



## CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA Y MODELADO DE MEMORIAS NO VOLÁTILES BASADAS EN ÓXIDOS

Néstor Ghenzi

CONICET, Argentina y GIA, CNEA, San Martín, Buenos Aires,  
Argentina.



Dr. Néstor Ghenzi

Licenciado en 2007, obtuvo su Maestría en Ciencias Físicas en 2009 formado en el Instituto Balseiro y Doctor (2014) en Ciencias Físicas por la UNSAM. Trabaja principalmente en las áreas de Física y Microelectrónica. Publicó diversos artículos en revistas nacionales e internacionales. Recibió el Premio Dupont-Conicet 2010, Innovar 2012, MIT technology review 2014, Giambiagi 2015, Mercosur 2016 y Sabato 2016 por causa de sus investigaciones en memorias no volátiles. Actualmente es Investigador en CNEA y CONICET en Buenos Aires, Argentina. El presente artículo, es un resumen del trabajo premiado por el Instituto Sabato, correspondiente a los premios 2014-2016, en la categoría: "Mención Especial"

### RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio sobre la conmutación de la resistencia eléctrica en dispositivos formados por estructuras metal - óxido - metal. Se estudiaron dos óxidos paradigmáticos por el tipo de mecanismo que exhiben, la manganita  $La_{0.325}Pr_{0.3}Ca_{0.375}MnO_3$  (LPCMO) y el óxido simple  $TiO_2$ . En la primera parte de la Tesis se analizaron los mecanismos de la conmutación resistiva en dispositivos de LPCMO cerámico a través de un enfoque teórico - experimental. A partir de la comprensión de la respuesta microscópica utilizando un modelo de migración de defectos, se interpretaron resultados experimentales novedosos con potencial uso tecnológico, como la reducción del umbral necesario para la conmutación, la optimización en el proceso de inicialización, el incremento en la durabilidad de los dispositivos y la mejora de la relación entre los valores de resistencia alta y baja.

La segunda parte de la Tesis está dedicada a junturas metal - óxido - metal basadas en películas de  $TiO_2$  obtenido por técnicas de dip-coating y sputtering reactivo. En este último caso se realizó la microfabricación de dispositivos con áreas de hasta  $4 \times 4 \mu m^2$ . Se fabricaron arreglos de junturas de  $Au/TiO_2/Al$ , y se caracterizaron sus dos modos de conmutación de la resistencia (unipolar y bipolar) obteniendo durabilidades de hasta  $10^4$  ciclos de conmutación y retentividades de hasta  $10^5$  segundos. Por otra parte se reformuló el modelo de migración de vacancias de oxígeno para reproducir los resultados experimentales obtenidos en dispositivos de  $TiO_2$ . Asimismo, se estudiaron junturas de  $Au/TiO_2/Cu$  con diferentes procesos de inicialización, encontrando que éstos determinan el tipo de filamento responsable de la conmutación resistiva. Se estudió su respuesta en presencia de irradiación con iones de oxígeno.

### ABSTRACT

In this work we present an experimental and theoretical study of the resistive switching (RS) phenomena in a complex oxide,  $La_{0.325}Pr_{0.3}Ca_{0.375}MnO_3$  (LPCMO), and a simple oxide,  $TiO_2$ . In the first part we studied the RS in ceramic manganite LPCMO through a theoretical - experimental approach. Microscopic profiles of oxygen vacancy concentration was revealed by the enhanced oxygen vacancy migration (VEOV) model. The understanding of the underlying mechanism allowed to produce a reduced threshold for switching, to control the initialization process, to obtain the increase of the durability by three orders of magnitude, and to attain an improved relationship between high and low resistance values.

In the second part, we designed and micro-fabricated memory cell arrays. Tests were conducted using  $TiO_2$  obtained by the dip coating and reactive sputtering techniques. The devices were characterized (i) morphologically by AFM, ellipsometry, x-ray diffraction, and SEM in parallel and transversal view and (ii) electrically by the pulsed and dc measurements

resulting in a durability of  $10^4$  cycles and a retention of  $10^5$  s. The reformulated VEOV migration model of oxygen vacancies reproduced the experimental results sufficiently in  $\text{TiO}_2$ . Au/ $\text{TiO}_2$ /Cu junctions were studied with different electroforming polarities, which determines the nature of the conductive filament responsible of the resistive switching. In this configuration three stable states were achieved. Based in the microfabricated devices with memory properties, we studied its response under heavy ions irradiation and we designed and built a fully functional prototype for testing in aerospace conditions.

