

Nouvelle topologie d'isolateur à ferrite imprimé utilisant le principe des « edge-guided mode »

S. Khim^{1,2}, T. Monediere¹, H. Parvery², B. Frigui², D. Passerieux¹, J. L. Valdes¹, L. Huitema^{1,3}

¹ Université de Limoges, XLIM, France

² CISTEME, Limoges, France

³ Institut universitaire de France (IUF), France
sokha.khim@unilim.fr

Résumé – Ce travail présente un isolateur à ferrite planaire, compact, assurant une transmission non réciproque grâce à l'utilisation d'un mode guidé asymétrique (caractérisé par une évanescence transverse des champs) et d'une série de stubs disposés sur un côté d'une ligne micro-ruban. Cette configuration supprime le recours aux absorbants ou aux court-circuits souvent utilisés dans ces topologies facilitant ainsi la réalisation et l'intégration tout en réduisant les coûts. Un prototype fonctionnant à 2,4 GHz est conçu, réalisé et mesuré. Il affiche des pertes d'insertion de 1,5 dB et une bande passante de 6,6%, avec une isolation et un coefficient de réflexion meilleurs que -20 dB.

1. Introduction

L'isolateur à déplacement de champ, développé initialement par M. Hines [1] puis par L. Courtois et al. [2], est une solution intégrable qui elle exploite le décalage asymétrique du champ électromagnétique dans des lignes microrubans déposées sur un substrat ferrite judicieusement aimanté Figure 1.

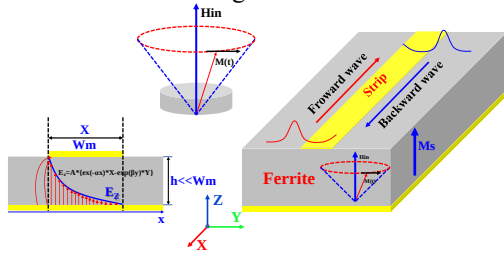


Figure 1. : Illustration du phénomène de déplacement de champ[1].

Toutefois, la non-réciprocité de ce dispositif repose sur l'utilisation d'un absorbant (ou d'un court-circuit) placé sur un seul côté de la ligne ce qui rend la réalisation et l'intégration plus difficiles. Plusieurs travaux récents fondés sur ce principe de Hines ont été publiés [3], [4], [5], [6]. À ce jour, aucune méthode ne combine de manière convaincante simplicité de conception, facilité de réalisation et haut niveau de performance, ce qui laisse place à de nouvelles avancées. Il a néanmoins été démontré qu'un isolateur planaire compact, offrant une isolation supérieure à 20 dB, pouvait être réalisé grâce à un simple stub en circuit ouvert placé d'un côté d'une ligne micro-ruban [6]. Le matériau ferrite utilisé possédait des pertes relativement élevées ce qui réduisait les performances du dispositif (pertes en transmission assez

élevées). Le présent travail propose un isolateur imprimé sur un substrat ferrite monocouche faible pertes, dont le principe d'isolation repose non plus sur l'utilisation d'absorbants ou de court-circuits, mais sur l'intégration de stubs disposés unilatéralement. Le choix rigoureux des propriétés du ferrite (Aimant à saturation $4\pi M_s$, ΔH_{eff}) permet de réduire les pertes magnétiques, tandis que l'utilisation d'un substrat unique garantit la compacité et la réduction des coûts. Fonctionnant dans la bande ISM à 2,4 GHz, le prototype présente une isolation et un coefficient de réflexion meilleurs que -20 dB, pour des pertes d'insertion inférieures à -1,5 dB.

2. Approche théorique

Le ferrite est généralement caractérisée par un tenseur de perméabilité. Celui-ci décrit son comportement anisotrope lorsqu'il est soumis à un champ magnétique continu. Lorsque le champ magnétique est suffisamment intense pour saturer la ferrite, son tenseur de perméabilité est décrit par l'équation (1) appelée tenseur de Polder [7].

$$[\mu_r(\omega)] = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec les éléments du tenseur de perméabilité donnés par:

$$\begin{aligned} \mu &= 1 + \frac{\omega_m \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} = \mu' - j\mu'' \\ \kappa &= \frac{\omega_m \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \kappa' - j\kappa'' \end{aligned} \quad (2)$$

