

ESTUDIO DE LA RESPUESTA I-V EN CELDAS DE MEMORIA DE $Sb_{70}Te_{30}$ STUDY OF THE I-V RESPONSE IN $Sb_{70}Te_{30}$ MEMORY CELLS

M.R. Fontana^{*1,2}, J.A. Rocca^{1,2}, F. Golmar^{3,4} y M.A. Ureña^{1,2}

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Sólidos Amorfos. Paseo Colón 850 (1063), Buenos Aires, Argentina

²CONICET - Universidad de Buenos Aires. Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN). Buenos Aires, Argentina.

³Escuela de Ciencia y Tecnología, UNSAM, Campus Miguelete (1650), San Martín, Buenos Aires, Argentina.

⁴CONICET Godoy Cruz 2290, Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 24/05/2024; Aceptado: 03/08/2024

Los vidrios calcogenuros se encuentran dentro del grupo de los materiales de cambio de fase y son prometedores en su aplicación a memorias electrónicas no volátiles. Bajo pulsos eléctricos, pueden ciclar entre dos estados estructurales amorfo y cristalino que están bien diferenciados en su conductividad. Suponiendo que los mecanismos de cambio de fase dependen de la energía por unidad de volumen entregada al material sensible, es deseable construir celdas a escala micrométrica, considerando también que eventualmente podrían integrarse en procesos de fabricación microelectrónica. En un trabajo anterior, observamos una disminución abrupta en la resistencia de las películas delgadas base $Sb_{70}Te_{30}$ depositadas por ablación láser en un rango de temperatura de aproximadamente 445 K cuando la muestra se calienta a bajas velocidades. A partir de los resultados de la calorimetría diferencial de barrido y difracción de rayos X en muestras obtenidas por el mismo método, asociamos el cambio de resistividad con el proceso de cristalización. En este trabajo, construimos dispositivos micrométricos de superficie rectangular con $Sb_{70}Te_{30}$ como material sensible, depositado sobre electrodos coplanares con espaciado L (8 y 16 μm) y ancho W (4, 8, 16, 32 y 64 μm). Medimos la respuesta de voltaje de los dispositivos cuando se excitan mediante barrido de corriente creciente y, entre barridos consecutivos medimos la resistencia aplicando un valor de voltaje constante. En las curvas I-V identificamos una transformación del estado original a uno de menor resistencia, atribuible a la cristalización, pero no fue posible realizar la transformación inversa a un estado de mayor resistencia. Partiendo del desconocimiento sobre la conductividad del material, simulamos el campo eléctrico en la celda mediante el Método de los Elementos Finitos. La conductividad eléctrica del vidrio calcogenuro en su estado inicial (amorfo) fue estimada a partir de ajustar su valor en las simulaciones con diferentes geometrías minimizando la diferencia entre las resistencias medidas y simuladas.

Palabras Clave: Materiales de cambio de fase (PCM - Phase Change Materials), vidrios calcogenuros, respuesta I-V.

Chalcogenide glasses are within the group of phase change materials and are promising in their application to non-volatile electronic memories. Under electrical pulses, they can circulate between two amorphous and crystalline structural states that are well differentiated in their conductivity. Assuming that the phase change mechanisms depend on the energy per unit volume delivered to the sensitive material, it is desirable to build cells on a micrometer scale, also considering that they could eventually be integrated into microelectronic manufacturing processes. In a previous work, we observed an abrupt decrease in the resistance of $Sb_{70}Te_{30}$ base thin films deposited by laser ablation in a temperature range of approximately 445 K when the sample is heated at low rates. From the results of differential scanning calorimetry and X-ray diffraction on samples obtained by the same method, we associate the change in resistivity with the crystallization process. In this work, we build micrometric devices with rectangular surface with $Sb_{70}Te_{30}$ as sensitive material, deposited on coplanar electrodes with spacing L (8 and 16 μm) and width W (4, 8, 16, 32 and 64 μm). We measure the voltage response of the devices when excited by scanning of increasing current and, between consecutive scanning, we measure the remaining resistance by applying a constant voltage value. In curves I-V, we identify a transformation from the original state to one of lower resistance, attributable to crystallization, but it was not possible to perform the reverse transformation to a state of higher resistance. Starting from the lack of knowledge about the conductivity of the material, we simulate the electric field in the cell using the Finite Element Method. The electrical conductivity of the chalcogenide glass in its initial state (amorphous) was estimated by adjusting its value in the simulations with different geometries, minimizing the difference between the measured and simulated resistances.

