



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería Informática

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Informática

Adquisición y análisis de datos de dispositivos de memoria de conmutación resistiva

Autor:

Óscar González Ossorio

Tutores:

Salvador Dueñas Carazo

Helena Castán Lanaspá

Agradecimientos

A mis tutores en el grupo de investigación, Helena y Salva. Les agradezco enormemente su apoyo, tanto técnico como moral, así como su predisposición al diálogo alumno-tutor. Nunca olvidaré la oportunidad que me han brindado para desarrollar este trabajo.

A mi compañero de trabajo, profesor y director del máster Benjamín, con el que he compartido ideas en la cafetería.

A mis compañeros del grupo: Héctor, José y Luis, tres personas que siempre han estado ahí para colaborar y con los que he compartido ayuda mutua.

A todas las demás personas del Campus, alumnos y profesores, que he conocido durante mi vida universitaria.

A todos ellos, gracias.

Y por supuesto, a mi familia, que siempre me ha ayudado a sobreponerme ante cualquier adversidad.

Resumen

Las memorias resistivas (RRAMs) son consideradas de gran interés en la actualidad y la investigación de las mismas concita una gran expectación. La paulatina mejora de los dispositivos electrónicos puede verse impulsada por esta vía, todavía en pruebas y bajo estudio. Este trabajo pretende ser una pequeña demostración de las características que pueden aportar las RRAMs en un futuro próximo, en el caso de que finalmente sea factible su fabricación. En este trabajo se dedica una parte importante al apartado experimental aportando también una solución informática al proceso de filtrado y análisis de datos.

Abstract

The resistive memories (RRAMs) are nowadays considered as very interesting and the research work on them arouses great expectations. The steady pace of electronic devices improvements may be boosted throughout this path, which is still under test. This work intends to be a little demonstration of the characteristics which the RRAMs can offer in the near future, in case their fabrication is eventually feasible. In this work the main part covers the experimental results, adding an informatic solution to the filtering and analysis of data.

Índice general

Índice de figuras	XI
Índice de cuadros	XIV
I Introducción y Planificación	1
1. Introducción	3
1.1. Las memorias resistivas dentro de las memorias no volátiles	4
1.2. Objetivos de este trabajo	4
2. Planificación del proyecto	7
2.1. Planificación inicial	7
2.2. Desarrollo real	7
2.3. Artefactos	7
2.4. Tareas	8
2.4.1. Actividades periódicas	8
2.4.2. Desglose de tareas del proyecto	8
2.5. Gestión de recursos	12
2.5.1. Análisis de costes	12
2.6. Gestión de riesgos	12
2.6.1. Riesgos identificados	12
II Estudio experimental	19
3. Caracterización de los experimentos	21
3.1. Equipos de medida	21
3.2. Clasificación de los experimentos	23
3.3. Descripción de las muestras	24
3.3.1. Estructura de las memorias resistivas	24
3.3.2. Clasificación según su polaridad	25
3.3.3. Clasificación según la capa de aislante	27
	IX

4. Procedimiento experimental	29
4.1. Adquisición de datos	29
4.1.1. Mediciones en la mesa de puntas	29
4.1.2. Mediciones en el criostato	29
4.2. Filtrado de datos	30
4.2.1. Plantillas de Excel	30
4.2.2. Scripts de filtrado	31
4.3. Análisis de datos	31
4.3.1. Scripts de representación	33
4.4. Procedimiento general dentro de Origin	33
4.5. Scripts de LabTalk	34
4.5.1. Descripción resumida de LabTalk	34
4.5.2. Organización de los scripts	36
4.5.3. Funcionamiento de los scripts	37
4.5.4. Interfaz de programación para LabTalk	42
 III Resultados obtenidos y discusión	 43
5. Análisis y valoración de los resultados	45
5.1. Funcionamiento de la memoria	45
5.1.1. Comportamiento resistivo	45
5.1.2. Comportamiento capacitivo	45
5.1.3. Comportamiento inductivo	47
5.1.4. Combinación de los tres comportamientos	47
5.2. Resultados obtenidos	47
5.2.1. Muestras bipolares	47
 IV Conclusiones	 59
6. Valoración del trabajo realizado	61
6.1. Objetivos cumplidos	61
6.2. Competencias adquiridas	61
6.3. Conclusiones	61
6.4. Trabajo futuro	62
 V Apéndices y Bibliografía	 63
A. Contenido del CD-ROM y manuales	65
A.1. Contenido del CD-ROM	65
A.2. Manual de usuario	65

