

Étude de Memristor à base d'IGZO

Ion Spinu

Faculté de physique
Université de Bucarest

Laboratoire des hétérostructures et des
matériaux multifonctionnels (HeCoMat)

Institut national de physique des
matériaux

Magurele, Roumanie

ion.spinu@infim.ro

<https://orcid.org/0009-0003-5705-6910>

Cristina Besleaga

Laboratoire des hétérostructures et des
matériaux multifonctionnels (HeCoMat)

Institut national de physique des
matériaux

Magurele, Roumanie

<https://orcid.org/0000-0003-3311-869X>

Lucian Pintilie

Laboratoire des hétérostructures et des
matériaux multifonctionnels (HeCoMat)

Institut national de physique des
matériaux

Magurele, Roumanie

<https://orcid.org/0000-0002-4934-2912>

Résumé— Cet article présente les aspects généraux et les études préliminaires sur les memristors oxydés. Dans ce contexte, nous avons réalisé et étudié un memristor à base d'IGZO en configuration en barres croisées 'crossbar'. Les résultats montrent une courbe courant-tension (I-V) présentant une hystérésis caractéristique et révèlent également un seuil de commutation situé entre 1,5 V et 2 V. Ces observations confirment le potentiel des memristors IGZO pour des applications futures dans les dispositifs neuromorphiques et les mémoires non volatiles.

Mots-clés—memristor, IGZO, résistance, crossbar

I. INTRODUCTION

Les memristors sont des composants électroniques passifs élémentaires dont la propriété est de conserver le courant qui les a traversés précédemment [1]. Ils ont été proposés par Leon Chua en 1971 [2]. Les memristors se comportent comme des synapses neuronales artificielles dans les applications de réseaux neuromorphiques [3]. Leur principale utilité dans ces applications est de réduire les pertes d'énergie importantes des technologies CMOS actuelles [4].

Les memristors ont été étudiés depuis les années 1960, sans toutefois être appelés memristors. Afin de réduire la consommation d'énergie des composants électroniques conventionnels, au cours des deux dernières décennies, ils ont fait l'objet des études mathématiques et physiques plus approfondies [5-8].

Ils pourraient principalement être utilisés dans des applications médicales telles que les neuroprothèses, l'amélioration des capacités cognitives humaines [9], la sécurité des logiciels et la reconnaissance d'images [11].

Les memristors sont principalement classés en deux catégories : numériques et analogiques [12]. Ces dernières peuvent être subdivisées en memristors oxydés, ioniques, à effet tunnel résonnant, à manganite, ferroélectriques et spintroniques.

A. Memristors oxydés

La commutation de résistance (R_S) peut être observée dans des oxydes tels que : IGZO, TiO_2 , CuO, ou MoO. Le mécanisme R_S est basé sur la migration des lacunes d'oxygène sous l'action d'un champ électrique externe dans la couche active du dispositif. L'empreinte des effets R_S est la transition entre l'état de faible résistance (LRS) et l'état de forte résistance (HRS) [12]. Lorsqu'une tension positive est appliquée à l'électrode supérieure, ces ions oxygène mobiles migrent vers l'électrode supérieure et s'accumulent à proximité de celle-ci, créant une forte concentration de lacunes cationiques à sa limite. À faible champ électrique, le système est en état de forte

résistance (HR). Ces amas de lacunes sont les noyaux du futur filament, et l'augmentation du champ électrique local entraîne une croissance supplémentaire du filament. Dès que ce dernier est entièrement formé, la R_S se produit dans l'état de faible résistance (LRS).

B. Memristors polymères

Les memristors polymères sont des memristors organiques utilisés dans les systèmes neuromorphiques flexibles, car ils sont biocompatibles, mécaniquement flexibles et peu coûteux [13]. Leur mécanisme de fonctionnement repose sur la migration d'ions (par exemple Li^+ [14]) lorsqu'un champ électrique est appliqué. L'inconvénient des memristors polymères réside dans l'instabilité thermique des matériaux organiques et leurs caractéristiques de commutation résistive chaotique localisée élevée [15].

C. Memristors à diode à effet tunnel résonant

Dans de telles structures, les électrons peuvent passer par certains états résonnants à certains niveaux d'énergie. L'architecture de ce type de memristor peut varier entre double barrière, triple barrière, fil quantique et points quantiques [16].

D. Memristor contrôlé par champ magnétique

La commutation résistive (RS) des memristors contrôlés par champ magnétique (MFC Memristor) peut être contrôlée en appliquant un faible champ magnétique. Les MFC Memristor peuvent être utilisés notamment pour le stockage d'informations.

