

MEMORIAS DE PRÓXIMA GENERACIÓN: EL PODER DE LOS ÓXIDOS

La electrónica móvil impone como desafío disponer de memorias con mayor capacidad de almacenamiento, más rápidas y, fundamentalmente, más pequeñas que las empleadas actualmente. Aquí describimos una alternativa posible.

María J. Sánchez

La tecnología de la información se sustenta en la posibilidad de contar con dispositivos de memoria con gran capacidad de almacenamiento de datos, costos moderados y bajos consumos de energía. Un requisito adicional para ciertas aplicaciones es que sean no volátiles, es decir, que retengan la información almacenada una vez desconectados del suministro eléctrico. Tal es el caso de las actuales memorias *Flash*, que nos permiten tanto guardar como transferir datos entre computadoras y diversos componentes electrónicos, y que utilizamos diariamente en reproductores de MP3, cámaras fotográficas, discos externos de conexión USB, etc. Este tipo de memorias contienen una matriz de celdas de transistores basada en la tecnología del silicio y operan mediante el almacenamiento de carga eléctrica.

A pesar de sus múltiples utilidades, las memorias *Flash* poseen una relativa baja velocidad de lectura y requieren de altos voltajes para las operaciones de escritura. Este último aspecto, junto con la necesidad de miniaturización impuesta por la electrónica móvil, implican importantes consumos de potencia en pequeñas regiones espaciales, lo que dificulta y vuelve muy costosa la integración de varios de estos dispositivos en arquitecturas de alta densidad.

La ley de Moore, que rige la industria actual de los semiconductores, predice la necesidad de una reducción exponencial del tamaño de los transistores con el paso del tiempo. Sin embargo, tanto por razones de costos como por las limitaciones de escalabilidad mencionadas, se estima que las actuales memorias *Flash* alcanzarán su límite de capacidad física dentro de los próximos 10 años.

Palabras clave: memorias, conmutación resistiva, compuestos de óxidos, memresistores.

María José Sánchez

Dra. en Física, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
Cjo. Nac. de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET), Argentina - Centro Atómico Bariloche (CAB)
e Instituto Balseiro (IB), Argentina.
majo@cab.cnea.gov.ar

Recibido: 19/04/2011 Aceptado: 08/07/2011

En la búsqueda de nuevas memorias

Los dispositivos electrónicos están adquiriendo mayor funcionalidad. A modo de ejemplo, los teléfonos celulares han incorporado internet, música e interfaces de video. El grado de adaptabilidad requerido para lograr esas funciones necesitará en el futuro cercano de nuevos materiales más allá del silicio, que puedan satisfacer el avance continuo de la electrónica móvil de próxima generación.

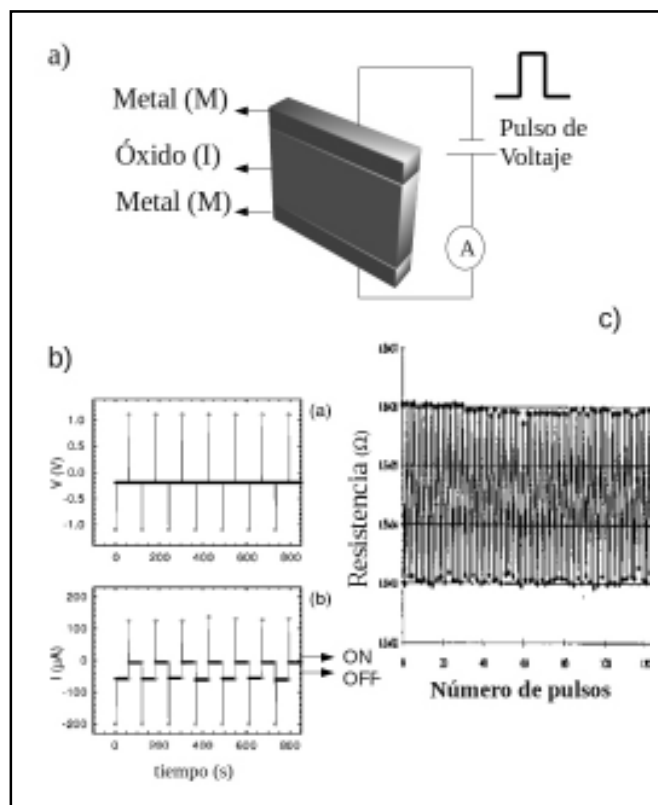
El desafío es entonces lograr memorias no volátiles que superen a las actuales memorias *Flash* tanto en características y funcionalidades, como en costos. Un número importante de alternativas están siendo exploradas en la actualidad. Entre ellas, se encuentran las memorias resistivas denominadas *RRAM* (del inglés *Resistive Random Access Memory*), que basan su funcionamiento en el fenómeno de la conmutación resistiva por aplicación de pulsos eléctricos.

