

Activation optique des matériaux à changement de phase pour la réalisation de filtres accordables en bande millimétrique

Areski Ghalem¹, Cyril Guines¹, Damien Passerieux¹, Jean-Christophe Orlianges¹, Laure Huitema¹, Aurelian Crunteanu¹

¹ XLIM, UMR 7252, CNRS/Univ. Limoges, 123 Av. Albert Thomas, F-87060, Limoges, France
aurelian.crunteanu@xlim.fr

Résumé – Nous présentons l'activation optique des matériaux à changement de phase (PCM) permettant un changement d'état amorphe/cristallin (isolant/métallique) de manière bistable et parfaitement réversible. L'application d'une courte impulsion laser (~30 ns), permet le passage du matériau GeTe d'un état isolant à haute résistivité vers un état cristallin et conducteur. Nous proposons de valider ce principe d'activation optique et l'intégration du matériau dans des fonctions hyperfréquences en réalisant un filtre passe-bande en bande millimétrique dont la réponse fréquentielle peut être modifiée en fonction de l'état du matériau GeTe.

1. Introduction

La complexité croissante des chaînes d'émission/réception haute fréquence, associée à l'ajout de nouvelles bandes de fréquences, impose l'émergence de nouvelles topologies reconfigurables intégrées au sein même de la chaîne de télécommunication (antennes, déphaseurs, filtres, amplificateurs, etc) [1]. La plupart des solutions couramment utilisées reposent sur l'intégration des éléments accordables localisés au sein d'une fonction RF spécifique et sont basées généralement sur des dispositifs de type semi-conducteurs, capacités ferroélectriques ou des dispositifs RF-MEMS [2-6]. Récemment, il a été démontré que des commutateurs RF intégrant des matériaux à changement de phase (PCM) présentent un potentiel extrêmement élevé pour la réalisation de dispositifs RF reconfigurables. En effet, des matériaux tels que le GeTe ou le Ge₂Sb₂Te₅ peuvent être commutés électriquement ou optiquement de manière bistable (en utilisant de courtes impulsions de courant ou laser) entre un état amorphe (isolant) et un état cristallin (conducteur) [7-8]. Outre la bi-stabilité du dispositif, qui constitue un avantage clé de la technologie basée sur les PCM (le commutateur ne nécessite pas d'énergie permanente pour être maintenu dans un état défini, OFF ou ON), les commutateurs RF-PCM présentent de très faibles résistances à l'état passant R_{ON}, un contraste de résistance élevé entre les deux états ainsi qu'une isolation élevée à l'état bloqué sur une très large gamme de fréquence. Par ailleurs, les PCM peuvent également être commutés optiquement entre leurs différents états [9]. Dans ce cas, l'implémentation d'une activation optique utilisant de courtes impulsions laser permet d'éviter un processus de fabrication assez

complexe nécessaire à l'activation électrique, en diminuant de surcroît les temps de commutation [10].

Nous présentons ici le contrôle optique du GeTe à l'aide d'impulsions laser UV très brèves ainsi que l'intégration du matériau en tant qu'élément agile pour la réalisation d'un dispositif de filtrage accordable dans la gamme des fréquences millimétriques.

2. Contrôle optique des films de GeTe et des dispositifs de commutation RF associés

Les expériences de commutation optique ont été effectuées sur des couches minces de GeTe d'épaisseurs comprises entre 200 nm et 1 µm fabriquées par pulvérisation magnétron à partir d'une cible de GeTe (composition 50:50) sur des substrats de saphir type c de 20x 20 mm². Les films de GeTe ainsi obtenus sont amorphes, avec des valeurs de conductivité de 1-2 S/ m, mais peuvent être amenés jusqu'à leur état cristallin (ayant des valeurs de conductivité de ~ 3x10⁵ S/ m) en les chauffant directement (à l'aide d'un élément chauffant ou un four) à des températures supérieures à 250° C. La Figure 1 montre l'évolution typique de la résistance d'un film de GeTe d'une épaisseur de 1 µm qui est soumis à un cycle de chauffage/ refroidissement (5° C/ min) à travers la température de changement de phase (environ 200 ° C).

