



**HAL**  
open science

## Caractérisations RF et optique de commutateurs hyperfréquences ultra-rapides à base de VO<sub>2</sub>

Mohammad-Nikhian N Sadiq, Marc Le Roy, André Pérennec, Marie-Blandine Martin, Paul Laurent, A Pérénec, Noham Martin, Damien Passerieux, Aurelian Crunteanu, Rémi Boyer, et al.

► **To cite this version:**

Mohammad-Nikhian N Sadiq, Marc Le Roy, André Pérennec, Marie-Blandine Martin, Paul Laurent, et al.. Caractérisations RF et optique de commutateurs hyperfréquences ultra-rapides à base de VO<sub>2</sub>. 16<sup>èmes</sup> Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux 2020, Toulouse, France, Mar 2020, Toulouse, France. pp.1-4. hal-02497173

**HAL Id: hal-02497173**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-02497173v1>**

Submitted on 3 Mar 2020

**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.

# Caractérisations RF et optique de commutateurs hyperfréquences ultra-rapides à base de VO<sub>2</sub>

M. N. Sadiq<sup>1</sup>, M. Le Roy<sup>1</sup>, A. Pérénec<sup>1</sup>, P. Laurent<sup>1</sup>, N. Martin<sup>1</sup>, D. Passerieux<sup>2</sup>, A. Crunteanu<sup>2</sup>, R. Boyer<sup>3</sup>, F. Dumas-Bouchiat<sup>3</sup>, M.-B. Martin<sup>4</sup>, L. Divay<sup>4</sup>, Q. Levesque<sup>4</sup>, G. Tanné<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ Brest, Lab-STICC, UMR 6285, CNRS, F-29200, Brest, France

<sup>2</sup>Univ Limoges, XLIM, UMR 7252, CNRS, F-87060, Limoges, France

<sup>3</sup>Univ Limoges, IRCER, UMR 7315, CNRS, F-87060, Limoges, France

<sup>4</sup>Thales Research & Technology, Palaiseau, France

{Mohammad-Nikhian.Sadiq, Marc.LeRoy, Gerard.Tanne}@univ-brest.fr

**Résumé** — Les matériaux présentant une transition de Mott semblent être prometteurs dans le cadre de la conception de dispositifs microondes. Dans ce contexte, cette étude porte sur le dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>) et vise à caractériser les performances de commutateurs en RF ainsi qu'en commutation lors de l'application de commandes électriques et optiques. La mesure du temps de commutation sous excitation optique montre que différents phénomènes physiques interviennent et que la puissance optique d'activation doit être maîtrisée pour éviter une dégradation des commutateurs. Au final, l'obtention de temps de commutation relativement courts valide le choix du VO<sub>2</sub> pour la conception de dispositifs microondes ultra-rapides reconfigurables répondant aux futurs standards des applications militaires et civiles. Les premières réalisations de déphaseurs mettant en œuvre des commutateurs plus aboutis sont également présentées.

## I. INTRODUCTION

Dans un contexte où les front-ends RF doivent être reconfigurables, agiles et multistandards (IoT, MIMO, 5G, défenses ...), le temps de commutation des dispositifs RF est devenu un paramètre crucial. Les techniques utilisées actuellement pour faire de la reconfiguration en RF peuvent être limitantes, soit en termes de performances sur des applications larges bandes et/ou à forte puissance avec l'apparition de phénomènes de non-linéarité (e.g. diodes PIN et transistors FET qui possèdent néanmoins des temps de commutation de l'ordre de 50 ns à 1 ns), soit au niveau des temps de commutation relativement longs (de l'ordre de 500 μs à 1 μs pour les commutateurs MEMS) [1]. Fort de ce constat, le dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>), matériau à transition de phase, semble être un candidat prometteur pour obtenir des temps de commutation très courts (de l'ordre de 0,1 μs jusqu'à 100 ps) sur une large bande de fréquence [2]. Ainsi, dans cette étude, après avoir rappelé succinctement les propriétés du VO<sub>2</sub>, nous observerons les performances RF de commutateurs et déterminerons les temps de commutation en optique avant d'évoquer l'usage de ce matériau au sein de déphaseurs.

