

Conception et caractérisation de commutateurs à base de VO₂ pour des dispositifs reconfigurables

M. N. Sadiq¹, M. Le Roy¹, A. Pérennec¹, P. Laurent¹, N. Martin¹,
D. Passerieux², A. Crunteanu², R. Boyer³, F. Dumas-Bouchiat³, G. Tanné¹

¹ Univ Brest, Lab-STICC, UMR 6285, CNRS, F-29200 Brest

² Univ Limoges, XLIM, UMR 7252, CNRS, F-87060, Limoges

³ Univ Limoges, IRCER, UMR 7315, CNRS, F-87060, Limoges
Mohammad-Nikhian.Sadiq@univ-brest.fr

Résumé – Dans le contexte des circuits RF commutables, le matériau VO₂ semble prometteur pour permettre une réduction du temps de transition. La transition est basée sur un changement d'état isolant-métal par activation thermique, électrique ou encore optique. Nous avons dans un premier temps caractérisé les propriétés électriques du VO₂, puis validé les principes de conception et de simulation de commutateurs à base de VO₂ pour la réalisation de dispositifs hyperfréquences. Plus précisément, des commutateurs (série et //) et des résonateurs (stubs CO) ont été simulés, réalisés et mesurés dans le but de valider la modélisation du matériau et de commutateurs pour une conception ultérieure de déphaseurs pour réseaux phasés.

1. Introduction

Les besoins en agilité et reconfigurabilité des dispositifs radiofréquences (RF) (antennes et dispositifs intelligents) s'accroissent fortement avec les nouveaux standards civils et militaires (e.g. massive MIMO et beamforming pour la 5G) et l'ouverture de nouvelles bandes de fréquences. Dans ce contexte, le besoin en dispositifs RF à commutation ultra-rapide est également exacerbé. Les dispositifs actuels sont basés majoritairement sur des technologies mécaniques de types MEMS ("MicroElectroMechanical Switches") ou à base de composants à semi-conducteurs. Ces derniers peuvent être réalisés en utilisant des diodes PIN, des varactors ou encore des transistors à effet de champs (FET) [1]. Ces dispositifs, bien que compacts et présentant des temps de commutation de l'ordre de 1 à 50 ns, sont potentiellement moins intéressants sur des bandes ultra-larges où les effets non-linéaires parasites s'avèrent particulièrement délicats à gérer.

Les MEMS, présentent, quant à eux, plusieurs avantages : compacité, poids faible, très bonnes performances RF large-bande et consommation DC très faible. En dépit de ces avantages, leur inconvénient majeur concerne les temps de commutation trop importants (de l'ordre de 1 à 500 μs [1]) pour des applications à commutation ultra-rapide. Le dioxyde de vanadium (VO₂), matériau à changement de phase semble être une solution prometteuse car il présente des

temps de commutation potentiellement très faibles, de l'ordre de 0,1 à 100 ps [1].

Cette étude se focalise, dans la section suivante, sur la modélisation du matériau, puis sur le design et la mesure de dispositifs RF élémentaires reconfigurables à base de commutateur à VO₂ aux sections 3 et 4. Enfin la dernière partie permettra de conclure sur la validité de la modélisation du matériau et sur les performances de ces blocs RF élémentaires.

2. Matériau VO₂ : propriétés et activations

2.a. Propriétés

Le dioxyde de vanadium (VO₂) est un matériau présentant une Transition Métal-Isolant (MIT) aussi connue sous le nom de transition de Mott [2, 3]. A température ambiante, le VO₂ est dans un état isolant et ce jusqu'à une température de transition isolant → métal ($T_{cm} = 68^{\circ}\text{C}$) [4] où le matériau devient conducteur. Cette transition est réversible (métal → isolant) à une température légèrement inférieure ($T_{ci} = 65^{\circ}\text{C} < T_{cm}$). Ce matériau est donc très intéressant pour des applications de commutation RF, en particulier dans les réseaux d'antennes.