Las celdas de memoria RRAM

En su concepción más simple, una memoria *RRAM* está compuesta por una estructura tipo capacitor en la que un material aislante o con alta resistencia a la conducción de electricidad *I*, se dispone entre dos electrodos metálicos formando una celda tipo Metal-I-Metal (*MIM*), tal como se muestra en la Figura 1a). En general *I* es una capa de un óxido metálico de algunas decenas a cientos de nanómetros (nm) de espesor. Dado que 1 nm es la milésima parte de un micrón, la capa de óxido resulta ser típicamente 10.000 veces más delgada que el grosor de un cabello.

Los compuestos de óxidos metálicos contienen una combinación apropiada de oxígeno con ciertos elementos de la tabla periódica denominados elementos de transición. Algunos son materiales completamente aislantes en su estado virgen y por lo tanto no conducen la electricidad. Otros pueden comportarse como buenos conductores y hasta llegar a exhibir propiedades superconductoras a muy bajas temperaturas. Una característica común a varios de estos compuestos es que un mismo material puede, ante variaciones de presión o temperatura por ejemplo, experimentar una transición entre el comportamiento metálico y el aislante, lo que los hace extremadamente versátiles y muy funcionales.

Figura 1: a) Ilustración de una celda RRAM con estructura tipo capacitor. Un compuesto de óxido se dispone entre dos electrodos metálicos. Los pulsos de voltaje son aplicados entre los electrodos. El amperímetro A mide la corriente que circula a través de la celda en los estados de alta y baja resistencia, cuando se aplica un voltaje de lectura. Dos experimentos de conmutación resistiva. b) Conmutación bipolar en una celda RRAM de un óxido compuesto. Panel superior: Pulsos de voltaje de ± 1 voltio en función del tiempo. Panel inferior: Estados de alta corriente o baja resistencia (ON) y estados de baja corriente o alta resistencia (OFF) en función del tiempo. Extraído de: Beck, A., Bednorz, J.G., Gerber, Ch., Rossel, C. y Widmer, D. (2000). Reproducible switching effect in thin oxide film for memory applications. *Applied Physics Letters*, 77, pp. 139-141. c) La resistencia cambia entre dos valores bien definidos, uno de baja resistencia (ON) y otro de alta resistencia (OFF) como consecuencia de la aplicación de pulsos de distinta polaridad de 5 voltios intensidad y 10 ns de duración. Extraído de: Zhuang, W.W. y colaboradores. (2002). Novel colossal Magnetoresistive thin film RRAM, *IEDM Technical Digest*, 02CH37358, pp. 193-196.



El fenómeno de la conmutación resistiva

Mediante estímulos eléctricos, por ejemplo en forma de pulsos de voltaje aplicados entre ambos electrodos metálicos, es posible conmutar o cambiar la resistencia de la celda entre dos valores estables y bien diferenciados. A este fenómeno se lo conoce como *conmutación resistiva por aplicación de pulsos eléctricos* y es la base del funcionamiento de una memoria RRAM.

