



HAL
open science

Optimisation de la trempe et amélioration de la fiabilité de commutateurs à matériaux à changement de phase

Corentin Mercier, Bruno Reig, Stéphane Monfray, Emmanuel Dubois, Alain Fleury, Frédéric Giancesello, Vincent Puyal, Ismaël Charlet, Jose Lugo-Alvarez, J.F. Robillard

► To cite this version:

Corentin Mercier, Bruno Reig, Stéphane Monfray, Emmanuel Dubois, Alain Fleury, et al.. Optimisation de la trempe et amélioration de la fiabilité de commutateurs à matériaux à changement de phase. JNM2024 - 23ème Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan les-Pins, France. hal-04618653

HAL Id: hal-04618653

<https://hal.science/hal-04618653>

Submitted on 20 Jun 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.

Optimisation de la trempe et amélioration de la fiabilité de commutateurs à matériaux à changement de phase

C. Mercier^{1,2,3}, B. Reig³, S. Monfray², E. Dubois¹, A. Fleury², F. Giancesello², V. Puyal³, I. Charlet³, J. Lugo-Alvarez³, J.-F. Robillard¹

¹ Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Junia, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN – Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, F-59000 Lille, France

² STMicroelectronics, 850 Rue Jean Monnet, 38920 Crolles

³CEA Leti, Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France
corentin.mercier@st.com

Résumé – Ce papier présente deux méthodes pour optimiser la fiabilité et le comportement en fusion / trempe des matériaux à changement de phases (PCM) utilisés pour réaliser des commutateurs radiofréquences (RF). Des simulations électrothermiques par éléments finis montrent les bénéfices de l'ajout d'une couche de diffusion de la chaleur en nitrure d'aluminium (AlN) placée au-dessus du heater ainsi que du rapprochement entre le substrat en silicium et la couche PCM. Nous détaillons comment leur influence permet de réduire significativement le temps de refroidissement du matériau après sa fusion. Ce résultat permet d'envisager la réalisation de commutateurs à base de GeTe avec des longueurs de canal RF supérieures à 4 μ m pour des tenues en puissance supérieures à 36 dBm dans l'état OFF.

1. Introduction

Ces dernières années, l'apparition de la 5G a encore fait apparaître de nouveaux besoins liés à la transmission de signaux. Dans ce domaine, la mise à niveau des performances des commutateurs RF est essentielle afin que les antennes puissent s'échanger des signaux de hautes fréquences le plus efficacement possible tout en limitant un maximum l'altération de ces derniers.

A cet effet, l'usage des matériaux à changement de phase (PCM) se présente comme une nouvelle alternative dans le domaine de la transmission de signaux. Déjà utilisée dans d'autres applications pour la photonique [1] ou encore les mémoires [2], cette technologie est ici exploitée pour la réalisation de commutateurs RF et pour sa facilité d'intégration dans le BEOL des composants CMOS, sa promesse de faibles pertes d'insertion et sa fiabilité [3].

Les commutateurs PCM sont constitués d'un matériau à changement de phase reliant deux parties d'une ligne de transmission RF. Ce matériau, ici du Tellurure de Germanium (GeTe), présente une structure modifiable par l'intermédiaire d'un apport de chaleur.

Cette chaleur lui permet de cristalliser ou d'atteindre sa température de fusion en vue d'une amorphisation. En parallèle, le coût en énergie et la chauffe des autres couches doivent être limités autant que possible. Mais dans le cas de l'amorphisation, il faut également que cette chaleur puisse s'évacuer le plus rapidement possible afin

d'empêcher le PCM de recristalliser et lui permettre ainsi de passer à l'état amorphe.

A ces objectifs thermiques viennent s'ajouter des attentes en termes de performances RF. Le signal doit pouvoir passer avec le moins de pertes quand le PCM est passant (état ON) et être isolé le plus efficacement quand le PCM est bloquant (état OFF).

