



HAL
open science

Application of chalcogenide glass to DBR filter reconfiguration

Clément Raguénès, Erwan Fourn, Cédric Quendo, Rozenn Allanic, Denis Le Berre

► **To cite this version:**

Clément Raguénès, Erwan Fourn, Cédric Quendo, Rozenn Allanic, Denis Le Berre. Application of chalcogenide glass to DBR filter reconfiguration. Journées Nationales Micro-ondes, Jun 2022, Limoges (France), France. hal-03986677

HAL Id: hal-03986677

<https://hal.science/hal-03986677>

Submitted on 13 Feb 2023

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.

Application de verre de chalcogénure à la reconfiguration de filtre DBR

C. Raguénès¹, E. Fourn¹, C. Quendo², R. Allanic², D. Le Berre²

¹ Univ Rennes, INSA Rennes, IETR, UMR CNRS 6164, 35000 Rennes, France

² Univ Brest, Lab-STICC, UMR CNRS 6285, 29200 Brest, France
clement.raguenes@insa-rennes.fr

Résumé — Cette étude présente un usage possible de verre de chalcogénure à la reconfiguration en fréquence de filtre DBR (Dual-behaviour resonator). La transition de phase entre les états amorphe et cristallin des verres de chalcogénure sera utilisée pour reconfigurer la fréquence centrale du filtre mais aussi pour en réadapter la réponse dans la bande passante. Cette correction est permise par l'introduction d'un saut d'impédance localisé au centre de chaque inverseur. Ce saut d'impédance permettra de faire fonctionner l'inverseur à deux fréquences distinctes, 12 GHz et 7 GHz, en fonction de la phase du verre de chalcogénure déposé et donc d'améliorer l'amplitude de reconfiguration du filtre.

1. Introduction

Dans plusieurs domaines de pointe actuels, du spatial, avec l'utilisation de plus en plus fréquente de cubesats, ou de l'automobile autonome, les systèmes micro-ondes doivent répondre à un nombre grandissant de contraintes, notamment concernant l'encombrement et le poids. La reconfigurabilité des systèmes est une solution qui permet de satisfaire ces exigences. Aujourd'hui, parmi les éléments les plus connus pour y arriver, nous retrouvons les transistors, les diodes PIN, les MEMS ou les varactors [1]. Ces composants ont déjà montré leurs avantages mais aussi leurs limites, que ce soit en termes de consommation, de fonctionnement à haute fréquence, de temps de commutation ou de facilité d'intégration.

Depuis quelques années, l'étude des applications potentielles aux composants et systèmes micro-ondes de certains matériaux à changement de phase s'est développée afin de trouver des alternatives à ces solutions. Dans ces études, deux matériaux se distinguent : le dioxyde de vanadium (VO_2) [2] [3] et la famille des verres de chalcogénure ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [4] et GeTe [5] principalement). Ces deux matériaux ont pour particularité de pouvoir réaliser des transitions de phase (amorphe isolante et cristalline conductrice) via une excitation thermique. La température de transition du VO_2 (68°C) est largement plus accessible que celle des verres de chalcogénure (200°C/600°C selon la famille et le sens de transition [6]) mais contrai-

rement au VO_2 , les verres proposent une stabilité dans les deux phases et se passent donc d'alimentation hors période de transition. Par ailleurs, l'activation par l'utilisation de fibre optique et de laser à semi-conducteur doit minimiser largement le couplage entre les signaux d'alimentation et RF. Jusqu'à aujourd'hui, les applications micro-ondes des verres de chalcogénure se limitent à des applications antennaires ([7]) et à des switches ([4], [5]) du côté système. Mais il est possible d'imaginer d'autres applications ambitieuses, en assumant un niveau de pertes, qui peut être contre-balançé par la variété des solutions permises par ce matériau.

Nous présentons ici une application innovante de filtre Dual-Behaviour Resonator (DBR) [8] reconfigurable en technologie micro-ruban. L'utilisation de verre chalcogénure nous permettra, à la fois de se substituer à l'usage d'autres éléments évoqués précédemment, comme des MEMS [9], mais également à augmenter l'amplitude de reconfiguration en corrigeant d'autres éléments que les stubs : les inverseurs.

2. Développement du filtre reconfigurable

Les deux principaux paramètres d'un filtre passe bande sont sa fréquence centrale et sa largeur de bande passante, qui sera ici mesurée à -15 dB. Lors d'un changement de fréquence centrale, l'adaptation dans la bande se dégrade par rapport à l'état initial, potentiellement jusqu'à sa disparition. C'est souvent cette dégradation qui va limiter la variation maximale de la fréquence centrale.

