

# Actionnement optique de commutateurs RF à changement de phase GeTe : Comparaison des performances pour différentes tailles de GeTe

A. Naoui<sup>1,2,3</sup>, I. Charlet<sup>1</sup>, S. Guerber<sup>1</sup>, B. Charbonnier<sup>1</sup>, C. Dupré<sup>1</sup>, J. Lugo<sup>1</sup>, C. Héllion<sup>1</sup>, M. Allain<sup>1</sup>, F. Podevin<sup>2</sup>, E. Perret<sup>3</sup>, B. Reig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEA-LETI, Université Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France

<sup>2</sup>Grenoble INP-UGA, TIMA, F-38031 Grenoble, France

<sup>3</sup>Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, F-26000 Valence, France  
ayoub.naoui@cea.fr

**Résumé** — Cet article présente des commutateurs à base de GeTe pour des applications RF, commutant de manière réversible entre leurs états ON et OFF grâce à l'actionnement optique par irradiation. Contrairement à ce qui a été présenté jusqu'à présent, la transition est induite par des impulsions laser infrarouges, à 915 nm, ce qui est très encourageant pour l'intégration ultérieure de sources laser. Nos travaux ont révélé l'efficacité de PCM's larges et épais, permettant une commutation bi-stable à des fréquences élevées allant jusqu'à 40 GHz, avec un FoM de 31.5 fs correspondant à une conductivité du GeTe de  $1.85 \cdot 10^5$  S/m. En outre, des progrès significatifs par rapport à la littérature ont été réalisés en dépassant 30k cycles avec l'actionnement optique.

## 1. Introduction

Les matériaux à changement de phase (PCM) ont une longue histoire d'applications, traditionnellement utilisés dans les mémoires [1] et l'industrie du stockage optique [2]. Cependant, des développements récents ont mis en avant les chalcogénures comme candidats prometteurs pour une nouvelle génération de commutateurs radiofréquence (RF). Ces commutateurs RF à base de PCM, tels que le germanium-telluride (GeTe) ou le germanium-antimoine-telluride (GST), offrent des performances remarquables, notamment une tenue en puissance élevée, une faible  $R_{on}C_{off}$ , le statut de commutateurs non-volatiles et une consommation d'énergie réduite. Ils sont devenus essentiels dans le contexte des applications RF modernes [3], en particulier pour résoudre les problèmes liés aux radars à ondes millimétriques, aux réseaux 6G et aux communications à haute fréquence [4][5][6].

Néanmoins, l'activation de ces commutateurs RF à base de PCM présente des défis importants. Les méthodes conventionnelles reposent sur un chauffage électrique indirect par effet Joule, tel que les micro-chauffeurs [7], qui peuvent induire des capacités parasites limitant les performances RF, mais aussi une distribution non uniforme de la température sur l'élément chauffant et sur le PCM [8]. Ce deuxième point peut également avoir un impact négatif sur les performances RF, car toute cristallisation ou amor-

phisation incomplète du PCM augmente soit le  $R_{on}$ , soit le  $C_{off}$ . D'autres solutions, telles que l'actionnement optique, ont été envisagées [9][10][11], mais elles ont été entravées par l'utilisation de lasers UV coûteux qui ne sont pas compatibles avec la technologie photonique CMOS.

Dans ce contexte, ce travail présente les performances d'actionnement optique de commutateurs RF basés sur du GeTe de différentes tailles à une longueur d'onde IR de 915 nm. La première partie décrit les conditions d'actionnement optique des différentes tailles de GeTe et leurs performances en courant continu (DC). La deuxième partie étudie leurs performances RF. La troisième partie est dédiée aux tests d'endurance. La dernière partie est consacrée à une comparaison avec l'état de l'art.