Par conséquent, la résistance à l'état ON (R_{ON}) et la capacité à l'état OFF (C_{OFF}) sont les deux facteurs à minimiser. La fréquence de coupure notée $f_{co}=1/(2\pi R_{ON} C_{OFF})$ permet de comparer les différents commutateurs existants au travers de ces deux paramètres. Cette valeur se doit d'être la plus élevée possible afin d'obtenir les meilleures performances. Une forte tenue en puissance est également de mise, rendant nécessaire l'étude de commutateurs de longueurs (L_{gapRF}) et de largeurs (W_{PCM}) de canal RF importantes

Dans ce papier, deux idées sont étudiées pour favoriser la distribution et l'évacuation de la chaleur dans le composant. La première idée consiste en l'ajout d'une couche d'AlN de 100nm d'épaisseur dans la partie haute du commutateur. Des simulations électro-thermiques réalisées à l'aide d'un logiciel d'analyse par éléments finis montrent l'impact de la dissipation thermique de cette couche sur la vitesse de refroidissement du PCM, la fiabilité du dispositif et les autres paramètres de performances.

La deuxième idée propose de rapprocher la couche de PCM du substrat. Une variation effectuée sur les épaisseurs du diélectrique et des contacts RF séparant le substrat du PCM fournissent des résultats encourageants quant à l'utilisation de cette solution pour accélérer la trempe.

2. Description technique du dispositif PCM

La composition du switch étudié, dont les étapes de fabrication technologique sont assez similaires à celles décrites dans [4], passe d'abord par un PCM, ici du GeTe de 100 nm d'épaisseur et de largeur 19 μ m, reliant deux électrodes RF (Métal 1) d'épaisseur 600 nm (Figure 1). L'épaisseur du diélectrique 1 séparant le Métal 1 du substrat en silicium est de 500 nm. Sur une chaufferette en tungstène, appelée heater, un pulse de tension est appliqué. Le heater agit comme une résistance et l'effet

joule permet de générer une chaleur qui sera ensuite transmise au PCM. La structure de ce dernier peut alors être modifiée de deux façons.

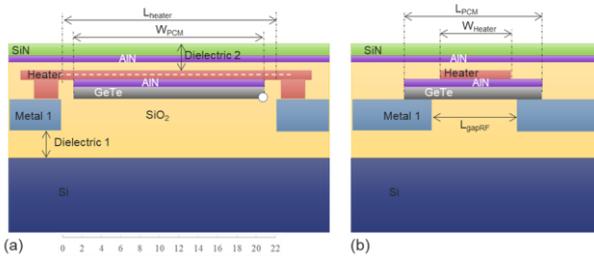


Figure 1. Représentation en coupe du commutateur dans l'axe du heater (a) et dans l'axe de propagation du signal RF (b). La ligne blanche et le point blanc représentent les zones d'observation utilisées dans les figures suivantes. L'échelle placée sous la figure (a) est celle utilisée dans la Figure 2.

Dans le cas d'un passage à l'état ON, le pulse appliqué a une tension modérée et une durée de l'ordre de 1 μ s. Le matériau cristallise, diminuant ainsi sa résistivité et le signal peut circuler. Dans le cas d'un passage à l'état OFF, le pulse appliqué a une tension plus forte et une durée plus courte. Le PCM atteint sa température de fusion, désorganisant sa structure. Puis, une trempe a lieu, permettant au PCM de conserver cette structure ayant une forte résistivité, bloquant ainsi le passage du signal. Avec ce fonctionnement, le dispositif n'a besoin d'être alimenté qu'au moment de changer de phase ; il est donc bistable.

Les autres couches du commutateur sont des diélectriques. Ceux possédant une faible conductivité thermique aident à confiner la chaleur pour augmenter la température du PCM. Celles ayant une forte conductivité thermique dissipent la chaleur pour une meilleure homogénéité de température et pour refroidir plus rapidement le dispositif.

