



**HAL**  
open science

# Déphaseur RTPS numérique 2 bits en bande X à activation optique ultra-rapide à partir de commutateurs à base de VO<sub>2</sub>

Phi-Long Doan, Marc Le Roy, André Pérennec, Gérard Tanné, Olga Ishchenko, Rihem Noumi

## ► To cite this version:

Phi-Long Doan, Marc Le Roy, André Pérennec, Gérard Tanné, Olga Ishchenko, et al.. Déphaseur RTPS numérique 2 bits en bande X à activation optique ultra-rapide à partir de commutateurs à base de VO<sub>2</sub>. 22èmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. pp.1032-1035. hal-03716390

**HAL Id: hal-03716390**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-03716390>**

Submitted on 7 Jul 2022

**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.

# Déphaseur RTPS numérique 2 bits en bande X à activation optique ultra-rapide à partir de commutateurs à base de VO<sub>2</sub>

Phi-Long. Doan<sup>2</sup>, M. Le Roy<sup>1</sup>, A. Pérennec<sup>1</sup>, G. Tanné<sup>1</sup>, O. Ishchenko<sup>2</sup>, R. Noumi<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> TE-OX, 21 Rue Jean Rostand, 91400 Orsay, France

[Marc.LeRoy@univ-brest.fr](mailto:Marc.LeRoy@univ-brest.fr), [philong.doan@te-ox.com](mailto:philong.doan@te-ox.com)

**Résumé** – Le déphaseur numérique 2 bits RTPS (Reflection-Type Phase Shifter) (0/90°/180°/270°) présenté ici utilise un coupleur hybride (branch-line) chargé par des lignes microrubans commutées ultra-rapidement. Les commutateurs sont de type Single-Pole Single-Throw (SPST) à base de films minces de dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>) déposés sur Saphir de type C et sont reportés par une nouvelle technique flip-chip sur le PCB principal pour permettre une activation optique. Les simulations montrent une adaptation meilleure que 20 dB à 10 GHz et supérieure à 10 dB sur une bande relative de 22% (8.95-11.16 GHz), quels que soient les états de phase du déphaseur. Les pertes d'insertions sont à  $1.8 \pm 0.6$  dB avec une déviation de phase maintenue en dessous de  $\pm 5^\circ$  dans le pire cas, correspondant ainsi à un facteur de mérite (FoM) de 113°/dB à 10 GHz, ce qui est prometteur pour un déphaseur à commutation ultra-rapide.

## 1. Introduction

Les réseaux d'antennes phasées sont devenus un élément important dans le développement des nouveaux et futurs réseaux de communication (5G Hybride MU-MIMO (Multi-User Multi-Input Multi-Output)) mais aussi pour des applications orientées défenses. Le niveau de performances des déphaseurs ou des cellules déphasantes est donc un critère essentiel pour ajuster avec précision et rapidité le dépointage électronique du faisceau. Plusieurs catégories de déphaseurs existent en fonction des éléments de commutation ou de réglage. Ainsi, les déphaseurs passifs peuvent être analogiques (réglage continu) ou numériques (valeurs discrètes de phase) et encore être de type TTD (True-Time-Delay) [1], à lignes chargées par des stubs [2] ou RTPS (Reflection-Type Phase Shifter) [3], etc... Les déphaseurs RTPS ont connu de nombreux développements récents par leur très bon compromis entre adaptation entrée/sortie, faibles pertes pour un faible coût, compacité [3] et surtout un très bon facteur de mérite (FoM). Nous avons donc retenu cette technique pour concevoir un déphaseur RTPS numérique 2 bits avec 4 états ; i.e. 0°, 90°, 180° et 270°. Ce RTPS repose sur un coupleur hybride (branch-line) dont 2 accès sont chargés par des stubs à ligne microruban. Les valeurs de déphasage sont obtenues par commutation entre les différentes lignes en utilisant des commutateurs ultra-rapides SPST (Single-Pole Single-Throw) à base de films minces de dioxyde de Vanadium (VO<sub>2</sub>) qui est un

matériau à transition de phase isolant-métal. La conception cible une activation optique du VO<sub>2</sub> pour atteindre des temps de commutation les plus faibles, soit 1 à 5 ns selon nos premières caractérisations en interne TE-OX [4] et Thales Research and Technology [G. Garry, invited Talk SPIE Photonics West 2013] et confirmées récemment dans le cadre d'un projet ANR [5].

