

Trabajo Fin de Máster

Caracterización y modelado de memorias RRAM basadas en estructuras metal-aislante-semiconductor y metal-aislante-metal

David Maldonado Correa

Junio de 2019



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

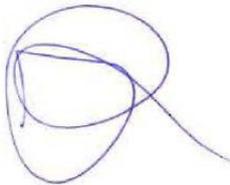
Tutor 1: Juan Bautista Roldán Aranda

Tutor 2: Andrés Roldán Aranda

Departamento de electrónica y tecnología de los computadores

Universidad de Granada

Firma Tutor 1:



Firma Tutor 2:



Agradecimientos

En primer lugar me gustaría expresar todo mi agradecimiento a mi familia. Gracias a mis padres y a mi hermano por el apoyo constante durante tanto tiempo y la confianza depositada, por haber estado siempre a mi lado en todas las situaciones difíciles y por todo el esfuerzo que han dedicado y siguen dedicando a formarme para intentar tener un futuro mejor. Gracias por comprenderme, ayudarme y apoyarme en todo momento, siendo capaces de sacarme adelante en los momentos duros. Sin vosotros no habría llegado hasta aquí.

Tampoco quiero olvidarme del resto de mi familia. Gracias a todos ellos por su afecto cariño y constante apoyo, especialmente a mis abuelos por haberme tenido siempre presente.

Mostrar también mis agradecimientos al Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, muy especialmente a mis tutores, Juan Bautista Roldán Aranda y Andrés María Roldán Aranda por su constante dedicación, atención y supervisión durante todo este tiempo. Todos son igualmente partícipes de este trabajo.

Resumen

El objetivo de este proyecto es el estudio y posterior análisis del efecto del campo magnético aplicado sobre dispositivos de tipo resistivo RRAM, en concreto sobre estructuras metal-aislante-semiconductor y metal-aislante-metal. Los temas a tratar serán la modificación del software de medidas y análisis desde el que se parte para que incluya compatibilidad de trabajo con campo magnético y desarrollo de distintos escenarios para la toma de medidas con campo magnético uniforme. Finalmente se llevarán a cabo una serie de medidas precisas y se tratarán los resultados. El sistema contará con el software para la configuración del conexionado y el lanzamiento del proceso de medida controlando el conjunto de la instrumentación involucrada mediante buses GPIB y RS-232. Finalmente, se concluye que los resultados muestran que el campo magnético aumenta los niveles de conducción de la corriente en el estado de baja resistencia de manera acumulativa, es decir, en series de ciclos RS sucesivos. Además, la media de la corriente en el estado de alta resistencia también se ve incrementada bajo los efectos del campo magnético.

Palabras clave

Campo magnético, caracterización, análisis, modelado, medida.

Índice

Prólogo	5
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.1.1 Memorias no volátiles	2
1.1.1.1 Memorias RRAM	3
1.2 Objetivos	5
1.3 Estructura del proyecto	7
2 Especificaciones del sistema de caracterización	8
2.1 Requisitos	8
2.1.1 Requisitos <i>Hardware</i>	8
2.1.2 Estructura de los dispositivos RRAM	8
2.1.3 Instrumentación electrónica disponible	9
2.1.4 Instrumentación para el posicionamiento	9
2.1.5 Control remoto de los equipos electrónicos	10
2.1.6 Herramienta <i>software</i>	10
2.2 Planificación previa del proyecto	11
3 Análisis del sistema	12
3.1 Dispositivos RRAM	12
3.1.1 Dimensiones de las estructuras MIS/MIM	12
3.2 Análisis del <i>Hardware</i> disponible	12
3.2.1 Analizador de parámetros HP 4145B	13
3.2.2 Gaussímetro GM08	13
3.2.2.1 Sondas Hall	14
3.2.3 Fuente de Tensión/Corriente DC KEPCO BOP 50-8	15
3.2.4 Multímetro digital HP 3478A	15
3.2.5 Microscopio SZM-2	16
3.3 Representación global del sistema de caracterización	18
4 Desarrollo e implementación del sistema	19
4.1 Implementación <i>Hardware</i>	19
4.1.1 Mesa de puntas auxiliar fija	19
4.1.2 Disposición estructural y localización del sistema	20
5 Caracterización y resultados	21
5.1 Consideraciones previas a las medidas	21
5.1.1 Posicionamiento de las puntas	23

5.1.1.1	Posicionamiento de las puntas con la mesa auxiliar	23
5.1.2	Proceso de <i>forming</i>	24
5.1.3	Proceso de <i>reset</i>	25
5.1.4	Proceso de <i>set</i>	26
5.1.5	Proceso de estabilizado del filamento	29
5.2	Medidas de estructuras metal-aislante-semiconductor (MIS)	30
5.3	Medidas de estructuras metal-aislante-metal (MIM)	33
6	Conclusiones	37
	Referencias	39
	Publicaciones y aportaciones a congresos relacionados con este trabajo	43

Prólogo

Hoy en día, uno de los nichos de mercado más significativos en la industria de la microelectrónica es el de las memorias no volátiles. Las nuevas necesidades de las personas en cuanto a métodos de almacenamiento de información, especialmente con el auge de los dispositivos móviles, han hecho que estas memorias se sitúen en la cabeza del mercado.

En los últimos años, las ventas de las memorias no volátiles han estado encabezadas por las memorias de tipo *flash*, tanto NAND como NOR. A pesar de ello, recientemente se ha avisado que el escalado de estos dispositivos pronto alcanzará unos límites. Entre ellos, efectos que dificultan o que no hacen posible su correcto funcionamiento (ruido de tipo telegráfico RTN (*Random Telegraph Noise*), corriente SILC (*Stress Induced Leakage Current*), desplazamiento de la tensión umbral y atrapamiento de carga, etc.) [1].

Debido a esto han surgido algunas alternativas con vistas a su sustitución. Un equipo que pertenece al comité que se encarga del ITRS (*Internacional Technology Roadmap for Semiconductor*) estudió diferentes tipos de memorias emergentes y sus características para tratar de averiguar cuáles serían las más adecuadas para sustituir a las memorias *flash* actuales, debiendo ser posible su fabricación en masa para la venta al público. Las tecnologías más representativas fueron dos: memorias de tipo magnetorresistivo con transferencia de spin mediante unión túnel magnética (STT-MRAM) y memorias de tipo resistivo, RRAMs [2].

Para tratar de evaluar la repercusión que han generado las de tipo resistivo basta con dar cuenta del número de publicaciones surgidas en años pasados. De esta manera, buscando la palabra "RRAM" en la web de Google Académico resultan los siguientes resultados por año de publicación: 1460 (2015), 1720 (2016), 1980 (2017) y 1920 (2018).

El funcionamiento de las memorias RRAM está basado en el cambio entre estados con resistencias distintas. Según el mecanismo de tipo físico o químico que permite la transición entre los estados de alta y baja conductividad se distinguen varios tipos de memorias RRAM. No obstante, este tipo de dispositivos cuentan con una fabricación muy sencilla, ya que se basan en dos contactos metálicos con un óxido dieléctrico entre ellos. Al contar con dos niveles de tensión distintos se pueden realizar las transiciones entre los estados de alta (*High Resistance State*) a baja resistividad (*set*) y el de baja (*Low Resistance State*) a alta resistividad (*reset*). Esto hace que nos encontremos ante un panorama realmente interesante para encarar satisfactoriamente los requisitos de escalado que tendrán que dar cuenta, teniendo en cuenta la situación de la industria electrónica actual. Como contraposición, los principios físicos y químicos que toman parte en las transiciones entre estados no acaban de ser completamente comprendidos. Adicionalmente, al tratarse de un dispositivo novedoso, los modelos compactos para la simulación circuital son pocos.

1 Introducción

1.1 Contexto

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) se presenta como finalización del Máster en Física.

El TFM propuesto se ha centrado en las siguientes líneas principales:

- Desarrollo y pruebas de distintos escenarios para la toma de medidas con campo magnético uniforme.
- Procesado de medidas mediante técnicas matemáticas avanzadas que permitan extraer parámetros característicos de la tecnología a estudiar.
- Análisis de los resultados para la búsqueda de tendencias comunes.

En proyectos anteriores se asentaron las bases sobre las que se ha partido, creando un sistema capaz de caracterizar el comportamiento de materiales magnetorresistivos. En este caso, el objetivo será en primera instancia la toma de medidas con diferentes valores de campo magnético aplicado directamente sobre ambas estructuras RRAM (*Resistive Random-Access Memory*). Posteriormente, las medidas obtenidas serán procesadas y analizadas según los parámetros propios de este tipo de memorias resistivas para comprobar los resultados obtenidos.

Para ello, nos ubicaremos en el laboratorio L4 situado en el Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

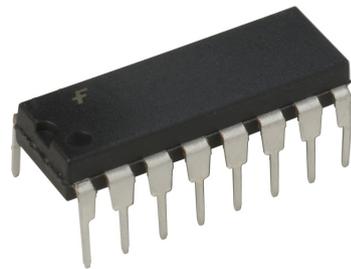
En este espacio contaremos con el conjunto de equipos electrónicos necesarios para llevar a cabo todos los procedimientos necesarios, intentando imitar de alguna manera a los laboratorios de caracterización situados en salas blancas específicamente para la fabricación y testeo de muestras sobre silicio, sirviendo como ejemplo la Figura 1.



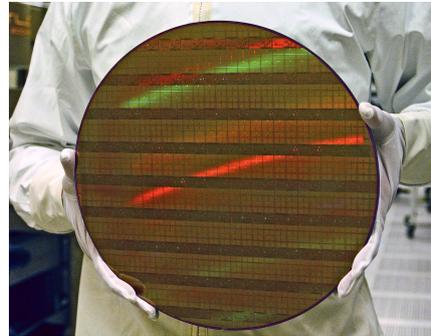
Figura 1: Ejemplo de sala blanca con sistema de caracterización de microcircuitos [3].

El amplio abanico de equipos electrónicos utilizados para la caracterización nos lleva a ejecutar todo el sistema mediante un *software* específico desde una estación de trabajo. De esta manera se inicializará y configurará todo el proceso cómodamente en el momento de realizar una medida.

Adicionalmente, debido a que la estructura de los dispositivos RRAM está sin encapsular, será necesario llevar a cabo el posicionamiento y conexionado de éste con los equipos de medida, aparte de la obligada excitación magnética. En la Figura 2 se puede ver la diferencia entre un dispositivo encapsulado y una oblea de silicio.



(a) Ejemplo de dispositivo encapsulado.



(b) Ejemplo de dispositivo sin encapsular: oblea de silicio.

Figura 2: Diferencia entre dispositivo encapsulado y sin encapsular [4].

1.1.1 Memorias no volátiles

Las memorias Flash de tipo NAND que se comercializan hoy en día han permitido que la información se transmita como nunca antes se había hecho. Además, el precio se ha ido decrementando paulativamente así como el tamaño de celda, el cual se ha reducido en un factor dos por año [5]. Sin embargo, debido a los numerosos problemas que están surgiendo en su escalado por debajo de los 9 nm su fin se va aproximando cada vez más.

Algunas de estas limitaciones son [6]:

- Cargas atrapadas después del ciclo.
- Efectos por tener pocos electrones.
- Pérdidas y/o fluctuaciones de carga.
- La tensión inducida por la corriente de fuga por efecto túnel a través del óxido (SILC, *Stress Induced Leakage Current*).
- Cargas atrapadas de forma aleatoria en el óxido debido a la inexactitud en la colocación de los niveles.
- Limitaciones geométricas en la miniaturización.
- Señales aleatorias telegráficas (RTN).
- Carga perdida por transiciones túnel a través del dieléctrico.

Para tratar de optimizar las prestaciones de las memorias Flash se han introducido celdas multinivel (*multi-level cell MLC*), de manera que las capas queden apiladas. Con

esto se ha logrado aumentar su capacidad en un factor dos, pudiendo llegar hasta un factor ocho. No obstante, el empleo de la *multi-level cell MLC* ha tenido como hechos no deseados la degeneración de la resistencia y del tiempo de retención, por lo que las limitaciones van a seguir existiendo.

Debido a las limitaciones expuestas, la industria de los semiconductores contempla tres posibles líneas de avance e investigación. Una de estas vías es el desarrollo de nuevos materiales que sirvan para seguir aprovechando la tecnología CMOS que se usa hoy en día por encima del escalado ("*More Moore strategy*"), acrecentando las tensiones de funcionamiento, las velocidades, etc. La segunda línea consiste en el empleo de la tecnología CMOS junto a arquitecturas novedosas que hagan que el procesado de la información vaya mas allá de lo que se consigue sólo con la tecnología CMOS. La tercera línea, motivo de este trabajo, consiste en perfeccionar dispositivos nuevos con principios de funcionamiento distintos ("*More than Moore strategy*") y que reemplacen a los que se tienen actualmente permitiendo un remedio con vistas al futuro sin que hayan grandes cambios en los procesos de fabricación más comunes.

Recientemente se dan varias líneas de investigación con vistas a la sustitución de la actual tecnología de memorias, Figura 3. En este trabajo, nos quedaremos con la tecnología *Resistive Random Access Memory* (RRAM).

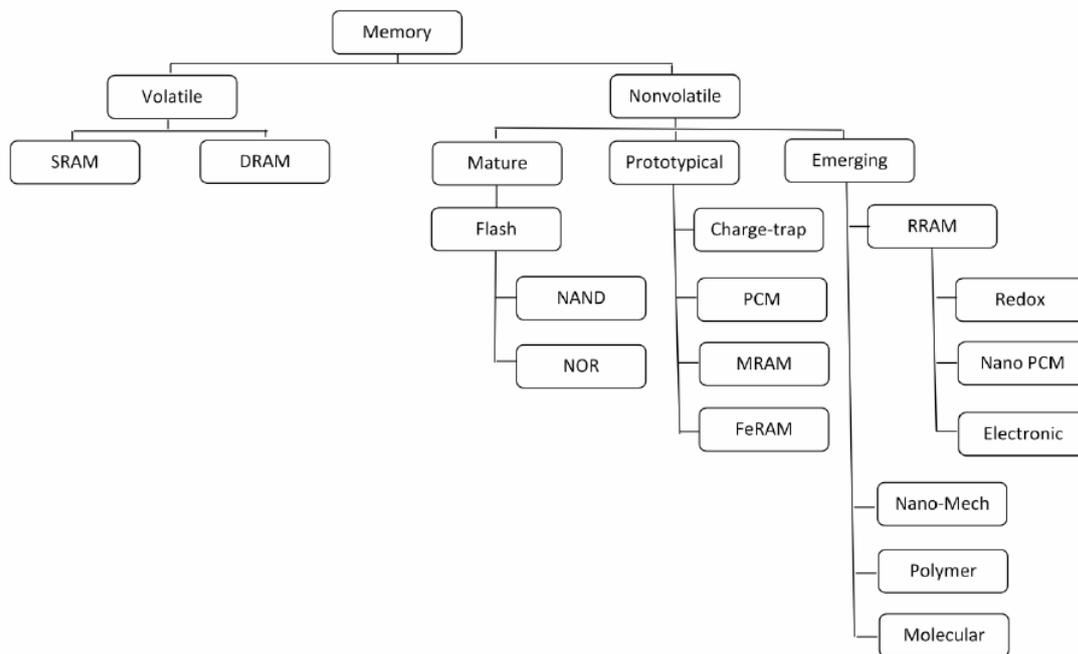


Figura 3: Mapa de los diferentes tipos de memorias y dispositivos emergentes que se contemplan actualmente [2].