## II. DIOXYDE DE VANADIUM VO<sub>2</sub>

Le VO<sub>2</sub> présente une Transition Isolant-Métal (MIT) aussi connue sous le nom de Transition de Mott [3]-[4]. A température ambiante (25°C), le VO<sub>2</sub> se trouve dans son état semi-conducteur (isolant). Au-delà de la température de transition isolant → métal ( $T_{cm} = 68^\circ\text{C}$ ) le matériau transite dans son état conducteur (métallique). Ce

phénomène est réversible et la transition inverse (métal → isolant) intervient à une température légèrement inférieure ( $T_{ci} = 65^\circ\text{C} < T_{cm}$ ) (Fig. 1). Ces températures de transition et les résistivités électriques dans ces deux états peuvent être ajustées selon la qualité du dépôt. La transition peut être obtenue à travers différents stimuli : thermique, optique et/ou électrique.

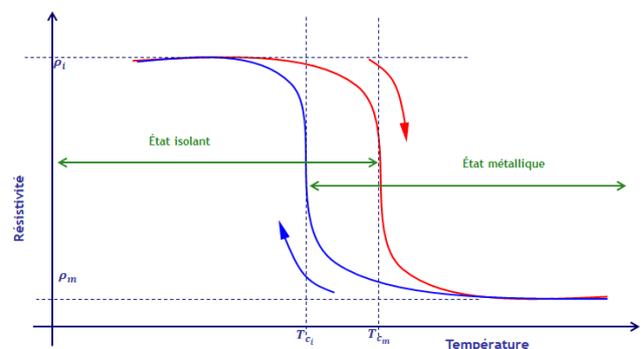


Fig. 1. Hystérésis d'évolution des propriétés électriques du VO<sub>2</sub> avec un stimulus thermique.

La transition isolant-métal du dioxyde de vanadium fait apparaître une transformation du réseau de maille : passant d'une structure monoclinique M1 (Fig. 2(a)) dans son état isolant à une structure rutile R (Fig. 2(b)) dans son état métallique.

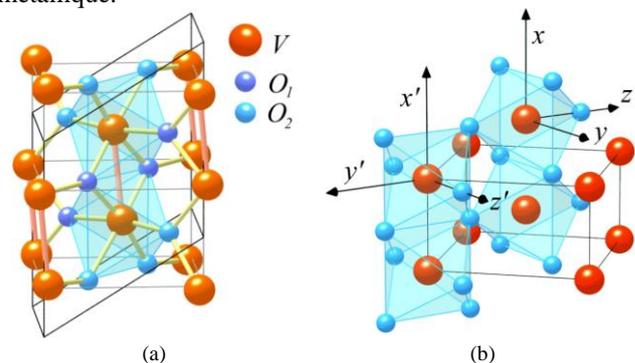


Fig. 2. Structures cristallographiques du VO<sub>2</sub> : (a) monoclinique M1 à basse température et (b) rutile R à haute température [5]

L'activation thermique présente l'inconvénient d'être lente en raison du temps de latence intervenant pour chauffer et refroidir le VO<sub>2</sub>. Quant aux commandes optiques et électriques, elles sont plus rapides (potentiellement < 1 ps) [6] et donc particulièrement intéressantes pour les applications citées.

### III. DISPOSITIFS ÉTUDIÉS

Les dispositifs étudiés sont des commutateurs série à base de VO<sub>2</sub> en technologie coplanaire (CPW) sur substrat Saphir R d'épaisseur 508 μm. Le motif de VO<sub>2</sub>, de longueur 5 μm, en couche mince d'épaisseur 200 nm déposé par ablation au laser impulsif (PLD) à IRCER, réalise une jonction entre deux portions de lignes du ruban central du CPW. La métallisation en Or (Au) de 1,5 μm d'épaisseur est réalisée par lift-off à XLIM.

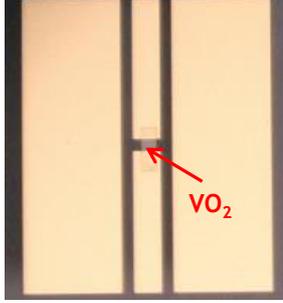


Fig. 3. Exemple de commutateur série RF réalisé à base de VO<sub>2</sub>.

D'autres dispositifs ont aussi été étudiés (commutateurs //, résonateurs reconfigurables ...) mais ne sont pas détaillés dans cette communication.

### IV. RÉSULTATS EXPERIMENTAUX

#### A. Activation par commande électrique

Les commutateurs à base de VO<sub>2</sub> ont subi deux types de caractérisation : une caractérisation RF avec une commande électrique du matériau et une caractérisation du temps de commutation avec une activation optique de la transition isolant-métal du VO<sub>2</sub>.

