



**HAL**  
open science

## **Filtre reconfigurable passe-bande / coupe-bande à base de couches minces de chalcogénure**

Clément Raguénès, Erwan Fourn, Denis Le Berre, Cédric Quendo, Rozenn Allanic, Cyril Paranthoen, Mathieu Perrin, Virginie Nazabal, Albane Benardais, Laurent Calvez

### ► **To cite this version:**

Clément Raguénès, Erwan Fourn, Denis Le Berre, Cédric Quendo, Rozenn Allanic, et al.. Filtre reconfigurable passe-bande / coupe-bande à base de couches minces de chalcogénure. 23èmes Journées Nationales Micro-ondes, Jun 2024, Juan-Les -Pins, France. hal-04853365

**HAL Id: hal-04853365**

**<https://hal.science/hal-04853365v1>**

Submitted on 22 Dec 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.

# Filtre reconfigurable passe-bande / coupe-bande à base de couches minces de chalcogénure

C. Raguene<sup>1</sup>, E. Fourn<sup>1</sup>, D. Le Berre<sup>2</sup>, C. Quendo<sup>2</sup>, R. Allanic<sup>2</sup>, C. Paranthoen<sup>3</sup>, M. Perrin<sup>3</sup>, V. Nazabal<sup>4</sup>, A. Benardais<sup>4</sup>, L. Calvez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR - UMR 6164, F-35000 Rennes

<sup>2</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Brest

<sup>3</sup>Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-35000 Rennes

<sup>4</sup>Univ Rennes, CNRS, ISCR - UMR 6226, F-35000 Rennes  
erwan.fourn@insa-rennes.fr

**Résumé** — Une structure de filtre reconfigurable pouvant passer d'un état passe-bande à un état coupe-bande et réciproquement est présentée ici. La transition entre les deux états est obtenue en modifiant la conductivité de lignes de transmission pour les faire passer d'un état isolant à un état conducteur à l'aide de couches minces de chalcogénure. Ces matériaux à changement de phase peuvent transiter entre un état amorphe à très faible conductivité et un état cristallin fortement conducteur. La solution de filtres reconfigurables proposée ici s'appuie pour la structure coupe-bande sur des filtres à stubs en circuit ouvert. Le comportement passe-bande est obtenu en connectant les stubs deux à deux, formant ainsi une structure innovante en anneaux présentant aussi un zéro de transmission de part et d'autre de la bande passante.

## 1. Introduction

Les challenges environnementaux actuels nous obligent à plus de sobriété et d'efficacité en termes de matières premières ou d'énergie consommées. Que des parties de systèmes soient peu utilisées apparaît alors de moins en moins acceptable. L'optimisation du taux d'usage des différents composants d'un terminal de communication consiste à les rendre reconfigurables pour les adapter à plusieurs usages, minimisant ainsi leur nombre. Parmi tous ces composants, nous nous intéressons ici aux filtres micro-ondes, éléments très présents dans les terminaux et qui restent difficiles à intégrer.

La reconfiguration des circuits micro-ondes se base surtout sur des composants semi-conducteurs (diodes PIN, varactors, etc.) [1, 2], mais on trouve aussi des solutions à base de MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) [3, 4] ou de matériaux dont on peut modifier les constantes diélectrique ou magnétique (cristaux liquides, ferroélectrique, etc.) [5, 6]. Toutes ces solutions ont déjà montré leurs avantages mais aussi leurs limites comme, en fonction des technologies, une consommation électrique élevée, une commutation lente, une montée en fréquence limitée, des difficultés d'intégration, etc.

Des matériaux à changement de phase (PCM) sont

également étudiés pour la reconfiguration des circuits micro-ondes comme le dioxyde de Vanadium ( $\text{VO}_2$ ) [7] ou les verres de chalcogénures dont le  $\text{GeTe}$  ou le  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) [8, 9]. Ces matériaux ont la capacité de passer d'un état amorphe très faiblement conducteur à un état cristallin fortement conducteur et réciproquement sous l'effet d'un stimulus en température avec un rapport de conductivité de  $10^4$  à  $10^6$ . Le  $\text{VO}_2$  transite d'un état à l'autre autour de  $70^\circ\text{C}$ , mais la conservation à l'état cristallin nécessite de continuer à le chauffer. A contrario, les chalcogénures sont stables dans leurs deux états mais les transitions nécessitent des stimuli de plusieurs centaines de degrés sur des temps très courts si on utilise une activation laser (quelques dizaines de nanosecondes). Ces derniers sont a priori plus intéressants pour des applications avec peu de changements d'état sur un temps donné. Nos travaux portent plus particulièrement sur le GST avec comme objectif de mettre en oeuvre une activation optique par laser, minimisant les interactions entre le circuit micro-onde proprement dit et les lignes de commande électrique utilisées dans les solutions usuelles de reconfiguration.

