

DISS. ETH NO. 29240

***Investigation of the Effect of Mechanical  
Pressure on Memristor Device Characteristics***

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

*YOURI POPOFF*

*MSc EEIT, ETHZ*

born on *23.02.1991*

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. M. Luisier (doctoral thesis supervisor)*

*Prof. Dr. M. Kraft*

*Dr. J. Fompeyrine*

*Dr. O. Groening*

*Dr. B. Offrein*

2023

---

# ABSTRACT

---

## .1 Abstract in English

IN recent years, neuromorphic computing has been introduced as a new computing paradigm to continue the exponential acceleration of computing power observed over more than half a century. The impending End of Moore's Law and the von Neumann bottleneck seen in the implementation of modern computers have motivated the development of neural networks, which represent one of the numerous approaches to implement neuromorphic computers. The research community is directing its focus on the benefits brought by dedicated hardware integrations of neural networks over pure software solutions, which cannot be optimally run on a classical computing hardware. The realisation of neuromorphic hardware asks for the development of artificial synapses, to which memristors are one of the possible answers.

In this PhD thesis, the effect of mechanical pressure as an external stimuli on memristors is investigated. For a long time, it has been well-known that a mechanical force can influence the physical properties of materials. The benefits from the change of the electrical characteristics is of special interest, as shown by the recent development of strained-Si channel transistors in which the increase of carrier mobility due to strain in the

material lead to a performance enhancement. The objective of this work is to discover if similar improvements are possible in memristor devices. Furthermore, the investigation focuses on the possibility to use mechanical force as a way to fine-tune the resistive state of memristors, a concept which allows to introduce an additional input to the devices.

In this work, three technologies are developed and evaluated in order to find the most suitable candidate for the study of the effect of pressure. Filamentary devices  $\text{HfO}_2/\text{Ti}$  **Resistive Random Access Memory (RRAM)**,  $\text{TaO}_x/\text{HfO}_2$  bilayer **RRAM**, and **Hafnium Zirconium Oxide (HZO) Ferroelectric Random Access Memory (FeRAM)** are fabricated and measured with a characterisation setup created for this purpose. A new probestation is built from scratch and automated measurements are performed using a custom control software. The resulting data are then analysed using a newly written program to run statistical analysis on the memristor measurement data.

To further understand the underlying switching mechanisms of these memristors, an impedance spectroscopy analysis method is refined and used on the bilayer **RRAM** and **FeRAM** technologies. After setting up and validating the method, a novel fitting procedure is utilised to model the behaviour of the devices. Following the **Direct Current (DC)** characterisation and impedance measurements, the ferroelectric memristor technology is chosen as the main candidate for the pressure experiments because amongst the three technologies considered it exhibits the highest reproducibility of memristive states in operation.

The development of an indenter tool is presented and used to precisely apply forces up to 2.75 N on integrated devices with a flat surface sapphire tip of  $\sim 75 \mu\text{m}$  diameter. A repeatable, consistent, and reversible effect due to pressure is observed and quantified. An increase up to 25% of the resistance of the **FeRAM** is shown in this work for a pressure of 0.54 GPa. The role of the piezoresistivity of the layer stack and of the pressure-induced ferroelectric domain switching are presented as the source of the resistance change.

As another means of applying stress to a device, the co-integration of a memristor and of a nano-actuator is targeted. Out of the many developed processing techniques, two main process modules are presented: the vertical sidewall **Ion Beam Etching (IBE)** etch of **Lead Zirconate Titanate (PZT)** and the advanced planarisation method of complex device topographies.

Building on top of this, an integrated nano-actuator platform is developed and fabricated devices are characterised using a optimised **Double Beam Laser Interferometer (DBLI)** system with a  $2\ \mu\text{m}$  diameter measurement beam. An unparalleled piezoelectric response of  $\sim 200\ \text{pm/V}$  is measured for **Chemical Solution Deposition (CSD) PZT** on platinised Si actuators. The role of layer unclamping is investigated as the reason for the large piezoelectric response.

As an outlook, the results of the development and fabrication of the fully co-integrated device are presented. Further future improvements to the different topics of this thesis are suggested as well.