1.1.1.1 Memorias RRAM

Las memorias de tipo RRAM (*Resistive Random Access Memory*), -denominadas también ReRAM-, son una de las líneas de investigación más prometedoras en el desarrollo de memorias no volátiles.

Las celdas de esta tecnología pueden estar formadas por dos tipos de estructuras: una estructura MIM (*Metal-Insulator-Metal*) o una estructura MIS (*Metal-Insulator-Semiconductor*) donde el aislante es un material que tiene la propiedad de cambiar su resistencia (*Resistive Switching, RS*) desde el estado de alta resistencia (HRS) a un estado de baja resistencia (LRS), Figura 4. Los aislantes más empleados son algunos tipos de óxidos (como óxidos metálicos), semiconductores, calcogenuros, y materiales orgánicos los cuales pueden cambiar su resistencia por medio de distintos mecanismos físicos. Dependiendo del tipo de materiales que se empleen en estas estructuras podemos diferenciar tres tipos de procedimientos diferentes:

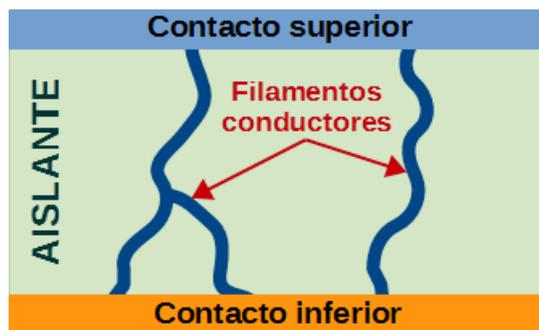


Figura 4: Esquema general de la estructura de una celda RRAM. Los filamentos conductores que se crean en el interior del aislante lo atraviesan completamente cerrando el circuito entre los dos contactos metálicos creando así el estado de baja resistencia [5].

- Unipolar: la transición del estado HRS al LRS o viceversa debe a la aplicación de una tensión externa de la misma polaridad.
- Bipolar: para cambiar de estado en un sentido u otro es necesario que la polaridad de la tensión externa quede invertida.
- Mixta: en este caso coexisten los dos comportamientos, unipolar y bipolar. Dependiendo del rango de tensiones que se le apliquen y de las condiciones iniciales del dispositivo se mostrará uno u otro comportamiento.

En la Figura 5 se observan las curvas I-V de set/reset características de estos dispositivos ya presenten un comportamiento unipolar, Figura 5a o bipolar, Figura 5b.

Debido a la sencillez de la estructura de las RRAMs y la compatibilidad de muchos de los materiales empleados en su fabricación con la tecnología CMOS, punto fundamental, hace que se permita una escalabilidad considerable sin que se modifiquen demasiado los procesos de fabricación más comunes, Figura 6.

Además de la sencillez de su estructura, permitiendo un escalado menor a los 5 nm, hay que añadir su baja tensión de operación (~ 3 V), su bajo coste, su baja potencia de disipación (~ 64 pJ/celda), la compatibilidad de integración en estructuras 3D tipo *crossbar*, su alta velocidad de operación (~ 100 ns) y su elevada compatibilidad con las tecnologías actuales de fabricación [7].

Otra de las características fundamentales que presentan este tipo de estructuras es la posibilidad de crear estructuras 3D como ya se ha descrito con anterioridad. Así, la

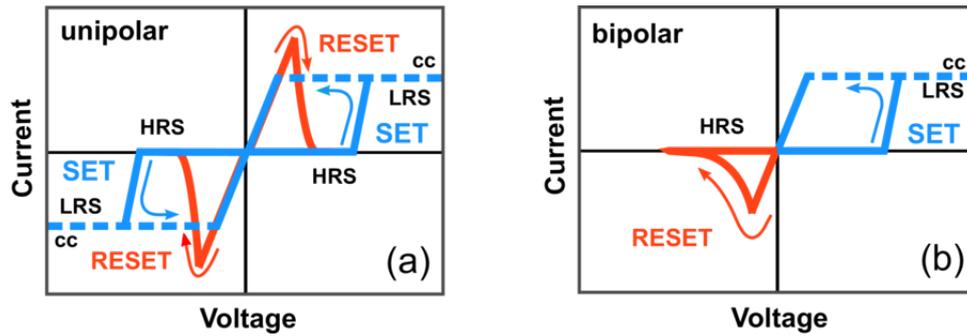


Figura 5: Diagrama de la curva I-V característica de dos procesos de conmutación resistiva (RS): (a) RS unipolar (tensiones positivas y negativas), (b) RS bipolar [8].

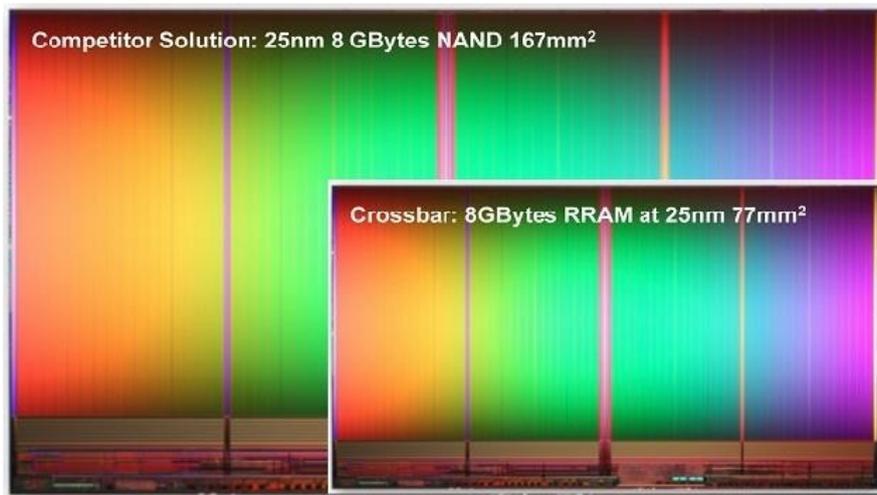


Figura 6: Comparativa de los tamaños de dos memorias de 8GB empleando tecnología *flash* de celdas NAND y memorias de tipo resistivo (RRAM) [9].

fabricación de memorias de alta densidad a un coste bajo será admisible ya que se incrementará el área efectiva de cada celda del orden de $4F^2/n$ (siendo n el número de capas o niveles con RRAMs) [10] [11].

En la tabla 1 se muestra una comparación entre las características de la tecnología RRAM y las de la NAND Flash, observándose una clara ventaja para las primeras.

Además de tener aplicaciones como memoria no volátil, las memorias RRAM han demostrado tener grandes prestaciones para ser usadas en circuitos neuromórficos que simulen neuronas e implementación de funciones físicas no clonables [12] [13].

1.2 Objetivos

El trabajo principal por el que se realiza este proyecto está encaminado a entender cómo se comportan los dispositivos RRAM cuando se les somete a la acción de un campo magnético uniforme y estable.

Su desarrollo parte de trabajos anteriores [14], donde se busca implementar todos los

Características	NAND Flash	RRAM*
Tamaño efectivo de celda	$5.44F^2$	$4.25F^2$
Escalabilidad	Hasta ~ 25 nm	<5 nm
Velocidad de escritura	7 MB/s	140 MB/s
Lectura asíncrona	0.04 MB/s	17 MB/s
Energía de escritura/celda	1360 pJ/celda	64 pJ/celda
Resistencia	$3 \cdot 10^3$ ciclos	10^6 ciclos
Retención	1 – 3 años	20 años

Tabla 1: Comparativa de las principales características de las memorias NAND Flash y las RRAM. *Los datos de las memorias RRAM se refieren a las fabricadas por la empresa Crossbar [7].

procedimientos experimentales del análisis de dispositivos magnetorresistivos y el tratamiento de sus resultados. La combinación de todos estos aspectos permitirá desarrollar un sistema de caracterización automatizado para el estudio de estos materiales de forma más profunda y completa.

El uso de campo magnético presenta una ventaja desde el punto de vista de la caracterización puesto que añade una nueva variable de control. Este trabajo se ha centrado en estudiar los niveles de conducción así como las tensiones y corrientes de set/reset para diferentes valores de campo magnético en los estados HRS y LRS. Algunos estudios dedicados a estudiar los efectos del campo magnético lo han hecho con niveles elevados [15]. Sin embargo, en este caso se han tomado niveles mucho más bajos, tratando así de representar una situación más común. De esta manera, la disposición es más cercana a casos reales de dispositivos multifuncionales cuya operación puede ser modulada por distintas variables físicas (campo eléctrico, campo magnético o intensidad luminosa [16]), como es el caso de algunos sensores.

En consecuencia, se realizan desarrollos hardware y software para el diseño real del sistema. Los desarrollos software irán encaminados a mejorar y adaptar versiones previas del sistema de caracterización para nuestras necesidades. Por otro lado, el desarrollo hardware se orienta a la generación de dicho campo magnético para llevar a cabo las pruebas necesarias, de esta manera se excitará a estos dispositivos para obtener unos resultados y así poder interpretarlos.



Figura 7: Presentación de los objetivos [17].

1.3 Estructura del proyecto

El proyecto se divide en 6 capítulos que describen cada una de las partes del proceso llevado a cabo. Estos capítulos pretenden describir de un modo lógico y cronológico el trabajo llevado a cabo durante la duración del proyecto.

- **Capítulo 1: Introducción:** Aquí se realizará una pequeña introducción al proyecto, así como una pequeña descripción del proceso que se va a realizar.
- **Capítulo 2: Especificaciones del sistema de caracterización:** En este capítulo se detallan todos los requisitos y especificaciones *software* y *hardware* del sistema. Además, se plantea la metodología de trabajo y se enumeran las fases del proyecto.
- **Capítulo 3: Análisis del sistema:** Analizamos las necesidades del sistema y cómo podemos cubrirlas mediante los equipos electrónicos disponibles en el laboratorio. Estudiamos en detalle el funcionamiento y composición de las memorias RRAM. Destacamos las funcionalidades de cada instrumento y decidimos cual será su función específica dentro del sistema. Determinaremos también el tipo de conectividad utilizada para la comunicación remota entre la estación de trabajo y la parte de *hardware*.
- **Capítulo 4: Desarrollo e implementación del sistema:** En este capítulo nos centraremos en los procesos *hardware* y estructurales diseñados en el capítulo anterior. Se explicará también la estructura de las librerías de control empleadas en cada instrumento así como las funcionalidades de la herramienta *software* final. Se dará por tanto cohesión a todas las partes implicadas en el sistema de caracterización.
- **Capítulo 5: Caracterización y resultados:** Validación del sistema al completo mediante la caracterización de los diferentes dispositivos empleados y análisis de los resultados obtenidos en las diferentes mediciones.
- **Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras:** Breve conclusión que se extrae después del trabajo y mención a las líneas futuras asociadas al proyecto.

2 Especificaciones del sistema de caracterización

En este capítulo serán detallados los requisitos y especificaciones del sistema de caracterización, tanto a nivel *hardware* como *software*. Se considerarán también los requerimientos impuestos por la estructura del propio dispositivo RRAM a caracterizar.

En las siguientes secciones se analizarán los requerimientos y especificaciones derivados de cada bloque.

2.1 Requisitos

2.1.1 Requisitos *Hardware*

La inducción del campo magnético sobre los dispositivos RRAM puede realizarse de dos maneras:

- Bobina de núcleo toroidal
- Bobinas de Helmholtz

La bobina de núcleo toroidal consiste en un hilo conductor de cobre arrollado por el que circula una corriente a través de espiras envueltas sobre un soporte toroidal.

Las bobinas de Helmholtz son necesarias para crear un campo magnético homogéneo sobre el dispositivo de manera controlada. Estas bobinas serán un requisito *hardware* específico para la creación de campo magnético. Además, dicho campo deberá calibrarse de forma que pueda ser controlado por medio de la corriente de alimentación suministrada a las bobinas.

En la Figura 8 podemos ver ambos tipos de bobinas.

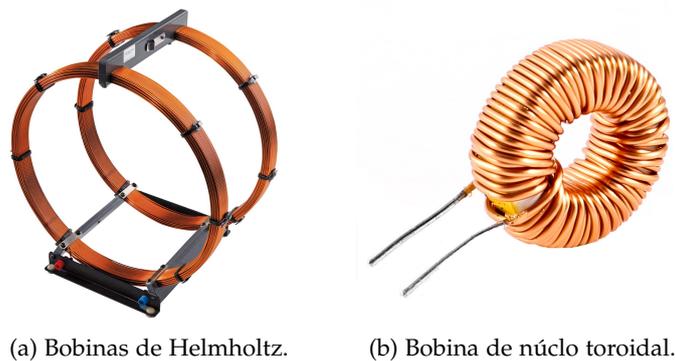
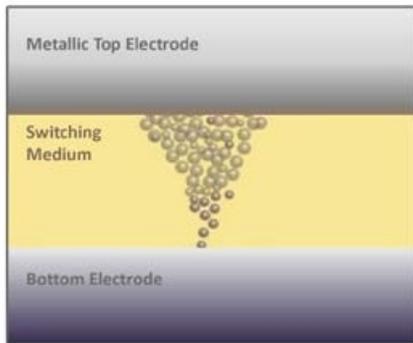


Figura 8: Posibles métodos de inducción magnética [18].

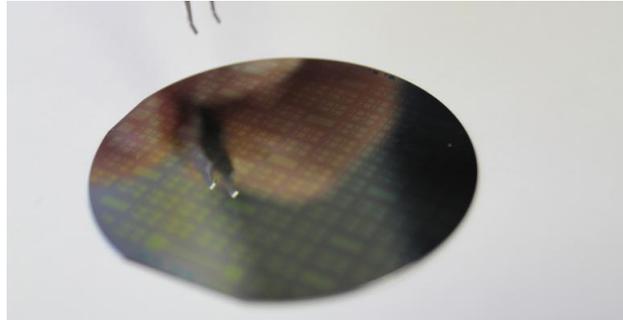
2.1.2 Estructura de los dispositivos RRAM

Debido a que la estructura de los dispositivos que analizaremos será sin encapsular, se utilizarán microposicionadores con agujas de wolframio de calibre adecuado para hacer contacto con los *pads* que se quieran medir.

Para ello serán necesarios 2 microposicionadores, uno de ellos para contactar el *pad* deseado a estudiar y otro para hacer contacto sobre el sustrato. En la Figura 9 se puede observar la estructura y el aspecto físico de estos dispositivos.



(a) Estructura interna de los dispositivos RRAM.



(b) Aspecto físico de una oblea con memorias RRAM.

Figura 9: Estructura y aspecto de dispositivos RRAM [19].

2.1.3 Instrumentación electrónica disponible

Para la realización de este proyecto tenemos una limitación en cuanto a los equipos disponibles en el laboratorio L4, el cual cuenta con los siguientes:

- Analizador de parámetros HP 4145B y Fixture test 16058A.
- Fuente de Tensión/Corriente KEPCO BOP 50-8.
- Gaussímetro Hirst Magnetic GM08.
- Multímetro digital HP 3478A.

Por tanto deberemos adaptarnos a las funcionalidades de cada instrumento para ser capaces de crear un sistema de caracterización que cubra y cumpla todos los requisitos del sistema fijados.

2.1.4 Instrumentación para el posicionamiento

Para asistir el posicionamiento de los contactos los cuales van desde los $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ hasta los $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ de los dispositivos, deberemos utilizar una mesa de puntas y un microscopio.

En el laboratorio L4 contamos con los siguientes equipos:

- Mesa de puntas auxiliar y *head probes* o microposicionadores.
- Microscopio OPTIKA SZM-2.