La variación o tasa relativa entre los dos valores de resistencia puede llegar a ser un factor 100. Al estado de alta resistencia se lo denomina estado OFF y al de baja resistencia estado ON y representan respectivamente el rol de los bits de información 1's y 0's de la electrónica binaria usual. Por lo tanto, a diferencia de las memorias Flash que almacenan la información en estados de carga eléctrica, en una RRAM los estados de memoria están codificados en valores de resistencia. Los estados ON y OFF son no volátiles, es decir, perduran si la celda es desconectada del circuito eléctrico.

Debido a su simplicidad estructural, estas celdas funcionan como unidades de memorias factibles de ensamblarse en arquitecturas complejas, como las requeridas para múltiples operaciones de lectura y escritura. Otra característica saliente es que la conmutación de la resistencia se logra a temperatura ambiente, requisito indispensable para su uso como componente en circuitos electrónicos.

La conmutación resistiva en compuestos de óxidos es un fenómeno conocido desde hace varias décadas. En el año 1962, Hichmock reportó la primera medición experimental, que mostraba variaciones en la resistencia de una celda MIM al aplicar pulsos de tensión entre los electrodos metálicos. El material I era óxido de aluminio y los M eran electrodos de aluminio. En años subsiguientes, mediciones similares fueron

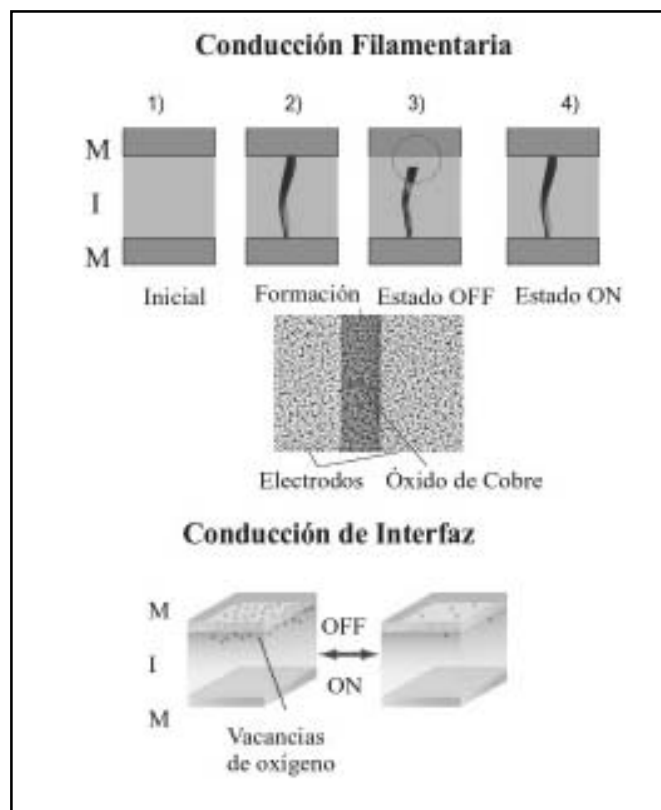
realizadas en compuestos de óxido de níquel y óxido de silicio.

En esa etapa temprana de investigación, las capas de óxidos que se utilizaban eran de algunas fracciones de milímetros de espesor y requerían de la aplicación de altos voltajes, en el rango de los cientos de volpara lograr la conmutación resistiva. Los compuestos en general contenían combinaciones de oxígeno con algún otro elemento, como níquel, cobre o silicio. En estos compuestos binarios o de dos elementos, la conmutación de la resistencia se obtenía aplicando pulsos de voltaje del mismo signo o polaridad, pudiendo incluso ser no polar, es decir ocurrir indistintamente tanto para pulsos de voltaje positivos como negativos.

Luego de esta primera serie de experimentos, el estudio de la conmutación resistiva en celdas de óxidos quedó en letargo por varios años. Sin embargo, hacia finales de los años 1990, a raíz de la búsqueda de nuevas tecnologías para el almacenamiento de información y de los avances en las técnicas de fabricación y miniaturización, resurgió la actividad en el área. La posibilidad de disponer de compuestos de óxidos en forma de películas muy delgadas, de tan sólo algunos nanómetros de espesor, impulsó el desarrollo de nuevos experimentos.