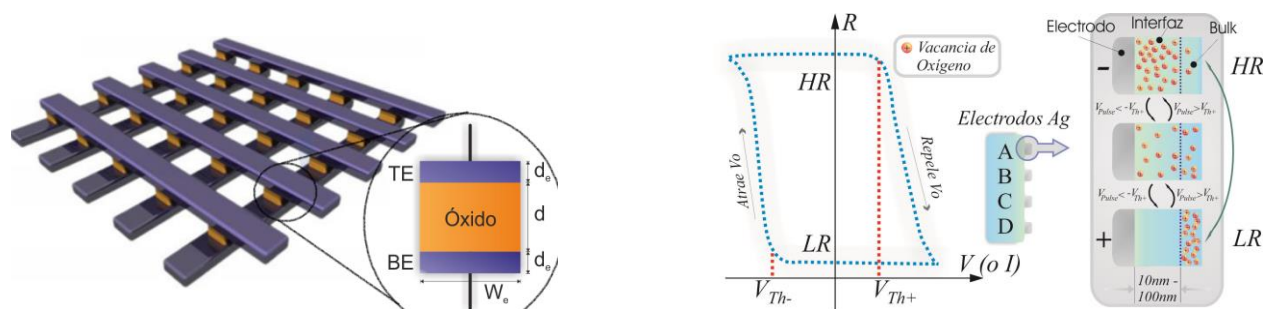
## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda en el uso de dispositivos electrónicos portátiles y de sistemas electrónicos embebidos está promoviendo el uso de diversos tipos de memorias no volátiles (MNV) de bajo consumo y alta densidad. Las actuales tecnologías de MNV, basadas en el almacenamiento de carga en la compuerta de un transistor, se acercan rápidamente a su tamaño crítico mínimo. Como consecuencia, el mercado de consumo electrónico está exigiendo tecnologías alternativas. Las investigaciones realizadas durante la última década hicieron emerger diversas tecnologías de memoria, muchas de ellas en la categoría de memoria de acceso aleatorio (RAM). Recientemente, la International Technology Roadmap Society [1] para semiconductores ha identificado a las RAM basadas en la conmutación de la resistencia (RAM resistivas, RRAM, Fig. 1(izq.)) como la principal tecnología emergente de memoria recomendada para la aplicación inmediata en los dispositivos electrónicos actuales. El fenómeno de conmutación resistiva por pulsos eléctricos, observado en diferentes interfaces óxido – metal (Fig. 1(der.)), consiste en el cambio abrupto de la resistencia eléctrica de un material debido a la aplicación de un pulso eléctrico. El cambio de resistencia es no - volátil, es decir permanente o semi - permanente, y reversible. Ésto permite utilizar a sistemas con interfaces óxido - metal como dispositivos de memoria, donde hechas por Hwang, Yang y Jeong agrupadas en la Referencia 3. Se realizó una revisión de la literatura, y se presentarán los aspectos más relevantes. El estado del arte en la fabricación de dispositivos de memoria (Fig. 2(a)) está dado por grandes compañías como Samsung, Panasonic y Sony (en el

la información está codificada en términos del nivel de resistencia eléctrica (ver Fig. 1(der.)). Por el tiempo de acceso reportado (algunos nanosegundos) y el formato de las muestras (posibilidades de disminuir el tamaño lateral hasta el rango nanométrico) (Fig. 2(b)), el estudio de tales dispositivos encarado en el escenario de la nanociencia y la nanotecnología posee una interesante perspectiva de aplicabilidad. Dentro del marco del Mercosur, el desarrollo de este proyecto ofrece un claro ejemplo de los desafíos y oportunidades que ofrecen la aplicación de la micro y la nanotecnología, así como también aumenta su competitividad industrial e incrementa los beneficios socioeconómicos derivados de su uso.

En la Figura 1(izq.) se muestra una celda típica metal - óxido - metal MOM, donde generalmente se mide el cambio de resistencia. La conmutación resistiva CR es un descubrimiento relativamente reciente, aunque hay reportes en los años 50 donde se observan efectos similares. La CR se está revelando como inusualmente universal y ya ha sido reportada tanto en óxidos binarios como el  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{WO}$ , etc. como en perovskitas ternarias  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{SrZnO}_3$  y  $\text{LaCuO}_3$  (compuesto madre de un cuprato superconductor) y aún en complejas perovskitas de cuatro y cinco componentes, los cuales incluyen una amplia variedad de manganitas debido a sus propiedades de magnetoresistencia colosal.