La mesa de puntas auxiliar incorpora unos microposicionadores para colocar cada aguja de wolframio de forma independiente sobre cada *pad*. Serán necesarios 2 microposicionadores como se vió en la sección 2.1.2.

Además, se deberá utilizar el microscopio OPTIKA SZM-2 para poder visualizar las agujas que contacten los *pads* de la muestra para llevar a cabo las mediciones.

2.1.5 Control remoto de los equipos electrónicos

Para que el sistema sea lo más eficiente posible, los equipos electrónicos mencionados en la sección 2.1.3 deberán controlarse de forma remota. Esto conllevará una agilización los procesos de medida, donde el ajuste de cada instrumento se llevará a cabo desde la interfaz gráfica de usuario del software que implementaremos. Con esto nos ahorraremos la programación individualizada de cada instrumento para cada tipo de medida que realicemos.

Debido a la naturaleza de los propios equipos, la comunicación entre la estación de trabajo y estos se realizará mediante conexiones RS-232 y buses GPIB según el instrumento, Figura 10.



Figura 10: Comunicación GPIB y RS-232 [20].

Para ello se deberá de configurar la estación de trabajo mediante los *drivers* correspondientes para la comunicación vía GPIB. Por otra parte, cada instrumento contará con una librería que contenga los comandos de comunicación necesarios para realizar todas sus funcionalidades.

2.1.6 Herramienta *software*

Todo el *software* con el que se va a trabajar será programado en MATLAB R2015a corriendo sobre Windows 10 (x64), aunque en el laboratorio L4 se cuenta con un ordenador con MATLAB R2014a sobre Windows 7 (x32). El sistema de caracterización que cuenta con todas las librerías de comunicación necesarias de tipo GPIB y RS-232 para cada instrumento, así como los algoritmos de medida y procesamiento de datos se programarán en esta plataforma.

La aplicación deberá mantener además total compatibilidad con versiones anteriores, donde ofrece compatibilidad de trabajo con magnetorresistencias. Además, toda la interfaz deberá estar detallada y comentada en inglés para facilitar su empleo internacionalmente.

El código del programa deberá ser también lo suficientemente escalable y abierto para permitir futuras ediciones.

2.2 Planificación previa del proyecto

En esta sección se expondrán las diferentes fases por las que transitará el proyecto describiendo su contenido de manera generalizada, Figura 11.

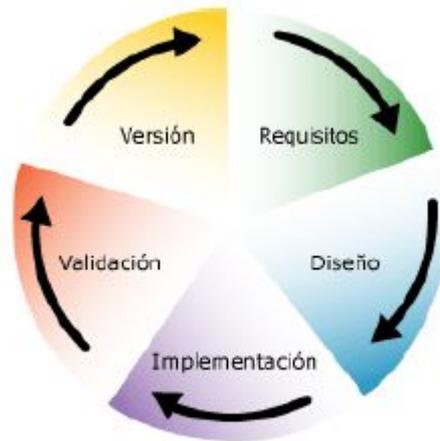


Figura 11: Principales fases de un proyecto.

Las diferentes fases son:

- **FASE I - Especificaciones del sistema:** realizaremos un estudio detallado de los requerimientos del sistema de caracterización. Para ello será necesario obtener documentación sobre las memorias RRAM y su estado del arte actual.

- **FASE II - Análisis y Diseño:** en esta fase se agrupan todos los requerimientos y especificaciones de la fase anterior y se trata de concebir la composición del sistema. Consideraremos todos aquellos elementos hardware, software y estructurales necesarios. Analizaremos las funcionalidades de cada equipo electrónico utilizado, determinando su utilidad dentro del sistema. También analizaremos el protocolo de comunicación GPIB y RS-232.

- **FASE III - Desarrollo e Implementación:** se realiza el conexionado de la instrumentación involucrada. Una vez analizados los diferentes equipos, comenzamos a testarlos individualmente mediante sus librerías de comunicación ya sean GPIB o RS-232 para posteriormente probarlos todos en conjunto. Tras realizar las primeras pruebas de comunicación y validar su correcto funcionamiento, implementaremos el software definitivo en MATLAB. Desarrollaremos las interfaces gráficas de usuario necesarias y procesamiento de datos.

- **FASE IV- Testeo y Validación:** una vez se ha concluido el proceso de desarrollo e implementación, solo queda validar el funcionamiento global del conjunto, resolviendo defectos y anomalías hardware puntuales y también depurando fallos software y aportando algunas mejoras puntuales. Tras esto, obtendremos los datos y resultados finales.

3 Análisis del sistema

En este capítulo se detalla la fase de análisis del proyecto, realizando un estudio detallado sobre el tipo de estructura RRAM que el sistema podrá caracterizar y toda la instrumentación y *hardware* implicado.

3.1 Dispositivos RRAM

Una memoria RAM resistiva (*resistive random-access memory*, RRAM o ReRAM) es un tipo de memoria no volátil (NV) de acceso aleatorio (RAM) que funciona cambiando la resistencia utilizando un material dieléctrico de estado sólido al que también se le refiere como memristencia. Esta tecnología se asemeja a la PCM (memoria de cambio de fase).

La idea básica es que en un dieléctrico, que normalmente es aislante, pueda formarse un filamento conductor después de la aplicación de un determinado voltaje. Una vez que el filamento esté formado, este puede ser reseteado (roto, resultando una gran resistencia entre los electrodos) o creado de nuevo (reformado, resultando en una resistencia menor entre electrodos) por otro voltaje determinado, Figura 12. La física que controla la formación y rotura del filamento tiene naturaleza estocástica, por lo que al pasar de un estado a otro el filamento formado es diferente [21] [22] [23].

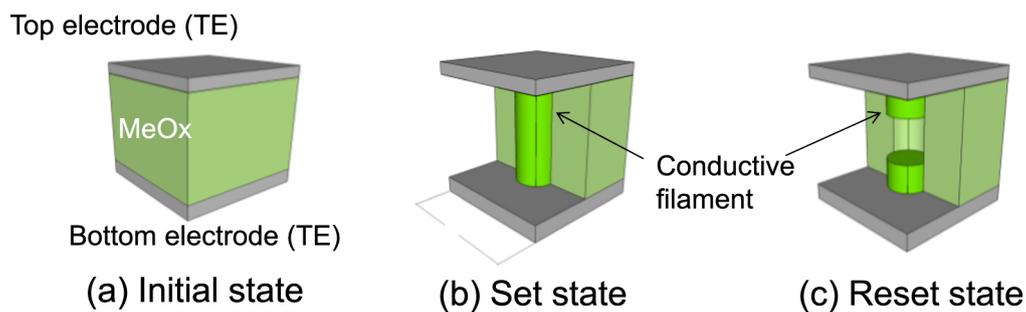


Figura 12: Estructura de un dispositivo RRAM y operación. [24]

3.1.1 Dimensiones de las estructuras MIS/MIM

Las dimensiones de las 7 estructuras capacitivas de geometría cuadrada objetivo de estudio cuyo lado, en μm , se indica en la cifra a la derecha de la estructura, cuenta con unas dimensiones de los pads y la separación entre dos consecutivos de $100 \times 120 \mu\text{m}^2$ y $50 \mu\text{m}$ respectivamente. Las dimensiones de las estructuras MIS y MIM son las que se indican en la Tabla 2.

3.2 Análisis del *Hardware* disponible

Durante esta sección analizaremos los equipos de instrumentación electrónica y posicionamiento mecánico que disponemos en el laboratorio L4 para desarrollar el sistema de caracterización de dispositivos RRAM. Detallaremos las características y funcionalidades de cada equipo, determinando cual será su finalidad dentro del sistema y como nos comunicaremos de forma remota con cada uno de ellos.

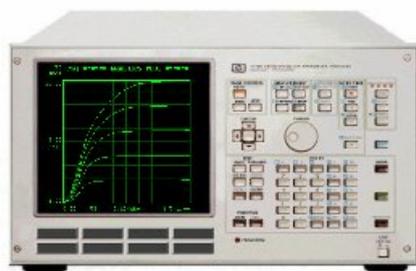
Estructura	Lados (μm)	Área (μm^2)	Perímetro (μm)
D1	120x120	1.44×10^4	480
D2	60x60	3600	240
D3	40x40	1600	160
D4	15x15	225	60
D5	5x5	25	20
D6	2x2	4	8
D7	1x1	1	4

Tabla 2: Dimensiones de los dispositivos MIS/MIM.

3.2.1 Analizador de parámetros HP 4145B

El *Semiconductor Parameter Analyzer* 4145B de HP [25], Figura 13, pertenece a una gama de instrumentación electrónica de altas prestaciones, completamente programable y automatizada, diseñada para medir, analizar y representar gráficamente las características DC de un amplio rango de dispositivos semiconductores como diodos, transistores bipolares y de efecto campo, obleas, componentes pasivos como resistencias, etc.

En nuestro caso es una pieza fundamental de nuestro sistema ya que se empleará para caracterizar los dispositivos RRAM mientras se les aplica un campo magnético.



(a) Vista frontal



(b) Vista trasera

Figura 13: Analizador de parámetros HP 4145B [25].

El analizador de parámetros HP 4145B cuenta con dos fuentes de tensión programables V_s (*Voltage Source*), cuatro unidades programables SMU (*Source Monitor Units*) y dos unidades de monitorización de tensión V_m (*Voltage Monitor*).

Las SMU (*Source Monitor Units*) cuentan con tres modos de funcionamiento: fuente de tensión (V) con monitorizado de corriente, fuente de corriente (I) con monitorizado de tensión y modo común.

3.2.2 Gaussímetro GM08

El gaussímetro GM08 de la compañía Hirst Magnetic [26] será el que emplearemos para medir el capó magnético que generen las bobinas, Figura 14.

El funcionamiento del gaussímetro se basa en un sensor de efecto Hall. Se conoce



Figura 14: Gaussímetro GM08 de *Hirst Magnetic* [26].

como efecto Hall a la aparición de un campo eléctrico por separación de cargas, en el interior de un conductor por el que circula una corriente en presencia de un campo magnético con componente perpendicular al movimiento de las cargas.

Un elemento imprescindible para el funcionamiento de este equipo son las sondas Hall (*hall probes*) que veremos en la sección 3.2.2.1, destinadas a medir el campo magnético en un determinado punto del espacio.

Para tomar las medidas, se elegirá la mayor resolución posible del dispositivo, 0.01 Oersted.

3.2.2.1 Sondas Hall

Dependiendo de la orientación del elemento del que se quiera medir el campo magnético, deberemos colocar la sonda en una determinada posición geométrica respecto a las líneas de campo inducidas. Para una correcta medición se deberá situar la superficie efectiva del sensor Hall de forma perpendicular a las líneas de campo [27].

El gaussímetro GM08 dispone de dos sondas, siendo posible conectar sólo una al mismo tiempo, Figura 15:



(a) Sonda axial.



(b) Sonda transversal.

Figura 15: Sondas disponibles para el gaussímetro GM08 [27].

En nuestro caso usaremos la sonda axial, quedando dispuesta como se observa en la Figura 16.

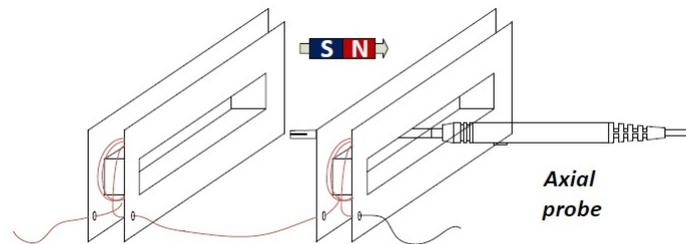


Figura 16: Colocación de la sonda axial sobre las bobinas de Helmholtz.

Ante la introducción de una corriente positiva, el campo magnético que se crea irá circulando desde la bobina izquierda a la derecha generando líneas de campo homogéneas en la dirección marcada por el imán de referencia.

Un corriente negativa generará un campo de sentido contrario siendo captado de igual forma por la sonda en esta misma disposición, solo que se registrará como un campo magnético de signo negativo.

3.2.3 Fuente de Tensión/Corriente DC KEPCO BOP 50-8

El equipo de alimentación encargado de suministrar corriente a las bobinas será la fuente de tensión/corriente DC KEPCO BOP 50-8 [28]. En esta sección detallaremos las especificaciones sobre los límites de operación.

Para nuestro caso, la fuente se utilizará en modo fuente de corriente limitada en tensión. En este modo, el dispositivo ofrece dos rangos de operación, *high* y *low*, en los que se dispone de una precisión en la corriente de consigna de 4 mA y 0.25 mA respectivamente. La corriente que especifiquemos remotamente será la que la que circule por las bobinas induciendo un campo magnético homogéneo en la zona intermedia.

La conexión de la fuente con las bobinas se hará según la Figura 17.

3.2.4 Multímetro digital HP 3478A

El multímetro digital 3478A de Hewlett Packard [29], Figura 18, será empleado como elemento auxiliar al analizador de parámetros HP 4145B en lo que a medidas de tensión se refiere. Para nuestro caso, será utilizado para la medida de la tensión aplicada a las bobinas.

Puede ser controlado remotamente por medio de conexión GPIB como vamos buscando, ofreciendo de 3 a 5 dígitos de precisión en medidas de resistencia, corriente y tensión tanto en continua como en alterna.

Además dispone de una opción de calibrado configurada manualmente mediante las teclas del panel frontal o de forma automática mediante una instrucción por bus GPIB. De la misma manera, cada vez que se enciende, se realiza un test automático de

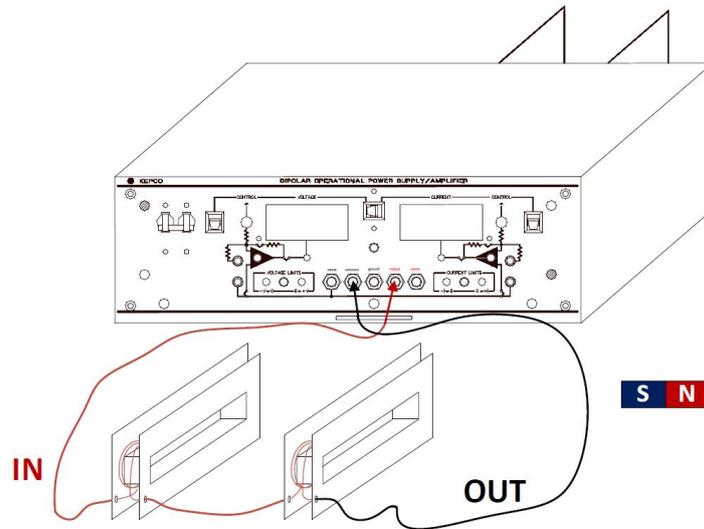


Figura 17: Conexión de la fuente de tensión/corriente Kepco y las bobinas de Helmholtz.

verificación que comprueba la mayor parte de la circuitería interna y certifica su correcto o incorrecto funcionamiento.

3.2.5 Microscopio SZM-2

Otro elemento que emplearemos será el Microscopio trinocular SZM-2 de OPTIKA [30], Figura 19, el cual usaremos para asistir visualmente al proceso de posicionamiento de las puntas sobre los dispositivos RRAM cuando se encuentren sobre la mesa puntas auxiliar.

El modelo SZM-2 dispone de un módulo de iluminación LED adicional con control de intensidad lumínica. La base del microscopio tiene unas dimensiones de 23 cm × 23 cm × 6 cm, con un peso total de 15 kg. En cuanto a la cabeza, esta es de tipo trinocular con capacidad giratoria de 360° y 45° de inclinación.