## 2. Actionnement optique du matériau GeTe

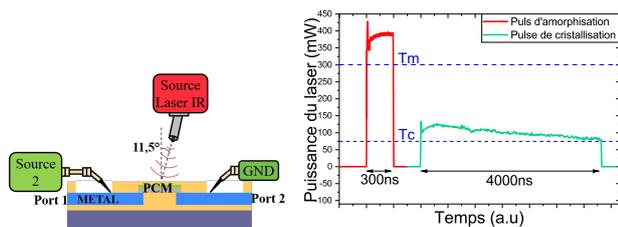
### 2.a. Actionnement optique

Dans ce travail, des commutateurs RF en série intégrés sur un guide d'ondes coplanaire (CPW) sont étudiés, en utilisant des GeTe de différentes largeurs, longueurs et épaisseurs (voir Tableau 1 pour un résumé). L'actionnement optique est réalisé par irradiation directe à travers une fibre optique connectée à une source laser pulsée fonctionnant à une longueur d'onde de 915 nm. La fibre est placée à une distance de 10  $\mu\text{m}$  au-dessus de l'élément PCM avec une inclinaison de 11,5° par rapport à la normale de la surface, comme le montre la Figure 1(a). Deux types de fibres optiques ont été utilisées avec des diamètres différents pour couvrir les différentes tailles de commutateurs (Tableau 1). Les micropositionneurs d'une station de mesure automatique permettent d'aligner la fibre avec le PCM au niveau du wafer, ce qui permet d'apporter la source d'excitation de manière modulable et très localisée sur les commutateurs PCM. Ces impulsions lumineuses sont absorbées par le matériau, ce qui provoque un échauffement localisé dans le PCM lui-même. L'augmentation de la température et le refroidissement qui s'ensuit induisent une transition de phase dans le PCM, modifiant ses propriétés électriques, en particulier sa résistance.

Les dispositifs sont actionnés par deux types d'impulsions optiques, comme le montre la Figure 1(b). Une impulsion courte (300 ns) est utilisée pour chauffer le GeTe

**TABLEAU 1. Différents dispositifs de GeTe étudiés.**

Nom	PCM longueur	PCM largeur	PCM épaisseur	Fibre optique
DUT15_1	1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	100 nm	Hi 780 $\varnothing$ 5 $\mu\text{m}$
DUT25_1	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	100 nm	Hi 780 $\varnothing$ 5 $\mu\text{m}$
DUT19_1	1 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$	100 nm	SMF 28 $\varnothing$ 10 $\mu\text{m}$
DUT29_1	2 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$	100 nm	SMF 28 $\varnothing$ 10 $\mu\text{m}$
DUT15_2	1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	200 nm	Hi 780 $\varnothing$ 5 $\mu\text{m}$
DUT25_2	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	200 nm	Hi 780 $\varnothing$ 5 $\mu\text{m}$

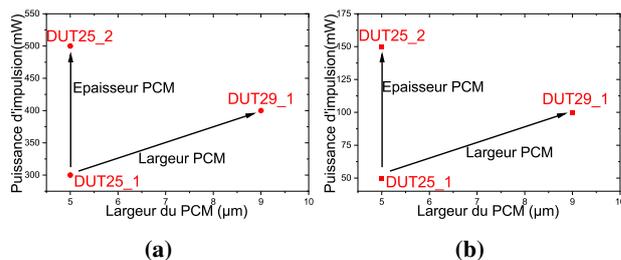


**FIGURE 1. (a) Montage expérimental pour l'excitation optique ; (b) Exemple d'impulsions laser utilisées.**

au-dessus de sa température de fusion ( $T_m \sim 973$  K). Immédiatement après, une trempe thermique gèle les atomes dans un état amorphe (état OFF). La cristallisation est obtenue en appliquant une impulsion d'une durée d'environ 4  $\mu\text{s}$  qui chauffe le PCM au-dessus de sa température de re-cristallisation ( $T_c \sim 573$  K), à laquelle la croissance et la nucléation des grains de cristal sont activées, modifiant la résistivité du PCM de l'état amorphe (haute résistivité) à l'état cristallin (faible résistivité). Pour extraire la résistance DC du PCM, une technique à 2 sondes est utilisée en appliquant une impulsion de 10 mV avec une source Keithley B2902A, après chaque activation optique.