Pour illustrer la solution que nous proposons, nous avons développé un filtre DBR reconfigurable en technologie micro-ruban, présenté en Figure 1. La réponse de ce filtre est centrée autour de 12 GHz avec une bande passante relative de 20% et est visible en Figure 2a. La reconfiguration de ce filtre va décaler cette bande passante de 20% jusqu'à 7 GHz, soit une variation de 40% par rapport à la fréquence initiale et entièrement grâce à des applications de verres de chalcogénure.

A l'état initial, les verres de chalcogénure (zones en jaunes sur la Figure 1) ont une structure amorphe (état pseudo isolant), c'est cet état qui est repré-

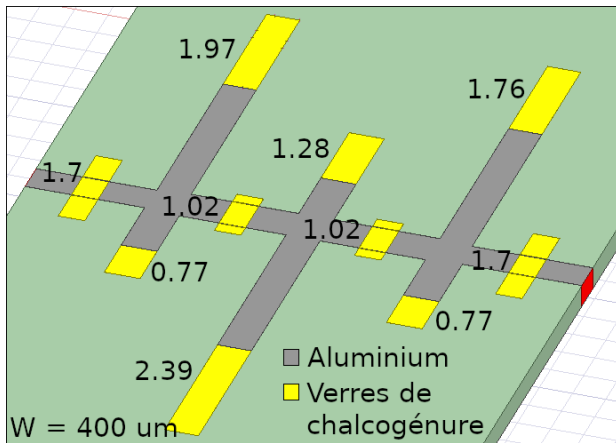


Figure 1. Filtre DBR développé

Substrat Silicium ($\epsilon_r = 11.9, h = 350\mu\text{m}$), Unité des longueurs : mm, W : largeur des dépôts de verre de chalcogénure

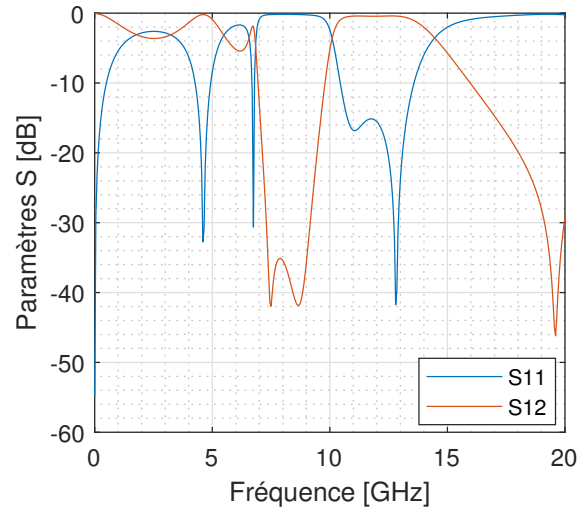
senté en 2a. Le chauffage des verres va déclencher une transition de phase qui va faire passer la structure des verres d'amorphe à cristalline. Ceci aura notamment pour effet une augmentation significative de la conductivité électrique du matériau. Lorsque la transition est déclenchée pour les zones situées en bout de stubs, la fréquence centrale va être décalée vers les basses fréquences mais ceci s'accompagne d'une dégradation de l'adaptation (cf. Figure 2b), c'est à dire une diminution de la taille de la bande passante. Le problème vient principalement des inverseurs situés de part et d'autre des résonateurs. Ceux-ci ont un comportement induit par la longueur quart d'onde de la fréquence centrale initiale, ils ne remplissent donc plus leur rôle quand cette fréquence varie. Ce verrou est complexe à surmonter, notamment du fait de leur emplacement, qui rend la modification de leur longueur physique très complexe.

2.a. Démonstration du principe de correction de l'adaptation

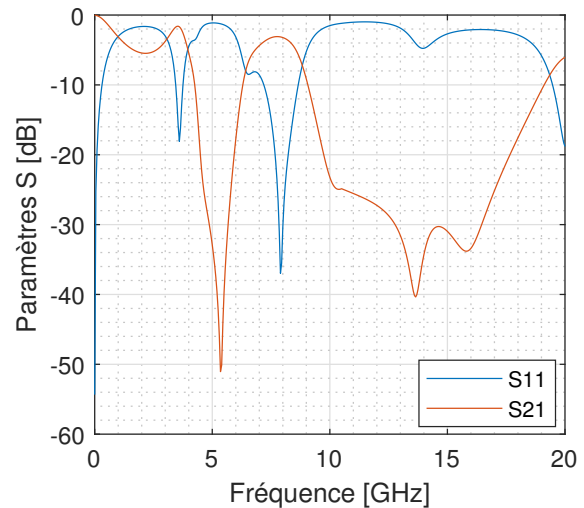
Pour contourner ce blocage, nous nous intéressons à l'impact d'une modification locale d'impédance au centre des inverseurs initiaux afin de jouer sur leur longueur électrique. Ceci est visible par les zones de verres, en jaune, sur la ligne centrale de la Figure 1.