Además hemos acoplado al microscopio una cámara digital modelo MVV 300 conectada al PC del laboratorio mediante USB, todo ello con objeto de poder documentar el escenario de posicionamiento de las puntas sobre los diferentes *pads*. Desde la estación de trabajo ejecutaremos el software de procesamiento de imagen y vídeo *Future WinJoe*, el cual ofrece un conjunto de herramientas de captura secuencial, procesado, medida y análisis de las imágenes tomadas.



(a) Panel delantero.



(b) Panel trasero.

Figura 18: Detalle del multímetro digital HP 3478A [29].



Figura 19: Microscopio SMZ-2 de OPTIKA [30].

3.3 Representación global del sistema de caracterización

Para finalizar este capítulo se ofrece un esquema global del conjunto *hardware* que hemos obtenido en el laboratorio L4 para este sistema de caracterización, Figura 20.

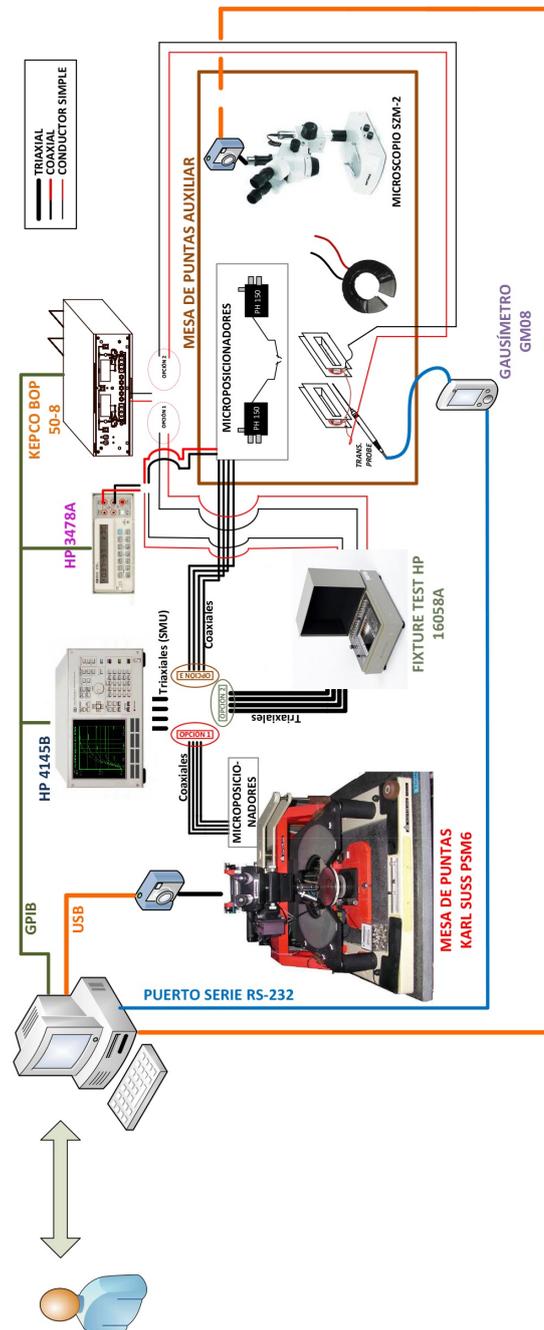


Figura 20: Esquema del conjunto *hardware* del sistema de caracterización.

4 Desarrollo e implementación del sistema

En este capítulo se detallará la solución tomada en el capítulo 3.

4.1 Implementación *Hardware*

En esta sección se van a describir los escenarios de trabajo dispuestos en los que se van a desarrollar todas las mediciones.

4.1.1 Mesa de puntas auxiliar fija

El diseño de la mesa de puntas auxiliar fija del que nos valdremos consiste en la disposición de tres bateas de paneles de metacrilato a los lados de las bobinas atornilladas mediante varillas roscadas sujetas por palometas, Figura 21.

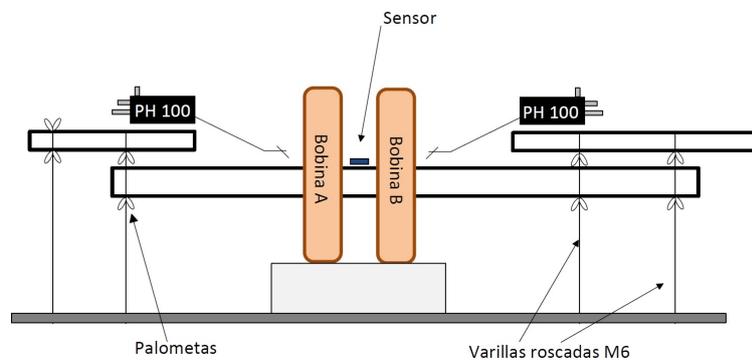


Figura 21: Diseño de la mesa de puntas auxiliar.

La disposición final con los microposicionadores montados lista para iniciar las mediciones se muestra en la Figura 22.



Figura 22: Disposición de la mesa de puntas auxiliar lista para las mediciones.

4.1.2 Disposición estructural y localización del sistema

La disposición estructural final de nuestro conjunto de equipos *hardware* se muestra en la Figura 23.

Además se incluye una imagen panorámica del laboratorio L4 para ofrecer más detalles del entorno de trabajo en la Figura 24.

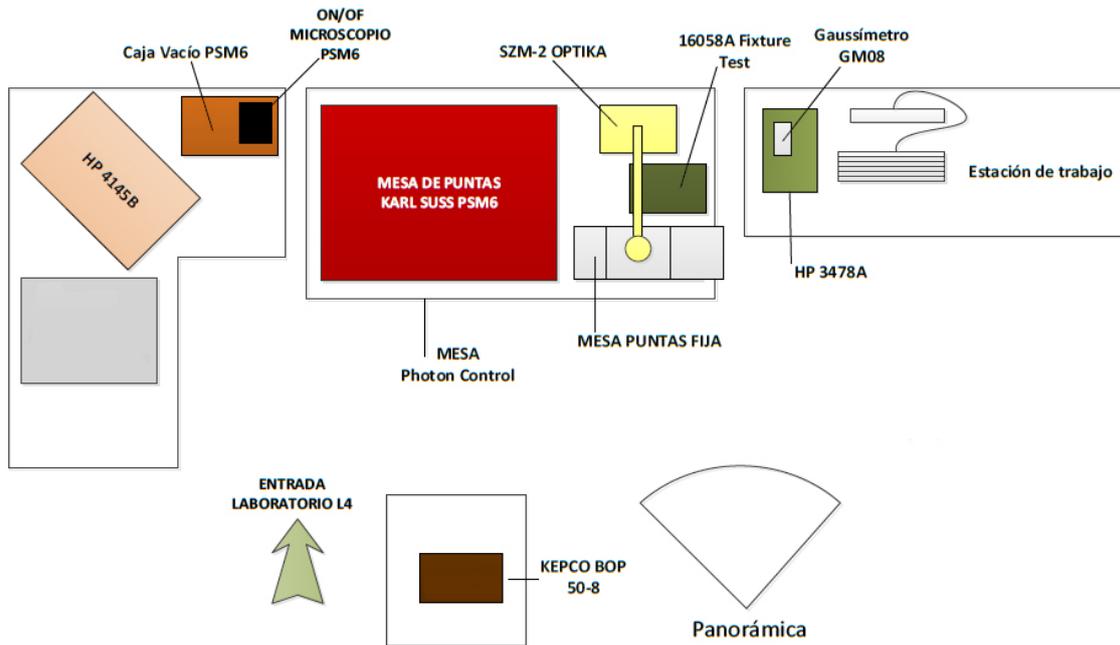


Figura 23: Esquema general de la disposición *hardware* en el laboratorio L4.



Figura 24: Panorámica del sistema de caracterización del laboratorio L4.

5 Caracterización y resultados

Una vez constituido correctamente el sistema de caracterización de dispositivos RRAM llegamos a la fase de caracterización del sistema en su conjunto.

Tras haber validado de forma individual el correcto funcionamiento de cada uno de los instrumentos controlados de forma remota que componen el sistema global así como del *software* que los rige, nos centraremos en la realización de todas las medidas necesarias para analizarlas posteriormente.

Dicha validación tiene como objetivo la verificación de los instrumentos de caracterización por si mismos para asegurar el correcto funcionamiento de todo el sistema.

5.1 Consideraciones previas a las medidas

Antes de comenzar con las mediciones en sí, se describirán secuencialmente los procesos que se siguen para la realización de estas. A la hora de realizarlas, seguiremos siempre un procedimiento estándar para asegurarnos la máxima reproducibilidad del experimento. En la Figura 25 se muestra el diagrama de flujo correspondiente.

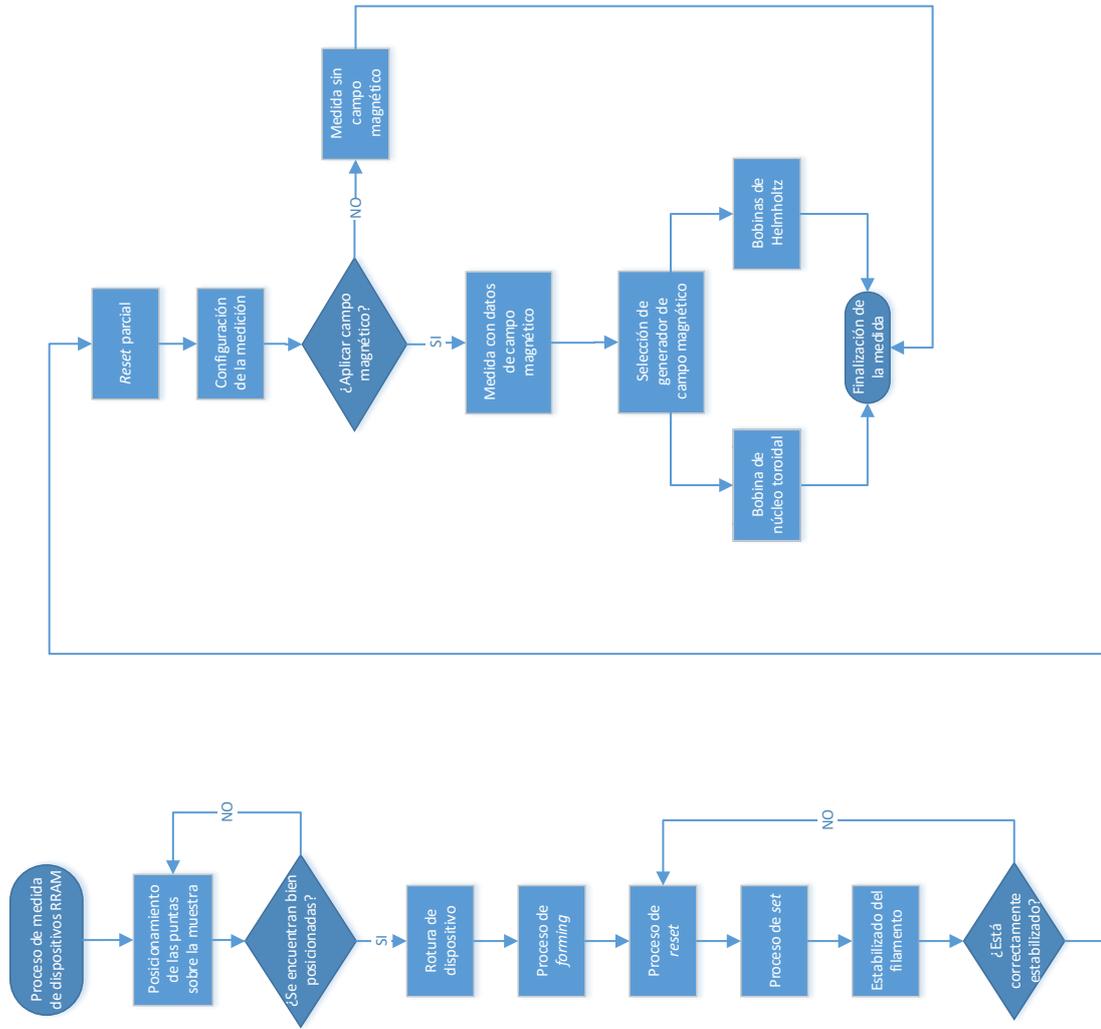


Figura 25: Diagrama de flujo del procedimiento de medida de dispositivos RRAM.

5.1.1 Posicionamiento de las puntas

Para contactar el dispositivo RRAM a medir será necesario posicionar las puntas de los microposicionadores PH 100 sobre la muestra. Este proceso resultará lento y poco preciso al principio debido a la inexperiencia con las mesas de puntas, pero con la práctica resultará mucho más eficiente.

5.1.1.1 Posicionamiento de las puntas con la mesa auxiliar

La mesa de puntas auxiliar no cuenta con un sistema de vacío sobre la muestra que pueda impedir su movimiento, por lo que deberemos por tanto adaptarnos a este escenario y sacarle el máximo provecho posible.

En la Figura 26 se detalla la configuración del microscopio con la cámara digital USB acoplada.

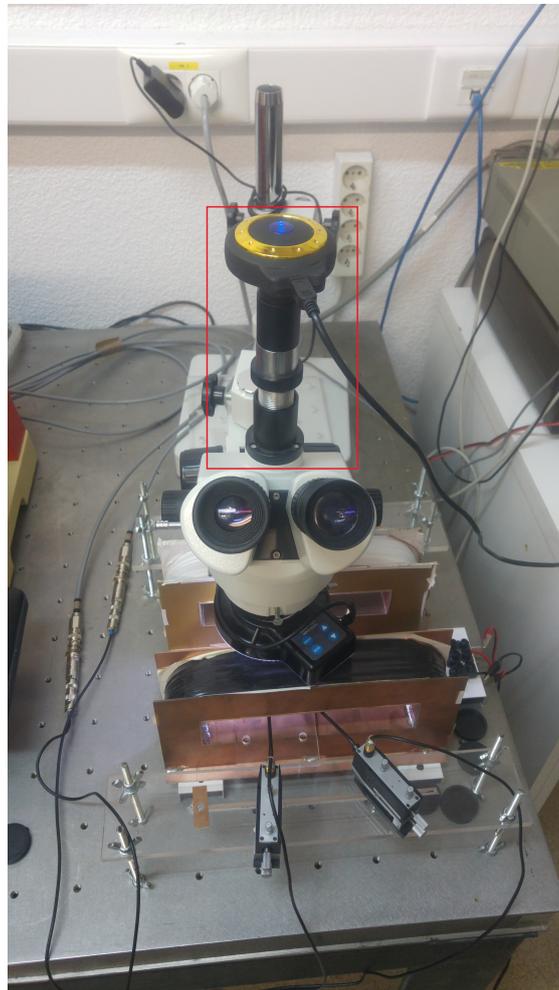
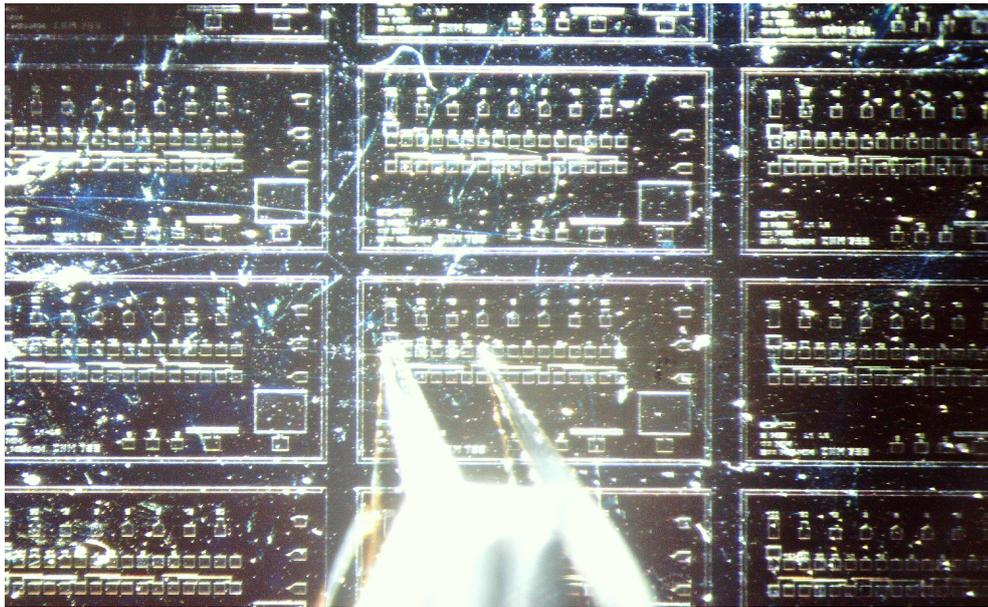


Figura 26: Microscopio SZM-2 con la cámara digital incorporada.