Plusieurs leviers peuvent être utilisés pour améliorer tous ces paramètres, comme les caractéristiques des matériaux utilisés, les dimensions des couches du dispositif - notamment celles du heater et du canal RF ayant une forte influence sur les performances RF [5] - ou encore les amplitudes et les durées des pulses de tensions appliqués à l'élément chauffant.

A partir de simulations réalisées sur le logiciel COMSOL Multiphysics, la suite de ce papier fournit une analyse du comportement électro-thermique de dispositifs de dimensions géométriques différentes (Tableau 1).

Référence	W_{PCM}	L_{PCM}	L_{GapRF}	W_{heater}
Dispositif A	20 μ m	3 μ m	1 μ m	1 μ m
Dispositif B	20 μ m	3.5 μ m	1.5 μ m	1 μ m
Dispositif C	20 μ m	6 μ m	4 μ m	3 μ m

Tableau 1. Dimensions des commutateurs étudiés. Les dispositifs varient selon la largeur du PCM (W_{PCM}), la longueur de l'espace entre les contacts RF (L_{GapRF}) et la largeur du heater (W_{heater})

Les conditions de simulations sont les suivantes : Les tensions définies sont celles suffisantes pour atteindre la température de fusion (998K) dans la partie du PCM au centre du canal RF sujette à changer de phase et choisie égale aux deux tiers de la longueur du canal RF. Cette

tension varie aux bornes du heater en fonction de la résistivité et donc de la température de ce dernier. Le changement des propriétés thermiques du GeTe une fois la fusion atteinte ne sont pas prises en compte. De même, l'impact des résistances thermiques d'interfaces n'intervient pas dans l'étude. La durée des impulsions de commande est fixée entre 150 ns et 400 ns. Une durée plus longue laisserait le temps à la chaleur de diffuser dans les autres matériaux, créant un environnement défavorable à la trempe du PCM. A l'inverse, une impulsion trop courte impliquerait l'usage d'un courant plus fort pour permettre au PCM d'atteindre sa température de fusion qui conduirait à une augmentation de la température dans le heater et du risque de destruction associé. Enfin, la résistivité du PCM est définie manuellement au début de chaque étude en fonction de la structure de départ du matériau (cristallin ou amorphe) et reste invariable au cours de la simulation.

3. Résultats de simulations

3.a Effet de la couche de diffusion en AIN sur la fiabilité du heater

Un premier ensemble de simulations permet d'observer l'impact de la couche de diffusion de la chaleur en AIN sur la température atteinte par le heater dans les dispositifs B (Figure 2 (haut)) et C (Figure 2 (bas)), avec ou sans couche d'AIN. La température du heater est donnée sur une ligne traversant sa longueur et au centre de sa largeur. L'observation est effectuée à la fin d'un pulse d'amorphisation de 400 ns, autrement-dit au moment où le heater est le plus chaud. Les impulsions de tensions appliquées ont été déterminées de sorte que dans chaque cas, un volume de GeTe couvrant au moins les deux tiers de la longueur du canal RF dépasse la température de fusion de 1000 K. Ce volume définit la zone active du matériau susceptible de changer de phase.

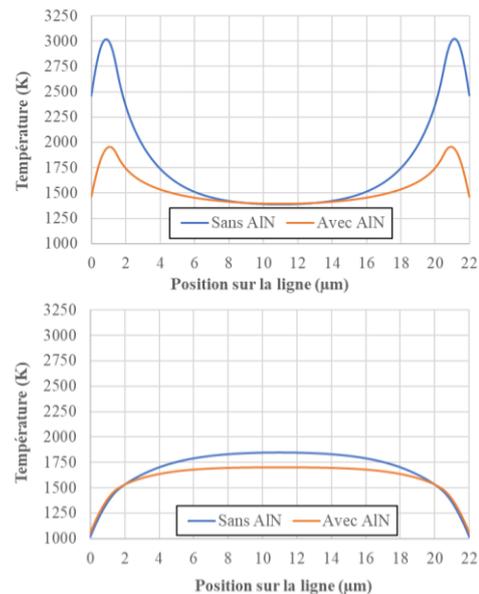


Figure 2. Température observée le long de la ligne blanche tracée dans la Figure 1, pour les dispositifs B (haut) et C (bas)