Nous allons utiliser l'équivalence entre un inverseur et une ligne ayant une charge imaginaire pure en son centre. Cette équivalence permet de modifier la longueur électrique d'un inverseur. Ici nous allons utiliser la réciproque afin de modifier la fréquence de fonctionnement d'un inverseur en gardant une longueur physique constante. L'objectif est donc de réaliser un déphasage de -90° aux deux fréquences de fonctionnement en conservant une longueur totale fixe ($\frac{\lambda}{4}$ à la fréquence initiale).

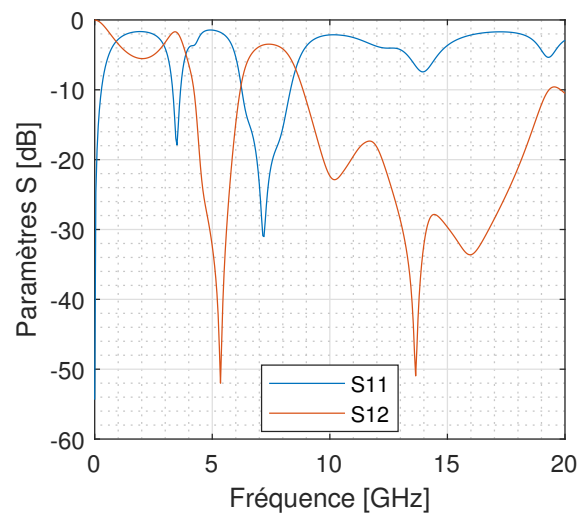
Le circuit visé pour atteindre cet objectif consiste à reprendre l'inverseur classique, dimensionné à la fréquence initiale (cf Figure 3a), puis à introduire



(a) Réponse du filtre initial



(b) Réponse du filtre décalé non corrigé



(c) Réponse du filtre final reconfiguré

Figure 2. Les 3 étapes de reconfiguration

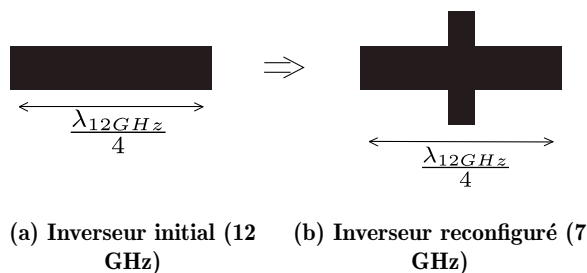


Figure 3. Illustration du principe de reconfiguration d'un inverseur

un élargissement en son centre, tel qu'illustré en Figure 3b. Ce saut d'impédance va permettre de modifier le déphasage induit pour l'inverseur et obtenir une valeur de -90° à 7 GHz, la fréquence reconfigurée, en gardant la longueur quart d'onde de la fréquence initiale.

Afin de maîtriser le comportement de ce circuit, nous le modélisons via une représentation matricielle. L'idée est de partir de l'inverseur initial, d'y ajouter le saut d'impédance, et d'identifier sa représentation matricielle avec celle d'un inverseur idéal à la fréquence reconfigurée.

La modélisation utilise les matrices de transfert ABCD, qui présentent l'avantage de pouvoir simplement mettre en cascade plusieurs éléments. L'inverseur reconfiguré (Figure 3b) décomposé en 3 parties d'impédances différentes suivant le schéma équivalent de la Figure 4. Cette structure à trois tronçons doit avoir un comportement équivalent à un inverseur dimensionné à la fréquence reconfigurée (Figure 4b). C'est donc dans cette optique que nous avons identifié la cascade de matrices ABCD représentative de la Figure 4a avec la matrice d'un inverseur idéal à 7 GHz, tel qu'illustré en Figure 4b.