Para finalizar este apartado se incluye un vídeo captado con la cámara digital sobre el microscopio SZM-2 en el proceso de posicionamiento de las puntas sobre los dispositivos, Vídeo 5.1.



Video 5.1: Vídeo de posicionamiento de las puntas sobre los dispositivos.

5.1.2 Proceso de *forming*

El proceso de *forming* sólo se realizará una vez por dispositivo (siendo virgen este) con el objetivo de crear un primer camino óhmico entre el *top* y el *bottom electrode*. En la Figura 27 se muestra un esquema de cómo queda un filamento entre el *top* y el *bottom electrode* de un dispositivo RRAM [31][32][33][34][35].

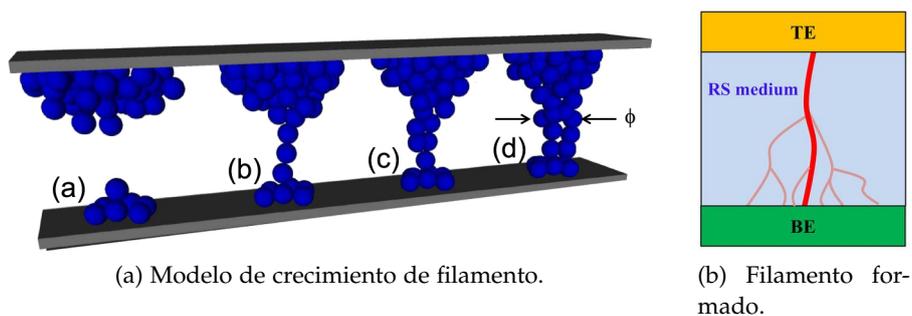


Figura 27: Esquemas de la formación de un filamento entre el *top* y el *bottom electrode* de un dispositivo RRAM. [31]

Esto se realizará desde la ventana *RRAM Measure* de la herramienta de caracterización. Para ello seleccionaremos la pestaña *Forming* apareciendo el panel correspondiente como se muestra en la Figura 28.

El voltaje mínimo lo dejaremos en 0V, mientras el que el máximo quedará establecido en -15V para dispositivos MIS, ya que el *forming* suele producirse en torno a -10V. Para

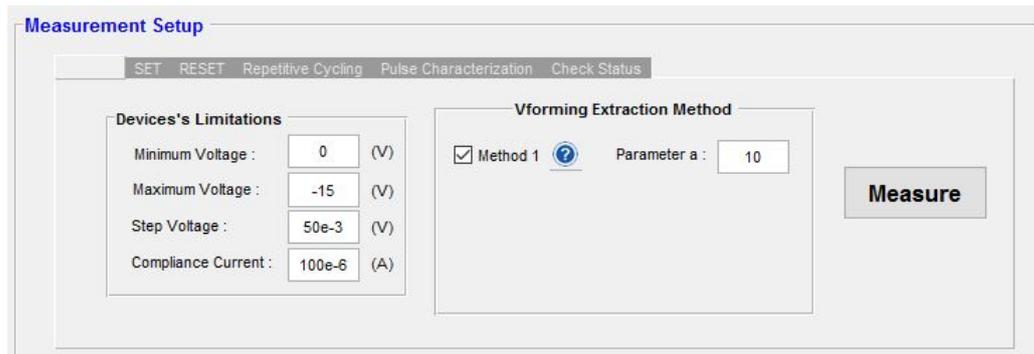


Figura 28: Panel de configuración para medida de tipo *Forming*.

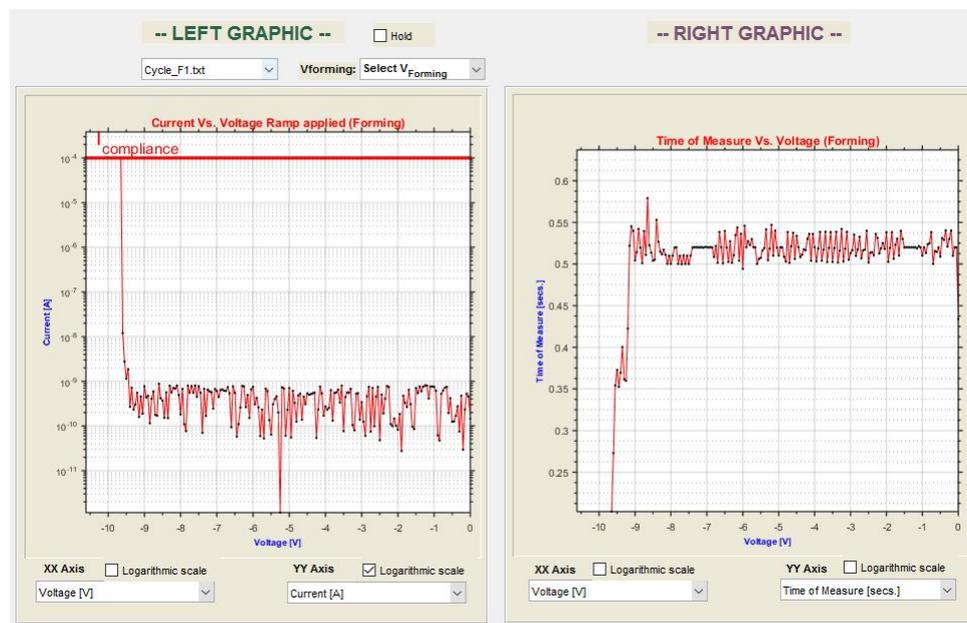


Figura 29: Gráfica del resultado de un proceso tipo *Forming* para estructuras tipo MIS.

el caso de estructuras MIM el máximo serán 5V.

En cuanto al *step* voltaje y la corriente de *compliance* estos quedarán con un valor de 50 mV y 100 μ A respectivamente.

Una vez que esté todo debidamente configurado presionaremos el botón *Measure*. El resultado que obtendremos será similar al de la Figura 29.

A escala microscópica la formación del filamento se muestra en la Figura 30.

5.1.3 Proceso de *reset*

El proceso de *reset* consistirá básicamente en romper el filamento creado en el proceso de *forming* o en el de *set* en ciclos posteriores [32] [34] [35]. Para ello, de igual manera que en la sección anterior, accederemos al panel de *reset* mediante la ventana *RRAM Measure*, Figura 31.

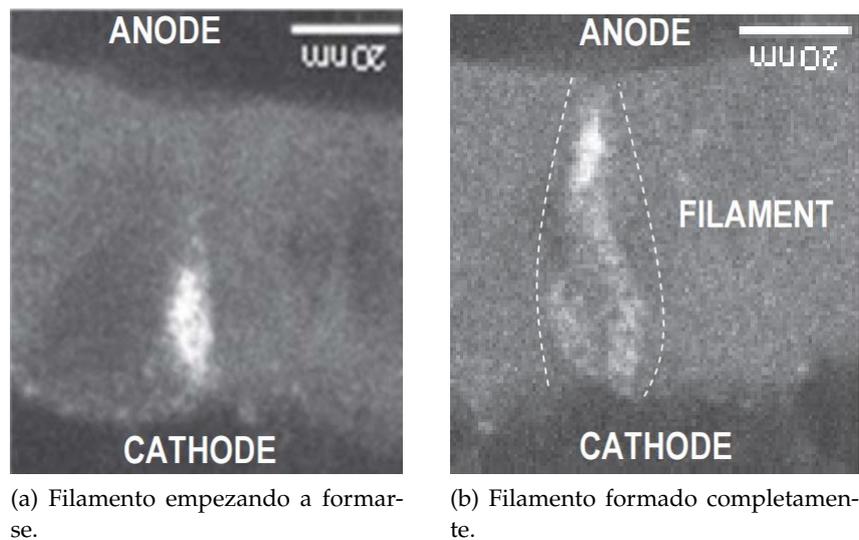


Figura 30: Formación de un filamento a escala microscópica. [36]

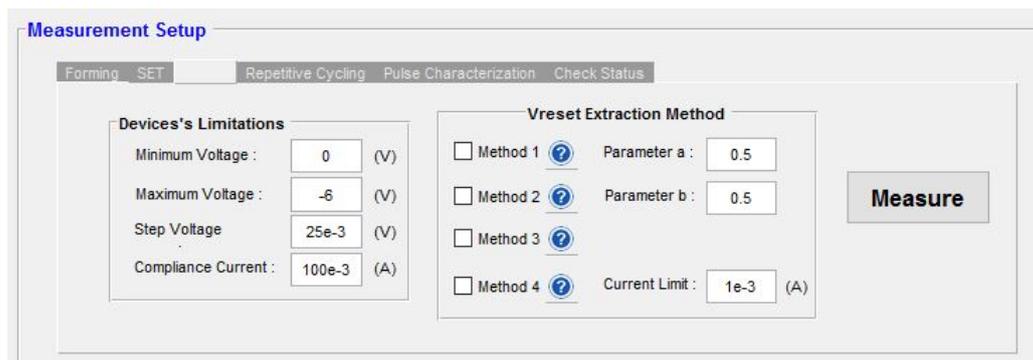


Figura 31: Panel de configuración para medida de tipo *Reset*.

El voltaje inicial será de 0 V mientras que el máximo lo estableceremos en torno a -6 V para dispositivos MIS, esto no supone un problema ya que la medida se detendrá automáticamente en caso de que el *reset* se haya producido a menor tensión. En el caso de estructuras MIM el máximo será de -1.2V, completándose un ciclo de reset cuando la medida vuelva a terminar en 0V.

El voltaje *step* y la corriente de *compliance* quedarán con un valor de 25 mV y 100 mA respectivamente.

Tras presionar el botón *Measure* y esperar a que finalice la medida, se mostrará una gráfica similar a la de la Figura 32.

5.1.4 Proceso de *set*

El proceso de *set* se llevará a cabo para crear un nuevo filamento cuando previamente se haya realizado un ciclo de *reset* [32]. Para ello, accederemos al panel de *set* mediante la

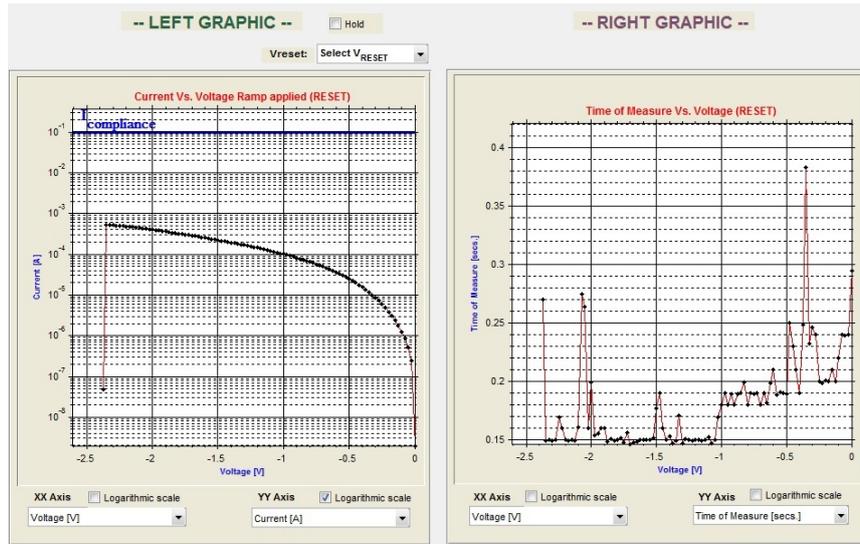


Figura 32: Gráfica del resultado de un proceso tipo *Reset* para estructuras tipo MIS.

ventana *RRAM Measure*, Figura 33.

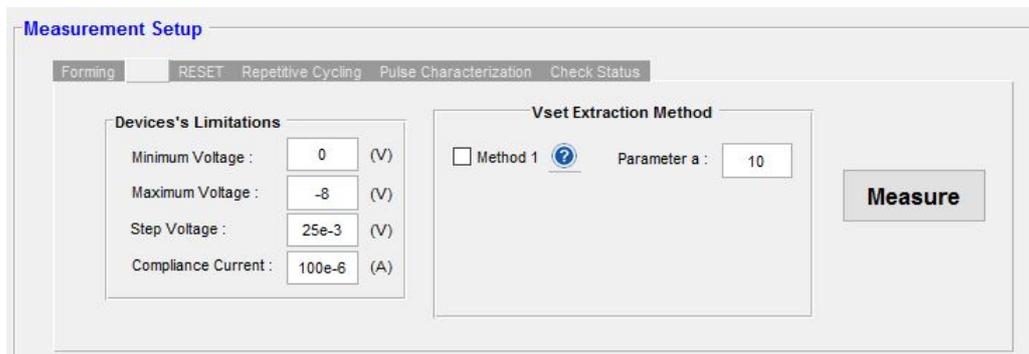


Figura 33: Panel de configuración para medida de tipo *Set*.

El voltaje inicial será de 0 V mientras que el máximo lo estableceremos en torno a -8 V para dispositivos MIS, de igual manera que en el caso del *reset* esto no supone un problema ya que la medida se detendrá automáticamente en caso de que el *set* se produzca antes. Para el caso de estructuras MIS el máximo quedará establecido en 1V, completándose un ciclo de *set* cuando la medida vuelva a terminar en 0V.

El voltaje *step* y la corriente de *compliance* quedarán con un valor de 25 mV y 100 μ A respectivamente.

Tras dar comienzo a la medida presionando el botón *Measure* y una vez que finalice la misma, se mostrará una gráfica similar a la de la Figura 34.

En la Figura 35 se muestra una recreación del filamento dispuesto entre el *top* y el *bottom electrode* entre la transición de un proceso tipo *set* a uno tipo *reset*.