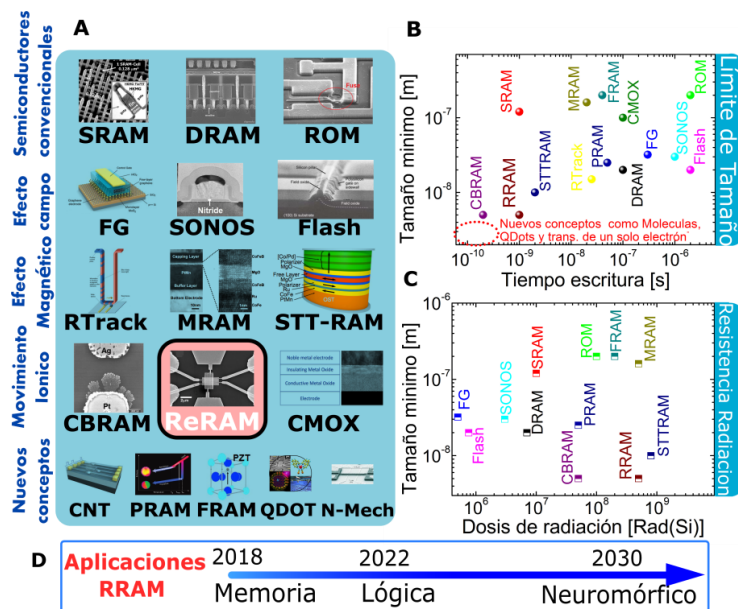
Se recomienda consultar las primeras revisiones de Sawa, Waser sobre este fenómeno hasta llegar a las más recientes (mercado masivo). El primer producto de celdas RRAM basado en óxido de Tantalio ha sido lanzado al mercado en 2013 [4] y prototipos RRAM de capacidad de 16 Gb han sido demostrados recientemente por Panasonic [5].



**Figura 1.** (Izq) Arreglo de juntas metal/óxido/metal que funciona como memoria RRAM. Permite una densidad 10 veces mayor que las memorias actuales. (Der) Respuesta de la R a la tensión aplicada, donde se ven dos estados de resistencia (lógica binaria) y esquema de movimiento de vacancias de oxígeno que da origen a la conmutación de la resistencia.

A nivel de dispositivos individuales (en investigación básica), el comportamiento RRAM ha sido ampliamente observado en estructuras metal / óxido / metal usando un analizador de parámetros de semiconductores y excursiones de tensión – corriente. Utilizando esta metodología se estudió la relación entre el comportamiento de las memorias RRAM y algunos parámetros de fabrica-

ción, como espesor del óxido, materiales de los electrodos, impurezas y/o dopado, e incluso otras condiciones de funcionamiento, tales como tensiones límites y temperaturas máximas y mínimas. Los parámetros más relevantes para este proyecto se muestran en la Figura 2 (b) y (c); el tamaño mínimo de una celda individual y la dosis de radiación máxima.

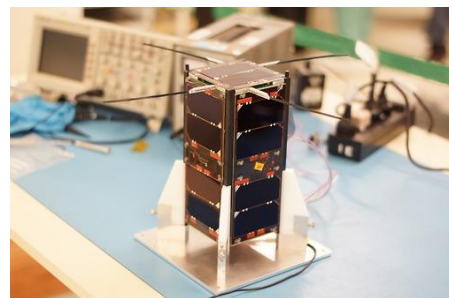


**Figura 2** (a). Tipos de memorias más relevantes en el mercado masivo (SRAM; DRAM, Flash y ROM) y bajo investigación (efecto de campo, magnético o movimiento iónico), CNT, cambio de fase, RAM ferroeléctricas, mecánicas o puntos cuánticos. (b) Posibilidades de miniaturización de los tipos de memoria mostrados en (a). RRAM es una de las más prometedoras en velocidad y tamaño. (c) Propiedades de resistencia a la radiación. RRAM y STT-RAM tienen las mejores perspectivas. (d) Línea de tiempo para que las memorias RRAM entren al mercado masivo.