Ces changements d'état sont bien entendu liés aux modifications des propriétés intrinsèques du matériau telles que ses propriétés électriques (Figure 1) [5] et optiques [6].

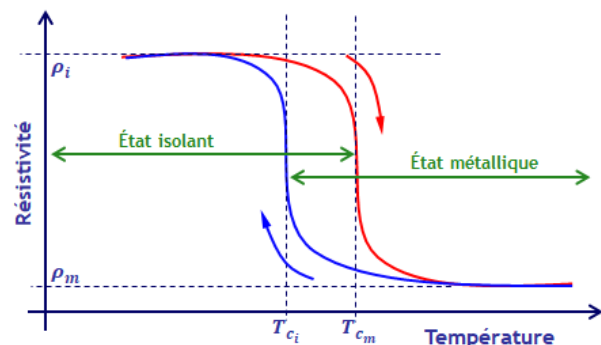


Figure 1. Comportement électrique du matériau VO₂ en fonction de la température

2.b. Activations

La transition (MIT) du VO₂ peut être obtenue par une commande thermique [5] (Figure 1), électrique [3, 7] ou optique [6, 8].

La commande thermique a l'inconvénient d'être lente à cause du temps de latence pour chauffer et surtout refroidir le VO₂. Les temps de commutation en sont donc affectés. Les commandes optiques et électriques sont quant à elles bien plus rapides (potentiellement < à 1 ps) [9, 10] et donc à priori plus pertinentes pour des applications RF.

3. Design

Dans cette étude, plusieurs dispositifs sont étudiés (Figure 2). Tout d'abord, des commutateurs en technologie coplanaire (CPW) sont réalisés dans des configurations série (Figure 2a) et parallèle (Figure 2b). Dans le cas de la configuration série, le VO₂ réalise la jonction entre deux portions du ruban central du CPW tandis que dans la configuration parallèle, le VO₂ remplit le gap entre le ruban central et le plan de masse du CPW. Ces deux dispositifs ont été spécifiquement développés dans le but d'améliorer la modélisation et la caractérisation des propriétés du matériau.

Dans un deuxième temps, le VO₂ a été intégré dans différentes topologies de dispositifs RF pour les rendre agiles. Ainsi, des résonateurs en circuit ouvert (CO) coupe-bande selon 2 configurations ont été réalisés. Dans la première configuration (Figure 2c), l'agilité ou la commutation porte sur un décalage de la fréquence de résonance due à une augmentation de la longueur du résonateur : décalage de 2 GHz vers les basses fréquences de 15 GHz à 13 GHz. Dans la deuxième configuration (Figure 2d), l'agilité est obtenue par une transposition du résonateur CO en résonateur CC (court-circuit) (passage d'un résonateur coupe-bande à passe-bande à 15 GHz).

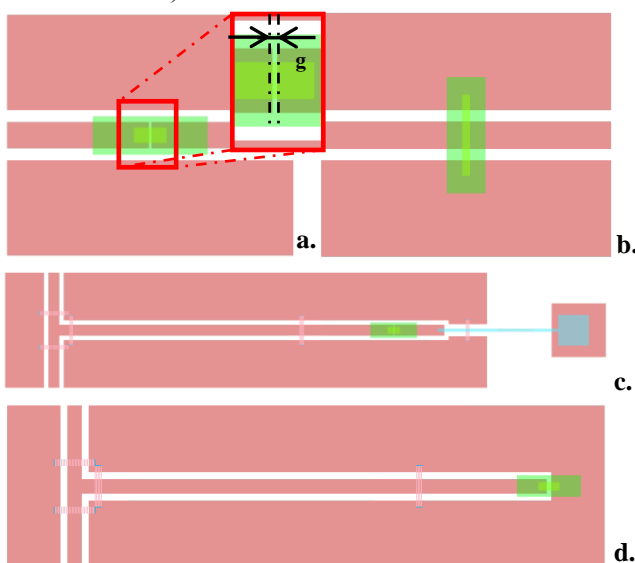


Figure 2. Masque des différents dispositifs étudiés

Les dispositifs, adaptés sur 50 Ω à 15 GHz, ont été conçus pour un substrat Saphir C ($\epsilon_r = 9,3$; épaisseur

508 μm) avec une épaisseur de métallisation en or de 1,5 μm.