A.2.1. Carga y ejecución de los scripts	65
A.3. Manual de desarrollador	66
A.3.1. Esquema jerárquico de los scripts	66
A.3.2. Árbol de directorios (Sistema de Ficheros)	66
B. Publicaciones como coautor	69
B.1. Listado de publicaciones como coautor	69
Bibliografía	71

Índice de figuras

2.1. Planificación: Tareas preliminares del proyecto	8
2.2. Planificación: Medida y análisis de las muestras	9
2.3. Planificación: Implementación de los scripts	9
2.4. Diagrama de Gantt del proyecto en toda su extensión	11
3.1. Mesa de puntas	21
3.2. Criostato de nitrógeno líquido	22
3.3. Equipo de wire-bonding	22
3.4. Keithley 4200-SCS	23
3.5. Proceso de electroforming 10 nm Lote 8356-1	26
3.6. Ciclos de SET y RESET en una muestra unipolar Lote 8343-6	27
3.7. Ciclo completo de SET y RESET en una muestra bipolar 20 nm Lote 8356-1	28
4.1. Hoja de datos en Origin	31
4.2. Secciones desplegables	32
4.3. Explorador del proyecto	32
4.4. Menú de visualizaciones	32
4.5. Configuración de la visualización	32
4.6. Consola de comandos: script de Filtrado	38
4.7. Formulario de entrada de datos: Filtrado	38
4.8. Nombre de las hojas filtradas	39
4.9. Consola de comandos: script de Representación	40
4.10. Formulario de entrada de datos: Representación	40
4.11. Mensaje de error en los scripts de representación	41
4.12. Nombre de las gráficas	41
4.13. Diferencias entre la representación básica y la mejorada (script)	41
4.14. Vista general de la herramienta de programación	42
5.1. Comportamiento resistivo: ciclos de histéresis	46
5.2. Comportamiento capacitivo: ciclos de histéresis	46
5.3. Experimento nº 1: ciclo marco	48
5.4. Experimento nº 2: medidas durante el enfriamiento	48
5.5. Experimento nº 3: medidas a temperatura estable (I)	49

5.6. Experimento nº 3: medidas a temperatura estable (II)	49
5.7. Experimento nº 4: transitorios de corriente normalizados	49
5.8. Experimento nº 4: control de SET y RESET acumulativos	50
5.9. Experimento nº 5: 10 ciclos de escritura y borrado acumulativos	50
5.10. Experimento nº 6: efecto de la limitación de corriente en el SET	51
5.11. Experimento nº 7: bucles anidados	51
5.12. Experimento nº 8: ciclos de borrado parciales y acumulativos	52
5.13. Experimento nº 9: ciclos de escritura parciales y acumulativos	52
5.14. Experimento nº 10: Electroforming	53
5.15. RESET a diferentes frecuencias	54
5.16. Barridos de frecuencia	54
5.17. Test de escritura	55
5.18. Test de borrado	55
5.19. Transitorios de SET	55
5.20. Experimentos de histéresis	56
5.21. Pruebas de robustez. Lectura a 0.1V	57
5.22. Comparativa entre 10 y 20nm de espesor del aislante	58
A.1. Esquema jerárquico de los scripts	66

Índice de cuadros

1.1. Comparación de las memorias convencionales y emergentes	4
2.1. Hitos del proyecto	10

Parte I

Introducción y Planificación

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, existe una amplia taxonomía de memorias semiconductoras de almacenamiento enfocadas hacia diferentes contextos operacionales [3].

Las memorias semiconductoras de tipo ROM (**R**ead **O**nly **M**emory) se pueden clasificar por su nivel de programabilidad.

- Memorias ROM
 - **OTPROMs**: One time programmable ROMs
 - **EPROMs**: Erasable programmable ROMs
 - **UVEPROMs**: Ultraviolet EPROMs (Técnica de borrado por radiación ultravioleta)
 - **EEPROMs**: Electrically EPROMs (Borrado al aplicar electricidad)

Por otro lado, las memorias RAM tienen muchas variantes, de las cuales las más conocidas son la DRAM (Dynamic RAM) y la SRAM (Static RAM).