Las características de la respuesta eléctrica de la CR bipolar pueden ser entendidas cualitativamente en términos del movimiento de vacancias de oxígeno en las cercanías de la interfaz óxido metal y el *bulk* del óxido. La región de la interfaz es una zona de alto valor de resistividad mientras que la región del *bulk* una zona de bajo valor de resistividad. Tal esquema se muestra en la Figura 1(der). Debido a las condiciones de crecimiento en una atmósfera con poco contenido de oxígeno, la manganita estudiada tiene una densidad de VO considerable. Se especula que cuando un pulso positivo por encima del umbral para el desanclaje de VO se aplica al contacto A, las vacancias de oxígeno (iones positivos) son expulsadas de la proximidad del electrodo A dejando la región de la interfaz metal - óxido con un contenido de oxígeno considerable (capa de agotamiento) que posee un valor alto de resistividad comparado con la resistividad del *bulk*. Esto mejora la conducción eléctrica a través de las cadenas Mn-O-Mn. Por lo tanto, al aplicar un estímulo positivo al contacto A, se tiende a disminuir su resistencia, llevándola hasta el estado LR. Al disminuir la amplitud del estímulo desde el valor máximo alcanzado del estímulo (estado LR), el estado LR permanece constante. No se inyectan más defectos a la interfaz, ya que probablemente la cantidad de oxígenos en la interfaz es cercana a la máxima. Después que la polaridad del estímulo cambia, se inicia un relleno suave y gradual de las vacancias ya que éstas se ven atraídas hacia el contacto A por la polaridad negativa. Los oxígenos móviles son removidos de la interfaz, produciendo un proceso de conmutación opuesto al anterior.

Con respecto al satélite donde se colocarán las muestras, se colabora con *Satelogic*, una empresa con sedes en Argentina y Uruguay que fabrica satélites del tipo CubeSat, la cual será la encargada del desarrollo del satélite y la puesta en órbita. Este tipo de satélites de investigación se utiliza actualmente en un número considerable de laboratorios en todo el mundo, aunque la tecnología RRAM será testeada por primera vez en condiciones aeroespaciales. En la Figura 3 se muestra el

primer satélite Cubesat construido por la empresa Satelogic. CubeSat es el nombre genérico de un tipo de microsátélites de investigación, estandarizado a un volumen de 1 litro, un peso de no más de 1 kg y que se caracterizan por ser construidos habitualmente con elementos y componentes comerciales de relativo bajo costo.



**Figura 3.** Satélite Cubesat construido por la empresa Satelogic. El mismo consiste en 3 cubículos de 10cmx10cmx10cm.

## PROBLEMA

La disponibilidad de circuitos integrados para aplicaciones espaciales es muy restringida, ya que los procesos de Si disponibles están controlados por las grandes corporaciones, y es claro que estas compañías solamente están interesadas en el mercado masivo de consumo. Todos los esfuerzos científicos y tecnológicos están orientados a aplicaciones para satisfacer al mercado de consumo, no a un mercado nicho como el de las aplicaciones espaciales. Se puede agregar en este lugar a las aplicaciones móviles, celulares y computadoras personales. Los beneficios que vienen de la fuerte investigación en procesos basados en Silicio para la miniaturización (longitud de canal del transistor) y para una mejora en la performance de las memorias (velocidad de acceso) cada día dan como resultado dispositivos más compactos y con una mayor capacidad de cálculo. Es claro que todos estos esfuerzos, siguiendo la bien conocida ley de Moore, solo se aplican para dispositivos para el mercado masivo. Esto genera inconvenientes para disponer de dispositivos para probar su resistencia a la



radiación, pero una oportunidad única para entrar en un mercado de alto valor agregado.

Las memorias RAM se basan en acumular carga, al usar electrones. En cambio, las RRAM se basan en cambiar átomos de lugar, lo que hace que tengan muchas propiedades nuevas. Como los átomos son mucho más pesados que los electrones pueden soportar mucha más radiación, 100 ó 1.000 veces más que las memorias convencionales. Es precisamente esta capacidad para funcionar frente a elevadas dosis de radiación lo que convierte a las memorias RRAM en ideal para aplicaciones aeroespaciales. En el espacio exterior no llega la acción protectora del campo magnético terrestre por lo que los dispositivos electrónicos se enfrentan a los efectos del viento solar y de los rayos cósmicos, que pueden alterar los estados de los componentes de sus circuitos y provocar errores en su funcionamiento, especialmente cuando se producen tormentas solares.

## JUSTIFICACIÓN

Este proyecto parte de una actividad en investigación básica y tiende al Desarrollo (I+D) en un área clave de la industria electrónica [10]. En un principio, los productos esperados de esta actividad eran solamente conocimientos básicos sobre mecanismos y materiales complejos. Actualmente, apuntamos a desarrollar procesos de fabricación, optimizando geometrías y protocolos basados en principios y mecanismos que dominamos, con el objetivo de tener un prototipo funcionando y eventualmente generar una patente relacionada. En esta etapa estamos pensando en aplicaciones que den soluciones puntuales a problemas específicos (en que no es necesario tener producción masiva) y en producciones a baja escala de dispositivos novedosos. Es éste un mercado específico de muy alto valor agregado, ya explorado previamente en la Argentina.