En el año 1997, un grupo de investigadores de la Universidad de Tokyo (Japón), bajo la dirección de A. Asamitsu, reportaron la primera medición de la conmutación resistiva en un óxido conocido como PCMO, que además de oxígeno contiene tres elementos: praseodimio, calcio y manganeso (a este tipo de óxi-

Figura 2: Localización de la conmutación resistiva: Conducción filamentaria. 1) celda en el estado inicial o virgen. 2) filamento metálico conectando ambos electrodos. 3) ruptura del filamento dando lugar al estado OFF o de alta resistencia y 4) reconstitución del filamento que restablece el estado de baja resistencia o estado ON. **Panel Inferior: Imagen de microscopía de un filamento en una celda de óxido de cobre con electrodos metálicos de platino.** Extraído de: Fujiwara, K., Nemoto, M., Rozenberg, M.J., Nakamura, Y. y Takagi H. (2008). *Resistance Switching and Formation of a Conductive Bridge in Metal/Binary Oxide/Metal Structure for Memory Devices. Japanese Journal of Applied Physics*, 47, pp. 6.266-6.270. **Conducción de interfaz.** Al variar la densidad de vacancias de oxígeno se modifica la resistencia de la interfaz. Extraído de: Sawa, A. (2008). *Resistive Switching in Transition metal oxides. Materials Today*, 11(6), pp. 28-36.



dos que tienen más de dos elementos se los llama complejos o compuestos, para diferenciarlos de los binarios). En este experimento la conmutación se logró con pulsos de voltajes cercanos a 1 voltio, casi 100 veces menores que los utilizados en los experimentos pioneros con óxidos binarios, y que resultan compatibles con los rangos de operación de la actual tecnología de circuitos electrónicos.

Otro aspecto novedoso de este experimento fue que los pulsos requeridos para lograr la conmutación resistiva fueron de distinta polaridad: por ejemplo para conmutar del estado OFF (alta resistencia o baja corriente) al estado ON (baja resistencia o alta corriente) se aplicó un pulso de +1 voltio, mientras que para conmutar del estado ON al estado OFF fue necesario aplicar -1 voltio.

Experimentos recientes

El gran avance que implicó la reducción de los voltajes de operación disparó definitivamente una impresionante actividad en el área, que se plasma tanto en investigaciones básicas como en el campo de las aplicaciones.

En la actualidad, grandes monstruos de las telecomunicaciones como Sharp, Samsung, Intel, Toshiba, IBM y Hewlett Packard trabajan arduamente en el diseño de memorias RRAM. Varios de estos laboratorios han reportado y patentado prototipos.

A modo de ejemplo, describimos brevemente dos (entre cientos de) experimentos realizados en celdas como la mostrada en la Figura 1a). En ambos experimentos se utilizaron óxidos compuestos y la conmutación se logró mediante voltajes de distinta polaridad, análogamente al experimento de Asamitsu y colaboradores.

La Figura 1b) reproduce resultados reportados en el año 2000 por un equipo de investigación de los laboratorios de IBM en Zurich (Suiza), liderado por A. Beck. El panel superior muestra la secuencia de pulsos

de voltaje de distinta polaridad en función del tiempo. Los pulsos son de 1 voltio de amplitud y 2 milisegundos de duración. El signo o polaridad va alternando entre positivo y negativo.

Luego de un pulso de + 1 voltio, el sistema pasa de un estado de alta resistencia a un estado de baja resistencia y lo contrario ocurre para un pulso negativo de -1 voltio. Para leer el valor de los estados de resistencia producto de la conmutación, es necesario aplicar luego de cada pulso de voltaje, un pequeño voltaje de lectura que no disturbe el estado de memoria obtenido. La corriente que circula por la celda se mide entonces con un amperímetro, como el dibujado en la Figura 1a). El valor de la resistencia se obtiene del cociente entre el voltaje de lectura aplicado y el valor de la corriente circulante. Para un valor dado del voltaje de lectura, el estado de alta corriente corresponderá al estado de baja resistencia (estado ON), mientras que el estado de baja corriente corresponderá al de alta resistencia (OFF). En el panel inferior de la Figura 1b) están indicados los estados de alta y baja corriente que corresponden, respectivamente, a baja resistencia (ON) y alta resistencia (OFF).