La simulation effectuée sur le dispositif B avec une petite longueur de canal RF de 1.5 μm permet de rendre compte d'une importante température aux extrémités du heater pouvant atteindre 3000 K. Ces pics se produisent à l'endroit où seul le diélectrique SiO₂ est présent autour de l'élément chauffant, confinant ainsi la chaleur en ces points. Au contraire, sur le reste du heater, le contact avec la barrière diélectrique en AlN au-dessus du PCM et la proximité des contacts RF va accélérer l'évacuation de la chaleur, créant une forte différence de température entre le bord et le centre du heater pour amener le GeTe à sa température de fusion. Cela entraîne un risque fortement accru de casse du heater lors des opérations d'amorphisation, comme observé en mesures (Figure 3).

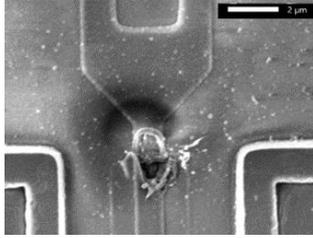


Figure 3. Photo d'un heater ayant cédé lors de l'application d'une pulse de tension

La couche de diffusion en AlN permet d'absorber et de dissiper la chaleur et ainsi de réduire fortement la hauteur de ces pics de température, ce qui permet d'améliorer significativement la fiabilité du composant.

Dans le cas d'une grande longueur de canal RF de 4 μm , en revanche, on ne retrouve plus les pics de température aux extrémités du heater ; la température la plus élevée est même observée au centre de la longueur du heater. En effet, l'espace entre les contacts RF étant plus grand, leur contribution à l'évacuation de la chaleur est plus faible et la température présente moins de variations le long du heater avec une chaleur qui s'évacue vers les contacts du heater. L'ajout de la couche de diffusion en AlN permet néanmoins de diminuer la chaleur en son centre de 200 K tout en la maintenant ailleurs et permet ainsi d'avoir une température relativement uniforme sur toute la longueur du heater pour amener le GeTe à sa température de fusion.

La température maximale atteinte dans le heater pour chacun des trois dispositifs A, B et C, avec ou sans couche de diffusion en AlN est reportée dans le Tableau 2.

Dispositif étudié	Sans AlN			Avec AlN		
	A	B	C	A	B	C
T° max dans le heater [K]	3194	3015	1846	2128	1955	1702

Tableau 2. Température dans le heater grâce à l'ajout de la couche d'AlN pour chacun des dispositifs

3.b Effet de la couche de diffusion en AlN sur le GeTe

D'autres simulations ont permis de mettre en lumière les avantages de la présence d'AlN dans le niveau de diélectrique 2 du commutateur pour l'amorphisation du PCM. Le premier paramètre que l'on cherche à améliorer est la vitesse de refroidissement du matériau après sa fusion afin d'accélérer la trempe et ainsi limiter la

recristallisation pour maximiser la longueur de la zone amorphe dans le canal RF. La tension requise pour atteindre la fusion dans le PCM ainsi que l'énergie consommée durant l'impulsion de commande du changement de phase sont également observées, ces deux paramètres devant être minimisés. Les simulations sont encore une fois effectuées pour deux dispositifs avec des longueurs de canal RF différentes, les dispositifs A et C, avec ou sans la couche d'AlN. L'impulsion de commande a une durée de 150 ns.