El Plan Espacial Nacional define el marco que orienta las actividades para que la Argentina acceda al espacio exterior con medios e instrumentos propios. Argentina es

un país con interés en actividades espaciales, que hace y hará uso intensivo de los productos de la ciencia y la tecnología. Las áreas que se perfilan como de impacto económico más directo para el corto y mediano plazo son: el seguimiento y cuantificación de la producción agropecuaria y forestal, el seguimiento y vigilancia de la actividad pesquera, la prevención y supervisión de inundaciones y otros desastres naturales, la evaluación y prospección de explotaciones del suelo y el subsuelo, y el monitoreo y supervisión de problemas ambientales. Los beneficios sociales derivados de las actividades espaciales son numerosos y están relacionados principalmente con la información generada que, luego de procesada, es usada en la toma de decisiones por las autoridades o por los sectores productivos.

A nivel del MERCOSUR, las industrias espaciales y microelectrónicas han sido señaladas como estratégicas. Mientras que Brasil avanza en coherencia, la Argentina ha desarrollado satélites en órbitas LEO durante los últimos 20 años y en GEO en los últimos dos años. En ambos países la micro y nano electrónica cuenta con apoyos muy importantes ya definidos. En la parte aeroespacial el científico a cargo se encuentra en contacto con miembros actuantes en las diversas iniciativas (ej. INVAP-Argentina, CONAE-Argentina, e INPE – BRASIL INST. NAC. PESQUISA ESPACIAL), con la intención de vincularse en un mediano plazo. Finalmente, la fuerte interacción con Satellogic (Argentina-Uruguay) le da un fuerte respaldo tecnológico a este proyecto. Se espera lanzar un satélite una vez por año con dispositivos de memorias para estudiar su comportamiento en condiciones reales.

Otro aspecto para ser remarcado está conectado con la disponibilidad de las tecnologías desarrolladas para la industria militar. En Estados Unidos algunas fábricas de Silicio (por ejemplo American Semiconductor) han desarrollado procesos con una cierta resistencia a la radiación y están relacionados con el diseño de dispositivos para aplicaciones militares. El



principal problema para la gente fuera de los Estados Unidos es que estas fábricas solo trabajan con los militares y no pueden proveer con sus componentes ni su tecnología a nadie de fuera de los Estados Unidos; esto está regulado por un conjunto de reglas llamadas ITAR (*International Traffic in Arms Regulations*), las cuales controlan las exportaciones e importaciones de artículos y servicios relacionados con la defensa. Las reglas ITAR fueron activadas durante la Guerra Fría y reforzadas después del 11 de septiembre de 2001 y prohíbe la comercialización fuera de los Estados Unidos de todas las tecnologías bases que puedan ser usadas para la construcción de armas incluyendo equipamiento de soldados. La resistencia a la radiación y procesos de Silicio para circuitos integrados diseñados para el mercado militar están considerados dentro de estas y caen bajo de las prohibiciones ITAR.

## OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto se encuadra en el estudio de propiedades eléctricas de dispositivos electrónicos con memoria no volátil basados en óxidos, y que operan por el mecanismo de conmutación de la resistencia (memorias RRAM o *memristors*). Se espera que los dispositivos fabricados trabajen de forma eficaz en condiciones hostiles como el espacio exterior, mostrando resistencia a la radiación ionizante.

El objetivo general del proyecto MEMO es el desarrollo y prueba de principio de la próxima generación de memorias no volátiles resistentes a la radiación basadas en el fenómeno de la conmutación resistiva. Para ello es necesario abordar los siguientes objetivos específicos:

**1)** Nanofabricación de estructuras Metal Óxido Metal (*sputtering*, ablación laser, evaporación, *dip coating*, litografía, *etching*, CVD, y FIB)

**2)** Caracterización física de los dispositivos y de su funcionamiento (XPS, SEM, XRR, FIB, mediciones eléctricas de la resistencia y capacitivas, pulsos de ns)

**3)** Modelado Montecarlo, dinámica molecular, modelos eléctricos compactos CAD, ecuaciones de balance y primeros principios.