Dans le cas des résonateurs CO (Figure 2c), il a été nécessaire d'intégrer des lignes de polarisation, conçues pour permettre de faire commuter le VO₂ par une commande électrique. Pour cela, des lignes résistives (résistivité 10⁻⁵ Ω.m) ont été paramétrées et implantées de manière à permettre une commande en tension et ne pas perturber la fonction RF par la partie commande.

De plus, l'impact de la dimension du gap (g) de VO₂ (de 5 μm à 30 μm) sur les réponses RF a également été étudié.

4. Réalisation et résultats

4.a. Réalisation

La réalisation des dispositifs est faite en plusieurs étapes (Figure 3). Tout d'abord une couche mince de VO₂ de 200 nm d'épaisseur est déposée par Ablation Laser Pulsé (PLD) sur un substrat Saphir R de 508 μm d'épaisseur à l'IRCER (Limoges), suivie d'une gravure sélective afin de ne garder que les zones d'intérêts. Puis les couches résistives de Molybdène (Mo) d'épaisseur 150 nm et métalliques d'or (Au) d'épaisseur 600 nm sont déposées par lift-off à XLIM (Limoges) (Figure 4).

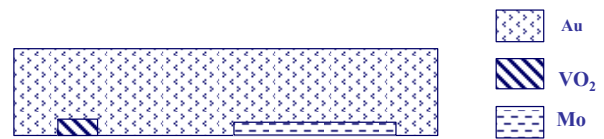


Figure 3. Illustration des couches réalisées

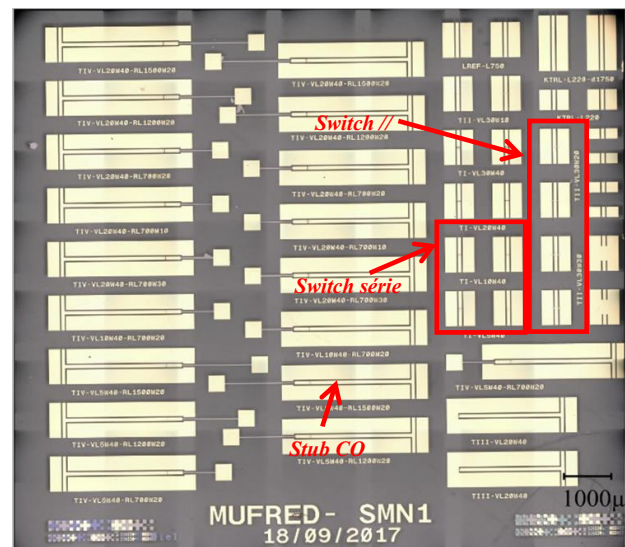


Figure 4. Photo des circuits réalisés à XLIM

4.b. Configuration pour la mesure

Les mesures ont été réalisées au Lab-STICC (Brest) grâce à une station sous pointes, en utilisant des pointes de type GSG avec un pitch de 200 μm (Figure 5). Le VO₂ est pour l'instant commandé électriquement : une tension est appliquée de part et d'autre du motif de VO₂ à l'aide d'un générateur DC (isolé à l'aide d'une résistance de 2 kΩ - 2 W). Les paramètres S sont relevés à l'analyseur de réseaux vectoriel, protégé par des tests de

polarisation pouvant supporter 200 V et 400 mA. La caractéristique courant vs tension sera également relevée pour chaque dispositif étudié.