## 2. Dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>)

Le dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>) présente une transition de phase isolant-métal à une température relativement basse. A température ambiante (25°C), le VO<sub>2</sub> se trouve dans son état isolant et au-delà de 68°C ( $T_{cm}$ ), sa résistivité baisse d'environ quatre à cinq ordres de grandeur [4], le matériau transite alors dans un état métallique. La transition inverse de l'état métallique à isolant intervient à une température légèrement inférieure, autour de 65°C ( $T_{ci}$ ) (Figure 1).

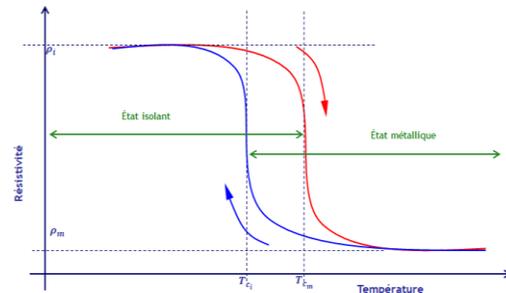


Figure 1. Hystérésis d'évolution des propriétés électriques du VO<sub>2</sub> pour une commande thermique [6]

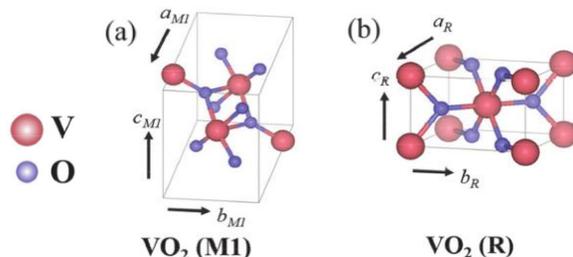


Figure 2. Structures cristallines polymorphes du VO<sub>2</sub> : a) monoclinique isolante M1 et b) rutile métallique R [7]

La transition de phase isolant-métal du VO<sub>2</sub> est associée à une transformation de la structure cristallographique, passant d'une structure monoclinique isolante M1 (Figure 2(a)) à une structure rutile métallique

R (Figure 2(b)). Cette transition peut être déclenchée par différents stimuli : optique, thermique, électrique, électrochimique, mécanique ou magnétique [8].

L'activation par commande optique, courtes impulsions LASER ou diode LASER, semble être particulièrement pertinente pour la conception de dispositifs RF car permettant l'obtention des temps de commutation les plus courts ce qui peut contribuer par exemple à l'amélioration des performances des antennes réseaux. De plus, à partir d'une conception dédiée, ce type de commande permet de simplifier la structure du circuit RF pour en réduire les pertes par rapport aux commandes électriques et thermiques. Cette publication cible donc la conception et l'utilisation de commutateurs à base de VO<sub>2</sub> à commande optique ultra-rapide par diode LASER appliqués à la réalisation de déphaseur 2-bit numérique RTPS en bande X.

### 3. Conception du RTPS 2 bits ultra-rapide

#### 3.a. Design du commutateur SPST à base de VO<sub>2</sub>

Les commutateurs à base de VO<sub>2</sub> ont été conçus en technologie coplanaire (CPW) sur un substrat Saphir (0001) ( $\epsilon_r = 10$ ) d'épaisseur 254  $\mu\text{m}$  avec une couche mince de VO<sub>2</sub> d'épaisseur 250 nm (Figure 3) pour un gap de VO<sub>2</sub> de 10  $\mu\text{m}$  et adaptés à 50  $\Omega$  à la fréquence de travail de 10 GHz. Les valeurs de résistivité du VO<sub>2</sub> dans ses 2 états issues de caractérisation DC [4] et utilisées pour nos simulations sous HFSS sont présentées à la Figure 3.