La caractérisation des performances RF a été réalisée au Lab-STICC à l'aide d'une station sous pointes avec des pointes de type GSG (pitch 200 μm) et des Tés de polarisation.

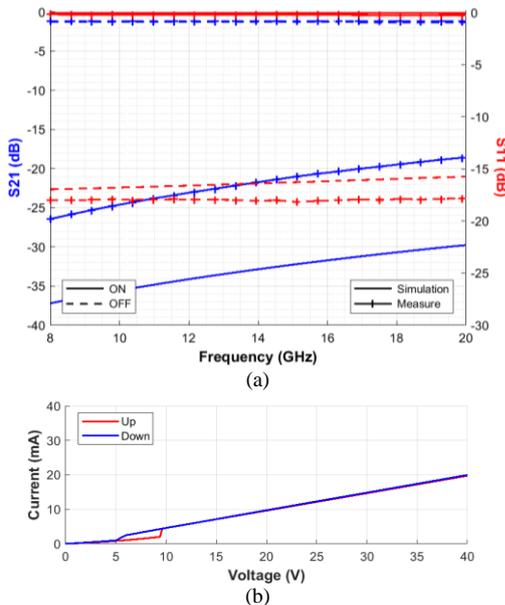


Fig. 4. Caractérisation RF des commutateurs à base de motif de VO<sub>2</sub> de longueur 5 μm avec une commande électrique : (a) paramètres S du commutateur et (b) hystérésis I-V d'activation

Dans leur état OFF (VO<sub>2</sub> à l'état isolant), les différents commutateurs RF présentent de bonnes performances (niveau d'isolation  $S_{21} \leq -20$  dB sur la bande de fréquence 8-18 GHz) (Fig. 4(a)). Dans leur état ON (VO<sub>2</sub> à l'état métallique), les motifs de VO<sub>2</sub> introduisent des pertes d'insertion cohérentes avec l'état de l'art (1,2 dB pour une longueur de motif de 5 μm). L'adaptation ( $S_{11}$ ) dans cet état ON est supérieure à 14 dB sur la bande de fréquence 8-20 GHz.

La courbe caractéristique I-V fait apparaître deux tensions de seuil de commutation : isolant → métal (9,6 V) et métal → isolant (5,4 V). Ces tensions de seuil sont fonction de la longueur du gap de VO<sub>2</sub> et de la qualité du dépôt.

#### B. Activation par commande optique et temps de commutation

La caractérisation par commande optique des temps de commutation a été réalisée à Thales Research & Technology (TRT) en utilisant un laser NIR (1064 nm) d'impulsion de longueur 4 ns sur les commutateurs à base de motifs de VO<sub>2</sub> de longueur 10 μm.

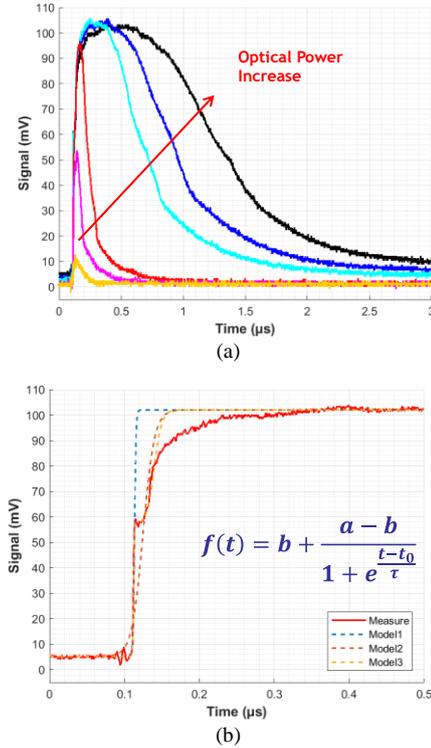


Fig. 5. Commutations par commande optique : (a) influence de la puissance optique (b) estimation du temps de commutation par les modèles

L'augmentation de la puissance optique provoque un maintien plus long du VO<sub>2</sub> dans l'état métallique qui correspond au temps nécessaire pour dissiper l'excès d'énergie thermique fourni par le laser (Fig. 5(a)). Une étude approfondie révèle une cassure de la pente de montée de la tension aux bornes du VO<sub>2</sub> durant l'excitation au laser (Fig. 5(b)). Ainsi, il peut être observé une première pente correspondant à une réponse rapide du matériau pour laquelle la puissance est néanmoins insuffisante pour le maintenir dans son état métallique. La seconde pente correspond à une réaction plus lente durant laquelle

l'énergie fournie par le laser est suffisante pour maintenir une certaine conductivité du VO<sub>2</sub> [7].