Keywords: Phase change materials, chalcogenides glasses, I-V response.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2024.35.3.65>



ISSN - 1850-1168 (online)

* mfontan@fi.uba.ar

I. INTRODUCCIÓN

En respuesta a la creciente demanda de almacenamiento y procesamiento de información impulsada por la inteligencia artificial y otras aplicaciones que requieren el uso intensivo de datos, los vidrios calcogenuros ofrecen una perspectiva prometedora como materiales de cambio de fase (PCM) [1-6] para el diseño innovador de memorias. Las memorias de cambio de fase aprovechan las transiciones de fase rápidas y reversibles entre los estados amorfo y cristalino para la conmutación, donde la cristalización y la amorfización son los procesos que permiten cambiar el estado lógico de la memoria de PCM. El cambio de resistencia eléctrica entre los estados amorfo (alta resistencia) y cristalino (baja resistencia) se utiliza para identificar los estados lógicos ("0" y "1") de las memorias [1, 6]. Los PCM, que frecuentemente se obtienen como películas delgadas, se agrupan en diferentes familias, siendo las aleaciones del sistema $GeSbTe$ uno de los vidrios calcogenuros más estudiados. Las aleaciones a lo largo del diagrama pseudobinario $GeTe - Sb_2Te_3$, (aleaciones como $Ge_1Sb_4Te_7$, $Ge_1Sb_2Te_4$ y $Ge_2Sb_2Te_5$) fueron las primeras que mostraron transformaciones muy rápidas y buen contraste en las propiedades ópticas y en propiedades eléctricas [1]. En particular, a partir de sus propiedades ópticas, la aleación $Ge_2Sb_2Te_5$ y materiales relacionados como $GeSbTeN$, $GeSnSbTe$, $GeBiSbTe$, $GeBiTe$, y $GeInSbTe$ son frecuentemente empleados en productos comerciales (discos CD, DVD, etc.). En un trabajo previo se estudió el comportamiento estructural y eléctrico con la temperatura de películas delgadas con composiciones $Ge_{13}Sb_5Te_{82}$, $Ge_1Sb_2Te_4$, $Ge_2Sb_2Te_5$, $Ge_1Sb_4Te_7$ y $Sb_{70}Te_{30}$ [7]. El contraste de resistencia eléctrica en estas aleaciones está entre 3 y 6 órdenes de magnitud y es factible generar múltiples estados de resistencia intermedia ajustando la relación amorfo-cristalino en una sola celda de memoria [7, 8]. En el sistema $SbTe$, las aleaciones ricas en Sb de composición cercana a $Sb_{70}Te_{30}$ destacan por sus buenas propiedades (transformaciones de fase rápidas y reversibles, conmutación entre estados cristalinos y amorfo [1, 2]). En un trabajo previo [8], hemos estudiado la estabilidad térmica de aleaciones amorfas de composición $Sb_{70}Te_{30}$ y su cinética de cristalización mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). En este trabajo hemos construido dispositivos micrométricos de superficie rectangular con materiales calcogenuros de composición $Sb_{70}Te_{30}$ como material sensible y con electrodos de cromo en configuración coplanar. Con el objetivo de encontrar una geometría que muestre el mejor rendimiento (por ejemplo, para maximizar el contraste entre resistencias, etc.) se fabricaron diferentes dispositivos variando el ancho y la distancia entre los electrodos (en el orden de los micrones). Se presentan los resultados de la caracterización eléctrica de los mismos y las simulaciones por elementos finitos para las diferentes geometrías.

II. EXPERIMENTAL

Fabricación de microdispositivos

Sobre sustrato de vidrio (soda lime), se fabricaron microdispositivos compuestos por electrodos coplanares de cromo sobre los cuales se depositó una película rectangular de material sensible (vidrio calcogenuro). La geometría de los microdispositivos que puede verse en Fig. 1, se definió con una máscara para litografía UV (lámpara de Hg , 365 nm) de manera tal que se pudieran obtener electrodos de cromo con separación L variable ($L = 8$ y $16 \mu m$) y ancho W variable ($W = 4, 8, 16, 32$ y $64 \mu m$), con terminales de la superficie requerida para contacto eléctrico (en probe station). Los electrodos de Cr (con un espesor $t = 100 nm$) se depositaron con metalizadora Quorum Q300T D. El material sensible (vidrio calcogenuro) se depositó usando la técnica de deposición con láser pulsado (PLD - Pulsed Laser Deposition) como se describe en II. La película de vidrio calcogenuro tiene una ventana de $60 \times 104 \mu m$ mientras que su espesor fue de 300-400 nm. El material excedente de los depósitos se eliminó atacando por vía húmeda (lift-off con acetona).