**4)** Ensayos de fiabilidad en ambientes hostiles (iones pesados, protones, gamma, etc.), con el objetivo de validar su uso en la industria aeroespacial.

**5)** Desarrollo de plataforma de medición de los dispositivos y comunicación con el satélite.

**6)** Testeo en condiciones reales fuera del laboratorio: Nanosatélite de baja orbita.

La sinergia entre los aspectos experimentales (puntos 1 y 2) y teóricos (punto 3) va a permitir obtener los parámetros microscópicos relevantes para optimizar la resistencia a la radiación de los dispositivos (punto 4). Es de destacar los aspectos multidisciplinarios de este proyecto (caracterización eléctrica, microscopía, espectroscopia, etc...) tanto como los interdisciplinarios (cálculos de primeros principios, Montecarlo y modelos eléctricos CAD).

## ANÁLISIS

La factibilidad del proyecto está dada ya que se cuenta con la experiencia y laboratorios equipados para llevar adelante la producción de muestras y su caracterización. Para (i) nanofabricación se tiene contacto con los grupos MEMS de CAC-CNEA que disponen de una sala limpia de 300 m<sup>2</sup> con un equipo de *sputtering* AJA de 5 cañones con fuentes DC y RF, RIE, CVD, equipos de litografía óptica, masterizadora de máscaras, mesa de ácidos, SEM, FIB y soldadora de obleas. En resumen, en lo referente a capacidades de equipamiento, se cuenta con lo necesario para continuar trabajando. Por el lado de la irradiación se cuenta con acceso a las salas de irradiaciones de los centros atómicos Ezeiza, Bariloche y Constituyentes (*Gamma cell*, acelerador lineal *Pelletrón* y acelerador de iones pesados respectivamente). Las mediciones de propiedades eléctricas y topografía se realizan con módulos electrónicos existentes



(voltímetros, amperímetros, fuentes, AFM, criostatos, magnetómetros) utilizando códigos para control específicos desarrollados en los mismos laboratorios. Se tiene acceso a equipos Raman, de rayos X, EDS, AFM con capacidad contacto, eléctrica y capacitiva, MFM, SEM, FIB y TEM para la caracterización.

El proyecto está dividido en 6 partes: (i) Nanofabricación, (ii) Caracterización física, (iii) Modelado, (iv) Ensayos de fiabilidad, (v) Desarrollo de placa electrónica y (vi) Ensamblaje de la placa electrónica con el satélite. Esto permite que el joven científico colabore con expertos en cada una de estas áreas para llegar a buen puerto en cada punto.

Por ejemplo, en el punto (i) se necesita fabricar películas delgadas para ser integradas a las estructuras metal óxido metal. Las películas de los óxidos deberían tener una densidad de defecto despreciable y buenas características aisladoras con una alta movilidad. La estrategia común para controlar el tamaño de grano es optimizar las

condiciones termodinámicas requiriendo un estudio detallado de varios parámetros de deposición y de cristalización, tales como la temperatura y presión de deposición, el espesor de la capa semilla, el tipo de limpieza anterior a la deposición. Sin embargo, para los aisladores típicos, el equilibrio de los defectos no es directo debido a la formación fácil de defectos. Por lo tanto, una estrategia independiente basada en la cinética de crecimiento, la cual varía la migración superficial de los adátomos, la dinámica de absorción-desorción, películas buffer para minimizar la tensión entre las diferentes películas y la densidad de nucleación de islas deben ser aplicados para controlar los defectos y obtener las propiedades del óxido deseadas.

De la misma forma que el punto (i), en c/u de los puntos hay varios inconvenientes que aparecerán a lo largo del proyecto para solucionar. Debido a cuestiones de espacio, algunas de las posibles dificultades y como mitigarlas se muestran en la Tabla I.

**Tabla I.** Riesgos críticos para la implementación del proyecto y medidas de mitigación del riesgo.

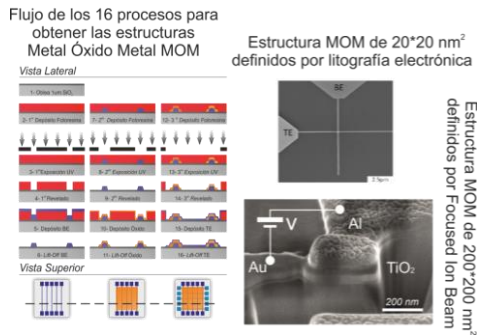
Descripción del Riesgo	Punto	Nivel de Riesgo	Riesgo propuesto- Medidas de mitigación
Nivel de Corriente en la celda RRAM	1	Alto	<i>Annealing</i> // Óxidos de alto $k$ // Estructura amorfa para evitar bordes de grano.
Tensiones umbrales	2	Medio	Funcionalización de las interfaces para el control de la barrera de inyección. Modelado para elegir un electrodo acorde
Software de adquisición corre lento	4	Alto	Ingenieros en sistemas ayudaran a cambiar código Labview por C++.
Problemas de comunicación entre placa y satélite	5	Bajo	Ingenieros electrónicos de Satellogic ayudarán a resolver problemas entre las interfaces.