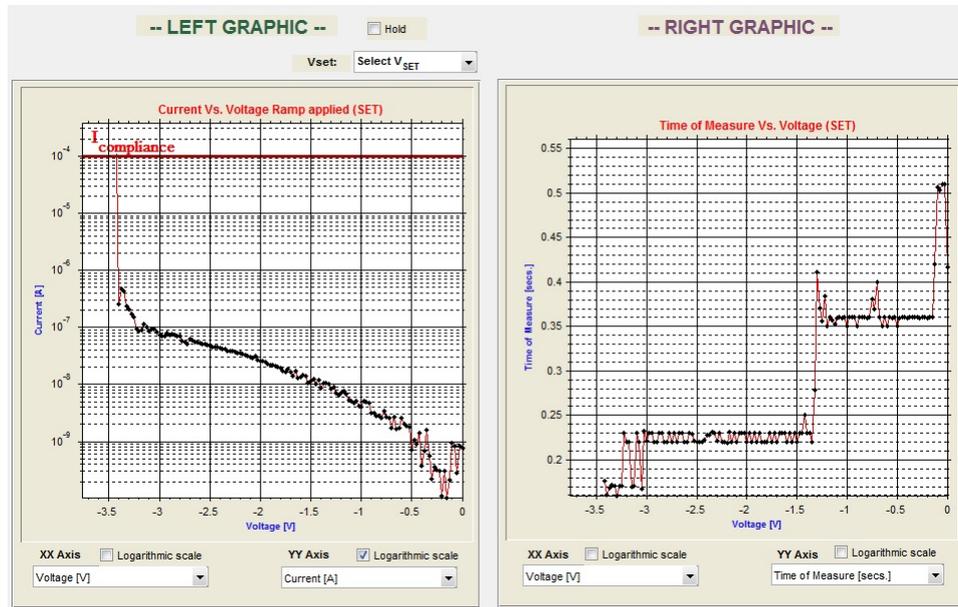


Figura 34: Gráfica del resultado de un proceso tipo *Set* para estructuras tipo MIS.

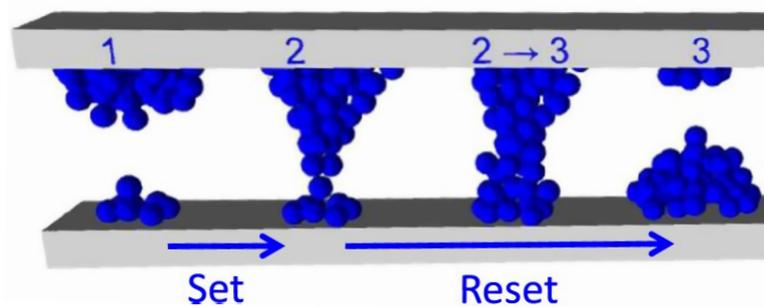


Figura 35: Transición entre un proceso tipo *set* y otro tipo *reset*.

5.1.5 Proceso de estabilizado del filamento

El proceso de estabilizado del filamento consistirá en repetir varias medidas de tipo *reset* sin que llegue a producirse este, por lo que deberemos de asegurarnos de que el voltaje máximo aplicado será menor al previsto para que se haga un *reset* del filamento.

El objetivo será tener un filamento único con el que realizar las pruebas de campo magnético posteriormente, por lo que será vital que tras varios ciclos de *reset* consecutivos no varíe.

En la Figura 36 se muestra un ciclo de *reset* con una tensión límite de -1V, innecesaria para que se produzca el proceso, justo lo que buscamos. En la Figura 37 se vuelve a repetir el mismo proceso, quedando aparentemente estabilizado.

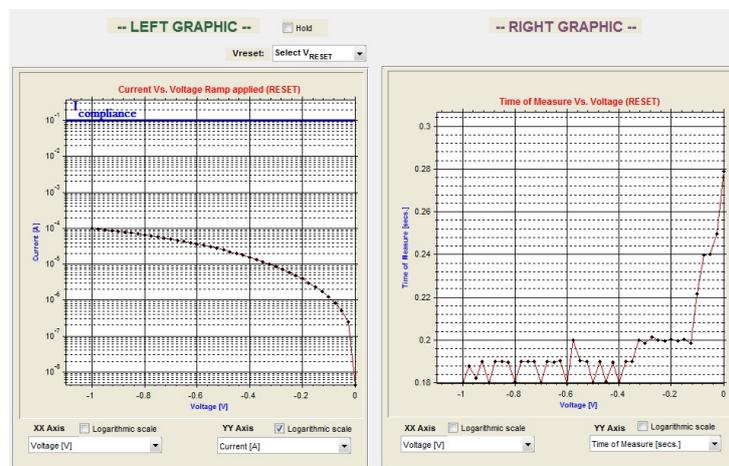


Figura 36: *Reset* parcial del filamento.

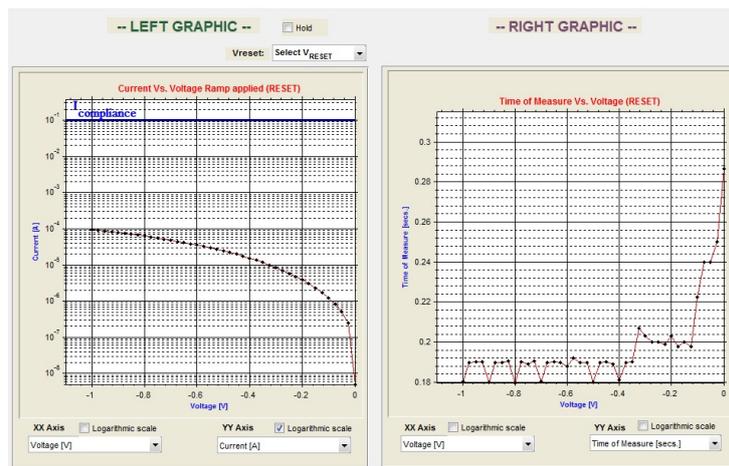


Figura 37: Segundo *reset* parcial del filamento.

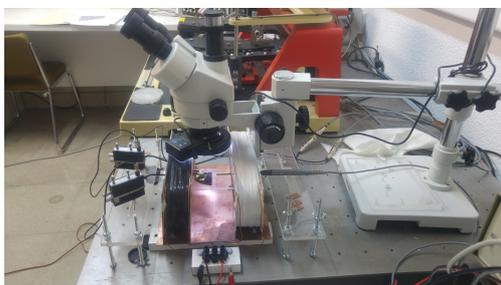
5.2 Medidas de estructuras metal-aislante-semiconductor (MIS)

En esta sección se van a exponer los resultados de las mediciones que se han llevado a cabo en los dispositivos metal-aislante-semiconductor (MIS). Antes de realizar cada una de ellas se ha seguido el proceso explicado en el apartado 5.1.

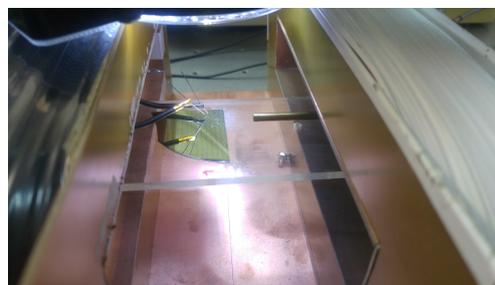
Este tipo de dispositivos metal-aislante-semiconductor, en adelante MIS, están fabricados en una oblea de silicio tipo-N ($\rho = 4 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$).

La técnica empleada para la fabricación ha sido *Atomic Layer Deposition* a 225°C empleando TDMAH y H_2O como precursores y N_2 como gas portador. El contacto eléctrico al electrodo inferior se realiza a través del metalizado de la parte inferior de la oblea de silicio [33]. Los dispositivos que se han medido tienen un área de $15 \times 15 \mu\text{m}^2$.

El campo magnético ha sido generado por dos bobinas Helmholtz controladas mediante una fuente de corriente variable como se muestra en la Figura 38.



(a) Vista general del conjunto con el posicionamiento de las puntas realizado gracias al microscopio.



(b) Vista lateral, la oblea se dispone entre las bobinas de Helmholtz las cuales producen un campo magnético uniforme entre ellas.

Figura 38: *Set-up* dispuesto para llevar a cabo las medidas.

A la hora de realizar las medidas se han ido haciendo secuencias de 10 ciclos parciales de reset (desde 0 hasta -1V) medidas para 2 valores fijos de campo magnético: -200 y 200 Oe. Entre estas secuencias, 10 ciclos parciales de reset son medidos de la misma manera sin aplicar campo para tratar de ver diferencias y permitir la comparación de las curvas.

Antes de empezar se ha hecho un forming en el dispositivo con una corriente de compliance de $100 \mu\text{A}$ como se indica en la Figura 39.

A continuación, con el fin de comprobar que el dispositivo funciona correctamente se hacen 6 ciclos RS completos como se muestra en la Figura 40.

Llegados a este punto comenzamos la medida para secuencia de los ciclos parciales de reset como se detalló anteriormente, resultando las curvas de la Figura 41. Para una mejor comprensión, en la Figura 41b) se ha calculado la media de los 10 ciclos parciales medidos para cada valor de campo magnético.

Para tratar de encontrar tendencias sobre el efecto del campo magnético, se ha repetido la misma medida en el mismo dispositivo después de realizar 5 ciclos RS completos. Con esto conseguimos crear otro filamento distinto para volver a proceder con la misma secuencia de medidas anterior, resultando lo expuesto en la Figura 42.

Para comparar los resultados de las 2 medidas propuestas, nos centramos en el tramo final de la medida comprendido entre -0.9V y -1V que es donde más se observa la variación en las curvas. En la Figura 43 se muestra la comparativa entre las 2 medidas

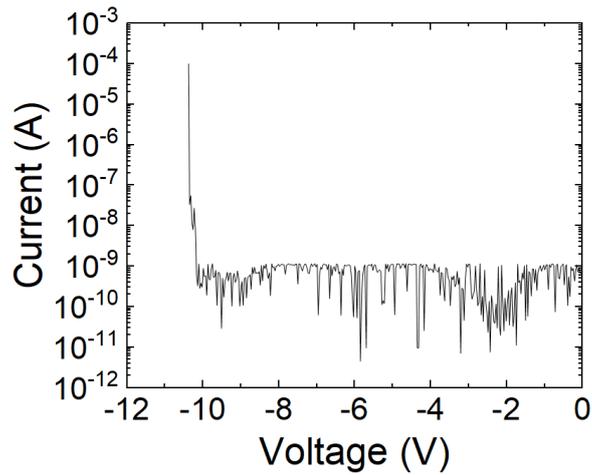


Figura 39: Proceso de forming realizado en el dispositivo previo a realizar las medidas.

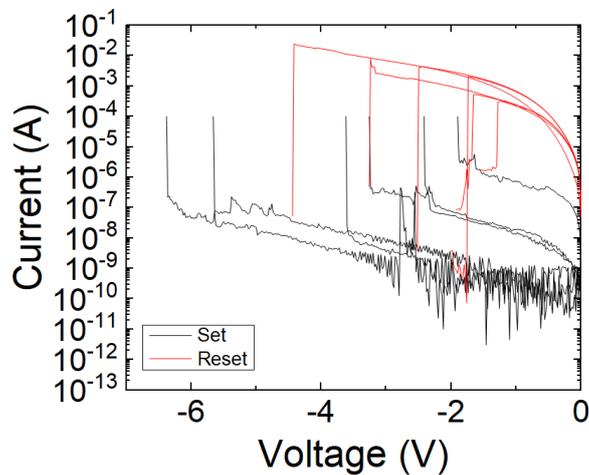
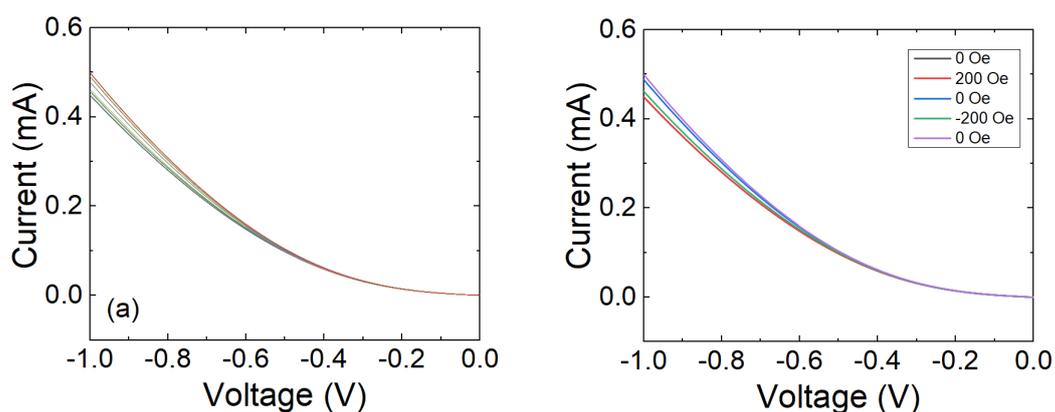


Figura 40: 6 ciclos RS completos para la verificación del dispositivo a estudiar.

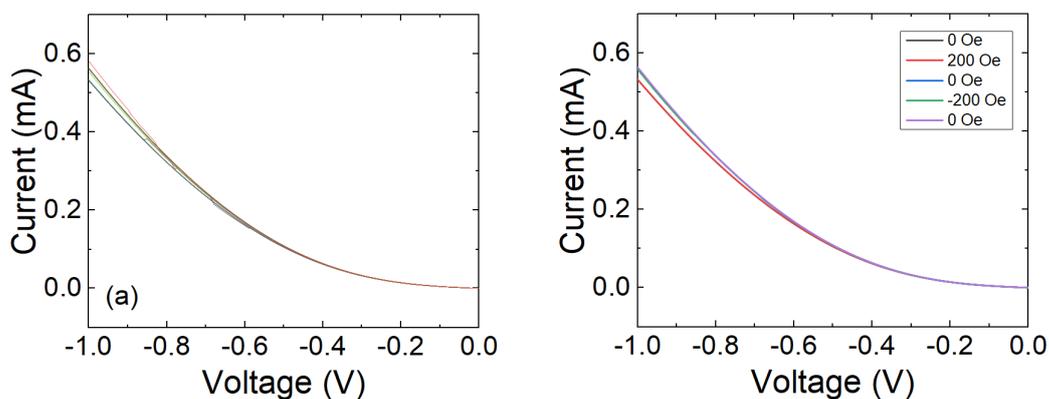
llevadas a cabo. Como se puede observar, el campo magnético afecta de la misma manera las dos medidas. La diferencia entre las medidas iniciales sin campo y las siguientes a 200 Oe no son apreciables, pero sí la posterior a esta realizada sin campo donde la corriente resultante es mucho mayor. Al volver a aplicar campo magnético en este caso a -200 Oe, la corriente vuelve a ser menor que la anterior en las 2 medidas distintas. Finalmente y al volver a realizar la medida sin campo, la corriente obtenida es la mayor de todo el proceso para ambos casos, demostrando que el campo magnético afecta de igual modo a los 2 filamentos estudiados [14].



(a) Curvas resultadas de la primera medida propuesta.

(b) Para una mejor interpretación se han calculado las medias de las secuencias de los ciclos.

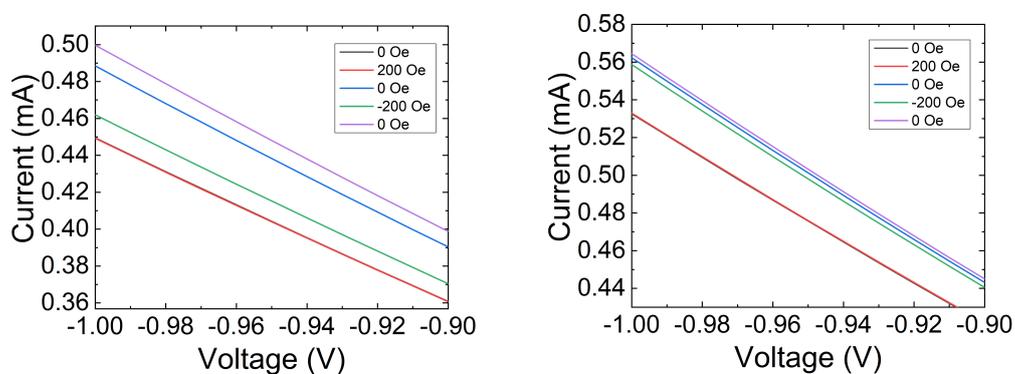
Figura 41: Resultados de la medida propuesta.