Depósito de películas de calcogenuros

El material sensible de los microdispositivos fueron películas delgadas que se fabricaron, como se mencionó, mediante deposición con láser pulsado (PLD) a partir de blancos de vidrios calcogenuros de composición $Sb_{70}Te_{30}$ (expresada como porcentaje atómico). Los blancos se prepararon con el siguiente procedimiento, se fabricaron muestras en volumen por síntesis directa en la composición indicada a partir de elementos puros (4N) en ampollas de cuarzo evacuadas con un vacío de 10^{-6} mbar y selladas. Las ampollas se colocaron en un horno calefaccionado por una resistencia eléctrica a $800^\circ C$, durante 8 horas, para homogeneizar la mezcla, luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente [9]. Las muestras así obtenidas fueron cortadas y pulidas para ser utilizadas como blancos en el proceso de PLD. Se depositaron películas delgadas sobre los microdispositivos descriptos en 2.1 a temperatura ambiente dentro de una cámara de vacío. El proceso de PLD se realizó utilizando un láser pulsado de Nd:YAG (Spectra-Physics Quanta-Ray Lab-150) con tiempos de deposición de 60 minutos, operando a una longitud de onda de 355 nm, con una duración de pulso de 8 ns y una frecuencia de repetición de 10 Hz. La densidad de energía incidente sobre el blanco fue de aproximadamente $2 Jcm^{-2}$ [7].

Respuesta Corriente-Tensión

Se caracterizó la respuesta Corriente-Tensión (I-V) de los microdispositivos contactando sus terminales metálicas con puntas de prueba tungsteno de $15 \mu m$ (como se muestra en la Fig. 1 medio) en una Probe Station Everbeing EB6 excitando y midiendo con un equipo SMUs de Keithley 4200A-SCS Parameter Analyzer. La respuesta I-V de los microdispositivos se realizó fijando la corriente mediante una función lineal creciente del tipo escalón en pasos de 100 nA, manteniendo la corriente constante en un intervalo de 10 ms, y midiendo la tensión. Este barrido en corriente fue realizado, más de una vez, hasta distintas corrientes máximas para los diferentes microdispositivos. La resistencia R de los dispositivos es determinada por el cociente V/I .