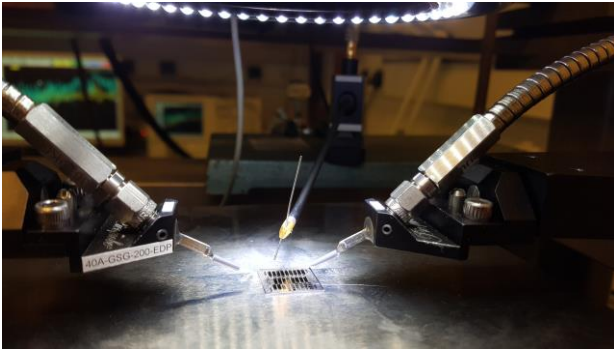


Figure 5. Photographie du dispositif de mesure avec les pointes RF et la pointe DC

Le matériel disponible au Lab-STICC étant limité en termes de puissance (tés de polarisation et pointes), seuls les dispositifs "commutateurs série" et "résonateurs CO" agiles en fréquence seront présentés dans cette étude. En effet, les dispositifs en configuration parallèle nécessitent des puissances plus importantes afin de faire commuter le VO₂ de son état isolant à son état métallique.

4.c. Résultats des commutateurs

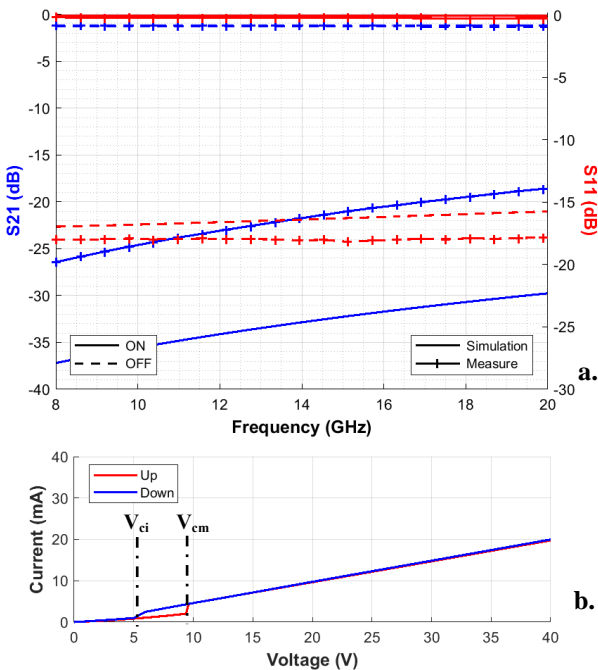


Figure 6. Paramètres S (a) mesurés et courbe caractéristique I-V (b) du commutateur série avec un gap de 5 µm

L'évolution des paramètres S₁₁ et S₂₁ pour des commutateurs séries est donnée Figure 6a (gap de VO₂ de 5 µm) et Figure 7a (gap de VO₂ de 30 µm).

Dans l'état isolant (position OFF du commutateur série), les 2 commutateurs VO₂ étudiés présentent des niveaux d'isolation tels que S₂₁ < -20 dB dans la bande 8 – 18 GHz. Dans son état métallique (position ON du commutateur série), le VO₂ introduit des pertes (S₂₁)

variables en fonction de la taille du gap (et par conséquent la longueur du VO₂). Ces pertes sont néanmoins constantes, -1,2 dB et -2,0 dB pour un gap de 5 µm et 30 µm respectivement, avec une adaptation S₁₁ < -14 dB sur la bande de fréquences 8 – 20 GHz.

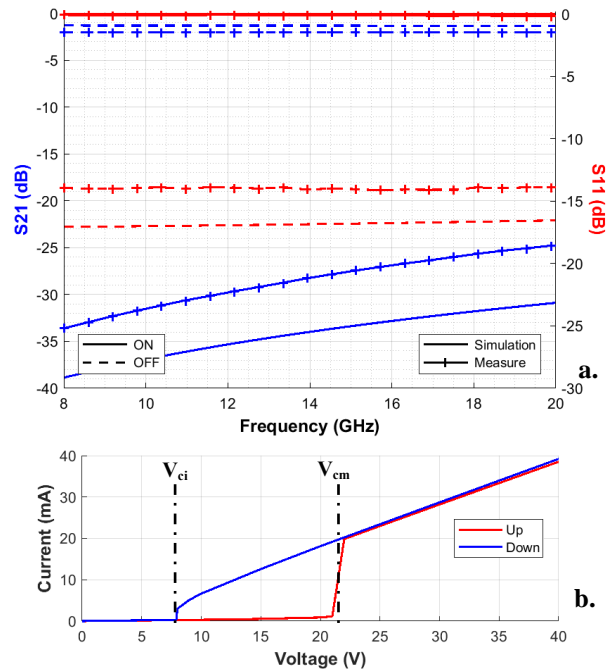


Figure 7. Paramètres S (a) mesurés et courbe caractéristique I-V (b) du commutateur série avec un gap de 30 µm