Où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation du signal microonde, $\omega_m = \gamma\mu_0 M_s$ est la fréquence gyrotropique, $\omega_0 = \gamma\mu_0 H_{in} + j\omega\alpha$ est la fréquence de Larmor, $\gamma = 2,8$ MHz/Oe est le rapport gyromagnétique, et α est le facteur d'amortissement qui détermine les pertes magnétiques. Les éléments du tenseur de perméabilité sont liés au champ magnétique interne (H_{in}) et à l'aimantation à saturation ($4\pi M_s$). De plus, les pertes magnétiques sont modélisées par le facteur d'amortissement $\alpha = \gamma\Delta H/2f$, où ΔH est la largeur à mi-hauteur du pic de résonance du ferrite et f est la fréquence micro-ondes. Un autre paramètre clé pour déterminer le comportement opérationnel des dispositifs à base de ferrite est la perméabilité effective, définie par (3), où μ et κ sont calculés à partir de (2).

$$\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} \quad (3)$$

La courbe d'évolution de la partie réelle de la perméabilité effective avec la fréquence, pour un ferrite

Y210 ($4\pi M_s = 1000$ G, $\varepsilon_r = 14,2$, $\Delta H = 10$ Oe) d'Exxelia sous un champ interne de 300 Oe est représentée sur la Figure 2(a). Elle révèle que la perméabilité effective μ_{eff} présente une résonance et devient négative entre 1,75 et 3,6 GHz. Dans cette région, un phénomène de déplacement de champ se produit, permettant la conception d'un isolateur à « edge-guided mode » [1], [4].

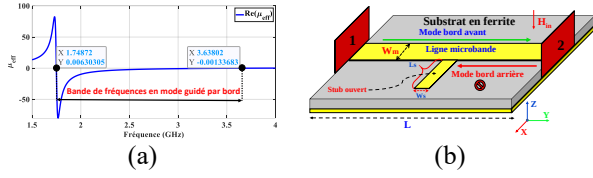


Figure 2. (a) intrigue de μ_{eff} par rapport à la fréquence pour Y210 avec $H_{in}=300$ Oe. (b) Isolateur proposé avec stub ouvert.

La Figure 2(b) présente le schéma de principe de l'isolateur conçu. Un (ou plusieurs) stubs est (sont) positionné(s) sur un côté de la ligne micro-ruban. Ils absorbent/dissipent l'énergie allant du port 2 vers le port 1 créant ainsi le phénomène d'isolation. L'énergie allant du port 1 vers le port 2 (sens passant) se propage sur le côté « haut » de la ligne et n'est pas perturbée par la présence du (des) stub(s).

3. Méthode d'atténuation

Un stub en circuit ouvert sur un substrat ferrite soumis à un champ magnétique interne (300 Oe) a tout d'abord été utilisé pour démontrer la non-réciprocité. Positionné de manière asymétrique le stub absorbe les signaux renvoyés par le port 2 offrant une isolation de 2 dB et une bonne adaptation autour de 2,4 GHz. L'onde directe est elle transmise avec peu de pertes. Afin d'améliorer l'isolation sans affecter la transmission directe, plusieurs stubs ont été ajoutés Figure 3(a). Une analyse paramétrique de cette conception est présentée sur la Figure 3(b), ($L = 12$ mm, $W_m = 5.5$ mm, $L_s = 12.2$ mm, $W_s = 0.2$ mm, écart 0.1 mm).

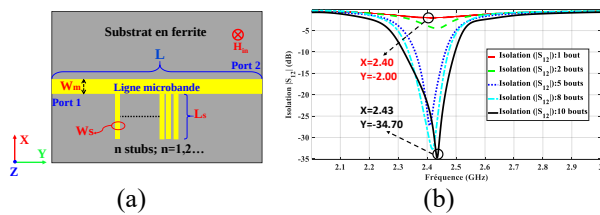


Figure 3. (a) Évolution du design ; (b) Paramètres S de l'isolateur.

La Figure 3(b) montre que la mise en œuvre de dix stubs identiques permet d'obtenir une isolation supérieure à 30 dB. Une amélioration supplémentaire est obtenue en introduisant une asymétrie dans la géométrie des stubs Figure 3(a). Le couplage entre les stubs est soigneusement contrôlé grâce à un positionnement précis et à l'optimisation de leurs dimensions et de leur espacement. Ceci est réalisé à l'aide de simulations électromagnétiques full-wave (CST). Cette approche permet d'obtenir une isolation et une adaptation meilleurs que -20 dB autour de 2.4GHz. Une amélioration supplémentaire est obtenue en insérant de petits stubs d'isolation dans la configuration

asymétrique (voir Figure 4(a)). Les paramètres ($|S_{11}|$, $|S_{22}|$) et l'isolation ($|S_{12}|$) restent inférieures à -20 dB sur une bande passante relative de 6,8 % centrée sur 2,4 GHz.