### 2.b. Performances DC en fonction de la géométrie

La Figure 2(a) montre la puissance minimale requise pour amorphiser DUT25\_1, DUT29\_1 et DUT25\_2 lorsque des impulsions optiques croissantes avec des pas de 50 mW ont été appliquées jusqu'à ce que la commutation puisse être atteinte. Lorsque les longueurs et les épaisseurs sont égales, il semble intuitif qu'un commutateur deux fois plus large nécessite deux fois plus de puissance. Ce n'est pas exactement le cas dans la Figure 2(a) lorsque l'on considère un rapport de surface entre le PCM et la fibre de 51% pour DUT25\_1 conduisant à 153 mW de puissance reçue si le dispositif était uniformément éclairé et de 23% pour DUT29\_1 conduisant à 92 mW de puissance reçue si le dispositif était uniformément éclairé. La raison est la suivante : la plus petite largeur est éclairée par une fibre de 5  $\mu\text{m}$  dont le profil est presque gaussien, ce qui signifie que la lumière est localisée au milieu. Pour garantir une température suffisante sur les bords de l'échantillon, il faut donc une puissance laser plus élevée. Ceci n'est pas nécessaire avec une fibre de 10  $\mu\text{m}$  dont le profil est presque multimode à 915 nm. En ce qui

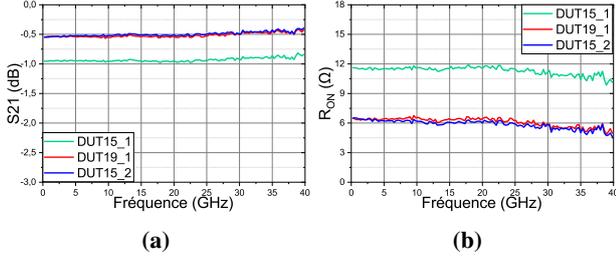


**FIGURE 2. Puissance requise pour différentes largeurs et épaisseurs de commutateurs PCM : (a) pour l'amorphisation ; (b) pour la cristallisation.**

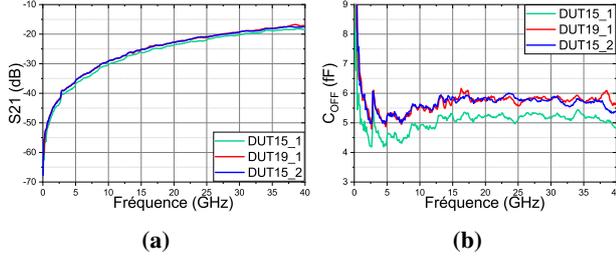
concerne l'épaisseur, théoriquement, les puissances nécessaires pour commuter sont proportionnelles au volume de GeTe. En particulier, DUT29\_1 et DUT25\_2 ont le même volume de GeTe mais des puissances plus élevées sont nécessaires pour commuter DUT25\_2 (Figure 2(a)). Cela peut s'expliquer par le fait que l'absorption optique suit une décroissance exponentielle avec l'épaisseur. La Figure 2(b) conduit à des conclusions similaires pour la cristallisation.