E. Memristors ferroélectriques

Les memristors ferroélectriques, qui ont une structure en croisillons sur un substrat de silicium monocristallin, peuvent être utilisés pour les cellules logiques booléennes de base et les réseaux neuronaux profonds pour la reconnaissance d'images. [17]

De plus, certains memristors ferroélectriques peuvent former une jonction tunnel ferroélectrique lorsqu'un film ferroélectrique d'une épaisseur de quelques nanomètres est placé (« pris en sandwich ») entre deux électrodes métalliques ; en appliquant un champ électrique externe, deux états distincts seront commutés. Ce type de memristor peut être utilisés dans différentes applications telles que l'identification par radiofréquence, les appareils intelligents et l'électronique grand public [12].

F. Memristors spintroniques

Les memristors spintroniques ont une résistance qui varie en fonction de la direction du spin des électrons. La direction du spin peut être modifiée à l'aide d'un aimant mobile afin d'observer l'hystérésis du memristor [12]. Ces memristors

présentent l'avantage de la non-volatilité des memristors résistifs [18].

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Dans cet article, le matériau utilisé comme semi-conducteur pour les dispositifs memristors était l'Indium Gallium Zinc Oxyde (IGZO), un mélange amorphe d'oxyde d'indium, d'oxyde de gallium et d'oxyde de zinc.

L'avantage de ce matériau réside dans sa large bande interdite, sa fabrication à basse température et sa mobilité élevée sous l'effet de champ [19, 20, 21].

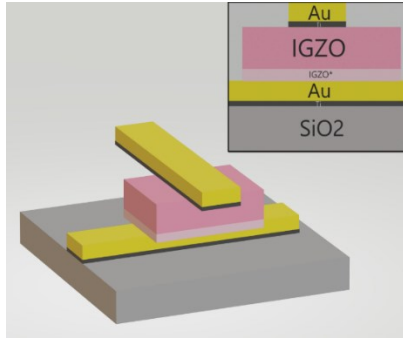


Fig.1 Architecture en barres croisées (crossbar) du memristor IGZO

La Figure 1 présente une représentation schématique des memristors étudiés. Les dispositifs ont été fabriqués sur un verre supérieur sur lequel une électrode inférieure en Ti/Au a d'abord été déposée. Ensuite, une couche semi-conductrice IGZO a été déposée, suivie du dépôt de l'électrode supérieure en Ti/Au.

Cette architecture a été choisie car elle fait partie des configurations les plus étudiées dans la littérature, ce qui facilite l'identification des mécanismes physiques régissant le comportement de commutation résistive (c'est-à-dire les transitions entre différents états résistifs) du memristor.

Deux méthodes de fabrication principales ont été utilisées : la lithographie UV et la pulvérisation cathodique en champ magnétron assistée par radiofréquence.

Les couches semi-conductrices ont été déposées par pulvérisation cathodique en champ magnétron assistée par radiofréquence à l'aide du système AJA Phase II J. Les matériaux utilisés pour les électrodes étaient le Titane (Ti) et l'or (Au), qui ont été déposés par pulvérisation cathodique RF-magnétron à l'aide d'un système personnalisé. L'épaisseur du Ti est de 7 nm et celle de l'Au est de 80 nm.

A. Lithographie ultraviolette

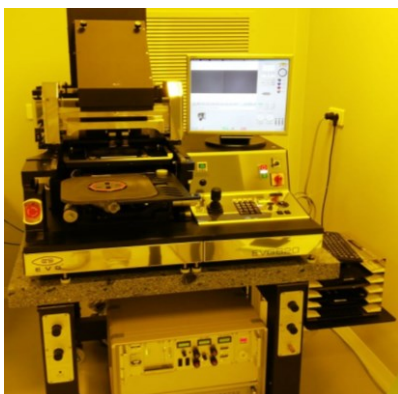


Fig.2 Système de lithographie UV EVG 620 NT

La lithographie ultraviolette est un type de technologie qui utilise une source lumineuse de 13,5 nm. Cette UVL ne peut être utilisée qu'avec un seul masque par exposition, et non pour des expositions multiples. Pour cette technologie, on utilise une résine photo-résistante, une source lumineuse et un photomasque (Figure 2).