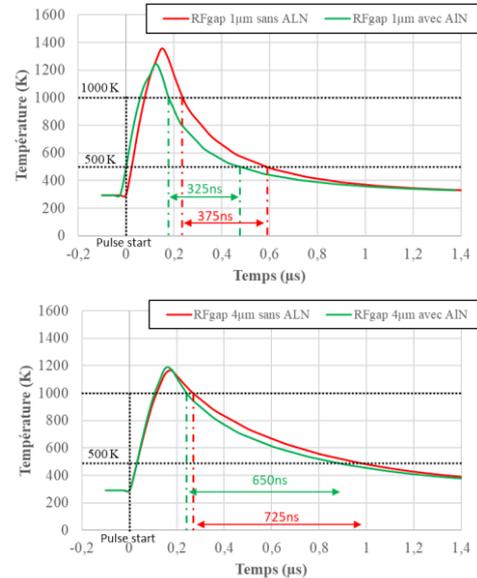


Figure 4. Température au cours du temps au point du PCM désigné Figure 1, pour le dispositif A (haut) et le dispositif C (bas).

La Figure 4 présente, sur les quatre combinaisons ainsi formées, l'évolution de la température en un point du PCM au cours du temps. Ce point se situe à l'extrémité de la largeur du PCM, au centre de sa longueur et à la base de son épaisseur.

En relevant le temps nécessaire pour que le GeTe descende de la température de fusion (1000 K) à 500 K (température en dessous de laquelle le GeTe est dans un régime de cristallisation lente), on s'aperçoit que l'ajout d'AlN dans le capping permet d'accélérer la trempe quelle que soit la longueur du canal RF. Ceci est permis par le fait que la chaleur contenue dans le composant après la chauffe possède, au travers de l'AlN, une nouvelle voie de dissipation.

Néanmoins, la dissipation de chaleur dépend encore au premier ordre des contacts RF. Dans le cas du dispositif C avec le plus grand gap RF, les contacts RF étant éloignés de la partie centrale du PCM, il reste assez difficile de refroidir ce dernier de façon efficace.

Dispositif étudié	Sans AlN			Avec AlN		
	A	B	C	A	B	C
Tension [V]	10,9	10,6	9	12,2	11,9	10,2
Energie [nJ]	325	306	227	406	385	280
Trempe [ns]	375	350	725	325	325	650

Tableau 3. Performances du commutateur pour chacune des combinaisons de capping et de longueur du gap RF étudiées

Le Tableau 3 récapitule, pour chacune des combinaisons étudiées précédemment, les tensions utilisées pour atteindre 1000 K dans la zone active du PCM, l'énergie consommée et la durée de trempe résultante (calculée de la même façon que précédemment).

Bien que cela augmente l'énergie consommée et la tension de commande, l'ajout d'ALN permet de diminuer de façon significative la température des points chauds du heater, réduisant ainsi son risque de casse. Par ailleurs, l'ALN permet également de réduire légèrement la durée de trempe, facilitant l'amorphisation du dispositif. Cependant, dans le cas des grands gaps RF, ce temps reste encore trop élevé. Il faut donc trouver des moyens supplémentaires d'accélérer la trempe tout en limitant l'impact sur les autres performances.

3.c Rapprochement du PCM vers le substrat

L'un des moyens pour accélérer la trempe consiste à réduire la distance séparant le PCM du substrat en silicium. Celui-ci étant un excellent conducteur thermique, l'évacuation de la chaleur pourra être plus rapide. Pour cela, il est possible de réduire les épaisseurs du diélectrique 1 et du Métal 1. A cet effet, un ensemble de simulations a permis d'observer l'effet de la variation de ces paramètres sur les performances du dispositif. Sur la Figure 5 sont représentés les évolutions de la température du PCM pour une impulsion d'amorphisation de 400 ns et pour quatre combinaisons d'épaisseurs de diélectrique 1 et de métal 1 faisant passer la distance entre le substrat et le GeTe de 1100 nm à 150 nm. Le point d'observation est situé au centre du gap RF, au milieu de la longueur du PCM et à la base de celui-ci.

