

# Nanocaractérisation des mécanismes de commutation des mémoires résistives à base d'oxyde d'hafnium

Tristan Dewolf<sup>1\*</sup>, V. Delaye<sup>1</sup>, N. Chevalier<sup>1</sup>, H. Grampeix<sup>1</sup>, E. Jalaguier<sup>1</sup>, P. Gonon<sup>2</sup>, M. Kogelshaf<sup>2</sup>, G. Audoit<sup>1</sup>, S. Schamm-Chardon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France,  
CEA LETI, MINATEC Campus, F-38054 Grenoble, France

<sup>2</sup>Univ. Grenoble Alpes, LTM, F-38000 Grenoble, France  
CNRS, LTM, F-38000 Grenoble, France

<sup>3</sup>CEMES-CNRS, Université de Toulouse, 29 rue Jeanne Marvig, Toulouse, France

\*tristan.dewolf@cea.fr; Téléphone : 0438781928

## 1. INTRODUCTION

Les mémoires résistives (RRAM) sont des candidates prometteuses pour les nouvelles générations de mémoires non-volatiles [1]. Elles suscitent un intérêt du fait de leur haute densité d'intégration, de leur grande vitesse de fonctionnement et de leur faible consommation. Les RRAM sont des structures métal-isolant-métal (M-I-M) capables de changer de résistance à l'application d'une tension. Dans le cas où l'isolant est un oxyde, on parle alors d'OxRRAM. Le principe des OxRRAM repose sur une transition réversible d'un état de haute résistivité HRS (High Resistance State) à un état de faible résistivité LRS (Low Resistance State) d'un oxyde suite à l'application d'une tension.

Le phénomène de commutation résistif a été observé dans une grande variété d'oxydes des métaux de transition (NiO, TiO<sub>2</sub>, TaO<sub>x</sub>, WO<sub>x</sub>, ZrO<sub>2</sub>). Parmi ceux-ci, HfO<sub>2</sub> a attiré beaucoup d'attention parce qu'il offre, entre autre, des coûts de fabrication faibles et une bonne compatibilité avec les processus de fabrication des transistors à effet de champ MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors). Cependant, le mécanisme de commutation n'est pas encore totalement compris. R. Waser et al [2] ont proposé un mécanisme de changement de résistance des OxRRAM qui depuis a largement été accepté dans la littérature. Ce mécanisme est basé sur la migration d'oxygène dans l'empilement M-I-M et la formation/suppression d'une région conductrice confinée entre les électrodes supérieure et inférieure appelée filament conducteur.

L'optimisation de ces dispositifs requiert une compréhension du mécanisme de commutation. Nous proposons de mettre en œuvre des analyses structurales et chimiques très locales par microscopie électronique en transmission de façon à examiner les changements chimiques et électroniques induits par le mécanisme de commutation et ainsi caractériser le filament conducteur et des électrodes dans les différents états de la mémoire.

## 2. RESULTATS

### 2.1 Conditions expérimentales

L'empilement MIM consiste en un wafer de Si (100) sur lequel est déposée une couche PVD (Physical Vapor Deposition) de 35 nm de TiN puis une couche ALD (Atomic Layer Deposition) de 5 nm d'oxyde d'hafnium et une électrode supérieure de 10 nm de Ti PVD. L'électrode supérieure est protégée de l'oxydation par un dépôt PVD de 50 nm de TiN. Différentes étapes de gravure, lithographie DUV (Deep Ultra-Violet) et faisceau d'électron sont enfin réalisées pour graver l'électrode supérieure qui a finalement un diamètre 80 à 130nm pour pouvoir confiner le filament conducteur.

Les mémoires MIM sont commutées à l'aide d'un AFM Dimension (Bruker), placé dans une boîte à gant sous flux constant d'azote, en mode conducteur. La pointe AFM (diamant dopé B) est directement reliée par un réseau de câblage à un générateur Keithley piloté par un programme sous Labview.

La lame TEM est préparée par sonde ionique focalisée (FIB) utilisant un faisceau de gallium d'un système Hélios450S possédant deux colonnes (une électronique une ionique) de FEI.

Finalement, la région conductrice est analysée en Spectroscopie de Pertes d'Énergie d'Électrons (EELS) sur un microscope TECNAI OSIRIS (FEI). Des informations complémentaires sur la structure et la composition de la région active sont obtenues en mode HAADF et HRTEM sur un TECNAI G2 F 2 (FEI).