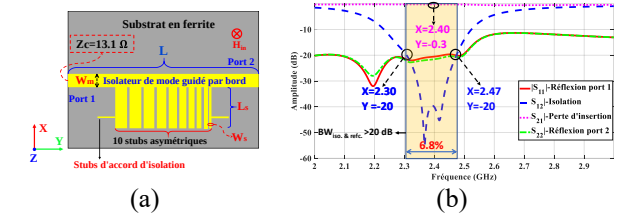


Figure 4. (a) Modèle final de l'isolateur $W_s = 0,2$ à $0,92$ mm. (b) Performances des paramètres S.

La Figure 5 présente la distribution du champ électrique à 2,4 GHz. La Figure 5(a) illustre la propagation dans le sens « passant » avec une perte d'insertion minimale, tandis que la Figure 5(b) confirme l'absorption complète de l'onde « arrière » par les stubs, avec une isolation maximale ($|S_{12}|$) de 55 dB en centre de bande (voir Figure 4 (b)).

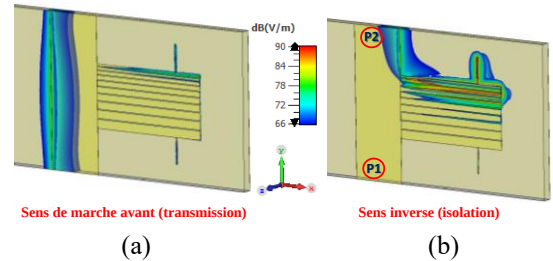


Figure 5. Répartition du champ électrique à 2,40 GHz : (a) vers l'avant et (b) vers l'arrière.

4. Validation expérimentale

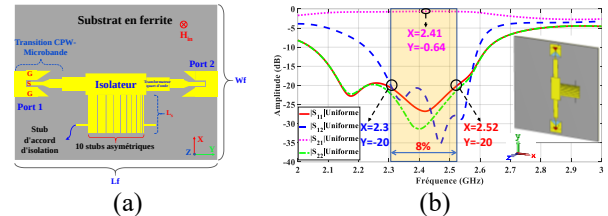


Figure 6. (a) Isolateur sur ferrite Y210 ($50 \times 50 \times 1$ mm) . (b) Performances pour $H_{in}= 300$ Oe.

La Figure 6(a) montre le modèle complet de l'isolateur, avec le transformateur d'impédance et les transitions pour les mesures sous pointes GSG (Ground-Signal-Ground).

Des simulations électromagnétiques ont d'abord été réalisées sous un champ de polarisation uniforme de 300 Oe, garantissant un fonctionnement dans la bande de perméabilité effective négative requise (Figure 6(b)). Afin d'évaluer les conditions pratiques, des co-simulations (EM-MS) ont été réalisées pour modéliser le champ magnétique délivré par les aimants permanents utilisés. Les résultats co-simulés sont présentés et comparés aux mesures (Figure 7(b)).

L'isolateur a été fabriqué sur un substrat en ferrite « polimiroir » ($50 \times 50 \times 1$ mm³). Une couche métallique de base (Ti/Au, 40/400 nm) a d'abord été déposée par évaporation par faisceau d'électrons, puis recouverte d'une couche d'or par électrolyse afin d'atteindre une épaisseur totale de 15 μ m. Le motif du circuit sur la

surface supérieure a été réalisé par gravure laser (LPKF ProtoLaser U4), tandis que la face arrière a été entièrement métallisée pour servir de plan de masse. La polarisation magnétique a été fournie par un aimant permanent externe en samarium-cobalt avec des plaques d'acier afin d'améliorer l'uniformité du champ. L'ensemble a été enfermé dans une boîte en Rohacell (HF-71) à faible permittivité ($\epsilon_r \approx 1$) pour permettre l'accès à la sonde et assurer un support mécanique, comme la Figure 7(a).