Ces expérimentations mettent en évidence deux mécanismes intervenant lors de l'excitation optique. Un premier mécanisme photo-induit durant lequel les photons injectés par l'excitation optique sont à l'origine de la transition isolant-métal. Dans un deuxième temps, l'énergie des photons injectés induit un mécanisme thermique qui maintient alors le dioxyde de vanadium dans son état métallique.

Trois modèles, basés sur l'équation de Boltzmann (1) (où  $a$  et  $b$  sont respectivement les asymptotes horizontales basse et haute,  $\tau$  la constante de temps et  $t_0$  la valeur centrale), sont alors définis pour analyser les différentes réactions (Tableau I) et estimer les temps de commutations correspondants ( $T_m$  définis à 10% et 90%) : 4,4 ns pour le *Model*<sub>1</sub> ne prenant en compte que la réaction rapide, 32,9 ns pour le *Model*<sub>2</sub> prenant en compte une moyenne des deux réactions et 40,1 ns pour le *Model*<sub>3</sub> prenant en compte la cassure de la pente évoquée précédemment.

$$f(t) = b + \frac{a-b}{1+e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}} \quad (1)$$

TABEAU I. VALEURS DES PARAMETRES DANS LES MODELES

Modèle	Plage de temps ( $\mu$ s)	a (mV)	b (mV)	$t_0$ ( $\mu$ s)	$\tau$ (ns)	$T_m$ (ns)
<i>Model</i> <sub>1</sub>	0 – 0,5	5,2	102	0,11	1,0	<b>4,4</b>
<i>Model</i> <sub>2</sub>	0 – 0,5	5,2	102	0,13	7,5	<b>32,9</b>
<i>Model</i> <sub>3</sub>	0 – 0,12	5,2	58	0,11	0,6	<b>40,1</b>
	0,12 – 0,5	57	10,2	0,14	5	

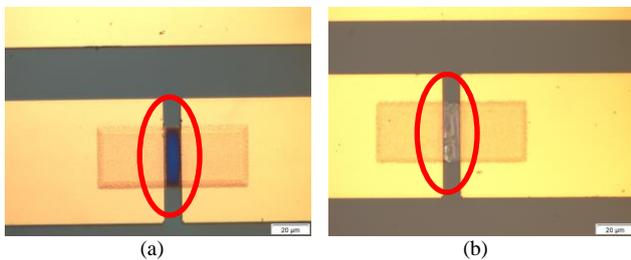


Fig. 6. Comparaison de l'état physique de la couche de VO<sub>2</sub> : (a) avant excitation optique et (b) après plusieurs excitations optiques.

Par ailleurs, des dégradations sont visibles sur un des motifs (longueur de gap de 5  $\mu$ m) de VO<sub>2</sub> suite aux impulsions laser (Fig. 6(a) et (b)). Ces dégradations dues à une ablation partielle du matériau induisent une forte dégradation des performances électriques. Des études complémentaires sont en cours afin d'en comprendre les causes, les conséquences, d'estimer leur fiabilité en fonction des puissances optiques associées et du nombre d'impulsion.

## V. INTEGRATION DANS DES FONCTIONS RF

Ces commutateurs ont été utilisés pour la réalisation des déphaseurs reconfigurables TTD (True Time Delay). Ainsi, un déphaseur TTD à lignes commutées à 8 états (3-bits) est réalisé avec un pas de 45° à 28 GHz. Pour cela, deux déphaseurs sont cascades : un déphaseur à 2 états (0° et 45° de déphasage relatif) et un déphaseur 2-bits (4 états avec un

pas de 90°). Ces déphaseurs sont réalisés à l'aide de commutateurs SP2T (Fig. 7(a)) et SP4T (Fig. 7(b)). Les commutateurs SPnT (Single Pole n Thru), dispositifs permettant de choisir un chemin parmi n sorties, sont réalisés à l'aide des motifs de VO<sub>2</sub> et intègrent un réseau de polarisation composé d'une résistance (en Molybdène) et de deux capacités MIM (Métal-Isolant-Métal, avec du Nitrure d'Aluminium).