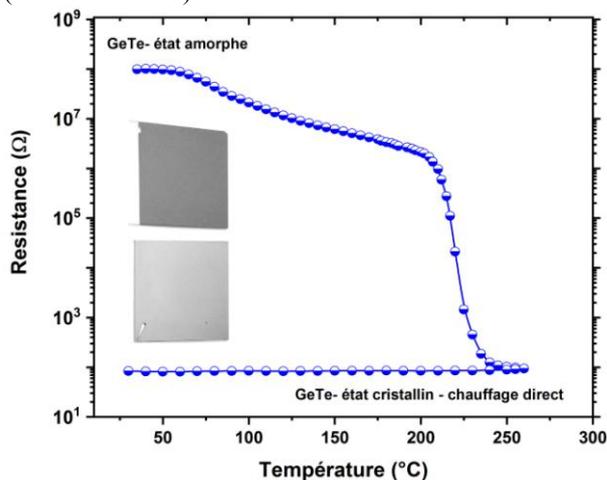


Figure 1. Variation de la résistance d'une couche de GeTe (1 µm d'épaisseur sur un substrat de saphir 20x20 mm²), entre l'état amorphe et l'état cristallin lors du chauffage direct. Les images insérées

montrent le changement de réflectivité du matériau entre les phases amorphes et cristallines.

Différents tests de changement de phase par voie optique ont été réalisés en irradiant directement les couches minces de GeTe ainsi obtenues avec des impulsions laser (de 30 ns de durée) issues d'un laser à excimère KrF (Coherent Compex Pro110) fonctionnant à une longueur d'onde de 248 nm. Comme indiqué schématiquement sur la Figure 2, la transition de la phase amorphe à la phase cristalline des films de GeTe nécessite une seule impulsion laser (LEP ou impulsion de basse énergie, courbe bleu) avec une fluence relativement faible (énergie d'impulsion de 85-95 mJ/cm²) mais suffisante pour chauffer le GeTe au-dessus de sa température de cristallisation (T_{crist}). Le matériau cristallisé peut être ramené à sa phase amorphe toujours par irradiation laser au moyen d'un pulse ayant une fluence énergétique beaucoup plus élevée (HEP-impulsion de haute énergie, courbe rouge), supérieure à 185 mJ/cm², permettant d'augmenter localement la température de la couche au-dessus de sa température de fusion (T_{melt}) et de refroidir ensuite rapidement le matériau dans un état avec un arrangement structural désordonné, de type amorphe.

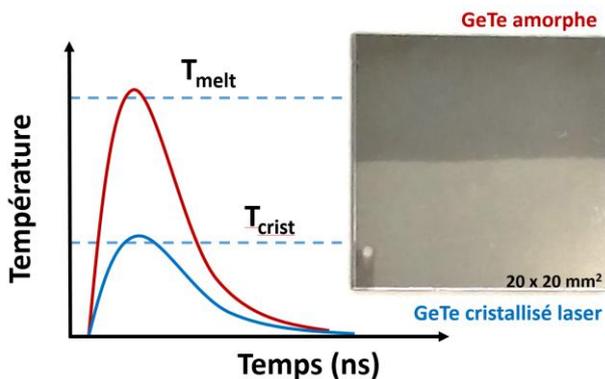


Figure 2. Principe de l'activation optique de couches de GeTe utilisant des impulsions laser UV. L'encadré montre un film de GeTe déposé sur un substrat de saphir de 20 x 20 mm² commuté sur moitié de sa surface à l'état amorphe et sur l'autre moitié à l'état cristallin.