Nous proposons ici de reconfigurer un filtre entre des comportements coupe-bande et passe-bande en tirant partie des propriétés particulières des PCM de transition entre un état isolant et un état conducteur. Le passage d'un état à l'autre sera obtenu en modifiant l'état de deux lignes de chalcogénure. Le filtre coupe-bande consiste en un filtre à stubs quart d'onde en circuit ouvert, le GST étant alors à l'état amorphe. Le comportement passe-bande est obtenu en transitant le GST à l'état cristallin associant les stubs deux-à-deux pour former une structure en anneaux. La section II de cette communication présente les deux topologies coupe-bande et passe-bande de ce filtre et le principe de transition. En section III, une première démonstration du concept est présentée sous la forme de filtres microrubans "idéaux" dans le sens où les lignes de connexion entre les stubs sont soit non présentes (cas isolant) soit en cuivre (cas conducteur). Le démonstrateur réel utilisant du GST est en cours de fabrication et sera présenté lors de la conférence.

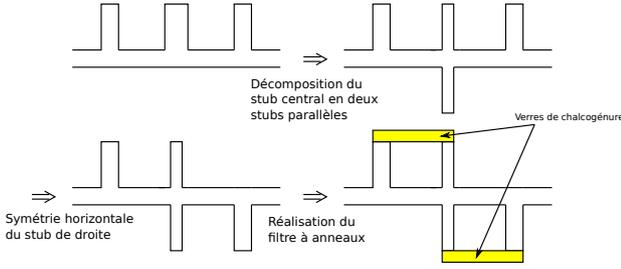


FIGURE 1. Étapes de transformation du filtre à stubs classique vers un filtre à anneaux.

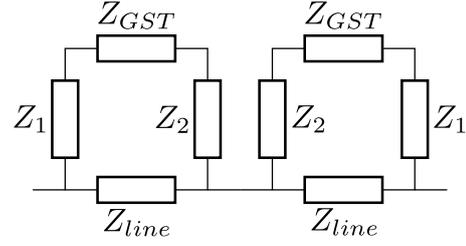


FIGURE 2. Schéma de principe du filtre à anneaux (toutes les lignes sont de longueur  $l = \lambda_0/4$ ).

## 2. D'un état coupe-bande à un état passe-bande

### 2.a. Le filtre coupe-bande initial

Le comportement coupe-bande du filtre reconfigurable proposé se base sur une topologie bien connue de filtres à stubs quart d'onde à extrémité en circuit ouvert dont on trouvera aisément les équations de synthèse dans [10]. Le filtre est d'ordre 3 et comporte donc 3 stubs séparés entre eux par des lignes quart d'onde. Pour préparer le passage au filtre passe-bande en anneaux, quelques variations géométriques sont introduites. La première consiste à décomposer le stub central en deux stubs en parallèle d'impédance deux fois plus grande et la seconde à inverser l'orientation du troisième stub vis-à-vis du premier (cf. Figure 1).

### 2.b. Vers le filtre passe-bande

Le passage de l'état coupe-bande à l'état passe-bande s'effectue en associant les stubs deux-à-deux comme présenté sur la dernière partie de la Figure 1. Cette association peut se faire en mettant à l'état cristallin et donc conducteur des lignes de verres de chalcogénure reliant les stubs. À l'état amorphe, ces lignes, non représentées sur les premières sous-figures de la Figure 1, sont très faiblement conductrices et donc assimilées en première approximation à un isolant parfait. De part leur très faible épaisseur (quelques centaines de nanomètres), leur impact global est négligeable sur le fonctionnement du filtre coupe-bande.