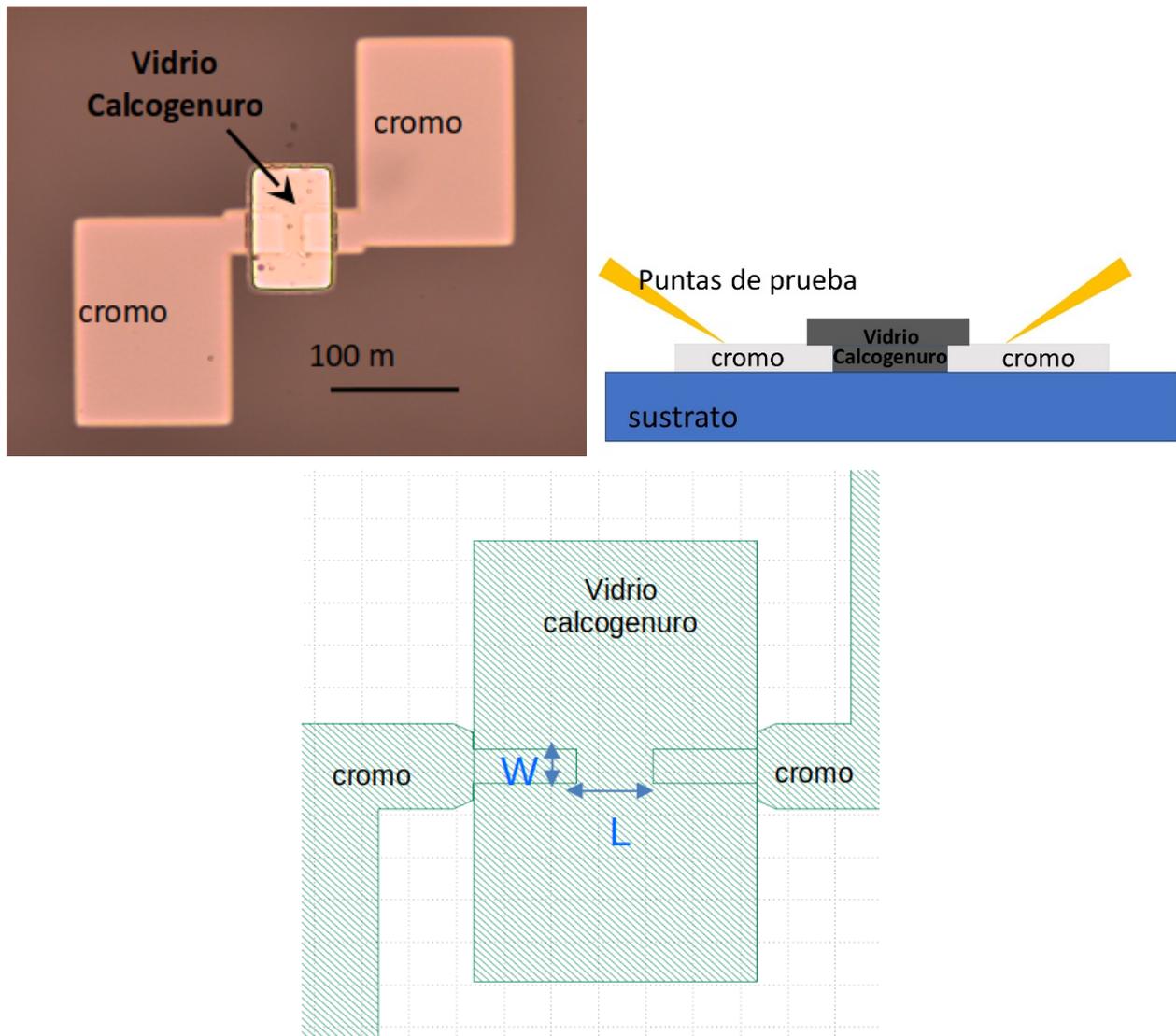


FIG. 1: Geometría de los microdispositivos. Arriba: foto de microscopía. Medio: esquema de la geometría. Abajo: esquema del corte transversal.

III. RESULTADOS

En la Fig. 2 se muestra el comportamiento típico de la respuesta I-V de los microdispositivos. Los mismos presentan una discontinuidad o cambio abrupto en la relación tensión/corriente atribuible a una transformación en el material sensible (vidrio calcogenuro). A modo de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos para los microdispositivos con las siguientes geometrías

1. $L = 16 \mu m$ y $W = 16 \mu m$
2. $L = 16 \mu m$ y $W = 8 \mu m$.

En la Fig. 2(a) se muestran los valores de I-V partiendo del estado inicial del dispositivo y registrando V al incrementar la corriente impuesta (curva roja (A)). Los valores de resistencia que surgen de la curva I-V roja (A) son altos y están asociados al estado amorfo. En esta figura también se observa que para un determinado valor alto de corriente se produce una transformación en la cual la tensión disminuye abruptamente, mostrando una discontinuidad de casi un orden de magnitud. Esta transformación es asociada con una disminución abrupta de la resistencia eléctrica, pasando a un valor bajo de resistencia, que se asocia al estado cristalino. Una vez producida la transformación al estado final, se realiza otro barrido similar en corriente para obtener la curva I-V del estado final (curva celeste C). La transformación mostrada en la Fig. 2, donde se produce el salto en la curva I-V es atribuible a una transformación de fase, y con su consecuente cambio significativo en la resistividad. Este cambio de fase es debido a la cristalización del vidrio calcogenuro [7, 8]. En otras palabras, se atribuye a la transición amorfo-cristal. En la Fig. 2(a), se observa que basta con un barrido para tener la excitación necesaria para que el dispositivo tenga el cambio deseado, o sea que el material calcogenuro pase del estado amorfo al estado cristalino. En la Fig. 2(b), se muestra que se repiten algunos barridos hacia mayores corrientes, hasta