Afin d'évaluer ses performances de commutation haute fréquence par l'activation optique du changement de phase, le matériau GeTe a été ensuite intégré au sein de structures test de type guides d'ondes coplanaires RF (CPW). Dans ce dispositif, les deux parties discontinues de la ligne de signal CPW sont reliées par un motif de GeTe de dimensions comprises entre 3 et 60 μm . Les structures ont été réalisées au moyen d'un procédé de micro fabrication conventionnel, avec les motifs de GeTe initialement à l'état amorphe. La Figure 3 décrit l'évolution des pertes d'insertion du composant (état ON, courbe bleu- paramètre S_{21}) après cristallisation du motif de GeTe soumis à une seule impulsion laser possédant une fluence relativement faible (énergie d'impulsion de 85 -95 mJ / cm²). Le motif PCM est ensuite irradié avec une impulsion ayant une fluence beaucoup plus élevée,

(supérieure à 185 mJ /cm²) permettant ainsi au dispositif RF de passer à l'état bloqué (OFF, GeTe à l'état amorphe). L'isolation mesurée est supérieure à 20 dB jusqu'à 60 GHz (courbe rouge sur la Figure 3). Les performances de ces dispositifs à contrôle optique peuvent être encore grandement améliorées en choisissant des dimensions appropriées du motif de GeTe permettant ainsi d'atteindre des valeurs de figure de mérite ($\text{FoM} = R_{\text{ON}} \times C_{\text{OFF}}$) allant de 25 à 45 fs, comparable aux commutateurs à commande PCM activés électriquement et supérieures aux performances des dispositifs à semi-conducteurs dans ce domaine de fréquences.

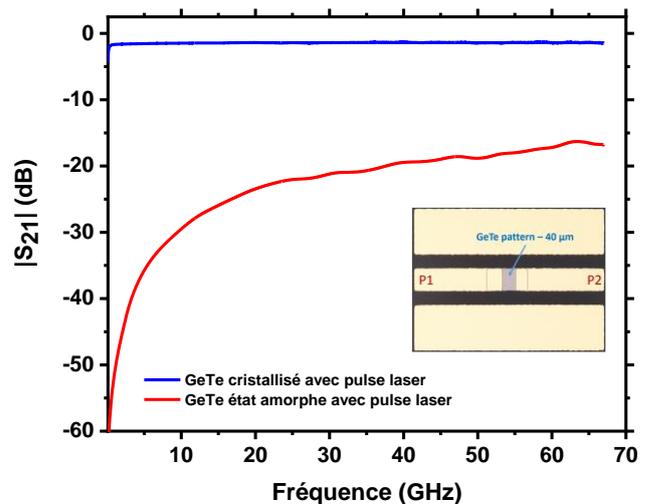


Figure 3. Paramètres S mesurés (isolation - état OFF, courbe rouge et pertes d'insertion -état ON, courbe bleue) pour un commutateur RF-PCM intégrant un motif GeTe de 40 μm de long commuté de manière répétée en utilisant des impulsions laser LEP-HEP alternées, entre l'état amorphe et l'état cristallin

3. Reconfiguration optique d'un filtre accordable dans le domaine millimétrique

Le contrôle optique des propriétés électriques du GeTe a été utilisé par la suite pour concevoir un filtre accordable en fréquence fonctionnant dans le domaine millimétrique. La topologie du dispositif réalisé se présente sous la forme d'un filtre du 3^{ème} ordre composé de sections de lignes couplées de demi longueur d'onde (Figure 4).

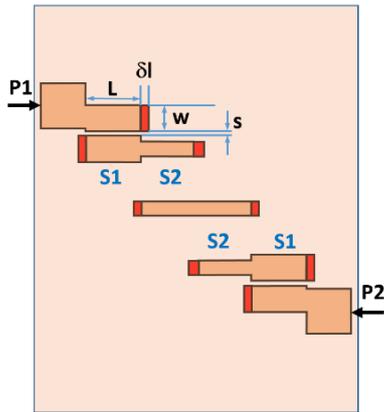


Figure 4 Topologie du filtre accordable à lignes couplées intégrant les motifs PCM représentés en rouge (P1 et P2 sont les ports d'entrée-sortie, S1 et S2 sont les différentes sections couplées du filtre)).