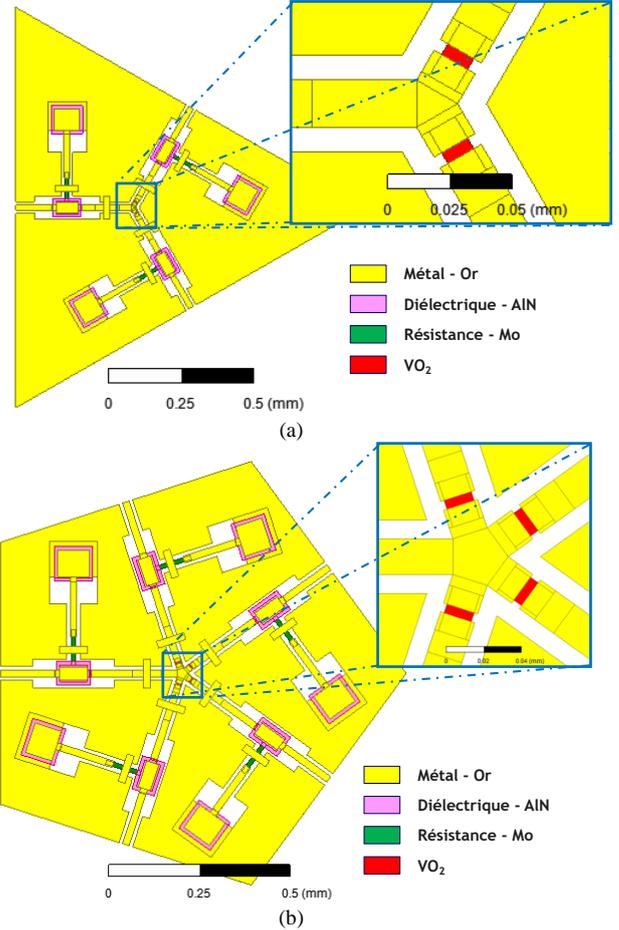


Fig. 7. Commutateurs à base de VO<sub>2</sub> : (a) SP2T et (b) SP4T.

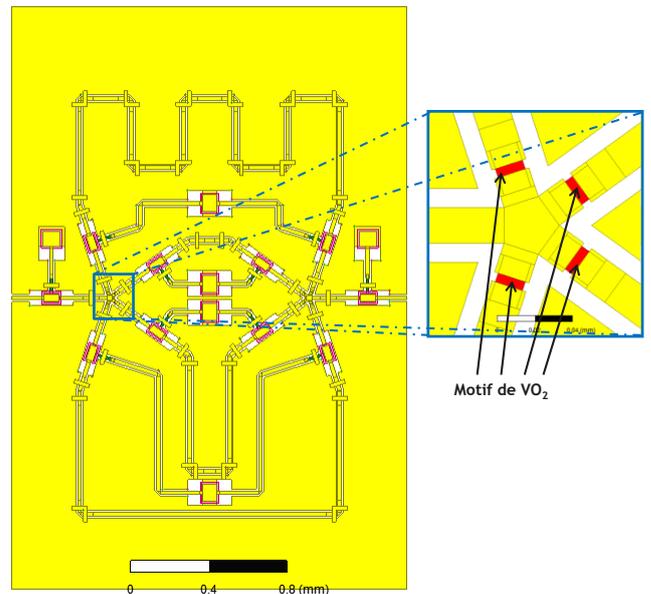


Fig. 8. Déphaseur 2-bits TTD réalisé à l'aide de commutateurs SP4T à base de VO<sub>2</sub>

Les déphaseurs TTD à lignes commutées sont alors composés de deux commutateurs SPnT (en entrée et en sortie du dispositif) et de différentes lignes de transmission de longueurs variables permettant de faire les différents états de déphasage (Fig. 8 pour le cas du déphaseur 2-bits).