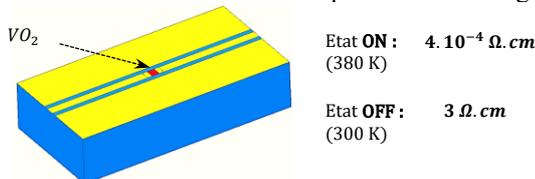


Figure 3. Commutateur SPST CPW à base de VO<sub>2</sub>

#### 3.b. Déphaseur proposé

Le déphaseur 2 bits proposé (0°/90°/180°/270°) est constitué (Figure 4) de deux déphaseurs 1-bit différents, 90° (Figure 5(a)) et 180° (Figure 5(b)), en cascade.

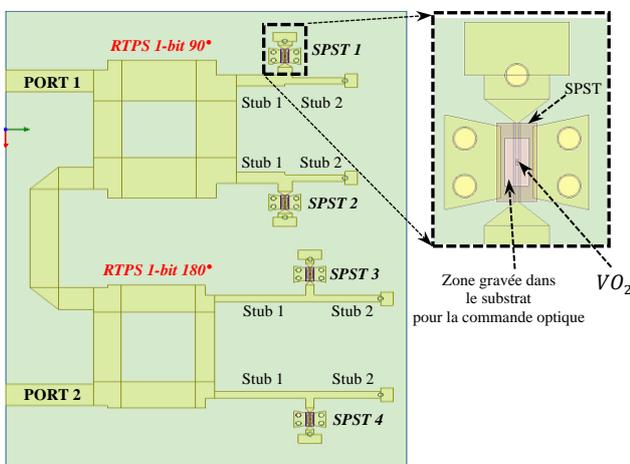


Figure 4. Déphaseur RTPS 2-bits en bande X

Les déphaseurs élémentaires à 1 bit sont basés sur la topologie RTPS composée d'un coupleur "branch-line" et

de deux stubs à ligne chargée (Stub 1 et Stub 2) connectés aux ports des voies directe et couplée de ce coupleur. Les déphaseurs unitaires [9] ont été étudiés pour minimiser l'influence des pertes introduites par les commutateurs puis optimisés pour l'obtention des valeurs différentielles des phases ciblées. Le commutateur SPST à base de VO<sub>2</sub> permet de commuter entre ces deux lignes (Stub1 et Stub2) selon l'état du VO<sub>2</sub> : métallique (ON  $\rightarrow$  Stub1 actif) ou isolant (OFF  $\rightarrow$  Stub1+Stub2 actifs). Ces déphaseurs sont conçus sur un substrat de type RT/duroid de 508  $\mu\text{m}$  d'épaisseur avec  $\epsilon_r=2.2$  et  $\tan\delta=0.0009$  à 10 GHz.

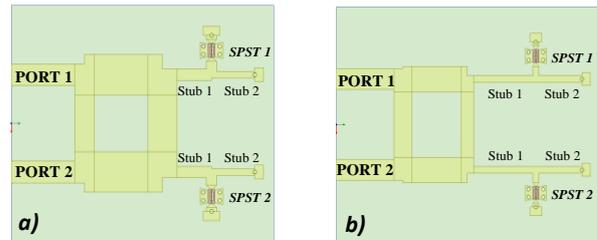


Figure 5. Déphaseurs RTPS 1-bit : a) 90° et b) 180°

Afin de faciliter la connexion entre les commutateurs CPW à base de VO<sub>2</sub> et les stubs à ligne chargée microruban sans utiliser de fils de "bonding", une technologie flip-chip sera utilisée. Les commutateurs sont contrôlés optiquement par des diodes LASER. Toute la face supérieure du PCB est ainsi dédiée au déphaseur et à l'ajout des éléments rayonnants en vue de réaliser un réseau d'antennes à commande de phase.