lograr el cambio, observándose que no ocurre hasta el noveno barrido. En ambos casos, cualquier barrido posterior a la transformación mantiene la relación tensión/corriente del estado cristalino. No se pudo realizar la reversión del proceso de cristal a amorfo debido a limitaciones experimentales relacionadas con la característica del pulso de corriente necesaria para lograrlo (pulsos de alta corriente y muy corta duración) [1]. En la Fig. 3 se muestra la resistencia eléctrica R (calculada a partir de las curvas I-V como V/I) en función de la corriente aplicada I para el dispositivo con $L=W=16\ \mu\text{m}$. La curva roja (A) muestra cómo evoluciona la resistencia R del dispositivo desde su estado inicial (de alta resistencia) a medida que se incrementa la corriente, observándose una disminución continua en la resistencia eléctrica. Este fenómeno se explica por el hecho de que una mayor corriente produce una mayor disipación de energía térmica por efecto Joule, incrementando la temperatura. Consecuentemente, debido al comportamiento semiconductor de este tipo de aleaciones, se observa una disminución en la resistencia eléctrica. A una corriente de $2 \cdot 10^{-4}$ A, se observa una disminución abrupta de R , indicando que el material sensible del microdispositivo alcanzó la temperatura de cristalización y produciéndose la transformación amorfo-cristal. En trabajos previos se reportó que esta temperatura de transformación se encuentra entre 413 y 445 K dependiendo de la velocidad de calentamiento [7, 8]. Luego de la transformación, realizando el barrido de corriente se observa también de un decrecimiento suave de R con la corriente (curva celeste C). En la Tabla 1 se reportan los valores de resistencias eléctrica inicial ($R_{inicial}$) (antes de realizar cualquier barrido de corriente) y de resistencia final (R_{final}) (después de la transformación) medidos a una tensión constante de 0,5 V en función de la geometría del dispositivo. En todos los casos se observa que la relación entre las resistencias eléctrica inicial $R_{inicial}$ sobre la resistencia final R_{final} es entre tres y cuatro ordenes de magnitud. Estos resultados están en acuerdo con los obtenidos en experiencias anteriores en las que se midió la resistencia en función de la temperatura [7]. Las mediciones de resistencia de Tabla 2 muestran que la configuración con $L=16\ \mu\text{m}$ y $W=8\ \mu\text{m}$ es la que tiene la mayor relación entre las resistencias del estado inicial y final. Con el objeto de determinar la dependencia de la resistencia eléctrica inicial del dispositivo con la geometría del mismo y estimar la conductividad del material sensible (vidrio calcogenuro) se realizó un modelo de conducción eléctrica usando el método de Elementos Finitos.

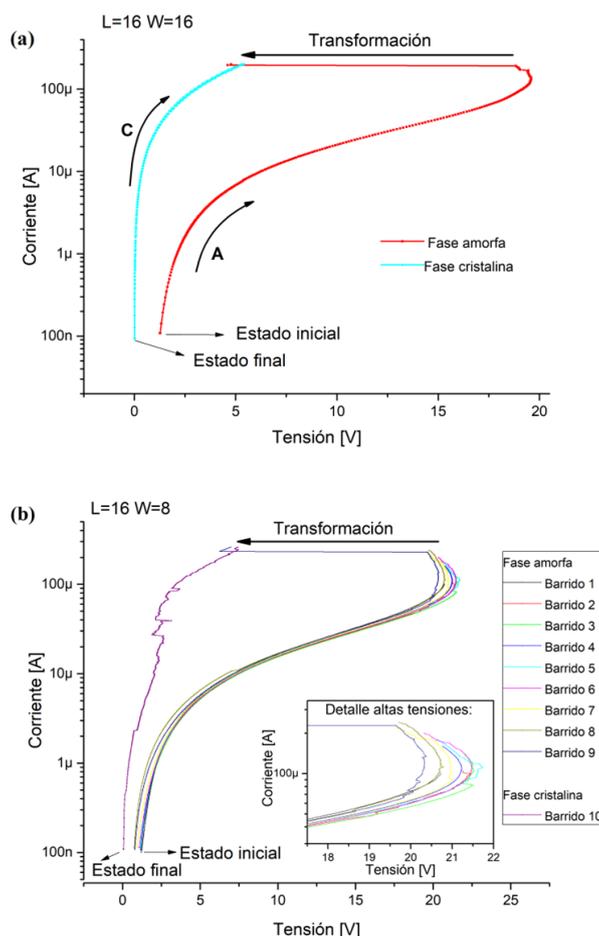


FIG. 2: Respuesta I-V para los microdispositivos con las siguientes geometrías a) $L = W = 16\ \mu\text{m}$ y b) $L = 16\ \mu\text{m}$, $W = 8\ \mu\text{m}$. En b) se muestra un detalle a valores altos de tensiones.

IV. DISCUSIÓN

Para poder estimar la conductividad del vidrio calcogenuro se realizó un modelado por el Método de Elementos Finitos de la conducción eléctrica en el microdispositivo. Se utilizó una biblioteca estándar del programa COMSOL Multiphysics 6.1 para realizar las simulaciones en un modelo bidimensional del dispositivo empleando elementos triangulares con una cantidad de nodos de entre 15000 y 22000. Como condiciones de borde se definieron la aislación eléctrica en el contorno del dispositivo y la conservación de la corriente en la región definida por esos límites. Para cada electrodo se estableció un potencial eléctrico constante de 0 y 1 V respectivamente. El modelado se realizó para el estado inicial de los dispositivos con $L = 16 \mu m$ y usando diferentes valores de W .

