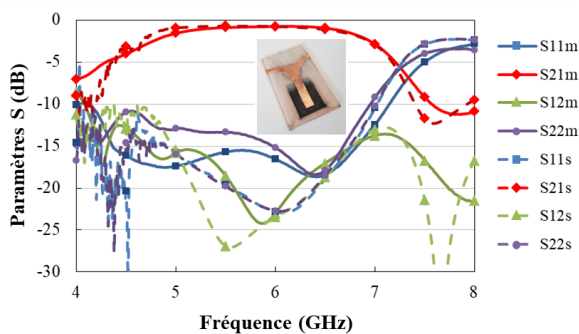


Figure 4. Comparaison entre simulation ($S_{ij,s}$) et mesure ($S_{ij,m}$) de l'isolateur.

4. Conclusion

Un isolateur en bande C a été conçu et fabriqué à partir d'un procédé hybride d'impression multi-matériaux. Le composant présente des pertes minimales de 0,76 dB à 6,04 GHz et une bande passante de 11,9%.

Si les performances restent modérées par rapport à des isolateurs traditionnels, ce concept permet d'obtenir des composants légers à faible coût mais ouvre surtout la voie à la co-intégration de plusieurs fonctions (filtre-circulateur-antenne) dans un même procédé de fabrication. Les avantages ne sont pas alors uniquement de baisser le coût et le temps de fabrication mais aussi de s'affranchir des transitions et interconnexions entre composants.

Références

[1] L. Martinez, V. Laur, A.L. Borja, P. Queffelec, and A. Belenguer, "Low loss ferrite Y-junction circulator based on empty substrate integrated coaxial line at Ku-band," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 104789-104796, Jul. 2019.

[2] W. D'Orazio, K. Wu, and J. Helszajn, "A substrate integrated waveguide degree-2 circulator", *IEEE Micr. Wireless Comp. Lett.*, vol. 14, no. 5, May 2004.

[3] M. Darques, J. Medina, L. Piraux, L. Cagnon, I. Huynen, "Microwave circulator based on ferromagnetic nanowires in an alumina template," *Nanotechnology*, vol. 21, no. 14, pp. 145208.1-4, Mar. 2010.

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

[5] L. Qassym, V. Laur, P. Queffelec, and R. Lebourgeois, "Ferrimagnetic garnets for Low Temperature Co-fired Ceramics microwave circulators," in *IEEE Int. Micr. Symp.*, Philadelphia, USA, 2018.

[6] M. Ho, S.P.M. Nagaraja, R.U. Tok, A. Rangchian, P. Kavehpour, Y.E. Wang, R. Candler, "Additive manufacturing with strontium hexaferrite-photorealist composite," *IEEE Trans. Magn.*, vol. Jan. 2020, 10.1109/TMAG.2019.2963184.

[7] Y. Wang, F. Castles, P.S. Grant, "3D printing of NiZn ferrite/ABS magnetic composites for electromagnetic devices," in *Mat. Res. Symp. Proc.*, vol. 1788, pp. 29-35, Jul. 2015.

[8] V. Laur, J.P. Gouavogui, B. Balde, "C-band hybrid 3D-printed microwave isolator", *IEEE Trans. Micr. Th. Techn.*, vol. 69, no. 3, pp. 1579-1585, March 2021.