## 3. Performances RF des switches PCM

Pour évaluer les performances RF de l'actionnement optique, des mesures de paramètres S ont été effectuées sur des dispositifs à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel Keysight PNAX à 2 ports. L'étalonnage a été effectué dans la gamme de fréquences de 40 MHz à 40 GHz. Dans un premier temps, l'analyse se concentre sur des commutateurs à l'état ON (PCM cristallisé optiquement). La Figure 3(a) illustre les pertes d'insertion mesurées après deembedding, pour des commutateurs de différentes largeurs et épaisseurs. Les observations révèlent que les pertes d'insertion sont réduites de moitié lorsque l'on double la section transversale du PCM. Ces résultats sont ensuite utilisés pour extraire la résistance  $R_{on}$  jusqu'à 40 GHz, comme le montre la Figure 3(b). Cette représentation met en évidence le passage de la résistance de 12  $\Omega$  à 6  $\Omega$ , lorsque la section transversale du commutateur PCM est doublée tout en conservant la même longueur de 1  $\mu\text{m}$ . Ce résultat confirme les calculs théoriques fournis dans le tableau 2, soulignant les avantages des PCM plus larges et plus épais. La Figure 4(a) montre les paramètres S à l'état OFF. Dans ce cas, les dispositifs sont actionnés optiquement par une courte impulsion pour obtenir l'état amorphe, qui est bien décrit par une isolation supérieure à 19 dB jusqu'à 40 GHz. Les capacités à l'état OFF sont extraites dans la Figure 4(b). Comme prévu, les dispositifs plus larges et plus épais ont des capacités légèrement plus élevées (entre 0.1 et 0.8 fF de plus) puisque la zone de couplage est doublée. Cela conduit à une figure de mérite (FoM) de 31.5 fs avec une fréquence de coupure de 5 THz sur le dispositif DUT15\_2 au lieu de 57.9 fs et 2.75 THz sur le dispositif DUT15\_1.



**FIGURE 3. Performances RF du GeTe cristallin pour différentes tailles : (a) Perte d'insertion ; (b) Résistance.**



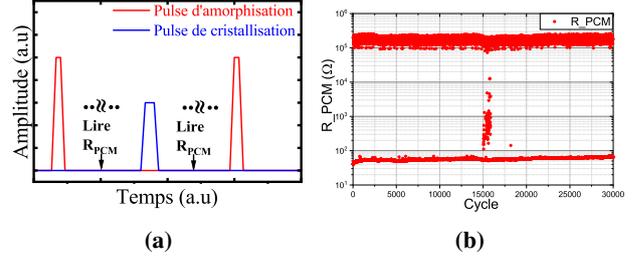
**FIGURE 4. Performances RF du GeTe amorphe pour différentes tailles : (a) isolation ; (b) Capacité.**

#### 4. Cyclage avec actionnement optique

Après avoir déterminé les conditions de l'actionnement optique dans la première partie, l'endurance du commutateur a été étudié sur le dispositif DUT25\_2. En utilisant la configuration de la Figure 1(a), avec un taux de répétition de 4 Hz comme dans la Figure 5(a), la résistance DC a été mesurée sur plusieurs heures pour les 2 états après chaque transition, comme le montre la Figure 5(b). La résistance DC est représentée en fonction du nombre de cycles, et nous constatons que 30k cycles sont atteints avec un rapport  $R_{off}/R_{on} > 10^4$ . En outre, les valeurs de résistance DC à l'état cristalline et amorphe restent stables tout au long des mesures, de sorte que le cyclage a été achevé avec succès. Néanmoins, certaines valeurs de résistance DC dans l'état OFF peuvent être observées en dessous de  $10^5 \Omega$ , ce qui signifie que le GeTe n'est pas en fait dans l'état amorphe comme prévu. Plus précisément, 30 cycles d'amorphisation ratées ont été comptés. Ces échecs d'amorphisation du PCM sont dus à des micro-vibrations des positionneurs qui ont désaligné temporairement la fibre, entraînant une amorphisation partielle du PCM. Malgré cette limitation des mesures, il s'agit de la première démonstration d'après nos connaissances d'un commutateur PCM actionné optiquement avec autant de cycles, alors qu'une dizaine de cycles seulement ont été réalisés jusqu'à présent [9][11].