Los resultados asociados al punto (i) de Nanofabricación definido en los objetivos relacionan con obtener los dispositivos metal óxido metal individuales y con transistores de efecto de campo. Se muestra en la Figura 4 algunos de los dispositivos fabricados.

De la Figura 4 se puede inferir que en el marco de este proyecto se pudieron

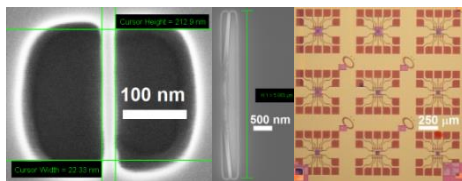
fabricar estructuras metal óxido metal en las cuales vamos a estudiar las propiedades de conmutación resistiva. Al avanzar con los resultados, vimos la necesidad de incorporar transistores de efecto de campo a las estructuras MOM. Se muestra en la Figura 5 algunas de las imágenes relacionadas con la miniaturización del transistor y con el

alineamiento entre los transistores y las estructuras MOM. A la derecha se muestran una sola estructura MOM con su respectivo transistor de manejo de corriente.



**Figura 4.** Flujo de procesos necesarios para construir una estructura MOM. En el centro se observan dispositivos micrométricos fabricados por PLD, *sputtering* y evaporación en combinación con litografía óptica. Finalmente en la derecha se observan dispositivos ultra miniaturizados por litografía electrónica y *focused ion beam*.

De las figuras 4 y 5 mostramos que tenemos la capacidad de fabricar estructuras tanto individuales como más complejas para estudiar la conmutación resistiva.

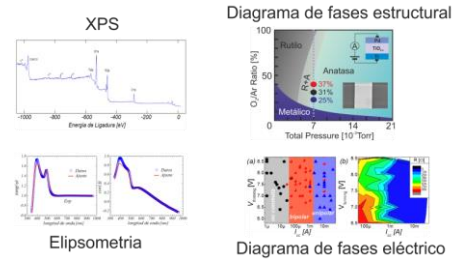


**Figura 5.** Miniaturización del transistor de efecto de campo hasta los 20 nm y de las estructuras MOM hasta los 40 nm. Se muestra también el correcto alineamiento geométrico entre diferentes estructuras y la unión de un transistor con una estructura MOM.

Los resultados asociados al punto (ii) de Caracterización están vinculados con dos materiales,  $TiO_2$ , cuyos resultados se muestran en la Figura 6 y una manganita  $PrCaMnO_3$ , cuyos resultados se muestran en la Figura 7.

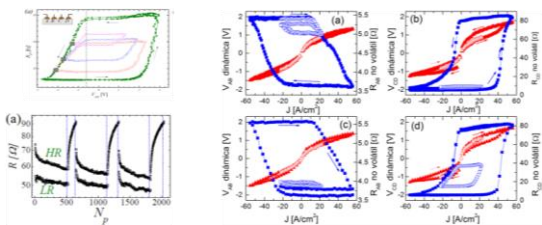
Se puede ver la caracterización por XPS y elipsometría donde se ve la correcta

estequiometría del óxido. Luego variando la relación de Oxígeno y Ar se puede seleccionar la fase en que el dióxido de titanio.



**Figura 6.** Caracterización estructural del óxido y eléctrica de las juntas de dióxido de titanio.

Luego de fabricado el dispositivo, se estudiaron las características eléctricas para encontrar el diagrama de fases eléctrico con las tensiones y corrientes permitidas. Se estudiaron la respuesta I-V con diferentes complianzas y el cambio de resistencia frente a pulsos de nano segundos.



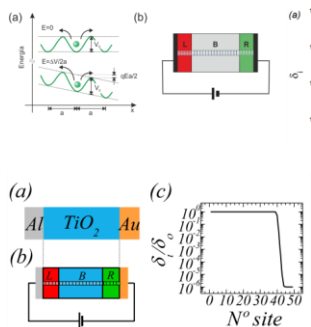
**Figura 7.** Se logró obtener 7 niveles de resistencia y apagar el comportamiento de las memorias basadas en  $PrCaMnO_3$ .