La figura 1c) muestra el resultado de otro experimento, realizado en un óxido compuesto PCMO por un grupo de científicos de los laboratorios Sharp y la Universidad de Houston (Estados Unidos de Norteamérica), encabezado por Wei-Wei Zhuang. Aquí se grafican explícitamente los valores de resistencia ON y OFF en función del número de pulsos aplicados. En este caso los pulsos de voltaje son de ±5 voltios de amplitud. Notar que el cambio relativo en la resisten-

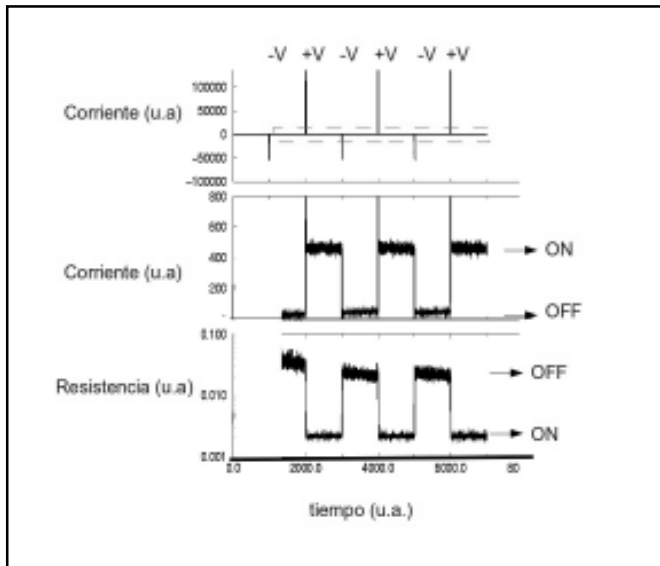


Figura 3: Resultados de las simulaciones numéricas de la conmutación bipolar empleando el modelo teórico desarrollado por M. J. Rozenberg, M. J. Sánchez, R. Weht, C. Acha, F. Gómez-Marlasca y P. Levy. Panel superior: Corriente circulante por la celda en función del tiempo (unidades arbitrarias) para la secuencia mostrada de pulsos de voltaje de amplitud $V=10$ (unidades arbitrarias). Panel medio: Amplificación de la región delimitada por la línea quebrada en el panel superior. Notar que se grafica la corriente de los estados de alta y baja corriente en valor absoluto. Panel inferior. Estados de resistencia ON y OFF en función del tiempo.

mina el estado ON de la celda. Para conmutar el estado de alta resistencia es necesario que el voltaje aplicado rompa este camino de conducción.

¿Por qué se rompe y cómo se reconstituye el filamento? Se especula con la posibilidad de que ciertos procesos químicos y un calentamiento térmico intenso, debido a los altos campos eléctricos localizados cerca del filamento, puedan ser responsables, respectivamente, de la formación y ruptura de los filamentos.

En la Figura 2 se esquematiza secuencialmente el proceso de formación y ruptura de un filamento conductor, dando lugar a los estados ON y OFF de la celda RRAM. Incluimos además una imagen de microscopía de un filamento en una celda de óxido de cobre. El filamento se distingue por contraste inmerso en el óxido de cobre. Este tipo de imágenes son escasas y muy difíciles de adquirir en las celdas de configuración vertical MIM que estamos analizando. Configuraciones planares en las que los dos electrodos metálicos se depositan sobre la superficie del material I son también utilizadas. En una de estas geometrías, un equipo de investigadores de la Universidad de Tokyo (Japón) ha tomado la imagen que aquí reproducimos.