Le Tableau 1 résume les 4 états possibles de ce déphaseur 2-bits en fonction de la configuration des 4 commutateurs SPST à base de VO<sub>2</sub>.

	SPST 1	SPST 2	SPST 3	SPST 4
REF (0°)	ON	ON	ON	ON
90°	OFF	OFF	ON	ON
180°	ON	ON	OFF	OFF
270°	OFF	OFF	OFF	OFF

Tableau 1. Etats du RTPS 2-bits RTPS en fonction de l'activation des commutateurs SPST

### 4. Résultats de simulation

#### 4.a. Commutateur SPST

Les résultats de simulation des paramètres S du commutateur SPST à base de VO<sub>2</sub> sont présentés à la Figure 6.

Dans son état OFF (VO<sub>2</sub> à l'état isolant), le commutateur montre une bonne performance (niveau d'isolation  $S_{21} < -20$  dB sur une large bande de 8 à 20 GHz). Dans son état ON (VO<sub>2</sub> à l'état métallique), les résultats présentent des pertes d'insertion d'environ 0.7 dB pour une longueur de VO<sub>2</sub> de 10  $\mu\text{m}$ , tandis que l'adaptation ( $S_{11}$ ) est supérieure à 20 dB sur la bande 8-20 GHz. Les résultats de simulation sont détaillés pour 10 GHz dans le Tableau 2.

@10 GHz	$S_{11}$ (dB)	$S_{21}$ (dB)
ON	-22.46	-0.68
OFF	-0.05	-33.32

Tableau 2. Paramètres S simulés du SPST à 10 GHz

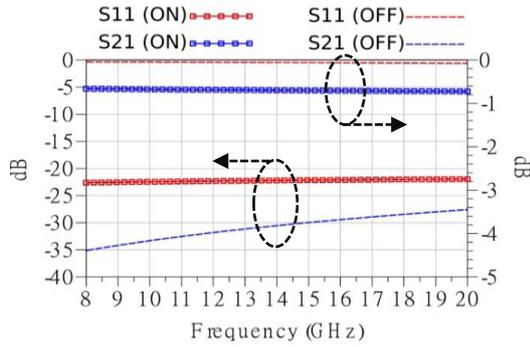


Figure 6. Paramètres S simulés du SPST

4.b. Déphaseur numérique 1-bit 90° et 180°

La Figure 7 présente les paramètres S simulés des déphaseurs RTPS 1-bit 90° (a) et 180° (b).

Les déphaseurs 90 et 180° présentent une bonne adaptation (>10 dB) sur une bande passante relative de 24.7% (8.6-11.1 GHz) et 28.6% (8.85-11.7 GHz), respectivement, tandis que les pertes d'insertion moyennes sont de 0.79±0.14 dB et 1.06±0.4 dB, conduisant à un facteur de mérite (FoM) de 97°/dB et 124°/dB ; le FoM étant défini par [3] :

$$FoM = \frac{\Delta\varphi_{max}}{IL_{max}}$$

où  $\Delta\varphi_{max}$  est le déphasage relatif maximal et  $IL_{max}$  correspond aux pertes d'insertion maximales sur l'ensemble des états de phase possibles. La largeur de bande relative pour une platitude de phase < 10° est de 17.9% (8.96-10.75 GHz) et 12.2% (9.27-10.49 GHz), respectivement.