À l'état cristallin, elles présentent par contre une forte conductivité et connectent électriquement les stubs pour former deux anneaux disposés symétriquement. La structure est alors équivalente à celle présentée en Figure 2. Cette topologie crée une bande passante autour de la fréquence centrale  $f_0$  et deux zéros de transmission de part et d'autre de cette bande. Notons que c'est bien la combinaison symétrique des deux anneaux qui permet l'obtention d'un comportement passe-bande. Toutes les lignes ayant une longueur  $l = \lambda_0/4$  avec  $\lambda_0 = c_0/f_0$ , chaque anneau pris individuellement peut même présenter un comportement coupe-bande à la fréquence centrale  $f_0$  si  $Z_1 Z_2 = Z_{GST} Z_{line}$ .

Pour déterminer la fréquence des zéros de transmission, il faut simplement déterminer les fréquences pour lesquelles le coefficient de transmission total  $S_{21}$  est nul, ce qui revient ici à annuler l'admittance de transfert  $Y_{21}$

qui est donnée par l'équation (1).

$$Y_{21} = \frac{j}{\sin(\beta l)} \left( \frac{1}{Z_{line}} + \frac{1}{(Z_1 + Z_2 + Z_{GST}) \cos^2(\beta l) - \frac{Z_1 Z_2}{Z_{GST}} \sin^2(\beta l)} \right) \quad (1)$$

où  $\beta = 2\pi/\lambda$  représente la constante de phase à la fréquence  $f = c_0/\lambda$ . La condition  $Y_{21} = 0$  nous conduit alors à

$$f_{z,\pm} = \frac{2f_0}{\pi} \arccos \left( \pm \sqrt{\frac{\frac{Z_1 Z_2}{Z_{GST}} - Z_{line}}{Z_1 + Z_2 + Z_{GST} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_{GST}}}} \right) \quad (2)$$

Dans (2), le signe  $\pm$  symbolise la symétrie des deux zéros de transmission autour de la fréquence centrale du filtre passe-bande. Cette équation montre que la position des zéros de transmission peut être contrôlée en modifiant l'impédance des différentes lignes de transmission. Dans notre cas, les impédances  $Z_1$ ,  $Z_2$  et  $Z_{line}$  sont déterminées en amont par la synthèse du filtre dans son état coupe-bande et la position des zéros de transmission sera donc fixée par l'impédance  $Z_{GST}$  des lignes additionnelles qui connectent les stubs deux-à-deux. En technologie micro-ruban, varier l'impédance  $Z_{GST}$  équivaut alors à varier la largeur de la ligne. L'utilisation de matériaux à changement de phase comme les verres de chalcogénure ajoute donc une capacité de reconfiguration supplémentaire puisqu'il est tout à fait possible de n'illuminer qu'une partie du matériau pour le faire transiter dans un état ou dans un autre en conservant le reste du dépôt dans l'autre état et ainsi modifier à façon la largeur conductrice de la ligne et donc son impédance. Une telle transition partielle a déjà été présentée dans le cas d'antennes patches [11].

## 3. Démonstration conceptuelle

Un filtre reconfigurable passant d'un comportement coupe-bande à un comportement passe-bande et réciproquement peut donc être développé simplement en partant d'une structure à stubs et en connectant ou déconnectant des lignes assurant la jonction entre les stubs deux-à-deux. Pour assurer cette jonction, nous mettons actuellement au point une solution à base de couches minces de GST contrôlées optiquement, avec l'aide de nos partenaires de l'Institut des Sciences Chimiques de Rennes (ISCR) et de

l'Institut de Fonctions Optiques pour les Technologies de l'information (i-FOTON) dans le cadre du projet DATE-RAC financé par le Labex CominLabs. La mise au point du procédé de fabrication complet des circuits en technologie microruban associé à des couches de GST n'étant pas encore finalisée, nous ne sommes pas, au moment de la rédaction de cette communication, en mesure de présenter une réalisation et des mesures de filtre reconfigurable coupe-bande/passe-bande utilisant cette technologie. Pour valider le concept proposé, nous présentons un exemple de "pseudo-reconfiguration" consistant à réaliser deux fois le circuit, une première fois sans ligne entre les stubs pour obtenir le comportement coupe-bande et une seconde fois en connectant les stubs par des lignes en cuivre comme les autres lignes du circuit (cf. Figure 4). Nous présenterons le cas réel à base de verres de chalcogénure lors de la conférence.