Le filtre micro ruban a été conçu en utilisant un logiciel de simulation électromagnétique par éléments finis (Ansys Electromagnetics) sur un substrat de saphir ($\epsilon_r = 10$) d'épaisseur $450 \mu\text{m}$. Les dimensions optimisées des résonateurs à lignes couplées (largeurs, espacement entre les résonateurs et les longueurs) pour chacune des sections symétriques S1-S2 du filtre sont résumées dans le tableau ci-dessous.

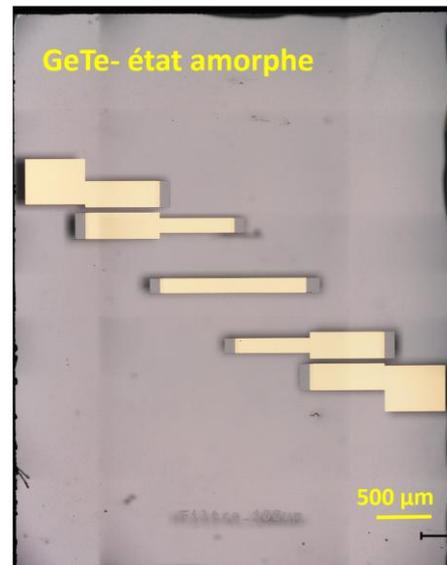
	Section S1	Section S2
Largeur - w (μm)	259	145
Espacement- S (μm)	50	445
Longueur- L (μm)	725	726

Tableau 1. Dimensions des sections de lignes couplées du filtre présenté sur la Figure 4

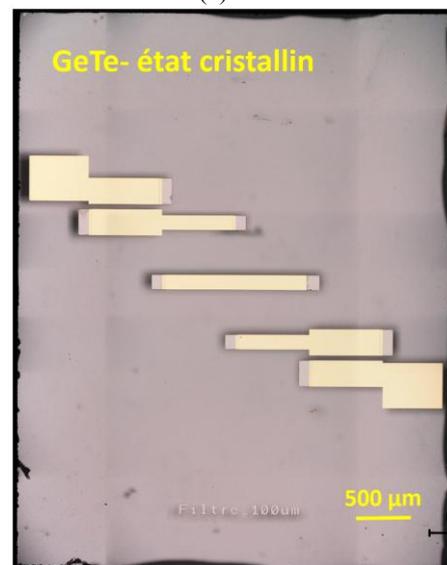
Comme indiqué sur la Figure 4, l'agilité fréquentielle du filtre passe-bande est réalisée par l'intégration d'un motif de GeTe de longueur $\delta l = 200 \mu\text{m}$ placé à l'extrémité des résonateurs. Ces films de GeTe à l'état amorphe sont simulés en prenant des valeurs de conductivité de l'ordre de 1 S/m . Lors de la cristallisation, ces valeurs de conductivité sont autour de $3 \times 10^5 \text{ S/m}$. Ces valeurs ont été déduites des travaux présentés précédemment et sont maintenant utilisées pour concevoir et démontrer un filtre accordable en fréquence dans le domaine des ondes millimétriques.

Le filtre a été réalisé sur le substrat de saphir en déposant une couche de GeTe de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur par pulvérisation cathodique magnétron, suivie par sa structuration par gravure sèche et photolithographie. Les résonateurs métalliques ont été fabriqués à l'aide d'un procédé de type lift-off par évaporation par faisceau d'électrons de couches métalliques de Ti/ Au ($10/1000 \text{ nm}$). Une couche métallique similaire de Ti/ Au a été utilisée comme plan de masse de l'autre côté du substrat. Les images du dispositif fabriqué sont représentées sur les Figures 5a, b.

À l'état amorphe (Figure 5a), les motifs de GeTe ont un comportement de type isolant et ne modifient pas la réponse du filtre.



(a)



(b)

Figure 5. Images du filtre fabriqué à base de PCM à l'état amorphe (a) et à l'issue de la cristallisation des motifs de GeTe par voie laser (b)

L'application d'une impulsion laser spécifique permet une transformation locale des motifs de GeTe vers leur état conducteur cristallin (Figure 5b) et modifie ainsi les longueurs effectives de chaque résonateur, produisant ainsi un décalage fréquentiel de la réponse globale du filtre.