#### 5. Discussion

Tableau 2 compare l'endurance du cycle de commutation et le FoM de notre travail avec ceux publiés dans la littérature en considérant à la fois les excitations électriques et optiques. En ce qui concerne la partie optique, des performances significatives peuvent être observées en



**FIGURE 5. (a) Schéma de la synchronisation de la mesure du cyclage ; (b) Cycles de commutation.**

termes de cycles de commutation. Comme indiqué précédemment, c'est la première fois qu'un nombre aussi élevé de cycles est atteint avec une excitation optique. Un FoM de 31.5 fs est obtenu, soit seulement 5.5 fs de plus que dans [10] alors que le dispositif DUT15\_2 est 3 fois plus petit. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le commutateur dans [10] n'est pas totalement cristallisé, contrairement à ce que nous avons obtenu puisque nos résultats sont en accord avec les calculs théoriques. Pour conforter cette hypothèse,  $R_{on}$  mesuré dans [10] est égal à  $3 \Omega$ , alors que leur géométrie et leurs propriétés des matériaux suggèrent  $1 \Omega$ , si le PCM est totalement cristallisé. De plus, les longueurs d'onde optiques utilisées dans la littérature présentent des défis particuliers en photonique intégrée, tels que le choix des matériaux, la complexité et les coûts de fabrication, limitant ainsi leur développement, ce qui n'est pas le cas pour 915 nm. En termes de comparaison avec l'excitation électrique, nous avons obtenu moins de cycles que [13][15][16]. Ceci est dû au désalignement de la fibre après des heures de cyclage puisque nous n'avons pas observé de dégradation de notre PCM. Pour établir une comparaison en termes de FoM, nous pouvons constater que nos dispositifs présentent le meilleur rapport FoM-surface. Ceci peut s'expliquer par l'excellent contrôle de la zone cristalline lors de l'excitation optique, ainsi que par l'absence de tout élément chauffant qui entraîne des capacités parasites, et rend  $C_{off}$  plus grande.

#### 6. Conclusion et perspectives

L'actionnement optique d'un commutateur RF à base de GeTe avec différentes géométries est étudié à 915 nm. Les conditions de commutation pour les états ON et OFF sont trouvées. Le test d'endurance est démontré pour au moins 30k cycles de commutation, ce qui est le taux optique le plus élevé rapporté jusqu'à présent. Les mesures de petits signaux montrent que les FoM sont plus faibles, grâce à une résistance plus faible à l'état ON, ce qui confirme l'avantage d'utiliser des dispositifs plus larges et plus épais, actionnés par irradiation optique directe. Ces travaux ouvrent la voie à la réalisation de commutateurs RF à actionnement optique de haute performance qui bénéficieront davantage de la photonique intégrée CMOS. En règle générale, la photonique intégrée à 915 nm repose sur un processus de base standard avec des guides d'ondes optiques en AlN/silice ou d'autres matériaux. Dans ce contexte, la co-intégration des commutateurs RF PCM et

**TABEAU 2. Comparaison des performances avec l'état de l'art.**

Réf	Excitation	Taille PCM	PCM épai	$R_{ON\_meas}$ ( $\Omega$ )	$R_{ON\_cal}$ ( $\Omega$ )	$C_{OFF}$ (fF)	FoM meas	FoM meas . surf (fs. $\mu\text{m}^2$ )	Cyclage
[9]	Optique	2x5 $\mu\text{m}^2$	100 nm	23	-	13.79	-	-	10
[10]	Optique 248nm	3x50 $\mu\text{m}^2$	200 nm	3	1.03*	8.8	26	260	-
[11]	Optique 248nm	1.5x0.5 $\text{mm}^2$	500 nm	-	27.3*	-	-	-	10
[5]	Electrique	-x10 $\mu\text{m}^2$	- nm	2.3	-	2.7	6.2	-	1B
[12]	Electrique	2x10 $\mu\text{m}^2$	75 nm	4.5	-	35	149	111.75	-
[13]	Electrique	5x44 $\mu\text{m}^2$	150 nm	11.5	-	3.3	37	244.2	300k
[14]	Electrique	3x- $\mu\text{m}^2$	- nm	4.5	-	5.6	25.2	-	10M
[15]	Electrique	0.9x30 $\mu\text{m}^2$	- nm	0.9	-	14.1	12.7	-	-
Ce travail	Optique 915nm	1x9 $\mu\text{m}^2$	100 nm	6.11	6*   3.83 <sup>+</sup>	5.9	36	32.4	> 30k
Ce travail	Optique 915nm	1x5 $\mu\text{m}^2$	200 nm	6	5.4*   3.45 <sup>+</sup>	5.25	31.5	31.5	> 30k

\* Calculées sur la base de la conductivité mentionnée dans l'article associé.