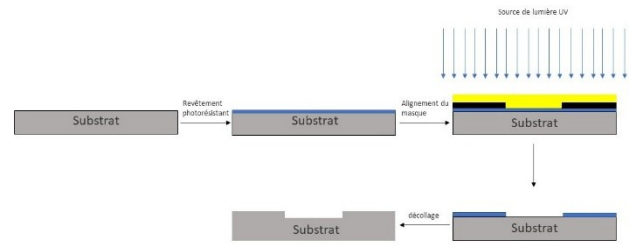


Fig.3 Représentation schématique de la séquence du processus photo-lithographique

Comme le montre la figure 3 pour l'UVL, le substrat est d'abord recouvert d'une résine photo-résistante, puis exposé à la lampe UV dans le dispositif d'alignement. Après le processus de gravure, l'échantillon est plongé dans un révélateur, puis nettoyé pour éliminer les résidus de photorésist. Il est ensuite nettoyé à l'eau afin que les résidus de révélateur n'altèrent pas la structure de l'échantillon.

B. Pulvérisation cathodique en champ magnétron assistée par radiofréquence



Fig.4 Système de pulvérisation cathodique en champ magnétron assistée par radiofréquence AJA Phase II J

La pulvérisation cathodique en champ magnétron assistée par radiofréquence est une méthode de dépôt qui utilise un plasma gazeux généré et situé dans un espace limité contenant une « cible », c'est-à-dire un matériau (dans notre cas, IGZO, Ti et Au) à déposer sur les échantillons souhaités. La surface de la cible est corrodée par des ions à haute énergie situés dans le plasma, les atomes libérés traversent le vide et se déposent sur l'échantillon, formant ensuite un film mince.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Quelques observations ont été faites sur les memristors IGZO crossbar. Ils présentent une hystérésis à la fois sous tension positive et sous tension négative. Leur état de faible résistance (LRS) commence entre 1,5 V et 2,0 V. Cela indique qu'ils commencent à conserver leur état de résistance à partir d'environ 2 V (Figure 5).

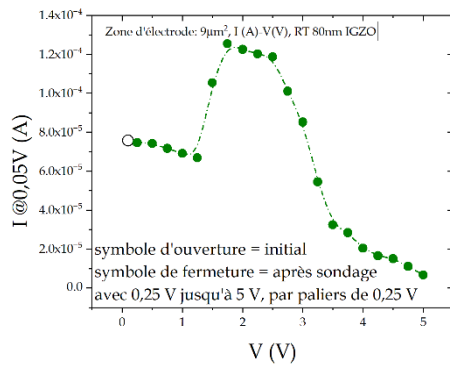


Fig.5 Mesure I (@0,05 V) pour différentes tensions

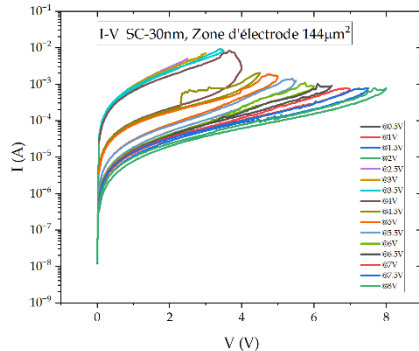


Fig.6 Mesure des caractéristiques I-V pour le memristor à base d'IGZO

Un dispositif peut être qualifié de memristor lorsque des boucles pincées (hystérésis) sont observées après l'application d'une tension. Cela indique que le dispositif est un memristor.

De plus, on constate que le memristor présente différents états résistifs (hystérésis) en fonction de la tension appliquée (Figure 6).

Ces états résistifs peuvent être réinitialisés et réécrits en appliquant des valeurs de tension prédéfinies, notre dispositif présentant à la fois une plasticité à court terme et à long terme. Une telle augmentation et diminution progressive de la résistance du memristor est très intéressante, car elle permet la mise en œuvre des deux règles d'apprentissage : Hebbian et anti-Hebbian.

IV. CONCLUSIONS

Les memristors développés ont pour matériau actif l'oxyde d'indium, de gallium et de zinc. Le processus de fabrication de cet oxyde est compatible avec les technologies actuelles appliquées au niveau industriel, de sorte que le transfert technologique peut être réalisé sans difficulté. Les memristors obtenus ont plusieurs états de résistance qui peuvent être écrits avec une faible tension, ce qui conduit à une faible consommation d'énergie.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par PNRR-III-C9-2022 – I8 Cod CF 8 et par le programme principal PC2-PN23080202.

RÉFÉRENCES

[1] William L. Hosch, "memristor" [Online]. Available: <http://britannica.com/technology/memristor>

[2] L. Chua, "Memristor-The missing circuit element," in IEEE Transactions on Circuit Theory, vol. 18, no. 5, pp. 507-519, September 1971

[3] Li Zhang, Zhenhua Tang, Dijie Yao, Zhaoyuan Fan, Songcheng Hu, Qi-Jun Sun, Xin-Gui Tang, Yan-Ping Jiang, Xiaobin Guo, Mingqiang Huang, Gaokuo Zhong, Ju Gao, Synaptic behaviors in flexible Au/WOx/Pt/mica memristor for neuromorphic computing system, Materials Today Physics, Volume 23, 2022, 100650

[4] G. Kumar and K. Datta, "Design of digital functional blocks using hybrid memristor structures," TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, China, 2015, pp. 1-5

[5] Strukov, D., Snider, G., Stewart, D. et al. The missing memristor found. Nature 453, 80–83 (2008).