En La Figura 8, se puede observar el algoritmo de control con el que se pudo escribir la memoria 100000 mil veces, además de poder obtener 7 niveles en el mismo bit y como se puede apagar y prender el funcionamiento de la conmutación resistiva.

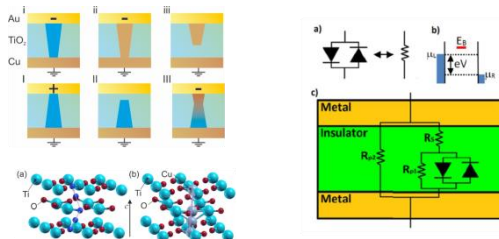
Los resultados asociados al punto (iii) de Simulaciones del fenómeno de CR se muestran en la Figura 9 para la difusión y migración de vacancias de oxígenos tanto en  $TiO_2$  como en PCMO. Para ello se usaron ecuaciones de balance en combinación con



el método de Montecarlo. Se pudo corroborar los resultados experimentales de la caracterización eléctrica, observar la disminución de la barrera de migración y simular los filamentos metálicos que causan la conmutación resistiva.



**Figura 8.** Simulación de la migración de vacancias de oxígeno por ecuaciones de balance y Montecarlo para las manganitas (arriba) y para el dióxido de titanio (abajo).



**Figura 9.** Simulación de primeros principios de la migración del Cu. Esquema de dos modelos compactos, uno basado en elementos básicos y otra separando la componente memristiva de la corriente.

Se observan los resultados de cálculos de primeros principios para la migración por campo eléctrico de iones Cu y de vacancias de oxígeno. También se desarrolló un modelo eléctrico con componentes básicos que reproducen las curvas I-V y otro modelo que logró separar la componente electrónica de la memristiva.

Los resultados asociados al punto (iv) de pruebas de fiabilidad frente a ambientes hostiles se desarrollaron principalmente en el acelerador electrostático de iones pesados Tandem [Appl. Radiat. Isot. 61, 380 (2004), Fig. 12]. Esta experiencia brinda al

investigador el conocimiento para probar sus dispositivos fuera del laboratorio.

## CONCLUSIONES

En resumen, las memorias RRAM tienen el potencial para responder preguntas fundamentales sobre la dinámica de defectos en estructuras novedosas y se espera que jueguen un rol fundamental en el mercado futuro de las memorias no volátiles y la nano electrónica. En el presente, establecer la fabricación de memorias resistentes a la radiación es una necesidad urgente para su aplicación. El propósito de esta investigación (y del proyecto) fue desafiar este problema crítico. Para aquello, se propuso una aproximación para fabricar y optimizar los dispositivos de memoria RRAM, usando procesos ya establecidos en la industria microelectrónica tales como fotolitografía, litografía electrónica, *sputtering* reactivo, deposición de capa atómica ALD y ablación laser variando las propiedades del óxido y de los electrodos metálicos. El principal resultado de este proyecto es la prueba y demostración de funcionamiento por primera vez de un dispositivo de memoria RRAM resistente a la radiación con elemento de selección funcionando en condiciones reales. Los dispositivos RRAM son una de las alternativas más prometedoras contra el problema de la miniaturización de los dispositivos basados en Si. Además, abre la posibilidad a posibilidades nuevas y excitantes: sistemas neuromórficos, simulación de electrónica adaptativa, programación analógica en escala de grises, coexistencia de respuesta volátil y no volátil entre otros.

## REFERENCIAS

- [1] IEEE Trans. Nucl. Sci. **50**, 466 (2003).
- [2] <http://pmddtc.state.gov/index.html>.
- [3] Science **319**, 1625 (2008).
- [4] <http://www.vlssymposium.org>.
- [5] [panasonic.co.jp](http://panasonic.co.jp)
- [6] <http://sat-nd.com/failures/index.html>
- [7] <http://www.space.com>
- [8] Nuclear Science, IEEE Transactions on **57**, 1640 (2010).



[9] <http://www.lanacion.com.ar/1703018-nanosatelites-una-empresa-local-hace-punta-en-el-espacio>  
[10] J. Appl. Phys. **107**, 093719 (2010).

[11] Science **344**, 1369 (2014).  
[12] <http://www.crossbar-inc.com/>  
[13] <http://www.tandar.cnea.gov.ar/>