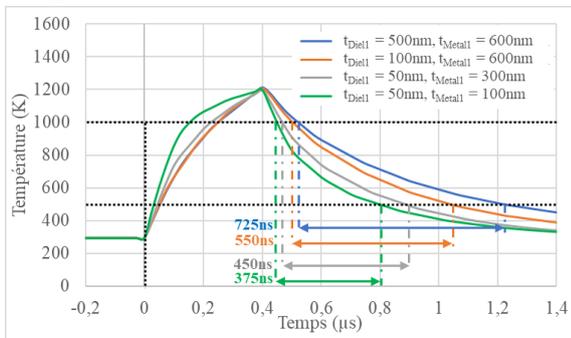


Figure 5. Impact de la diminution des épaisseurs du diélectrique 1 et du métal 1 sur la trempe du PCM.

L'amincissement du diélectrique 1 de 500 nm à 100 nm permet une première accélération de la trempe qui passe de 725 ns à 550 ns. Diminuer dans un second temps l'épaisseur du métal 1 de 600 nm à 100 nm avec 50 nm de diélectrique 1 permet encore d'accélérer la trempe qui passe à 375 ns.

Le Tableau 4 permet de mettre en évidence une limite au rapprochement entre le substrat et le PCM. A partir d'une certaine distance, la chaleur s'évacue trop rapidement. Si cela est un avantage pour la trempe, c'est également un problème au moment de la chauffe du PCM. Ainsi, la température atteinte dans le heater entraîne un risque de casse trop important. Le coût en tension et la quantité d'énergie nécessaire sont également trop élevés.

Epaisseur diélectrique [nm]	500	100	50	50
Epaisseur contacts [nm]	600	600	300	100
Tension utilisée [V]	7,2	7,2	7,8	10,1
Energie consommée [nJ]	403	403	473	793
T_max du heater [K]	1510	1530	1652	2110
Durée de trempe [ns]	725	550	450	375

Tableau 4. Performances du commutateur pour différentes épaisseurs de diélectrique 1 et de métal 1

Ces valeurs évoluant de façon exponentielle, la conclusion proposée est de garder un diélectrique 1 avec une épaisseur de 50 nm et un métal 1 de 300 nm. Ce choix résulte en une durée de trempe de 450 ns permettant de maximiser la longueur de matériau amorphe pour les grands gaps tout en limitant l'impact sur les autres paramètres.

4. Conclusion

Deux nouvelles optimisations de l'empilement technologique de commutateurs à base de PCM ont été présentées. Les simulations réalisées ont fourni des résultats permettant de diminuer significativement le temps de trempe du dispositif sans impact majeurs sur la tension d'actionnement, l'énergie consommée ou la température du heater. Cette diminution du temps de trempe pour les commutateurs ayant une longueur de canal RF de 4 µm pourrait permettre d'obtenir une longueur de matériau amorphe dans le canal RF suffisamment grande pour tenir des puissances de l'ordre de 36 dBm.

D'autres solutions sont toujours à l'étude pour accélérer d'avantage la trempe et ainsi améliorer à nouveau la tenue en puissance des commutateurs PCM.

Ce travail a reçu le soutien du laboratoire commun STMicroelectronics-IEMN et du réseau RENATECH.

Références

- [1] D. Tripathi, et al., «Recent developments in Chalcogenide phase change material-based nanophotonics», *Nanotechnology*, vol. 34, no. 50, p. 502001, Dec. 2023.
- [2] Shen Xiang, et al., «Phase-Change Memory and Optical Data Storage», *Springer Handbook of Glass*, pp 1495–1520, 2019.
- [3] T. Singh, et al., «Chalcogenide Phase-Change Material Germanium Telluride for Radio-Frequency Applications: An overview» in *IEEE Nanotechnology Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 26–41, June 2022.
- [4] B. Reig, et al. «Caractérisation de la tenue en puissance d'un commutateur RF à changement de phase», *XXIèmes Journées Nationales Microondes*, 14-17 Mai 2019.
- [5] G. Slovin, et al., «Design Criteria in Sizing Phase-Change RF Switches» in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 11, pp. 4531-4540, Nov. 2017.