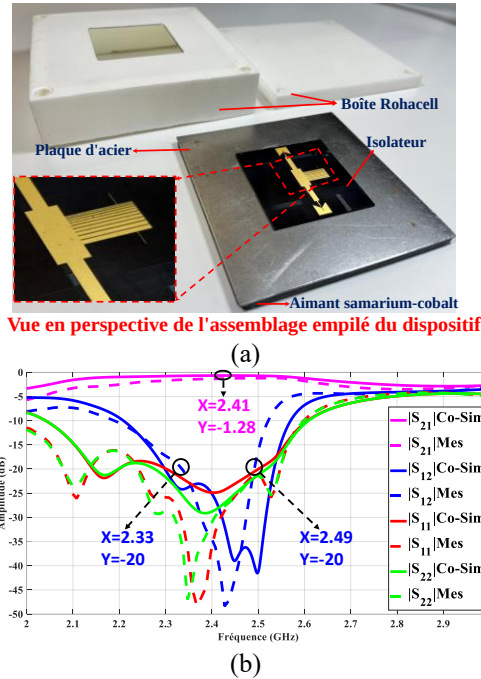


Figure 7. (a) Prototype de l'isolateur. (b) Performances simulées et mesurées.

Les paramètres S mesurés du dispositif sont présentés à la Figure 7(b). Les données expérimentales concordent bien avec les résultats de la simulation, avec des variations d'amplitude et de bande passante de $\pm 2,5\%$. L'isolation maximale mesurée ($|S_{12}|$) atteint 48,40 dB à 2,42 GHz. Les coefficients de réflexions ($|S_{11}|$) et ($|S_{22}|$), ainsi que l'isolation, restent inférieurs à -20 dB sur la gamme de fréquences de 2,33 GHz à 2,49 GHz, ce qui correspond à une bande passante relative de 6,6%. Les pertes d'insertion minimales mesurées ($|S_{21}|$) dans la bande de travail sont de 1,28 dB.

La principale contribution de ce travail est l'introduction d'une nouvelle topologie d'isolateur asymétrique à perturbation par stub qui supprime l'énergie inverse sans absorbants, court-circuit ou charge adaptée. Cette approche facilite la réalisation et permet d'obtenir un isolateur compact et intégrable

5. Conclusion

Une nouvelle topologie d'isolateur à ferrite imprimé compact et simple à réaliser a été proposé dans cet article. La fabrication d'un prototype a été validée par des mesures qui concordent avec les simulations. Ces résultats confirment à la fois la faisabilité de l'approche et son potentiel. Nous allons chercher dans le futur à élargir la bande passante de fonctionnement de ce type de dispositif compact.

6. Remerciements

Ces travaux ont été soutenus et financés par l'Agence de l'Innovation de la Défense (AID) et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet CAFE (ANR-24-ASTR-0019). Ils ont été réalisés dans le cadre du laboratoire commun INOGYRO entre la PME Inoveos et l'Institut de recherche XLIM (<https://inogyro.xlim.fr/>). Les gravures des circuits ont été réalisées chez Inoveos (LPKF ProtoLaser U4). Tout ou partie des expériences ont été réalisées à la plateforme d'essais PLATINOM d'XLIM, membre du réseau CNRS RF-Net.

Références

- [1] M.E. Hines, "Reciprocal and Nonreciprocal Modes of Propagation in Ferrite Stripline and Microstrip Devices," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, no. 5, pp. 442–451, May 1971.
- [2] L. Courtois, N. Bernard, B. Chiron, and G. E. Forterre, "A New Edge-Mode Isolator in the Very High Frequency Range," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 24, no. 3, pp. 129–135, Mar. 1976, doi: 10.1109/TMTT.1976.1128793.
- [3] L. Zeng, C.-Y. E. Tong, and S. N. Paine, "A Low-Insertion Loss Cryogenic Edge-Mode Isolator With 18 GHz Bandwidth," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 3, no. 4, pp. 1258–1266, Oct. 2023, doi: 10.1109/JMW.2023.3307297.
- [4] W. Marynowski, "Integrated Broadband Edge-Guided Mode Isolator With Antiparallel Biasing of the Ferrite Slabs," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 28, no. 5, pp. 392–394, May 2018.
- [5] M. F. Farooqui, A. Nafe, and A. Shamim, "Inkjet printed ferrite-filled rectangular waveguide X-band isolator," in *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, IEEE, Jun. 2014, pp. 1–4.
- [6] S. Khim, J. L. Valdes, H. Parvery, L. Huitema, and T. Monediere, "Planar Isolator Based on Field Displacement in Ferrite Substrate," in *2024 54th European Microwave Conference (EuMC)*, Sep. 2024, pp. 172–175, doi: 10.23919/EuMC61614.2024.10732277.
- [7] J. D. Adam, L. E. Davis, G. F. Dionne, E. F. Schloemann, and S. N. Stitzer, "Ferrite devices and materials," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 50, no. 3, pp. 721–737, Mar. 2002, doi: 10.1109/22.989957.