TABLA 1: Valores de la resistencia eléctrica medida inicial y final para diferentes geometrías de dispositivos. Las medidas se realizaron a tensión constante de 0,5 V.

L (μm)	W (μm)	$R_{inicial}(\Omega)$	$R_{final}(\Omega)$	Cociente: $\frac{R_{inicial}}{R_{final}}$
8	4	$4,63 \cdot 10^8$	$4,59 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^3$
8	16	$2,03 \cdot 10^8$	$1,01 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^3$
8	32	$1,68 \cdot 10^8$	$7,72 \cdot 10^4$	$2,18 \cdot 10^3$
8	64	$1,40 \cdot 10^8$	$8,52 \cdot 10^4$	$1,65 \cdot 10^3$
16	4	$2,71 \cdot 10^8$	$2,63 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^3$
16	8	$2,49 \cdot 10^8$	$2,17 \cdot 10^5$	$1,15 \cdot 10^4$
16	16	$1,9 \cdot 10^8$	$1,82 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^3$
16	32	$9,52 \cdot 10^7$	$8,52 \cdot 10^4$	$1,65 \cdot 10^3$

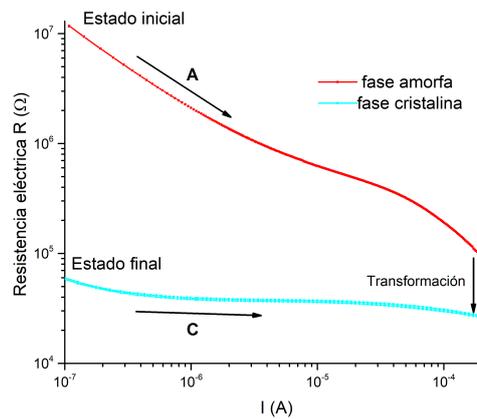


FIG. 3: Resistencia eléctrica en función de la corriente aplicada para el microdispositivo con $L = W = 16 \mu m$.

En la Fig. 4(a) se ve un esquema del mallado empleado. La Fig. 4(b) muestra el potencial eléctrico estacionario de la celda en el estado inicial para los dispositivos con $L = 16 \mu m$ y $W = 8 \mu m$. La Fig. 4(c) muestra el campo eléctrico estacionario de la celda en el estado inicial para los dispositivos con $L = 16 \mu m$ y $W = 8 \mu m$. La densidad de corriente, que es proporcional al campo eléctrico (por la ley de Ohm), tiene una intensidad mayor, como es de esperar, en la región donde los electrodos están más próximos. Un parámetro que caracteriza al dispositivo es la resistencia eléctrica. La conductividad eléctrica del vidrio calcogenuro en el estado inicial puede ser estimada a partir de ajustar su valor en las simulaciones con diferentes geometrías minimizando la diferencia entre las resistencias medidas y simuladas. En la tabla 2 se observan los valores entre las resistencias medidas y simuladas para el estado inicial del material sensible y para las siguientes geometrías: $L = 16 \mu m$ y W variable. Luego, el valor así obtenido de la conductividad eléctrica en el estado inicial es: $\sigma = 2,01 \cdot 10^{-2} (\Omega m)^{-1}$. Este valor es visiblemente inferior al reportado por otros autores para el material en estado amorfo ($\sigma = 3,8 \cdot (\Omega m)^{-1}$ a temperatura ambiente) [10]. Esta diferencia podría deberse a que en el modelo no consideré los efectos de la resistencia de contacto entre el electrodo y el vidrio calcogenuro. Esta resistencia adicional incrementaría la resistencia del dispositivo modelado, lo que se reflejaría como una disminución en el valor de la conductividad calculada mediante la simulación si no se tuviera en cuenta.

Por otro lado, en la Fig. 5 se muestran los valores de corriente eléctrica medidas y las obtenidas de la simulación en función del ancho W . Como es de esperar, la corriente aumenta a medida que lo hace W . Es posible ajustar los resultados con una función lineal que no pasa por el origen $I(W) = AW + B$. El valor de la ordenada al origen B es el valor de corriente para ancho W nulo que representa la conducción eléctrica para dos electrodos idealmente lineales. No resulta posible realizar un ajuste análogo para la resistencia en el estado final ya que el mismo podría diferir para cada celda (debido a que se espera una distinta fracción del volumen del material cristalizada en cada experiencia utilizando diferentes geometrías).