A l'instar de la courbe caractéristique de la résistivité en fonction de la température, la courbe caractéristique I vs V présente une hystérésis (Figure 6b et Figure 7b) avec deux tensions de commutation : isolant V_{ci} et métallique V_{cm}. Ce couple de tensions (V_{ci} et V_{cm}), contrairement à une commande thermique, est variable ((5,2 V et 9,6 V) et (7,9 V et 20,2 V) respectivement pour un gap de 5 µm et 30 µm). Le VO₂ se comportant comme un élément résistif à faible résistivité à l'état métallique, la loi d'Ohm permet de justifier les tensions de commutation différentes en fonction du gap.

4.d. Résultats des Résonateurs

Pour faire commuter le VO₂ en configuration série au sein des résonateurs CO, une pointe DC indépendante des pointes GSG a été utilisée et positionnée sur le plot de polarisation (Figure 2c).

Les dispositifs étant réalisés sur un substrat Saphir R, qui présente une anisotropie au niveau de sa permittivité, une rétro-simulation a été nécessaire. On peut donc s'attendre à un léger décalage des fréquences de travail des résonateurs CO.

L'évolution des paramètres S₁₁ et S₂₁ en fonction de la fréquence pour un résonateur CO (Figure 2c) est donnée Figure 8a (gap de VO₂ de 5 µm). Comme mentionné précédemment, on remarque un décalage en fréquence (14,4 GHz au lieu de 15 GHz) de la fréquence de résonance à l'état isolant du VO₂ (état appelé OFF) dû à l'anisotropie du substrat Saphir R. L'agilité en fréquence est plus importante que celle initialement

prévue (2,4 GHz au lieu de 2 GHz) en raison de la résistivité de la ligne résistive (inférieure à celle utilisée en simulation lors du design). L'isolation (paramètre S_{21}) est meilleure que 15 dB dans les deux états aux fréquences de résonances respectives.

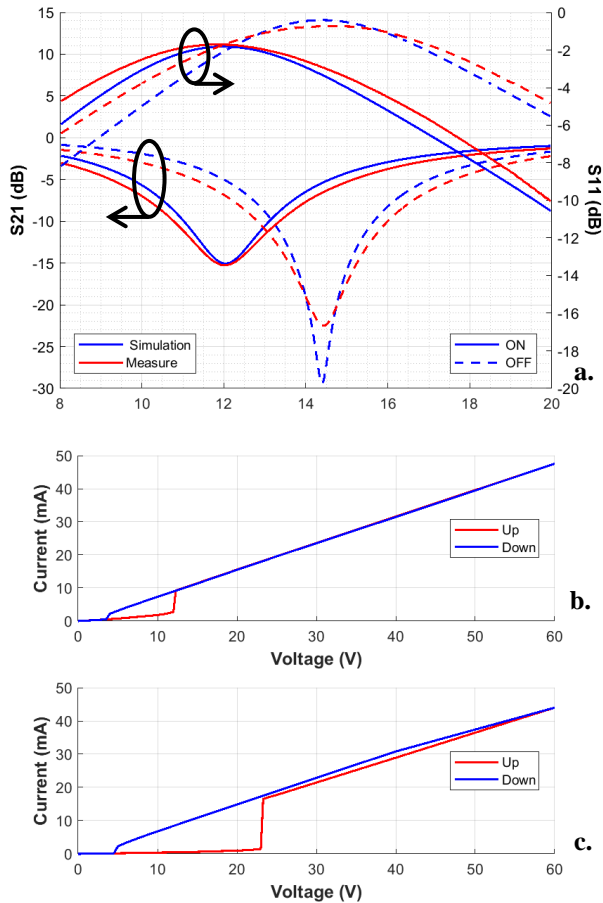


Figure 8. Paramètres S mesurés du résonateur CO pour un gap de 5 µm (a), courbes caractéristiques I-V pour un gap de 5 µm et une résistance de 1,3 kΩ (b) et gap de 10 µm et résistance de 1,3 kΩ (c)