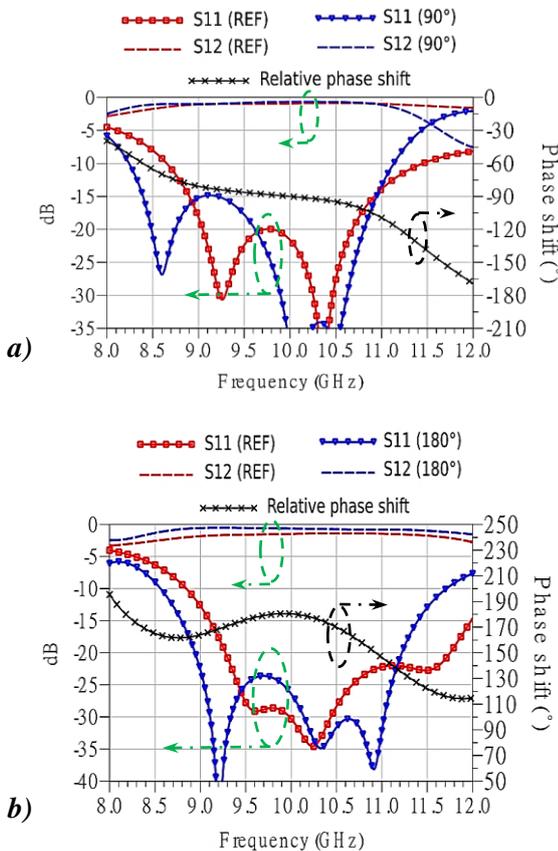


Figure 7. Paramètres S simulés des RTPS (a) 90° et (b) 180°

4.c. Déphaseur 2-bits 0/90°/180°/270°

La Figure 8 montre les paramètres S simulés du déphaseur 2-bit proposé. Une bonne adaptation est obtenue (>10 dB) sur une largeur de bande relative d'environ 22% (8.9-11.1 GHz). Une valeur élevée de FoM de 113°/dB est obtenue avec des pertes d'insertion moyennes de 1.8±0.6 dB. Une largeur de bande relative de 11 % (9.3-10.4 GHz) est atteinte pour une platitude de phase inférieure à 10°. Pour 10 GHz, les performances du déphaseur numérique 2-bit RTPS proposé sont récapitulées au Tableau 3.

Paramètres	Valeurs			
	Etat REF	Etat 90°	Etat 180°	Etat 270°
$S_{11}(dB) @10GHz$	-29.38	-26.94	-22.20	-23.54
BP (%) (<-10 dB)	28	22.8	31.4	27.1
$S_{21}(dB) @10GHz$	-2.44	-2.12	-1.64	-1.22
$\Delta\varphi(^{\circ}) @10GHz$	0°	-86.96	-177.22	-265.39

Tableau 3. Performances RF simulées du déphaseur numérique 2-bit RTPS contrôlé par des commutateurs à base de VO<sub>2</sub>

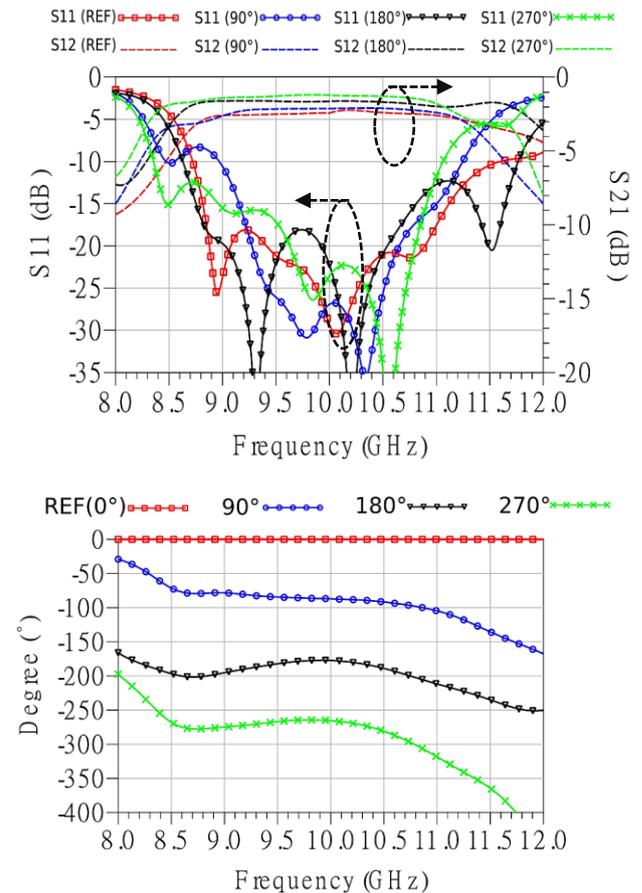


Figure 8. Paramètres S simulés du RTPS 2-bits complet

5. Conclusion

La nouvelle topologie de déphaseur 2-bits RTPS en bande X présentée ici fait appel à des commutateurs à base de VO<sub>2</sub> reportés en "flip-chip" pour une commutation ultra-rapide commandée optiquement des différents états