### 2.2 Tests électriques

Les mesures C-AFM ont été réalisées en appliquant directement la tension au niveau de la pointe en contact avec l'électrode supérieure de la structure mémoire de 80, 100 ou 130 nm de diamètre. Le schéma du montage est représenté dans l'insert de la figure 1a. Plusieurs balayages en tension ont été réalisés avec différents courants

limites appelés courants de compliance (25  $\mu\text{A}$ , 50  $\mu\text{A}$ , 100  $\mu\text{A}$  et 250  $\mu\text{A}$ ). Nous avons arrêté la mise sous tension une fois le courant limite atteint afin de pouvoir étudier l'empilement juste après la première étape de formation du filament appelée étape d'« electroforming ». La courbe I(V) pour un courant de compliance de 100  $\mu\text{A}$  est présentée sur la figure 1a. Le courant de compliance est atteint pour une tension  $V_{\text{electroforming}}$  égale à 2.3 V.

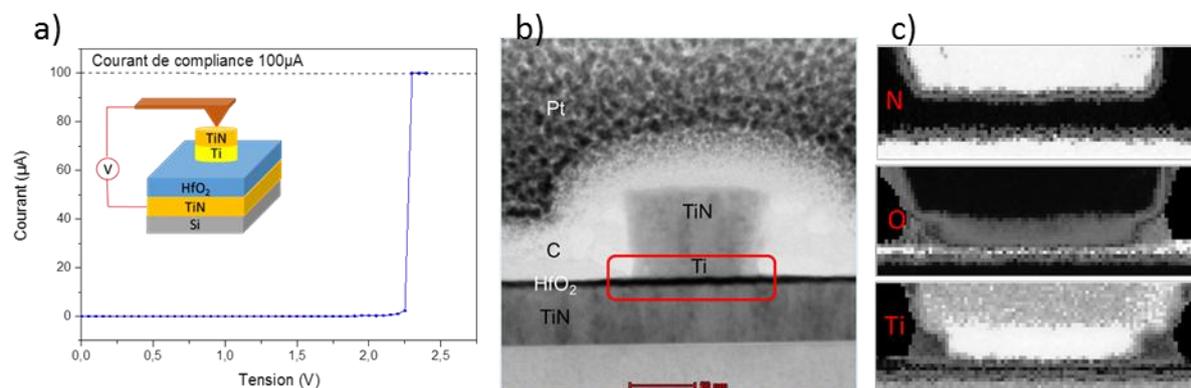


Figure 1: (a) Courbe I(V) mesurée par polarisation de la pointe AFM. Insert : empilement et schéma du montage utilisé. (b) Image STEM-HAADF de la structure mémoire commutée. (c) Cartographies chimiques STEM-EELS de la région encadrée en rouge, pour l'azote, l'oxygène et le titane.

### 2.3 Analyses STEM-EELS / HRTEM

La figure 1b montre l'image STEM-HAADF réalisée sur la structure mémoire après « electroforming ». Toutes les couches de l'empilement Si/TiN/HfO<sub>2</sub>/Ti/TiN sont visibles et la distribution des différents éléments O, N et Ti peut être repérée sur les cartographies EELS correspondantes (Figure 1c). En particulier, nous ne mettons pas en évidence une diffusion du métal dans la couche d'oxyde d'hafnium. Un tel phénomène de diffusion d'espèces provenant de l'électrode supérieure, formant un chemin de conduction riche en Ti, avait été précédemment observé par TEM/EELS par Privitera et al. [3].

Sur l'image HRTEM (figure 2) d'une lame relativement mince (50 nm) apparaît une zone de contraste plus clair que celui de HfO<sub>2</sub>. Cette zone pourrait correspondre à un chemin de conduction reliant les deux électrodes Ti et TiN. Des analyses sont en cours afin d'étudier plus en détail cette zone.

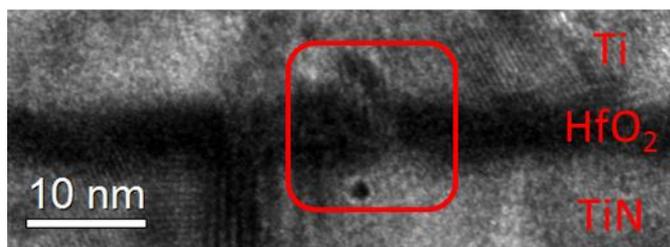


Figure 2 : Image HRTEM de la structure mémoire après amincissement FIB. Encadré : zone de faible contraste.

## 3. CONCLUSION

La 1<sup>ère</sup> étape du fonctionnement de la mémoire TiN/HfO<sub>2</sub>/Ti/TiN a été réalisée en utilisant un AFM conducteur. La formation d'une potentielle zone de conduction locale dans l'oxyde d'hafnium a été mise en évidence par HRTEM. Une prochaine analyse chimique permettra de préciser la nature de cette zone. Ces premiers résultats contribuent à une meilleure compréhension du mécanisme de commutation des structures OxRRAM à base d'oxyde d'hafnium.

## REFERENCES

- [1] Sawa A. *Mater. Today*, **11**, 28 (2008)
- [2] Waser R, Dittmann R, Staikov G and Szot K. *Adv. Mater*, **21**, 2632 (2009)
- [3] Privitera et al., *Micro. Eng.*, **109**, 75-78 (2013)