L'exemple proposé est centré autour de la fréquence  $f_0 = 10$  GHz, conçu en technologie microruban sur un substrat Rogers RO6010 ( $\epsilon_r = 10,7$ ,  $\tan \delta = 0,0023$ ) d'épaisseur 1,27 mm avec une métallisation en cuivre d'épaisseur 17,5  $\mu\text{m}$ . La conception commence par le filtre coupe-bande à stubs puis on ajoute les lignes additionnelles pour connecter les stubs deux-à-deux en ajustant la largeur de ces lignes pour contrôler les fréquences des zéros de transmission. Elles ont été fixées ici à 8,1 et 11,9 GHz conduisant à une bande passante relative de 13%. Le filtre ainsi obtenu est représenté schématiquement en Figure 3 et le Tableau 1 présente les dimensions associées. Notez qu'un compromis impliquant une phase d'optimisation et quelques allers-retours entre les deux structures est nécessaire pour assurer un bon niveau d'adaptation dans les deux cas. Les filtres présentés ici ont été conçus et optimisés en utilisant les logiciels ADS (Keysight Technologies) et HFSS (ANSYS) et fabriqué par gravure laser sur un appareil LPKF Protolaser U4.

Les deux circuits fabriqués sont présentés sur la Figure 4. Ils ne diffèrent que par la présence ou non des lignes connectant les stubs entre eux. Les Figures 5(a) et 5(b) montrent les résultats de simulations et de mesures pour les deux états. Une bonne corrélation entre simulations et mesures est observable sur toute la bande de fréquences, à l'exception d'une certaine divergence aux plus hautes fréquences relativement loin de la bande d'intérêt toutefois. Cette divergence peut s'expliquer notamment par la gravure laser qui peut altérer les caractéristiques du substrat. Nous obtenons cependant des niveaux de perte faibles de l'ordre de 0,9 dB dans l'état coupe-bande et 1 dB dans l'état passe-bande.

Dimensions (en mm)			
$W_1$	0,95	$W_2$	0,6
$W_{line}$	1,6	$W_{GST}$	1,4
$l$	2,25		

TABLEAU 1. Dimensions des filtres fabriqués.

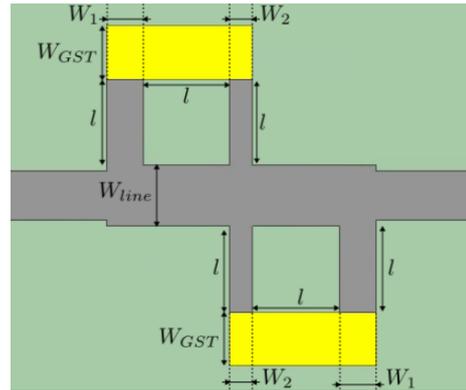


FIGURE 3. Représentation du filtre reconfigurable.

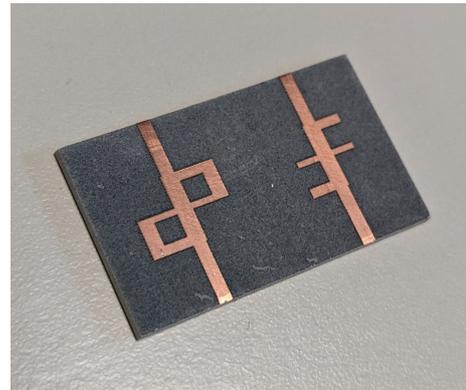


FIGURE 4. Photo des deux filtres représentant les deux états du filtre reconfigurable coupe-bande/passe-bande proposé.