de phase. Les simulations montrent un très bon facteur de mérite (FoM) aux alentours de 113°/dB sur une bande relative de 22% (8.95-11.16 GHz) environ. Ces valeurs sont à la hauteur de l'état de l'art actuel des déphaseurs quelles que soient les techniques utilisées, avec comme valeur ajoutée des temps de commutation attendus ultra-courts. Une caractérisation RF des performances du système complet incluant la commande optique est planifiée mais pour une nouvelle version minimisant le nombre de commande optique, e.g. RTPS 2-bits à 2 commandes optiques au lieu des 4 nécessaires ici.

## 6. Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet DRUIDE (programme RAPID) financé par la DGA sous convention n° 192906070.

## Références

- [1] P. Anand, S. Sharma, D. Sood, and C. C. Tripathi, "Design of compact reconfigurable switched line microstrip phase shifters for phased array antenna," *1<sup>st</sup> International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication & Networking*, 2012.
- [2] Y. P. Lyu, L. Zhu, and C. H. Cheng, "Single-Layer Broadband Phase Shifter Using Multimode Resonator and Shunt  $\lambda/4$  Stubs," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 7, n°. 7, pp. 1119–1125, Jul. 2017.
- [3] F. Burdin, Z. Iskandar, F. Podevin, and P. Ferrari, "Design of compact reflection-type phase shifters with high figure-of-merit," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 6, pp. 1883–1893, Jun. 2015.
- [4] O. M. Ishchenko *et al.*, "Strongly electronic-correlated material for ultrafast electronics application.," *18th International Conference on Nanotechnology, IEEE-NANO*, 2018.
- [5] M. N. Sadiq, M. Le Roy, A. Perennec, P. Laurent, N. Martin, D. Passerieux, A. Crunteanu, R. Boyer, F. Dumas-Bouchiat, M-B. Martin, L. Divay, Q. Levesque, G. Tanné, "Design and Characterisation of VO<sub>2</sub> Based Switches for Ultra-Fast Reconfigurable Devices," *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, 2019.
- [6] M. N. Sadiq, M. Le Roy, A. Perennec, P. Laurent, N. Martin, D. Passerieux, A. Crunteanu, R. Boyer, F. Dumas-Bouchiat, M-B. Martin, L. Divay, Q. Levesque, G. Tanné, "Caractérisations RF et optique de commutateurs hyperfréquences ultra-rapides à base de VO<sub>2</sub>." *16<sup>èmes</sup> JCMM*, Toulouse, France, 2020.
- [7] Y. Zhang, W. Xiong, W. Chen, and Y. Zheng, "Recent progress on vanadium dioxide nanostructures and devices: Fabrication, properties, applications and perspectives," *Nanomaterials*, vol. 11, n°. 2, 338, 2021..
- [8] Y. Ke, S. Wang, G. Liu, M. Li, T. J. White, and Y. Long, "Vanadium Dioxide: The Multistimuli Responsive Material and Its Applications," *Small*, vol. 14, no. 39. Wiley-VCH Verlag, Sep. 27, 2018.
- [9] B. Bélenger, B. Espana, S. Courrèges, P. Blondy, O. Vendier, D. Langrez, J.-L. Cazaux, "A High-Power Ka-Band RF-MEMS 2-Bit Phase Shifter on Sapphire Substrate," *6<sup>th</sup> European Microwave Integrated Circuit Conference*, pp. 164-167, 2011.