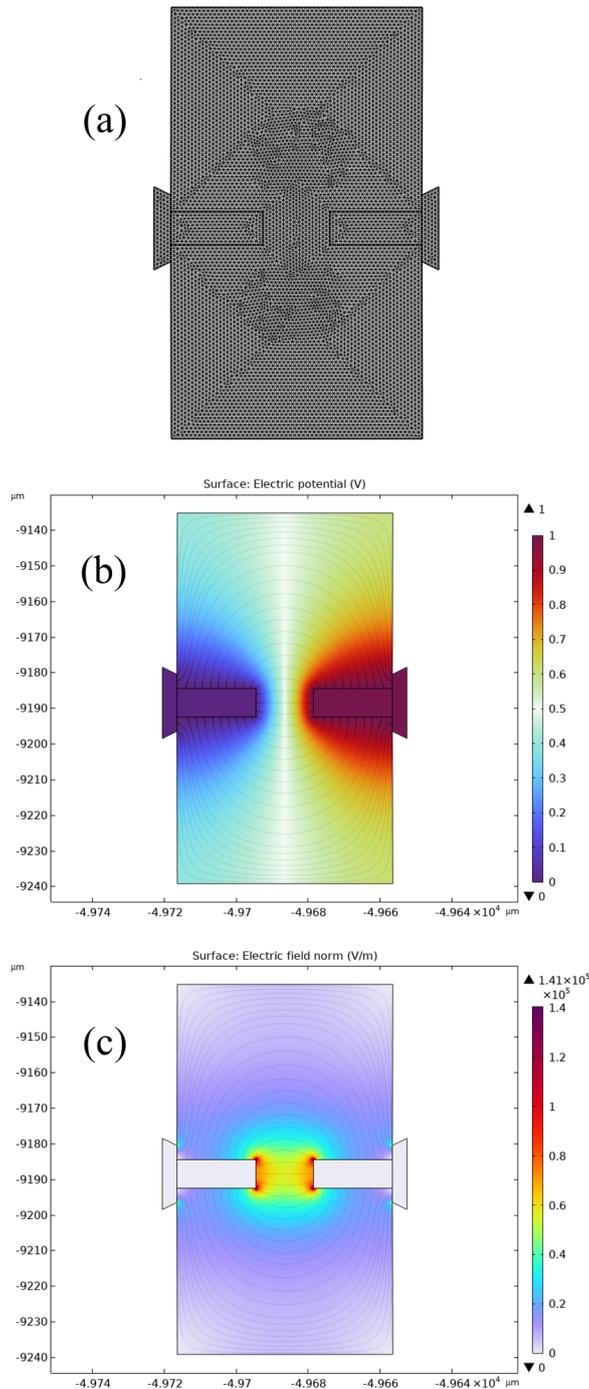


FIG. 4: Modelado por elementos finitos para el dispositivo con $L = 16 \mu\text{m}$ y $W = 8 \mu\text{m}$. (a): Esquema del mallado empleado. (b): Resultados para potencial eléctrico estacionario de la celda en el estado inicial. (c): Resultados para el campo eléctrico estacionario de la celda en el estado inicial.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se construye por técnicas de microfabricación, dispositivos de $Sb_{70}Te_{30}$ como material sensible, variando la geometría de sus electrodos, con el objetivo de caracterizar su comportamiento eléctrico cuando son excitados con barridos de corriente. Atribuimos el comportamiento de las curvas I-V a una transformación desde su estado original (amorfo) de alta resistencia a uno de menor resistencia (cristalino). La ocurrencia de la transformación durante un barrido en corriente se observa como un retroceso abrupto en la tensión sobre la celda debido a la disminución en su resistencia. Los “estados” antes y después de dicha transformación son identificados a partir del valor de la resistencia medida a baja tensión. Los resultados obtenidos sugieren que la transformación ocurre cuando se alcanza un umbral de corriente o potencia disipada en el calcogenuro. De todas las geometrías estudiadas, la configuración con $L = 16 \mu\text{m}$ y $W = 8 \mu\text{m}$ es la que tiene la mayor relación entre las resistencias del estado inicial y final. La conducción eléctrica en los dispositivos fue simulada por elementos finitos, obteniéndose valores de conductividad eléctrica del vidrio calcogenuro muy bajos

TABLA 2: Valores de la resistencia eléctrica medida y modelada de dispositivos con $L = 16 \mu\text{m}$ y diferentes valores de W .