#### 4. Conclusion

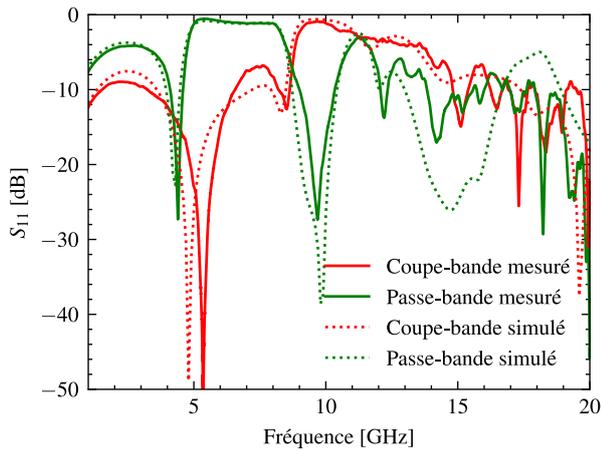
Une nouvelle solution de reconfiguration d'un filtre entre un état coupe-bande et un état passe-bande est présentée dans ce travail. Le filtre coupe-bande est basé sur une topologie bien connue de filtres à stubs en circuit ouvert. En connectant les stubs deux-à-deux, on obtient un filtre à deux anneaux disposés symétriquement et qui présente un comportement passe-bande avec un zéro de transmission de chaque côté de la bande. Si une simple démonstration de concept est proposée ici pour valider le principe par la mesure, la mise en oeuvre réelle à base de verres de chalcogénure est actuellement en développement et sera présentée lors de la conférence.

#### 5. Remerciements

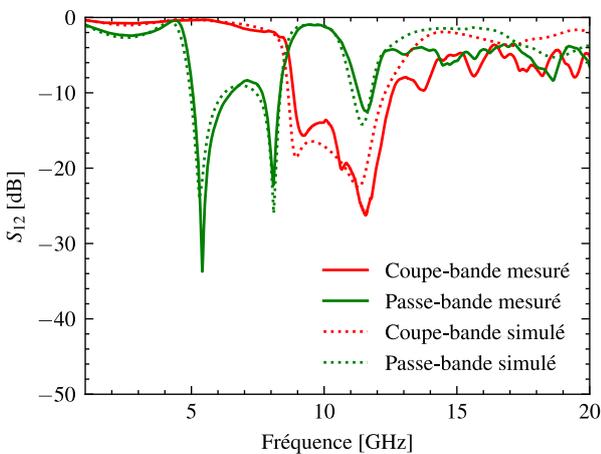
Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat attribuée au labex CominLabs et gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-10-LABX-07-01.

#### Références

[1] K. Song *et al.*, "Compact wide-frequency tunable filter with switchable bandpass and bandstop frequency response," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 47 503–47 508, 2019.



(a) Coefficient  $S_{11}$  (en dB)



(b) Coefficient  $S_{12}$  (en dB)

**FIGURE 5. Réponses simulées et mesurées du filtre reconfigurable dans ses deux états.**

[2] Y.-J. Zhang *et al.*, “Design of novel reconfigurable filter with simultaneously tunable and switchable passband,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 59 708–59 715, 2019.

[3] E. Fourn *et al.*, “Mems switchable interdigital coplanar filter,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 1, pp. 320–324, 2003.

[4] N. Kumar and Y. K. Singh, “Rf-mems-based bandpass-to-bandstop switchable single- and dual-band filters with variable fbw and reconfigurable selectivity,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 10, pp. 3824–3837, 2017.

[5] D. Jiang *et al.*, “Tunable microwave bandpass filters with complementary split ring resonator and liquid crystal materials,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 126 265–126 272, 2019.

[6] S. Courreges *et al.*, “A low loss x-band quasi-elliptic ferroelectric tunable filter,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 203–205, 2009.

[7] L. Huitema *et al.*, “Highly integrated  $\text{vo}_2$ -based tunable antenna for millimeter-wave applications,” *Appl. Phys. Letters*, vol. 110, no. 20, p. 203501, 2017.

[8] A. Mennai *et al.*, “Bistable rf switches using  $\text{ge}_2\text{sb}_2\text{te}_5$  phase change material,” in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, 2015, pp. 945–947.

[9] T. Singh and R. Mansour, “Characterization, optimization, and fabrication of phase change material germanium telluride based miniaturized dc 67 ghz rf switches,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 8, pp. 3237–3250, 2019.

[10] G. Matthaei *et al.*, *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. Norwood, MA : Artech House, 1980.

[11] L. Huitema *et al.*, “Optical switching of gete phase change material : Application to a frequency agile millimeter-waves patch antenna,” in *European Conference on Antennas and Propagation*, Londres, UK, Avril 2018.