## .2 Résumé

CES dernières années, l'informatique neuromorphique a été introduite comme nouveau paradigme informatique pour poursuivre l'accélération exponentielle de la puissance de calcul observée depuis plus d'un demi-siècle. La fin imminente de la Loi de Moore et le goulot d'étranglement de von Neumann observés dans la mise en œuvre des ordinateurs modernes ont motivé le développement des réseaux de neurones, qui représentent l'une des nombreuses approches pour mettre en œuvre des ordinateurs neuromorphiques. La communauté scientifique se concentre sur les avantages apportés par les intégrations matérielles dédiées des réseaux de neurones par rapport aux solutions logicielles pures, qui ne peuvent pas être exécutées de manière optimale sur un matériel informatique classique. La réalisation de matériel neuromorphique demande le développement de synapses artificielles, auxquelles les memristors sont une des réponses possibles.

Dans cette thèse de doctorat, l'effet de la pression mécanique en tant que stimuli externe sur les memristors est étudié. Depuis des temps mathusalémiques, il est bien connu qu'une force mécanique peut influencer les propriétés physiques des matériaux. Les avantages du changement des caractéristiques électriques sont particulièrement intéressants, comme le montre le développement récent des transistors à canal Si contraint dans lesquels l'augmentation de la mobilité des porteurs due à la contrainte dans le matériau conduit à une amélioration des performances. L'objectif de ce travail est de découvrir si des améliorations similaires sont possibles dans les dispositifs à memristor. De plus, l'étude se concentre sur la possibilité d'utiliser la force mécanique comme moyen d'affiner l'état résistif des memristors, un concept qui permet d'introduire une entrée supplémentaire dans les dispositifs.

Dans ce travail, trois technologies sont développées et évaluées afin de trouver le candidat le plus approprié pour l'étude de l'effet de la pression. Des dispositifs filamenteux  $\text{HfO}_2/\text{Ti}$  **RRAM**, bicouche  $\text{TaO}_x/\text{HfO}_2$  **RRAM**

et **HZO FeRAM** sont fabriqués et mesurés avec un système de caractérisation créé à cet effet. Une nouvelle station de caractérisation est construite à partir de zéro et des mesures automatisées sont effectuées à l'aide d'un logiciel de contrôle personnalisé. Les données résultantes sont ensuite analysées à l'aide d'un programme nouvellement écrit pour exécuter une analyse statistique sur les données de mesure du memristor.

Pour mieux comprendre les mécanismes de commutation sous-jacents de ces memristors, une méthode d'analyse par spectroscopie d'impédance est affinée et utilisée sur les technologies bicouches **RRAM** et **FeRAM**. Après la mise en place et la validation de la méthode, une nouvelle procédure d'ajustement est utilisée pour modéliser le comportement des dispositifs. Suite à la caractérisation **DC** et aux mesures d'impédance, la technologie des memristors ferroélectriques est choisie comme principale candidate pour les expériences de pression, car parmi les trois technologies considérées, elle présente la plus grande reproductibilité des états memristifs lors de son fonctionnement.

Le développement d'un outil d'indentation est présenté et utilisé pour appliquer avec précision des forces jusqu'à 2.75 N sur des dispositifs intégrés avec une pointe en saphir à surface plane de  $\sim 75 \mu\text{m}$  de diamètre. Un effet reproductible, cohérent et réversible dû à la pression est observé et quantifié. Une augmentation jusqu'à 25% de la résistance de la **FeRAM** est montrée dans ce travail pour une pression de 0.54 GPa. Le rôle de la piézorésistivité des couches et de la commutation de domaine ferroélectrique induite par la pression sont présentés comme la source du changement de résistance.

Comme autre moyen d'exercer une pression sur un dispositif, la co-intégration d'un memristor et d'un nano-actionneur est visée. Parmi les nombreuses techniques de traitement développées, deux principaux modules de fabrication sont présentés : la gravure **IBE** de paroi verticale de **PZT** et la méthode de planarisation avancée de topographies complexes de dispositifs.

En plus de cela, une plate-forme intégrée de nano-actionneurs est développée et les dispositifs fabriqués sont caractérisés à l'aide d'un système

DBLI optimisé avec un faisceau de mesure de  $\sim 1 \mu\text{m}$  de diamètre. Une réponse piézoélectrique inégalée de  $\sim 200 \text{ pm/V}$  est mesurée pour CSD PZT sur des actionneurs en Si platiné. Le rôle du desserrage de la couche est étudié comme la raison de la grande réponse piézoélectrique.

En perspective, les résultats du développement et de la fabrication du dispositif entièrement co-intégré sont présentés. D'autres améliorations futures aux différents sujets de cette thèse sont également suggérées.