Les performances des filtres ont été évaluées dans la gamme de fréquences 20-40 GHz en utilisant un analyseur de réseau de type N5247A PNA-X (Agilent). Les résultats de mesure sont présentés sur la Figure 6 et montrent des performances similaires ou très proches des simulations électromagnétiques.

La réponse globale du filtre dans le cas des motifs de GeTe à l'état amorphe est présentée sur les courbes noires des Figures 6a (paramètres de transmission S_{21}) et 6b (paramètres de réflexion S_{11}). Dans ce cas, le filtre présente des pertes d'insertion de l'ordre de 2.5dB ainsi qu'un coefficient de réflexion d'environ 15 dB à la fréquence centrale (33 GHz).

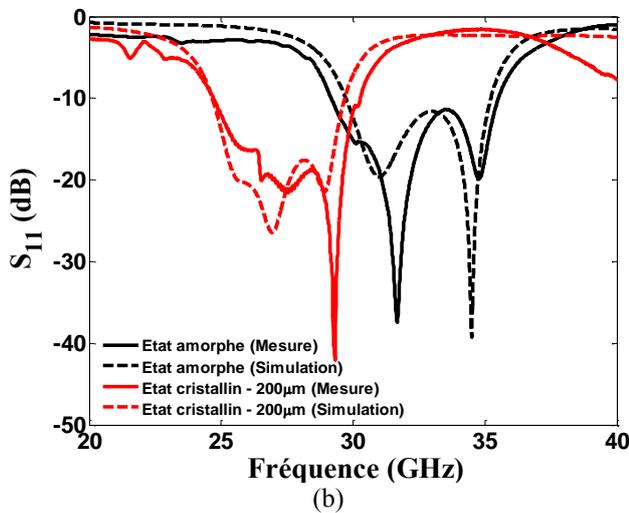
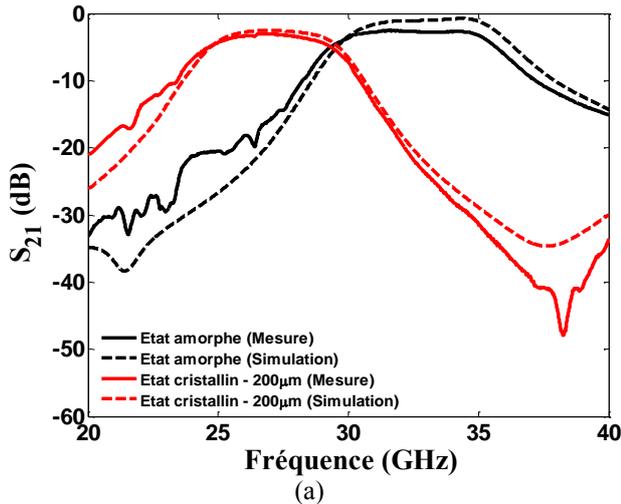


Figure 7. Comparaison simulation/mesure des pertes d'insertions (5a) ainsi que du coefficient de réflexion (5b) d'un filtre intégrant des motifs de GeTe de 200 μm à l'état amorphe et cristallin.

Suite à la transformation optique des motifs GeTe de 200 μm à état cristallin/ conducteur (Figure 5b), la fréquence centrale du filtre est décalée de manière significative, vers 27 GHz, avec une largeur de bande à 3 dB de 7 GHz et des pertes d'insertion inférieures à 3 dB (courbes rouges sur les Figures 6a et 6b). Il est intéressant de mentionner que les motifs de GeTe peuvent être partiellement ou entièrement cristallisés de manière réversible, à l'aide d'un schéma d'activation optique à position contrôlée et avec un spot laser de dimensions micrométriques. Ces motifs peuvent donc être utilisés comme des éléments agiles permettant le fonctionnement du filtre sur tout état intermédiaire entre les deux cas extrêmes (GeTe amorphe ou cristallisé sur toute la longueur) représentés sur les Figure 6a et 6b.