La conmutación distribuida o de interfaz se atribuye a una modificación de la resistencia de contacto de las interfaces entre los electrodos metálicos M y el material óxido I. Cuando dos materiales con diferentes propiedades, como un metal y un óxido, se ponen en contacto, aparece una resistencia conocida como resistencia de contacto o de interfaz. En las celdas MIM verticales que estamos analizando, hay dos interfaces. La superior corresponde a la región definida entre las últimas capas de átomos del electrodo superior y las primeras capas de átomos del óxido. Por analogía, la interfaz inferior es la región comprendida entre las últimas capas atómicas del óxido y las primeras del electrodo inferior. La interfaz entre un metal y un óxido es en general una región con alta resistencia.

Un grupo de investigadores encabezados por el Dr. Ignatiev, de la Universidad de Houston (Estados Unidos), han mostrado cómo en una celda del óxido complejo PCMO la resistencia de las interfaces se modifica al aplicar los pulsos de voltaje de distinta polaridad, mientras que la resistencia de la zona central del óxido prácticamente no varía al aplicar los pulsos.

cia entre los estados ON y OFF es un factor 100, lo que permite definir dos estados de resistencia bien diferenciados.

Estableciendo clasificaciones

La importante cantidad de evidencia experimental ha permitido clasificar la conmutación resistiva de acuerdo con ciertas características distintivas:

Conmutación unipolar y bipolar

Una primera clasificación distingue la conmutación resistiva por la polaridad del voltaje aplicado, definiendo dos tipos de conmutación: unipolar y bipolar.

La conmutación unipolar depende de la amplitud del voltaje aplicado pero no de su polaridad. Por el contrario, la conmutación bipolar es direccional y depende de la polaridad o signo del voltaje aplicado. Ésta se observa tanto en los óxidos binarios como en los complejos, los cuales son relativamente buenos conductores.

En contraste, la conmutación unipolar es casi excluyente a los óxidos altamente aislantes en su estado virgen, como lo son algunos óxidos binarios. Para que se produzca la conmutación, los óxidos más resistivos requieren de un procedimiento inicial conocido como *formación*, que consiste en aplicar a la celda un campo eléctrico suficientemente intenso que permitía bajar la alta resistencia inicial.

Conmutación filamentaria y de interfaz

Una segunda clasificación está basada en el lugar geométrico de la celda o camino de conducción que origina la conmutación. En la conmutación filamentaria los estados de resistencia OFF y ON se deben a la ruptura y reconstitución de un filamento metálico que conecta a los dos electrodos. Se especula en que el mismo proceso de formación al que nos referimos anteriormente genera el filamento. Éste establece un camino de conducción de baja resistencia que deter-

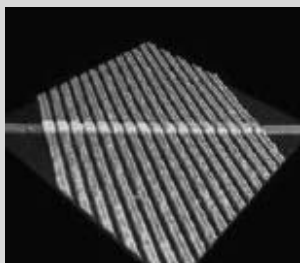
Celdas RRAM y memresistores

Las celdas RRAM pueden ser formalmente descritas como **memresistores o resistores con memoria**. La teoría de los memresistores fue formulada hace más de 40 años por Leon Chua, profesor de la Universidad de Berkeley en California (Estados Unidos de Norteamérica), quien es considerado el padre de la teoría de los circuitos eléctricos no lineales.

En base a consideraciones de simetrías físicas, Chua postuló la existencia de un cuarto componente básico en la teoría de circuitos no lineales, además de los tres conocidos resistor, inductor y capacitor.

Un memresistor es un componente elemental cuyo valor de resistencia depende de la historia temporal del voltaje que se ha aplicado entre sus terminales. Es diferente a un resistor variable, dado que en estos últimos la resistencia depende del valor instantáneo del voltaje o corrientes circulantes. El nombre memresistor se debe entonces a que el componente tiene memoria de la cantidad de corriente que por él ha circulado en un lapso de tiempo determinado.

En el año 2008 un grupo de investigación liderado por Stanley Williams, de los laboratorios Hewlett Packard (HP), demostró la conexión directa entre los memresistores y las celdas de memoria RRAM. Utilizando celdas de dióxido de titanio de unos pocos nanómetros de espesor y siguiendo un riguroso protocolo de medición, los investigadores de HP mostraron que las curvas experimentales que vinculaban la corriente con la tensión aplicada satisfacían todas las características enunciadas por Chua para los memresistores.