Physiquement, il est montré dans [10] que la tronçon de faible impédance est assimilable à une capacité parallèle qui peut être utilisé pour modifier la fréquence de fonctionnement d'un inverseur, au même titre qu'un tronçon inductif. Ce type de tronçon est réalisé par un amincissement local de ligne. En pratique, chacun des cas pourrait être réalisable mais nous avons décidé de nous concentrer sur le comportement capacitif puisque l'amincissement introduit une complexité supérieure, que nous avons décidé d'éviter dans un premier temps.

2.b. Obstacles pratiques

Nous avons ajouté ce comportement capacitif au centre de chaque inverseur via les sauts d'impédance, représentés en jaunes sur la Figure 1. Les résultats sont présentés sur la Figure 2c. On observe que les corrections apportent un gain en largeur de bande passante (définie pour un niveau de coefficient de réflexion inférieur à -15 dB), notamment grâce au remplacement des pôles du filtre, par rapport à la réponse du filtre avant correction, en Figure 2b.

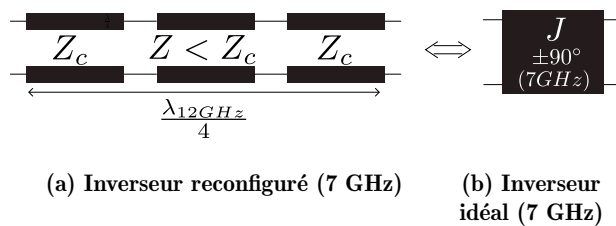


Figure 4. Principe de reconfiguration d'un inverseur à longueur constante

Fonctionnement initial à 12 GHz vers une fréquence différente, définie par la valeur de Z

Cette correction des inverseurs de longueur fixe présente l'avantage de pouvoir modifier le déphasage, et donc de changer la fréquence à laquelle ce dernier est de -90° . La contrepartie de cette solution concerne l'adaptation de la ligne. Pour des inverseurs dits "classiques", la ligne est très bien adaptée. Mais l'ajout d'un saut d'impédance ajoute beaucoup de réflexions parasites, ce qui dégrade énormément la réponse de la ligne, la différence d'adaptation entre les deux lignes est visible en Figure 5. Finalement, il semble difficile d'obtenir des inverseurs présentant des caractéristiques de phase et d'adaptation idéales en y ajoutant un saut d'impédance d'une telle importance. Il faut donc trouver un compromis qui permette une correction suffisante du déphasage de l'inverseur pour améliorer la bande passante du filtre sans trop désadapter la ligne.

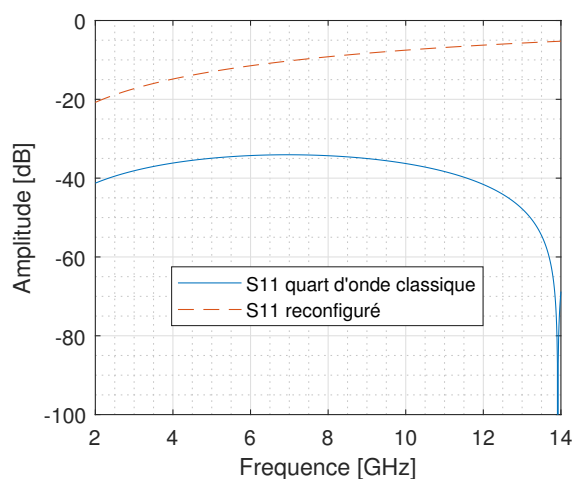


Figure 5. Comparaison des S_{11} d'un inverseur reconfiguré et d'un inverseur classique

Deux longueurs physiques différentes pour un fonctionnement à la fréquence reconfigurée (7 GHz)

Par ailleurs, l'aspect physico-chimique concernant les verres de chalcogénure présente également des incertitudes. En effet, si le comportement de cette famille de matériau est bien connu, il ne l'est surtout que pour des dimensions bien inférieures à celles que nous utilisons. La principale interroga-

tion concerne l'homogénéité de cristallisation sur de grandes surfaces et sur des épaisseurs relativement importantes. Une conséquence de cette interrogation concerne l'épaisseur de peau. En effet, afin d'être sûr de la cristallisation complète du matériau, il est nécessaire d'utiliser une épaisseur très faible, de l'ordre de quelques centaines de nanomètres. A nos fréquences de travail, et selon la conductivité atteinte par les verres de chalcogénure en phase cristalline, l'épaisseur de peau est comprise entre 1 et 10 μm . Ces deux contraintes sont incompatibles et nous empêchent de travailler à des fréquences trop basses. Avec les compositions de verres actuelles, il nous faut encore une fois trouver un juste milieu entre homogénéité de cristallisation et épaisseur de peau pour atteindre un comportement acceptable dans la bande du filtre reconfiguré.