4. Conclusion

Nous avons utilisé l'activation optique réversible du matériau à changement de phase GeTe comme moyen de contrôle des états bistables de commutateurs de type RF-PCM avec de très bonnes performances sur une large

bande de fréquences, jusqu'à 67 GHz. Cette schéma de contrôle optique a été utilisée pour la conception et la démonstration de l'agilité fréquentielle d'un filtre passe-bande intégrant des matériaux à changement de phase et opérant dans le domaine millimétrique. Les résultats présentés ici peuvent être facilement étendus au contrôle optique en temps réel de nombreuses variétés de dispositifs haute fréquence (filtres, antennes, surfaces sélectives en fréquence etc).

5. Remerciements

Les auteurs remercient le soutien financier des projets MASTERS (H2020 M.Era-Net) et AROME (PEPS INSIS-DGA).

Références

- [1] Z.Pi, F.Khan "An introduction to millimeter-wave mobile broad-band systems" Communications Magazine, IEEE, vol. 49, pp. 101–107, 2011.
- [2] V. Alleva, A. Bettidi, A. Cetronio, W. Ciccognani, M. De Dominicis, M. Ferrari, E. Giovine, C. Lanzieri, E. Limiti, A. Megna, M. Peroni, and P. Romanini, "High power microstrip GaN-HEMT switches for microwave applications," Eur. Microw. Integr. Circuits Conf., Oct. 2008, 194–197.
- [3] R.Stefanini, M.Chatras, P.Blondy, G.M.Rebeiz, "Miniature MEMS Switches for RF Applications," IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol.20, no.6, pp.1324-1335, Dec. 2011.
- [4] A. Ghalem, L. Huitema, A. Crunteanu, M. Rammal, L. Trupina, L. Nedelcu, M.G. Banciu, P. Dutheil, C. Constantinescu, P. Marchet, F. Dumas-Bouchiat, C. Champeaux "Electrical transport properties and modeling of electrostrictive resonance phenomena in $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ thin films" J.Appl.Phys., vol. 120, 184101-1:9, 2016.
- [5] A.Ghalem, M.Rammal, L.Huitema, A. Crunteanu, V. Madrangeas, P.Dutheil, F.Dumas-Bouchiat, P. Marchet, C.Champeaux, L.Trupina, L.Nedelcu, M.G.Banciu "Ultra-High tunability of $\text{Ba}_{(2/3)}\text{Sr}_{(1/3)}\text{TiO}_3$ -based Capacitors under Low Electric Fields". IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Volume [26], pages 504-506, 2016.
- [6] K.Nadaud, F.Roubeau, A.Pothier, P.Blondy, L Zhang, R.Stefanini "Compact thin-film packaged RF-MEMS switched capacitors" IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., San Francisco, 2016.
- [7] N. El-Hinnawy, P. Borodulin, A. Ezis, C. Furrow, C. Padilla, M. King, E. Jones, B. Wagner, J. Paramesh, J. Bain, D. Nichols, R.M.Young, "Substrate agnostic monolithic integration of the inline phase-change switch technology" in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., San Francisco, CA, USA, pp. 1-4, 2016.
- [8] A.Mennai, A.Bessaudou, F.Cosset, C.Guines, P. Blondy, A.Crunteanu, "Bistable RF Switches Using $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ Phase Change Material", in 18th European Microwave Week, Paris, France, pp. 1-4, 2015.

- [9] L. Chau, J. G. Ho; X. Lan; G. Altvater; R. M. Young; N. El-Hinnawy; D. Nichols; J. Volakis; N. Ghalichechian, "Optically controlled GeTe phase change switch and its applications in reconfigurable antenna arrays", in Proc. SPIE. 9479, p. 947905, 2015.
- [10] A.Crunteanu, L.Huitema, J.-C Orlianges, C.Guines, D.Passerieux, H.Wong," Optical switching of GeTe phase change materials for high-frequency applications," IEEE MTT-S IMWS, Pavia, Italy, 20-22 Sept, 2017.