Une rétro-simulation a permis de remonter à la permittivité effective du substrat Saphir R ($\epsilon_r = 10,6$) et à la résistivité des lignes résistives en Molybdène ($5,7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$).

Les caractéristiques I vs V des dispositifs sont présentées Figure 8b et Figure 8c pour un gap respectivement de 5 µm et 10 µm. Les tensions de commutation diffèrent selon la valeur du gap : (3,7 V et 12,3 V) et (4,8 V et 23,3 V) respectivement pour un gap de 5 µm et 10 µm. Ces couples de tensions et notamment la tension de commutation métallique (V_{cm}) seront des critères importants (en plus des pertes admises par le matériau) pour le dimensionnement du gap du VO_2 dans la conception de futurs dispositifs RF.

5. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt potentiel quant à l'utilisation du dioxyde de vanadium en couche mince afin de réaliser des commutateurs RF large bande. La modélisation et l'intégration de ce matériau

ont permis de réaliser des commutateurs, eux-mêmes utilisés au sien de résonateurs reconfigurables en fréquence.

Les temps de commutation par commande optique sont en cours de mesure à Thales TRT (Palaiseau) pour confirmer les très faibles valeurs attendues.

Cette première étape de validation expérimentale des modèles de conception et de simulation ainsi que du potentiel du VO_2 nous permet d'envisager la conception de déphaseurs à commutation rapide pour une intégration dans des réseaux d'antennes phasés.

6. Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour le financement des travaux réalisés dans le cadre du projet ANR MUFRED et présentés dans ce papier.

Références

- [1] G. M. Rebeiz, « *RF MEMS : Theory, Design and Technology* », Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
- [2] N.F. Mott, « *Metal-Insulator Transition* », *Reviews of Modern Physics*, vol. 40, n° 4, Octobre 1968.
- [3] G. Stefanovich, et al., « *Electrical Switching and Mott Transition in VO_2* », *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 12, pp. 8837-8845, 2000.
- [4] H.-T. Kim, et al., « *Monoclinic and Correlated Metal Phase in VO_2 as Evidence of the Mott Transition : Coherent Phonon Analysis* », *Physical Review Letters*, vol. 97, N° 26, pp. 266401(4), Décembre 2006.
- [5] A. Crunteanu, et al., « *Microwave Switching Functions Using Reversible Metal-Insulator Transition (MIT) in VO_2 Thin Films* », 2007 European Microwave Conference, Décembre 2007.
- [6] T. Ben-Messaoud, et al., « *High Contrast Optical Switching in Vanadium Dioxide Thin Films* », *Optics Communications*, vol. 281, pp. 6024-6027, 2008.
- [7] A. Mennai, et al., « *High Cut-off Frequency RF Switches Integrating a Metal-Insulator Transition Material* », *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2015, IMS 2015, Phoenix, USA*, 2015.
- [8] S. Chen, et al., « *Smart VO_2 Thin Film for Protection of Sensitive Infrared Detectors from Strong Laser Radiation* », *Sensors and Actuators*, vol. 115, pp. 28-31, 2004.
- [9] A. Cavalleri, et al., « *Evidence for a Structurally-Driven Insulator to Metal Transition in VO_2 : A view from the UltraFast Timescale* », *Physical Review B*, vol. 70, pp. 161102(4), 2004.
- [10] A. Cavalleri, et al., « *Femtosecond Structural Dynamics in VO_2 during an UltraFast Solid-Solid Phase Transition* », *Physical Review Letters*, vol. 87, n° 23, Décembre 2001.