2.c. Démonstrateur

Au niveau de la méthode de chauffage, une fois que les besoins en termes d'énergie et de longueur d'onde seront bien déterminés, nous allons utiliser des lasers à semi-conducteurs (diodes laser). Ce type de laser est très compact et permet donc de bien se placer dans l'optique d'une intégration future. La motivation première qui a mené à ce projet réside dans l'utilisation d'un chauffage par laser. En effet, l'utilisation de laser permet d'acheminer l'énergie d'activation aux verres de chalcogénure directement via un système de fibre optique et donc de limiter grandement le couplage entre le signal d'alimentation et le signal utile microonde.

Finalement, le démonstrateur présenté montre un filtre DBR reconfigurable à bande passante relative constante fonctionnant à 12 GHz et 7 GHz. Les performances simulées permises par cette preuve de concept sont résumées sur le tableau ci dessous.

	Filtre initial	Filtre reconfiguré
Fréquence centrale	12 GHz	7 GHz
Bande passante relative	20%	20%
Insertion losses	0.4 dB	3.5 dB
Return losses	< 15 dB	< 15 dB

Nous constatons une augmentation non négligeable du niveau de perte par insertion, due au soucis d'adaptation présenté ci-dessus mais également à la conductivité atteinte à l'état cristallin des verres. Il est difficile de dire avec certitude s'il est possible d'augmenter encore plus l'excursion en fréquence centrale compte tenu des compromis déjà nécessaires pour arriver aux résultats présentés. Dans ce sens, des études poussées sur la cristallisation des verres de chalcogénure seraient très utiles, notamment pour déterminer si l'homogénéité de transition est possible pour des épaisseurs ou des surfaces plus importantes que les dimensions d'usage habituel des verres de chalcogénure.

3. Conclusion

Une solution de reconfiguration de filtre se basant sur l'utilisation de verre de chalcogénure pour jouer sur la fréquence de fonctionnement de tronçons inverseurs quart d'onde à longueur constante a été introduite. Une augmentation des pertes est constatée, due en grande partie au comportement des verres de chalcogénure à l'état cristallin. Cependant, ce niveau de pertes permet d'arriver à un taux de reconfiguration, défini comme la variation de fréquence centrale, de 40%, largement plus important que ce qui peut être retrouvé dans [3] et [9], où il dépasse difficilement les 10%.

Les validations expérimentales du principe exposé sont prévues rapidement, et seront présentées pendant la conférence. Par ailleurs, d'autres systèmes sont à l'étude afin de valider le potentiel de l'application des verres de chalcogénure aux systèmes hyperfréquences reconfigurables.

Références

- [1] V. Steel and A. Morris, "Tunable rf technology overview," *Microwave Journal*, November 2012.
- [2] L. Huitema *et al.*, "Highly integrated VO₂ - based tunable antenna for millimeter-wave applications," *Applied Physics Letters*, May 2017.
- [3] D. Bouyge *et al.*, "Reconfigurable bandpass filter based on split ring resonators and vanadium dioxide (VO₂) microwave switches," in *2009 APMC*. IEEE, Dec. 2009.
- [4] A. Mennai *et al.*, "Bistable RF switches using Ge₂Sb₂Te₅ phase change material," in *2015 EuMC*. IEEE, Sep. 2015.
- [5] T. Singh and R. R. Mansour, "Characterization, Optimization, and Fabrication of Phase Change Material Germanium Telluride Based Miniaturized DC-67 GHz RF Switches," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Aug. 2019.
- [6] S. Raoux *et al.*, "Phase Change Materials and Their Application to Nonvolatile Memories," *Chemical Reviews*, Jan. 2010.
- [7] L. Huitema *et al.*, "Optical switching of GeTe phase change material : Application to a frequency agile millimeter-waves patch antenna," in *12th EuCAP*, Apr. 2018.
- [8] C. Quando *et al.*, "Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators based on stepped-impedance stubs and different-length stubs," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2004.
- [9] E. Fourn *et al.*, "Bandwidth and central frequency control on tunable bandpass filter by using mems cantilevers," in *IEEE MTT-S IMS*, 2003.
- [10] D. M. Pozar, *Microwave Engineering, 4th Edition*. Wiley, 2011.