Este experimento motivó además una intensa actividad vinculada a la utilización de las celdas RRAM como memresistores en estudios asociados a lógica computacional y neuromórfica, un área de investigación que modela el comportamiento de sistemas neurales biológicos mediante el empleo de circuitos electrónicos.

El Memresistor de Hewlett Packard. Imagen de microscopía de un arreglo de 17 celdas RRAM de dióxido de titanio. El tamaño típico de cada celda es de 50 nm.

En el caso de los óxidos compuestos, como el PCMO, éstos son en su estado virgen relativamente buenos conductores. Cuando se los dispone en las celdas MIM, la resistencia total que se mide en los experimentos que describimos, consta esencialmente de tres contribuciones, las dos resistencias de cada interfaz, más la resistencia de la parte central de la celda que contiene exclusivamente el óxido. En un lenguaje más técnico, se dice que *la resistencia total es la suma de tres resistencias en serie*.

El experimento de Ignatiev y colaboradores fue concluyente y revelador en varios aspectos. Fundamentalmente permitió mostrar que en las celdas de óxidos compuestos, la conmutación resistiva ante la aplicación de pulsos de distinta polaridad (bipolar) estaba determinada esencialmente por las modificaciones de las resistencias de las interfaces.

La pregunta a responder es entonces cuál es el origen físico de la modificación de la resistencia de interfaz en la conmutación bipolar. Como veremos, la respuesta se encuentra escondida en los oxígenos.

Un método experimental que puede emplearse para identificar si el tipo de conducción es filamentaria o de interfaz consiste en estudiar la dependencia de la corriente que circula por la celda en el estado ON variando el tamaño de los electrodos metálicos emplea-

dos. Si bien esto no es sencillo de implementar, hay estudios que reportan que en el caso de la conducción filamentaria, la corriente resulta independiente del área de los electrodos, mientras que para la conducción de interfaz la corriente sí depende del tamaño de los electrodos.

El papel protagonista de los oxígenos en la conmutación bipolar

En contraste con el gran número de evidencias experimentales, no hay en la actualidad una completa comprensión del mecanismo físico subyacente a la conmutación resistiva y grandes esfuerzos están dirigidos a avanzar en esta dirección. Contribuye en parte a esta realidad la diversidad de compuestos en los que el fenómeno se manifiesta, lo cual indica que posiblemente no haya un único origen para la conmutación y los mecanismos de conducción que la posibilitan.

En el caso de la conmutación bipolar, estudios recientes dan cuenta del rol fundamental que juegan en este proceso los iones de oxígeno, comunes a todos los compuestos analizados. En general las interfaces entre los electrodos metálicos y el óxido son regiones deficientes de oxígeno, dado que estos iones tienden a ubicarse en la región central de la celda ocupada por el óxido.

En los óxidos compuestos como el PCMO, que ya mencionamos, los oxígenos actúan de puentes para mediar la conducción eléctrica. Por lo tanto una región del óxido deficiente en oxígeno contiene “puentes rotos” que la tornarán menos conductora o más resistente. En lenguaje más riguroso, decimos que en los óxidos compuestos la *resistividad* (resistencia por unidad de volumen) aumenta al disminuir la cantidad de oxígeno.

Sucede que los iones de oxígeno son partículas cargadas y por lo tanto factibles de moverse en un campo eléctrico. La electrostática nos enseña que en los materiales que no son muy buenos conductores, como es el caso de los óxidos que nos ocupan, un voltaje aplicado genera campos eléctricos, tanto más intensos cuanto más resistivo sea el medio material.

Es aquí donde entran nuevamente en juego las interfaces. Debido a sus altas resistencias de contacto es allí donde se producen, como consecuencia de los pulsos de voltaje aplicados entre los electrodos, los campos eléctricos más intensos (de hasta 1 voltio/1 nm). Estos campos eléctricos posibilitan los desplazamientos de los iones de oxígeno, los cuales a temperatura ambiente, pueden viajar distancias de hasta algunos nanómetros en las cercanías de las interfaces.