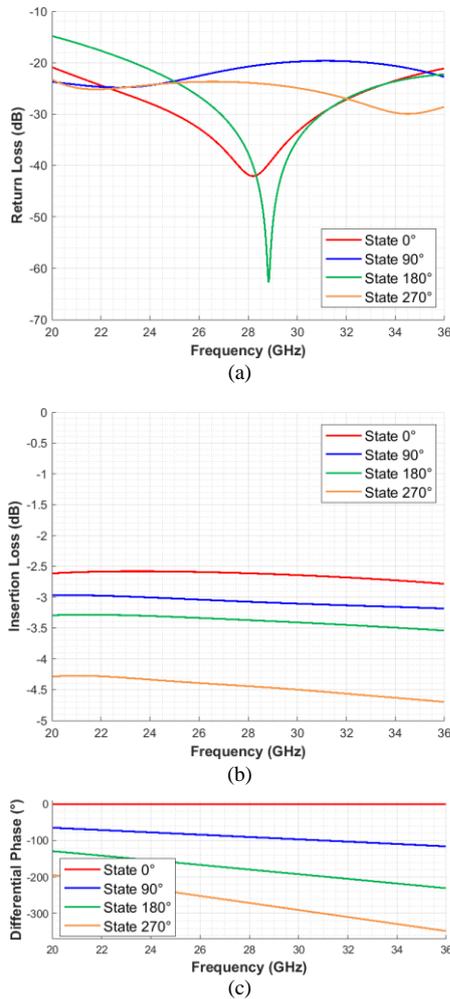


Fig. 9. Performances en simulation du déphaseur 2-bits : (a) coefficient de réflexion, (b) pertes d'insertion et (c) déphasage relatif.

TABLEAU II. PERFORMANCES RF SIMULEES DU DEPHASEUR 2-BITS A BASE DE VO<sub>2</sub>

Paramètres	Valeurs				Unités
	Etat 0°	Etat 90°	Etat 180°	Etat 290°	
S <sub>11</sub>	-41,8	-20,8	-37,7	-23,9	dB
BP	57,1	9,6	33,4	57,1	%
S <sub>21</sub>	-2,61	-3,07	-3,37	-4,44	dB
Δφ	0	-90,4	-179,5	-271,11	°
FoM	61,6				%dB

L'évolution des coefficients de réflexion et des pertes d'insertion du déphaseur 2-bits est donnée Fig. 9(a) et Fig. 9(b). Dans ses 4 états, le dispositif présente de très bonnes performances avec un coefficient d'adaptation  $S_{11} < -20$  dB à 28 GHz, une bande passante relative de 9,6 % et des pertes d'insertion  $S_{21}$  variant de  $-2,61$  dB dans l'état de référence à  $-4,44$  dB dans le cas du chemin le plus long (270° de déphasage relatif) avec une platitude des

pertes de  $\pm 0,03$  dB dans la bande passante. La figure de mérite (FoM) de ce déphaseur (définie comme le rapport du déphasage relatif maximal réalisé sur les pertes d'insertions maximales) est alors de 61,6 %/dB. Les performances sont récapitulées dans le Tableau II.

## VI. CONCLUSION

Les dispositifs étudiés présentent des performances prometteuses et cette étude, réalisée dans le cadre du projet ANR MUFRED, a permis de valider l'intégration du VO<sub>2</sub> dans la conception de dispositifs plus avancés tels que des commutateurs SPnT, des déphaseurs et des réseaux d'antennes phasés. Ainsi, les déphaseurs TTD (True Time Delay) à base de SPnT (prévu pour être commandé électriquement et/ou optiquement) sont actuellement en cours de réalisation et de caractérisation.

## VII. REMERCIEMENTS

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

## REFERENCES

- [1] G. M. Rebeiz, *RF MEMS: Theory, Design and Technology*, Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
- [2] A. Hariri, et al., "Very Wide-Band and Compact VO<sub>2</sub> Switches", *IEEE MTT-S IWMS-AMP 2018*, Ann Arbor, MI, USA, 2018.
- [3] N. F. Mott, "Metal-Insulator Transition", *Reviews of Modern Physics*, vol. 40, n°14, 1968
- [4] G. Stefanovich, et al., "Electrical Switching and Mott Transition in VO<sub>2</sub>", *Journal. Phys.: Condes. Matter*, vol. 12, pp. 8837-8845, 2000.
- [5] V. Eyert, "The Metal-Insulator Transitions of VO<sub>2</sub>: A Band Theoretical Approach", *Annals of Physics*, vol. 11, pp. 650-702, 2002.
- [6] A. Cavalleri, et al., "Femtosecond Structural Dynamics in VO<sub>2</sub> During an UltraFast Solid-Solid Phase Transition," *Physical Review Letters*, vol. 87, n°123, 2001.
- [7] T. L. Cocker, et al., « Phase Diagram of the UltraFast Photoinduced Insulator-Metal Transition in Vanadium Dioxide,» *Physical Review B*, 85, vol. 85, pp. 155120(11), 2012.