$W (\mu\text{m})$	$R_{\text{medido}} (\Omega)$	$R_{\text{modelado}} (\Omega)$	Diferencia
4	$2,71 \cdot 10^8$	$2,88 \cdot 10^8$	6 %
8	$2,049 \cdot 10^8$	$2,51 \cdot 10^8$	1 %
16	$1,99 \cdot 10^8$	$2,02 \cdot 10^8$	2 %
64	$9,52 \cdot 10^7$	$9,52 \cdot 10^7$	0 %

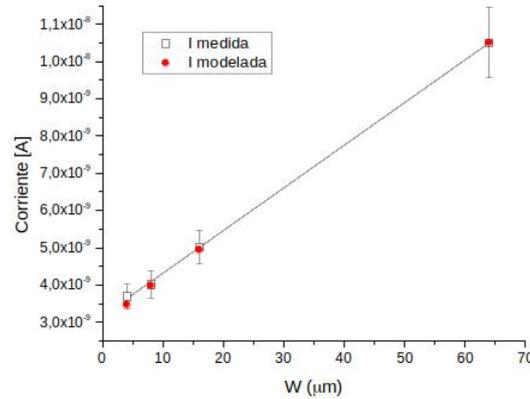


FIG. 5: Corriente eléctrica medidas y simuladas de los microdispositivos con $L = 16 \mu\text{m}$ en función del ancho W .

comparados con bibliografía. Este resultado muestra que el modelo de conducción en estos dispositivos debe ser mejorado considerando los efectos de la resistencia de contacto metal-semiconductor.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería, a la Universidad de Buenos Aires, a la Escuela de Ciencia y Tecnología UNSAM, a CONICET y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica por la financiación de la presente investigación. Al equipo del Departamento de Micro y Nanotecnología del CAC-CNEA por el apoyo en el uso de Sala Limpia.

REFERENCIAS

- [1] M. Wuttig y N. Yamada. Phase-change materials for rewriteable data storage. *Nature Materials* **6**, 824-832 (nov. de 2007). ISSN: 1476-4660. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat2009>.
- [2] G. Liu, L. Wu, M. Zhu, Z. Song, F. Rao, S. Song e Y. Cheng. The investigations of characteristics of Sb₂Te as a base phase-change material. *Solid-State Electronics* **135**, 31-36 (sep. de 2017). ISSN: 0038-1101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2017.06.004>.
- [3] S. Raoux, W. Wełnic y D. Ielmini. Phase Change Materials and Their Application to Nonvolatile Memories. *Chemical Reviews* **110**, 240-267 (ago. de 2009). ISSN: 1520-6890. <http://dx.doi.org/10.1021/cr900040x>.
- [4] A. V. Kolobov, P. Fons, A. I. Frenkel, A. L. Ankudinov, J. Tominaga y T. Uruga. Understanding the phase-change mechanism of rewritable optical media. *Nature Materials* **3**, 703-708 (sep. de 2004). ISSN: 1476-4660. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat1215>.
- [5] F. Rao, W. Zhang y E. Ma. Catching structural transitions in liquids. *Science* **364**, 1032-1033 (jun. de 2019). ISSN: 1095-9203. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aax6333>.
- [6] X.-P. Wang, X.-B. Li, N.-K. Chen, Q.-D. Chen, X.-D. Han, S. Zhang y H.-B. Sun. Element-specific amorphization of vacancy-ordered GeSbTe for ternary-state phase change memory. *Acta Materialia* **136**, 242-248 (sep. de 2017). ISSN: 1359-6454. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.006>.
- [7] J. Rocca, J. L. García, M. A. Ureña, M. Fontana y B. Arcondo. Temperature Dependence of Electrical Resistance in Ge-Sb-Te Thin Films. *Materials Research* **22** (2019). ISSN: 1516-1439. <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0512>.
- [8] J. Rocca, M. Ureña y M. Fontana. MASTER CURVE FOR CRYSTALLIZATION OF SB70TE30AMORPHOUS ALLOYS. *Anales AFA* **34**, 22-26 (mar. de 2023). ISSN: 1850-1168. <http://dx.doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.1.22>.
- [9] M. Ureña, M. Fontana, B. Arcondo y M. Clavaguera-Mora. Crystallization processes of Ag-Ge-Se superionic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* **320**, 151-167 (jun. de 2003). ISSN: 0022-3093. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093\(03\)00022-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00022-X).
- [10] E. Prokhorov, A. Mendoza-Galván, J. González-Hernández y B. Chao. Effects of Ge addition on the optical and electrical properties of eutectic Sb₇₀Te₃₀ films. *Journal of Non-Crystalline Solids* **353**, 1870-1874 (jun. de 2007). ISSN: 0022-3093. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2007.02.017>.