Con la polaridad del voltaje aplicado se controla el sentido de circulación de los iones. Imaginemos que aplicamos un voltaje positivo de suficiente intensidad y duración entre el electrodo superior y el inferior. Sin pérdida de generalidad podemos pensar que el electrodo inferior está a tierra o a voltaje de referencia nulo. El importante campo eléctrico generado por este pulso “atraerá” hacia la interfaz superior a los iones de oxígeno localizados en sus cercanías. Esto producirá la reparación de los puentes rotos originados en la deficiencia de oxígenos. Como consecuencia, se producirá una importante disminución de la resistencia de la interfaz que da lugar al estado ON.

Un pulso de voltaje suficientemente negativo produce el efecto contrario, empujando los iones de oxígeno desde la interfaz superior hacia la región central de la celda, provocando un aumento significativo de la resistencia de la interfaz y dando origen al estado OFF.

Avanzando en la comprensión de los mecanismos físicos que regulan a las RRAM

Desde hace varios años, conjuntamente con colegas del Centro Atómico Constituyentes y de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Buenos Aires, estamos intentando comprender el origen microscópico de los mecanismos físicos que regulan la conmutación resistiva en las celdas de memoria RRAM.

Uno de los resultados más relevantes del trabajo conjunto ha sido la elaboración de un modelo teórico que incorpora como ingrediente fundamental el movi-

miento de los iones de oxígeno en regiones nanométricas en torno de las interfaces. El modelo da cuenta del rol primordial que juegan las interfaces, como regiones activas para la conmutación resistiva, y los campos eléctricos que allí se generan. Los resultados del modelo reproducen detalles no triviales de los experimentos de conmutación bipolar en óxidos compuestos y han permitido un avance cualitativo en el entendimiento de los mecanismos relevantes que originan la conmutación bipolar. La Figura 3 muestra un ejemplo de este modelo de conmutación resistiva. Cabe destacar la similitud con los resultados experimentales descriptos en la Figura 1b).

Consideraciones finales

No hay dudas de que las celdas de memoria RRAM están instaladas como potenciales candidatas para memorias no volátiles de próxima generación.

Sin embargo resulta aún prematuro pensar en una electrónica basada exclusivamente en compuestos de óxidos. En la actualidad, el desafío se encuentra en ensamblar e integrar las celdas RRAM de óxidos en las matrices de silicio, tarea para nada sencilla debido, en particular, a la diferente estructura cristalina de estos materiales.

Los avances en el campo de las aplicaciones tecnológicas se sustentan en gran medida en la investigación básica, que estudia las leyes y principios que gobiernan los fenómenos en los que se basan dichas aplicaciones. Una profunda comprensión de los diversos procesos de origen químico y electrónico que rigen la conmutación resistiva posibilitará la optimización de dispositivos de celdas RRAM y servirá de guía para el desarrollo de futuros experimentos.

Lecturas sugeridas

- Waser, R. y Aono, M. (2007). Nanoionics-based resistive switching memories. *Nature Materials*, 6, pp. 833-840.
- Sawa, A. (2008). Resistive Switching in Transition metal oxides. *Materials Today*, 11(6), pp. 28-36.
- Rozenberg, M.J., Inoue, I.H. y Sánchez, M.J. (2004). Nonvolatile memory with multilevel switching: a basic model. *Physical Review Letters*, 92, pp. 178.302-178.305.
- Rozenberg, M.J., Sánchez, M.J., Weht, R., Acha, C., Gómez-Marlasca, F. y Levy, P. (2010). Mechanisms of bipolar resistive switching in transition-metal oxides. *Physical Review B*, 81, pp. 115.101-115.105.
- Ignatiev, A., Wu, N.J., Chen, X., Nian, Y. B., Papagianni, C., Liu, S.Q. y Strozier, J. (2008). Resistance switching in Oxide thin films. *Phase Transitions*, 81, pp. 791-799.
- Strukov, D.B., Snider, G.S., Stewart, D.R. y Williams, R. S. (2008). The missing memristor found. *Nature*, 453, pp. 80-83.