(a) Curvas resultadas de la segunda medida propuesta.

(b) Para una mejor interpretación se han calculado las medias de las secuencias de los ciclos.

Figura 42: Resultados de la segunda medida propuesta.



(a) Detalle de las medias de las curvas de la primera medida propuesta.

(b) Detalle de las medias de las curvas de la primera medida propuesta.

Figura 43: Comparación de los resultados de las 2 medidas realizadas.

5.3 Medidas de estructuras metal-aislante-metal (MIM)

En esta sección se van a exponer los resultados de las mediciones que se han llevado a cabo en los dispositivos metal-aislante-metal (MIM). Antes de realizar cada una de ellas se ha seguido el proceso explicado en el apartado 5.1.

Este tipo de dispositivos metal-aislante-metal, en adelante MIM, están fabricados en una oblea de silicio tipo-N ($\rho = 4 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$) los cuales presentan la estructura indicada en la Figura 44.

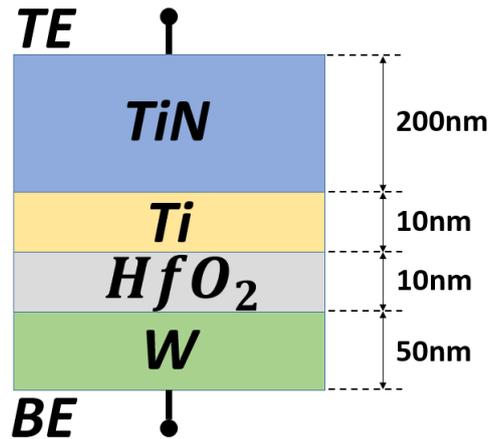
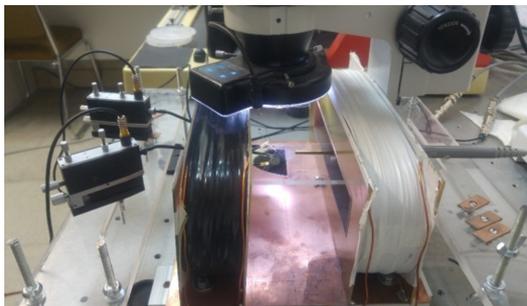


Figura 44: Estructura tipo metal-aislante-metal empleada para las medidas.

La técnica empleada para la fabricación ha sido *Atomic Layer Deposition* a 225°C empleando TDMAH y H₂O como precursores y N₂ como gas portador. El contacto eléctrico al electrodo inferior se realiza a través del metalizado de la parte inferior de la oblea de silicio. Los dispositivos que se han medido tienen un área de $15 \times 15 \mu\text{m}^2$.

El campo magnético ha sido generado por dos bobinas Helmholtz controladas mediante una fuente de corriente variable como se muestra en la Figura 45.



(a) Vista lateral, la oblea se dispone entre las bobinas de Helmholtz las cuales producen un campo magnético uniforme entre ellas.



(b) Vista superior, el campo magnético creado es perpendicular a la dirección de la corriente de carga.

Figura 45: *Set-up* preparado para realizar las medidas.

A la hora de realizar las medidas se han ido haciendo secuencias de 50 ciclos RS para el mismo valor de campo magnético. Entre esas secuencias, 50 ciclos RS sin cam-

po magnético han sido medidos adicionalmente para permitir la comparación entre las distintas medidas. En la Figura 46 se muestran los valores de los campos magnéticos aplicados para cada ciclo.

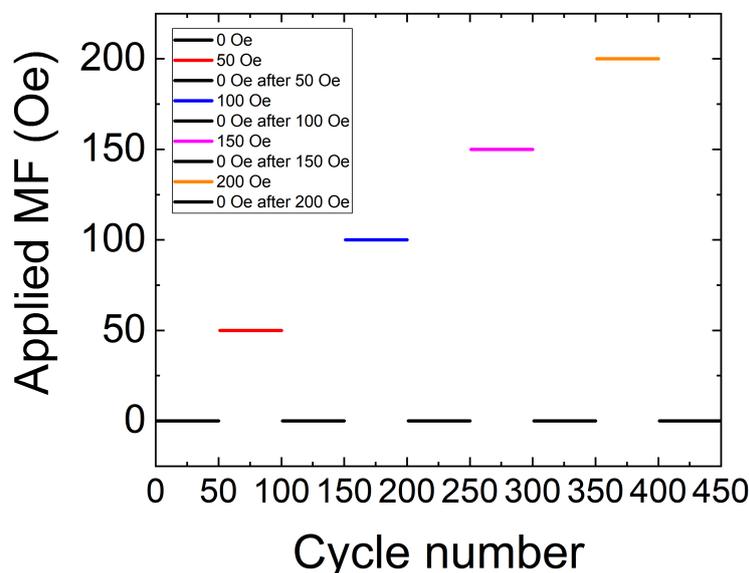


Figura 46: Secuencia para los 450 ciclos de set/reset realizados frente al valor de campo magnético aplicado. El campo se incrementa en pasos de 50 Oe y entre cada valor de campo 50 ciclos RS se han medido sin campo [37][38].

En la Figura 47 se muestran las curvas I-V medidas. En la Figura 47a) se muestran las curvas obtenidas a 0 Oe después de haber aplicado un valor de campo magnético, mientras que en la Figura 47b) se representan las curvas para cada valor de campo. Como se puede observar, el campo magnético dispersa la distribución I-V. Para tratar de buscar tendencias, en la Figura 48 se muestra la corriente frente al número de ciclo para varias tensiones aplicadas.

En las Figuras 48a) y 48c) se muestra cómo el campo magnético tiene influencia en la resistencia HRS (*High Resistance State*) del dispositivo: un ligero incremento de la corriente se observa según crece el campo magnético, por lo tanto los efectos del campo magnético parecen influenciar la morfología del *conductive filament* (CF) durante el proceso de *switching*. Otro aspecto a destacar es la influencia que tiene el campo magnético en el primer ciclo medido sin campo después de haberlo retirado [37][38].

En las Figura 48b) se aprecia un mayor rango de valores para la corriente HRS en comparación a la Figura 48c), esta situación es diferente porque la tensión considerada aquí está más cerca de la tensión de set. En este punto de operación el *conductive filament* (CF) está casi formado y la conducción es puramente óhmica.

El campo magnético afecta la estocasticidad del proceso de *resistive switching*, basta con ver cómo la variabilidad de la tensión de set aumenta. Observando el LRS (*Low Resistance State*), los efectos del campo magnético son considerables, especialmente para valores mayores de 100 Oe. Estos efectos parecen ser acumulativos, incrementando la corriente ciclo por ciclo mientras que el campo es aplicado (con algunas excepciones). Sin embargo, este efecto no se mantiene al retirar el campo magnético (solo para los

menores valores de campo la corriente permanece al mismo nivel después de quitar el campo).

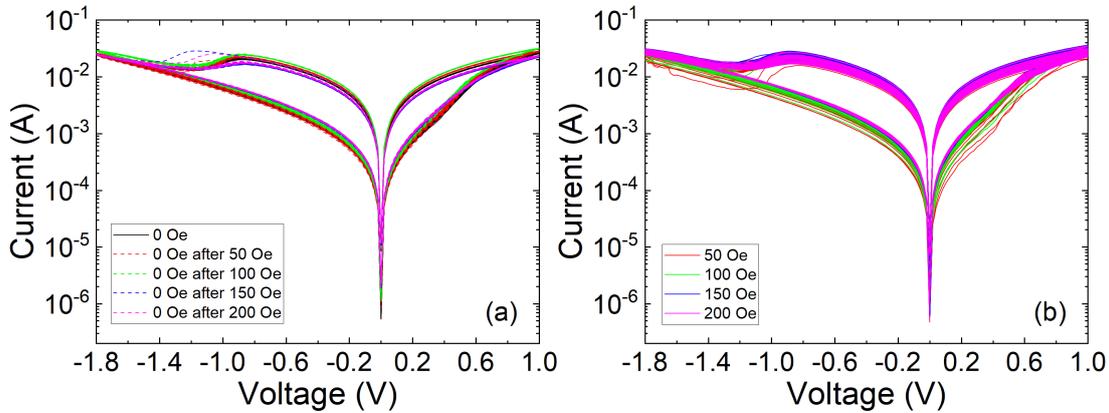


Figura 47: Curvas IV obtenidas experimentalmente para 450 ciclos de set/reset. El campo magnético se incrementa en pasos de 50 Oe (desde 0 Oe hasta 200 Oe) y entre cada valor de campo considerado se han medido 50 ciclos sin campo. La Figura 47a) muestra las 250 curvas sin campo (después de haberlo aplicado) mientras que la Figura 47b) muestra las 200 curvas obtenidas aplicando un valor de campo magnético determinado.

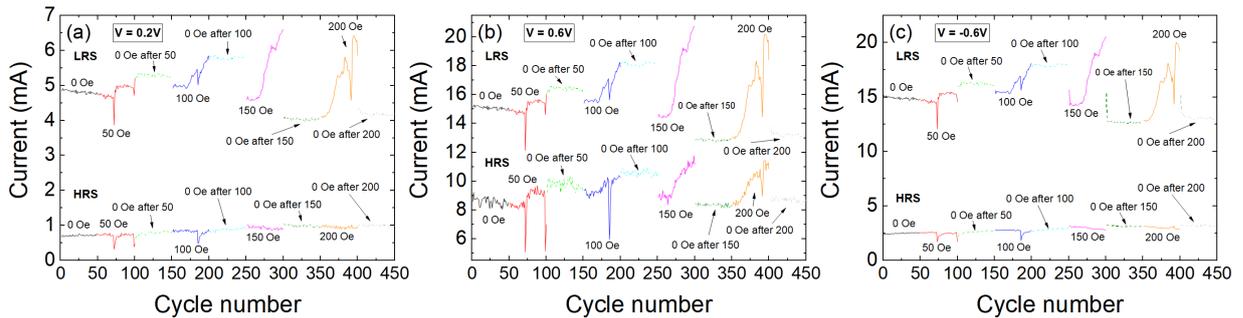


Figura 48: Corrientes HRS y LRS medidas experimentalmente para diferentes tensiones aplicadas: a) 0.2V, b) 0.6V, c) -0.6V frente al número de ciclo de las curvas obtenidas

Una vez que el efecto del campo magnético en la corriente ha sido mostrado, nos centramos en la influencia que tiene en las corrientes y tensiones de set/reset. Las medidas obtenidas muestran diferentes tendencias, 49 y Figura 50. La tensión de set (49a) y la corriente de set (50a) muestra una tendencia decreciente para los valores medios cuando son representados ciclo a ciclo bajo los efectos del campo magnético. En cuanto a la tensión de reset los efectos del campo no son significativos. No obstante, es remarkable que el primer ciclo de la serie de *resistive switching* para valor de 0 Oe después de la aplicación de 150 Oe y 200 Oe muestra un importante aumento en su valor absoluto, indicando la influencia del valor de campo magnético aplicado anterior en la morfología del filamento y la estabilidad en el *switching*. En la Figura 50b) se muestran las correspondientes corrientes de reset durante el *resistive switching*. Una clara influencia del campo magnético en el nivel de corriente se obtiene para valores de 150 Oe y 200 Oe.

Finalmente, en la Figura 51 se muestra la función de distribución acumulada (CDF) [37][38] para las tensiones y corrientes de set/reset. Aparte de las tendencias generales ya

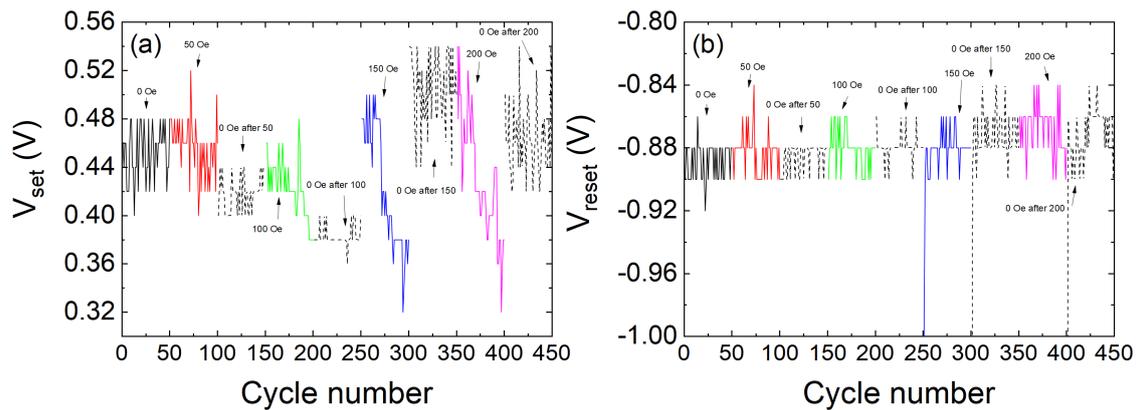


Figura 49: Tensiones de set (a) y reset (b) experimentales obtenidas para cada ciclo medido para toda la serie de *resistive switching* [37].

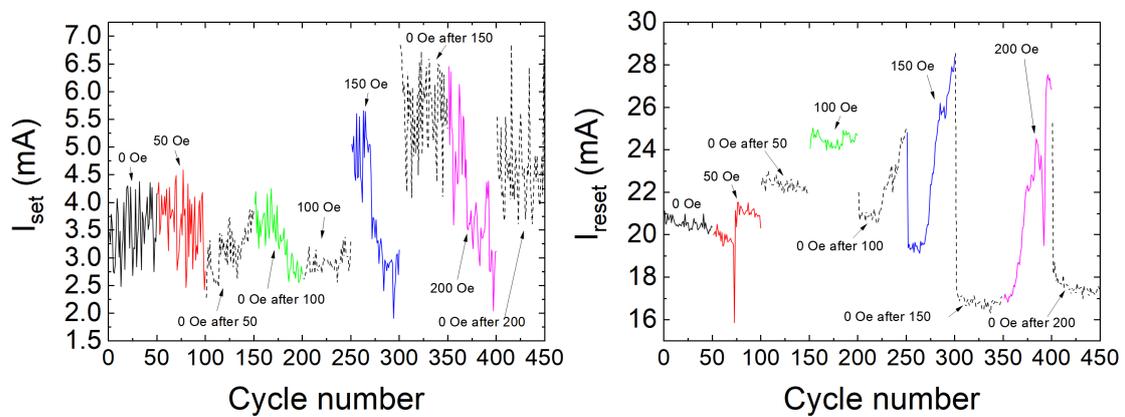


Figura 50: Corrientes de set (a) y reset (b) experimentales obtenidas para cada ciclo medido para toda la serie de *resistive switching* [37][38].

comentadas anteriormente, una clara dispersión en los valores medidos se aprecia bajo los efectos del campo magnético frente a los que no lo tienen, aunque el valor medio para las curvas a 0 Oe está afectado por los cambios morfológicos debidos al campo magnético aplicado anteriormente.