[6] T. W. Hickmott; Low - Frequency Negative Resistance in Thin Anodic Oxide Films. J. Appl. Phys. 1 September 1962; 33 (9): 2669-2682.

[7] S. Kundu, P. B. Ganganaik, J. Louis, H. Chalamalasetty and B. P. Rao, "Memristors Enabled Computing Correlation Parameter In-Memory System: A Potential Alternative to Von Neumann Architecture," in IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, vol. 30, no. 6, pp. 755-768, June 2022

[8] Xiang Li, Dorsan Lepour, Fabian Heymann, François Maréchal, Electrification and digitalization effects on sectoral energy demand and consumption: A prospective study towards 2050, Energy, Volume 279, 2023, 127992, ISSN 0360-5442

[9] Mikhaylov A, Pimashkin A, Pigareva Y, Gerasimova S, Gryaznov E, Shchepanikov S, Zuev A, Talanov M, Lavrov I, Demin V, Erokhin V, Lobov S, Mukhina I, Kazantsev V, Wu H and Spagnolo B (2020) Neurohybrid Memristive CMOS-Integrated Systems for Biosensors and Neuroprosthetics. Front. Neurosci. 14:358

[10] Lv, S., Liu, J. and Geng, Z. (2021), Application of Memristors in Hardware Security: A Current State-of-the-Art Technology. Adv. Intell. Syst., 3: 2000127

[11] Ji, X.; Dong, Z.; Zhou, G.; Lai, C.S.; Yan, Y.; Qi, D. Memristive System Based Image Processing Technology: A Review and Perspective. Electronics 2021, 10, 3176

[12] N. Nithya and K. Paramasivam, "A Comprehensive Study on the Characteristics, Complex Materials and Applications of Memristor," 2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2020, pp. 171-176

[13] Hea-Lim Park, Min-Hoi Kim, Sin-Hyung Lee, Control of conductive filament growth in flexible organic memristor by polymer alignment, Organic Electronics, Volume 87, 2020, 105927, ISSN 1566-1199

[14] Feng, Y., Gao, X., Zhong, Y., Wu, J., Xu, J. and Wang, S. (2019), Solution-Processed Polymer Thin-Film Memristors with an Electrochromic Feature and Frequency-Dependent Synaptic Plasticity. Adv. Intell. Syst., 1: 1900022

[15] Jinglin Sun, Zhilong He, Shuzhi Liu, Fei Fan, Weihua Chen, Bin Zhang, Gang Liu, Intramolecular rotation induced High-Temperature Self-Optimization for polymer memristor devices, European Polymer Journal, Volume 161, 2021, 110814, ISSN 0014-3057

[16] Jian Ping Sun, G. I. Haddad, P. Mazumder and J. N. Schulman, "Resonant tunneling diodes: models and properties," in Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 4, pp. 641-660, April 1998

[17] Dong-Ping Yang, Wen-Min Zhong, Jun Li, Xin-Gui Tang, Qi-Jun Sun, Qiu-Xiang Liu, Yan-Ping Jiang, Ferroelectric memristors based on double perovskite Bi2FeCoO6 for synaptic performance and human expression recognition storage, Materials Today Electronics, Volume 11, 2025, 100133, ISSN 2772-9494

[18] Abeer Al-Edresi, Gülcan Aydın, Mouna El Abboubi, Sinan Kazan, İdris Candan, Sait Eren San, A review on footsteps of a revolution in electronics: Spin memristors, Materials Today Physics, Volume 55, 2025, 101760, ISSN 2542-5293

[19] Nomura, K., Ohta, H., Takagi, A. et al. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. Nature 432, 488–492 (2004)

[20] K. C. Sanal, M. Majeesh, and M. K. Jayaraj "Growth of IGZO thin films and fabrication of transparent thin film transistor by RF magnetron sputtering", Proc. SPIE 8818, Nanostructured Thin Films VI, 881814 (19 September 2013)

[21] M. J. Kim, H. J. Park, S. Yoo, M. H. Cho and J. K. Jeong, "Effect of Channel Thickness on Performance of Ultra-Thin Body IGZO Field-Effect Transistors," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 69, no. 5, pp. 2409-2416, May 2022