+ Calculées sur la base de la conductivité de [10] égale à  $2,9 \cdot 10^5$  S/m.

de la photonique passive intégrée représente une nouvelle phase dans l'actionnement optique. Au final, la réalisation d'un circuit d'actionnement optique entièrement intégré peut être envisagée à l'aide de lasers hybrides intégrés [16].

## Références

- [1] A. Fantini *et al.*, "Comparative Assessment of GST and GeTe Materials for Application to Embedded Phase-Change Memory Devices," in *IEEE International Memory Workshop*, 2009.
- [2] S. R. Ovshinsky *et al.*, "Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures," in *Phys. Rev. Lett.*, 1968.
- [3] A. Naoui *et al.*, "Indirect Electrical-Control Through Heating of a GeTe Phase Change Switch and Its Application to Reflexion Type Phase Shifting," in *International Microwave and Antenna Symposium (IMAS)*, 2023.
- [4] T. Singh *et al.*, "Miniaturized DC-60 GHz RF PCM GeTe-Based Monolithically Integrated Redundancy Switch Matrix Using T-Type Switching Unit Cells," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019.
- [5] N. El-Hinnawy *et al.*, "A 25 THz  $F_{CO}$  (6.3 fs  $R_{ON} * C_{OFF}$ ) Phase-Change Material RF Switch Fabricated in a High Volume Manufacturing Environment with Demonstrated Cycling > 1 Billion Times," in *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2020.
- [6] N. Wainstein *et al.*, "Radiofrequency Switches Based on Emerging Resistive Memory Technologies - A Survey," in *Proceedings of the IEEE*, 2020.
- [7] S. Gharbieh *et al.*, "Phase Change Material Based Reconfigurable Transmitarray : a Feasibility Study," in *16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2022.
- [8] I. Charlet *et al.*, "RF Performance of Large Germanium Telluride Switches for Power Application," in *18th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, 2023.
- [9] L. Chau *et al.*, "Optically Controlled Gete Phase Change Switch And Its Applications in Reconfigurable Antenna Arrays," in *SPIE Defense and Security*, 2016.
- [10] A. Crunteanu *et al.*, "Optical Switching of Gete Phase Change Materials for High-Frequency Applications," in *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 2017.
- [11] M. Pinaud *et al.*, "Terahertz Devices Using the Optical Activation of GeTe Phase Change Materials : Toward Fully Reconfigurable Functionalities," in *ACS Photonics*, 2021.
- [12] N. El-Hinnawy *et al.*, "A Four-Terminal, Inline, Chalcogenide Phase-Change RF Switch Using an Independent Resistive Heater for Thermal Actuation," in *IEEE Electron Device Letters*, 2013.
- [13] J.-S. Moon *et al.*, "Phase-change RF switches with robust switching cycle endurance," in *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2018.
- [14] J.-S. . Moon *et al.*, "5 THz Figure-of-Merit Reliable Phase-change RF Switches for Millimeter-wave Applications," in *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, 2018.
- [15] N. El-Hinnawy *et al.*, "12.5 THz Fco GeTe Inline Phase-Change Switch Technology for Reconfigurable RF and Switching Applications," in *2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2014.
- [16] A. Marinins *et al.*, "Wafer-Scale Hybrid Integration of InP DFB Lasers on Si Photonics by Flip-Chip Bonding With sub-300 nm Alignment Precision," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2023.