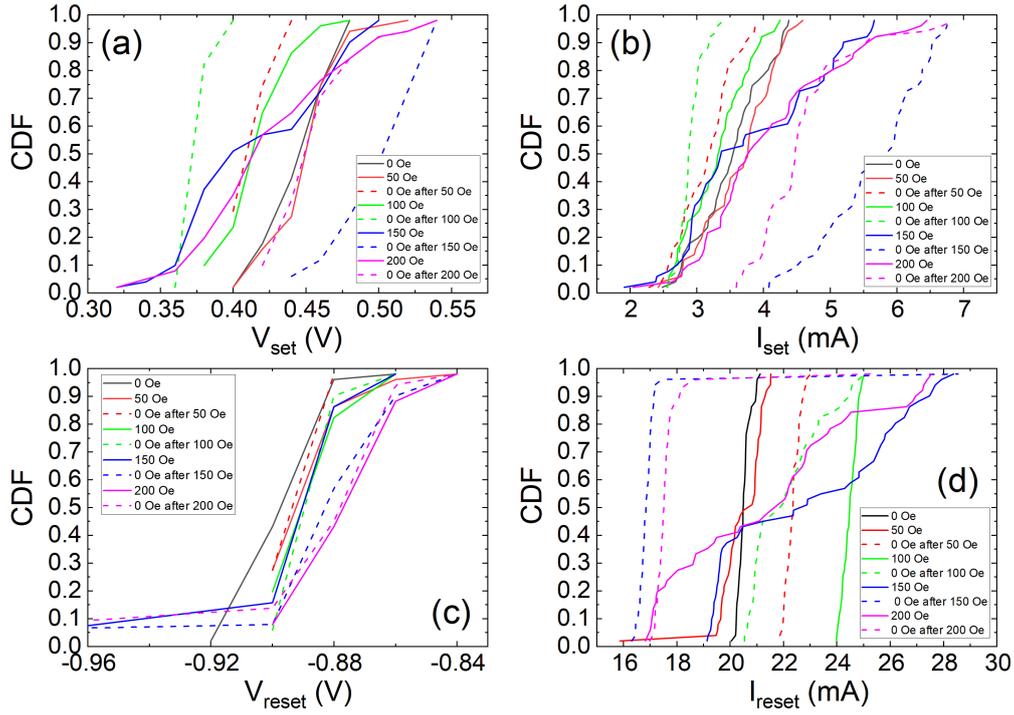


Figura 51: Función de distribución acumulada para los parámetros V_{set} , V_{reset} , I_{set} e I_{reset} medidos con y sin campo magnético aplicado.

6 Conclusiones

La consecución de todas las fases descritas inicialmente y la unión de la parte *hardware* y *software* del proyecto ha dado lugar a un sistema de caracterización de dispositivos RRAM completo, preciso y eficiente con posibilidad de incluir en las medidas el efecto del campo magnético. Además, tiene la posibilidad de ser modificado en el futuro para seguir incorporando nuevas herramientas.

Hemos conseguido sacar partido a un conjunto de instrumentos y equipos electrónicos a fin de establecer, en el laboratorio L4, un entorno de trabajo propicio para investigación y caracterización de este tipo de memorias.

Centrándonos en aspectos técnicos, se ha podido demostrar que hay un efecto del campo magnético sobre este tipo de dispositivos, alterando su curva I-V en mayor o menor medida dependiendo de manera directa de este. Aunque la explicación teórica no está del todo clara, se ha supuesto que este efecto está provocado por la fuerza de Lorentz, provocando que los electrones que circulan por el camino óhmico queden “pegados” a las paredes alterando la circulación de la corriente eléctrica, Figura 52.

Como futuras líneas se sugiere continuar con el estudio de los efectos provocados por mayores valores de campo magnético, ya que pueden obtenerse resultados de interés realmente interesantes.

Concluimos expresando la satisfacción del trabajo realizado y los resultados que se han ido obteniendo. El aprendizaje llevado a cabo ha sido muy transversal, permitiendo

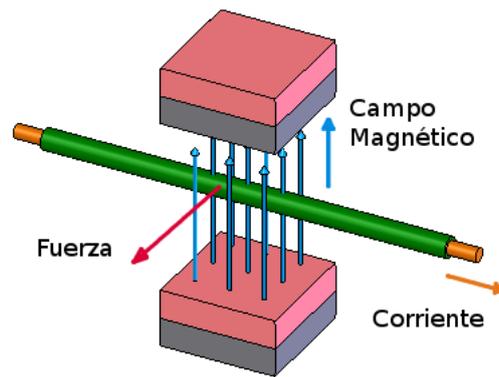


Figura 52: Diagrama teórico explicativo de la ley de Lorentz [39].

el trabajo en diferentes disciplinas dentro de un enfoque tanto *hardware* como *software*.

Referencias

- [1] D. Ielmini,
Reliability issues and modeling of Flash and post-Flash memory,
Microelectronic Engineering, vol. 86, pp. 1870-1875, (2009).
- [2] J. Hutchby and M. Garner,
Assessment of the Potencial and Maturity of Selected Emerging Research Memory Technologies Workshop and ERD/ERM Working Group Meeting,
www.itrs.net/Links/2010ITRS/2010Update/ToPost/ERD_ERM_2010FINALReportMemoryAssessment_ITRS.pdf, (2010).
- [3] Imagen obtenida de la web:
<https://www.tch.es/sala-limpia/>
- [4] Imagen obtenida de la web:
https://www.zator.com/Hardware/H3_1.htm
- [5] Process integration, devices, and structures and emerging research devices,
International technology roadmap for semiconductor. Emerging Research Devices,
Ed. 2011, (2011).
- [6] D. Ielmini,
Reliability issues and modeling on Flash and post-Flash memory,
Microelectronic Engineering, 86, pp. 1870-1875, (2009).
- [7] Información obtenida de la web:
<https://www.crossbar-inc.com/assets/img/media/Crossbar-RRAM-Technology-Whitepaper-080413.pdf>
- [8] Imagen obtenida de la web:
<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/makarov/dissertationch2.html>
- [9] Imagen perteneciente a *Crossbar Inc.* Obtenida de la web:
<https://www.crossbar-inc.com/assets/img/media/Crossbar-RRAM-Technology-080113.png>
- [10] Wong, H. S., Lee, H. Y., Yu, S., Chen, Y. S., Wu, Y., Chen, P. S., ... and Tsai,
Metal-oxide RRAM,
Proceedings of the IEEE, 100(6), (1951- 1970).
- [11] Baek, I. G., Kim, D. C., Lee, M. J., Kim, H. J., Yim, E. K., Lee, M. S., ... and Ryu, B. I.,
Multi-layer cross-point binary oxide resistive memory (OxRRAM) for post-NAND storage application,
In Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest. IEEE International (pp. 750-753). IEEE., (2005)
- [12] M. Pedro, J. Martin-Martinez, R. Rodriguez, M.B González, F. Campabadal, M. Nafria,
A flexible characterization methodology of RRAM: Application to the modeling of the conductivity changes as synaptic weight updates,
Solid-State Electronics, (2019).

- [13] S. Yu,
Neuro-inspired computing using resistive synaptic devices,
Springer, (2017).
- [14] **D. Maldonado**, A.M. Roldán, M.B. González, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J.B. Roldán,
A study of magnetic field effects on TiN/Ti/HfO₂/W resistive memories,
Póster presentado en la 12^a Conferencia Española de *Electron Devices* (CDE), Salamanca (España), (2018).
- [15] J. Guo, X. Kang, Y. Gao, W. Chen, X. Zhao,
Enhanced magnetic modulation in HfO₂-based resistive memory with an Hf top electrode,
Appl. Phys. Letters, 113, 043502, (2018).
- [16] S. Das, S. Majumdar, S. Giri,
Magnetic Field, Temperature, and Time Controlled Manipulation of Switching Mechanism in NiO Film: Evidence of Large Magnetoconductance,
J. Phys. Chem., 114, 6671–6675, (2010).
- [17] Imagen obtenida de la web:
<https://www.wilsonpro.com/blog/a-cellular-infrastructure-to-do-list-for-commercial-real-estate-professionals>
- [18] Imágenes obtenidas de las webs:
<http://oelectric.net/power-electronics.html>
<https://www.klingereducational.com/product/ka6021-helmholtz-coils/>
- [19] Imagen obtenida de la web:
https://cdn.embedded.com/contenteetimes/images/EDN_systems_design/design/crossbar201311/Fig7.jpg
- [20] Imágenes obtenidas de las webs:
<https://bit.ly/2IQYJsI>
<https://bit.ly/2FCi3YB>
- [21] F. Pan, S. Gao, C. Chen, C. Song, F. Zeng,
Recent progress in resistive random access memories: Materials, switching mechanisms, and performance,
Mat. Science and Eng., 83, pp. 1-59, (2014).
- [22] M. Lanza et al,
Recommended methods to study resistive switching devices,
Advan. Elec. Materials, 1800143, (2018).
- [23] L. Larcher, A. Padovani, O. Pirrotta, L. Vandelli, and G. Bersuker,
Microscopic understanding and modeling of HfO₂ RRAM device physics,
in *Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting*, pp. 20.1.1–20.1.4 (2012).
- [24] Ielmini., D.,
Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling,
Semiconductor Science and Technology, Volume 31, Number 6 (2016).

- [25] Hewlett-Packard.
HP 4145 Semiconductor Parameter Analyzer Operation Manual.
- [26] HIRST-Magnetic.
GM08 and GM07 Instruction Guide.
- [27] HIRST-Magnetic.
GM08 Hall Effect Probes.
- [28] Inc., K.
BOP 400W Bipolar Operational Power Supply Start Guide.
- [29] Hewlett-Packard.
HP 3478A Multimeter Operating Manual.
- [30] OPTIKA.
SZM-2 Microscope User Manual.
- [31] Jongmin Kim, K. J.,
Switching power universality in unipolar resistive switching memories,
Scientific Reports 6 (2016).
- [32] G. González-Cordero, F. Jiménez-Molinos, J.B. Roldán, M.B. González, F. Campabadal,
In-depth study of the physics behind resistive switching in TiN/Ti/HfO₂/W structures,
J. Vac. Sci. Technol. B 35, 01A110 (2017).
- [33] M. B. Gonzalez, J. M. Rafi, O. Beldarrain, M. Zabala, F. Campabadal,
Analysis of the Switching Variability in Ni/HfO₂ -Based RRAM Devices,
IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 14, no. 2, pp. 769-771
(2014).
- [34] Villena, M. A., Jimenez-Molinos, F., Roldán, J. B., Suñé, J., Long, S., Lian, X. and Liu, M.,
An in-depth simulation study of thermal reset transitions in resistive switching memories,
Journal of Applied Physics, 114(14), 144505 (2013).
- [35] Villena, M. A., González, M. B., Roldán, J. B., Campabadal, F., Jiménez- Molinos, F., Gómez-Campos, F. M., and Suñé, J.,
An in-depth study of thermal effects in reset transitions in HfO₂ based RRAMs,
Solid-State Electronics, 111, 47-51 (2015).
- [36] Sekar, D.,
Resistive ram: Technology and market opportunities,
MonolithIC 3D Inc., (2011).
- [37] **D. Maldonado**, A. M. Roldán, M. B. González, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J. B. Roldán,
Influence of magnetic field on the operation of TiN/Ti/HfO₂/W resistive memories,
Microelectronics Engineering, 215, 110983. Impact Factor: 1.654, (2019).

- [38] **D. Maldonado**, A. M. Roldán, M. B. González, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J. B. Roldán,
Influence of magnetic field on the operation of TiN/Ti/HfO₂/W resistive memories,
Póster presentado en la 21^a Conferencia sobre "Insulating Films on Semiconductors"
(INFOS), Cambridge (UK), (2019).
- [39] Imagen obtenida de la web:
[http://lacienciarecreativa.blogspot.com/2013/10/
fuerza-de-lorentz-en-un-liquido.html](http://lacienciarecreativa.blogspot.com/2013/10/fuerza-de-lorentz-en-un-liquido.html)

Publicaciones y contribuciones a congresos internacionales relacionadas con este trabajo

- **D. Maldonado**, A. M. Roldán, M. B. González, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J. B. Roldán, "Influence of magnetic field on the operation of TiN/Ti/HfO₂/W resistive memories", *Microelectronics Engineering*, 215, 110983. Impact Factor: 1.654.

- Tipo de participación: Póster
Título: Influence of magnetic field on the operation of TiN/Ti/HfO₂/W resistive memories
Autores: **D. Maldonado**, A. M. Roldán, M. B. González, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J. B. Roldán
Nombre del congreso: 21th Conference on "Insulating Films on Semiconductors"
Lugar y Fecha: Cambridge (UK), 1-3 de julio de 2019
Entidad organizadora: University of Cambridge (UK)
Carácter: Internacional

- Tipo de participación: Poster
Título: A study of magnetic field effects on TiN/Ti/HfO₂/W resistive memories
Autores: **D. Maldonado**, A.M. Roldán, M.B. González, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J.B. Roldán
Nombre del congreso: 12th Spanish Conference on Electron Devices (CDE 2018)
Lugar y Fecha: Salamanca (España), 14-16 de noviembre de 2018
Entidad organizadora: Universidad de Salamanca
Carácter: Internacional

Publicaciones y contribuciones a congresos internacionales relacionadas con la temática de este trabajo

- E. Pérez, **D. Maldonado**, C. Acal, J.E. Ruiz-Castro, F.J. Alonso, A.M. Aguilera, F. Jiménez-Molinos, Ch. Wenger, J.B. Roldán, "Analysis of the statistics of device-to-device and cycle-to-cycle variability in TiN/Ti/Al:HfO₂/TiN RRAMs", *Microelectronics Engineering*, 214, pp. 104-109, 2019. Impact Factor: 1.654.

- J.B. Roldán, F.J. Alonso, A.M. Aguilera, **D. Maldonado**, M. Lanza, "Time series statistical analysis: a powerful tool to evaluate the variability of resistive switching memories", *Journal of Applied Physics*, 125, 174504, 2019. Impact Factor: 2.328.

- Tipo de participación: Presentación oral
Título: Analysis of the statistics of device-to-device and cycle-to-cycle variability in TiN/Ti/Al:HfO₂/TiN RRAMs
Autores: E. Pérez, **D. Maldonado**, C. Acal, J.E. Ruiz-Castro, F.J. Alonso, A.M. Aguilera, F. Jiménez-Molinos, Ch. Wenger, J.B. Roldán
Nombre del congreso: 21th Conference on "Insulating Films on Semiconductors"

Lugar y Fecha: Cambridge (UK), 1-3 de julio de 2019
Entidad organizadora: University of Cambridge (UK)
Carácter: Internacional

- Tipo de participación: Póster
Título: An in-depth statistical study of resistive switching energies in unipolar RRAMs
Autores: **D. Maldonado**, C. Acal, M.B. González, J.E. Ruiz-Castro, A.M. Aguilera, R. Picos, F. Jiménez-Molinos, F. Campabadal, J.B. Roldán
Nombre del congreso: 21th Conference on “Insulating Films on Semiconductors”
Lugar y Fecha: Cambridge (UK), 1-3 de julio de 2019
Entidad organizadora: University of Cambridge (UK)
Carácter: Internacional

- Tipo de participación: Poster
Título: A spline-based functional study of dielectric current dependence on resistive memories
Autores: M.J. Ibáñez, D. Barrera, **D. Maldonado**, F. Jiménez-Molinos and J.B. Roldán
Nombre del congreso: 18th International Conference on Computational and mathematical methods in Science and Engineering
Lugar y Fecha: Rota (España), 9-14 de julio de 2018
Entidad organizadora: Universidad de Cádiz
Carácter: Internacional