Cabe destacar que la memoria de tipo FLASH es una subclase de EEPROM y ofrece una velocidad de operación mucho más lenta que las DRAMs:

- Velocidad [escritura/borrado]
 - **DRAMs** $\rightarrow <10\text{ns}/<10\text{ns}$
 - **FLASH** $\rightarrow 1\text{ms}/0.1\text{ms}$

Así mismo, hay que tener en cuenta que las memorias FLASH funcionan de manera óptima a 5V, pero su desempeño a tensiones bajas ($\sim 0.5\text{V}$) no es fiable. Por esto, las memorias FLASH son usadas generalmente como almacenamiento secundario.

Para intentar subsanar la “brecha” existente entre la FLASH y la DRAM surge una alternativa hasta ahora no muy explorada, las memorias resistivas. Las memorias resistivas forman parte, como las FLASH, de las NVMs (Non-Volatile Memories) por lo que su estado se mantiene aunque no estén alimentadas con electricidad. Estas memorias contrarrestan los aspectos negativos de las FLASH: mayor velocidad de acceso (equiparable con las DRAMs), mayor fiabilidad (FLASH 10^5

	Volatile memory		Non-volatile memory		Emerging non-volatile memory			
Type	SRAM	DRAM	NOR-FLASH	NAND-FLASH	MRAM	PRAM	FRAM	RRAM
Cell elements	6T	1T1C	1T	1T	1(2)T1R	1T1R or 1D1R ^a	1T1C	1T1R or 1D1R ^a
Cell	Latch	Stack/trench capacitor	Floating gate/charge trap	Floating gate/charge trap	Magnetoresistance	Phase-change	Polarization-change	Resistance-change
Minimum cell size	140F ²	6F ²	10F ²	5F ²	20F ²	4.8(4)F ^{2b}	22F ²	4F ^{2c}
Write/erase time	0.3ns/0.3ns	<10ns/<10ns	1ms/10ms	1ms/0.1ms	10ns/10ns	20ns/50ns	10ns/10ns	5ns/5ns
Endurance (cycles)	>3 × 10 ¹⁶	>3 × 10 ¹⁶	>10 ⁵	>10 ⁵	>3 × 10 ¹⁶	10 ⁸	10 ¹⁴	>10 ¹⁰
Application	Cache	Main memory	Storage	Storage	Storage	Storage	Storage	Storage/Main memory

^a Las celdas 1D1R (un diodo y una resistencia) se usan en PRAMs y RRAMs basadas en arrays de barras cruzadas (crossbar-arrays).

^b Las PRAMs basadas en arrays de barras cruzadas consiguen un tamaño mínimo de celda de 4F².

^c De manera similar a las PRAMs, las RRAMs también alcanzan un tamaño mínimo de celda de 4F².

Cuadro 1.1: Comparación de las memorias convencionales y emergentes

ciclos, mientras que las memorias resistivas hasta 3×10^{16} ciclos) y un voltaje de funcionamiento menor.

En el Cuadro 1.1 se puede ver una comparativa del rendimiento de diferentes tipos de memorias [3]. Es inevitable fijarse en lo prometedoras que son las RRAMs.

1.1. Las memorias resistivas dentro de las memorias no volátiles

Las memorias resistivas [6] resultan ser especialmente útiles en el ámbito de las NVMs y más concretamente, las RRAMs (Resistive RAMS) suponen un camino escasamente explorado hasta el momento. Esto, unido a algunas aplicaciones específicas de dicho subconjunto de memorias, las hace especialmente atractivas con vistas a un futuro relativamente cercano.

En la industria de memorias de almacenamiento existe una demanda muy acusada de nuevas mejoras en los sistemas de almacenamiento persistente: SSDs y FLASH. El principal objetivo de estas mejoras es reducir el tiempo de acceso y el consumo de energía (mejorar el rendimiento)

Las RRAMs son un buen candidato para sustituir a las memorias FLASH y ocupar su lugar en sistemas empotrados. El abanico de posibilidades también incluye los circuitos neuromórficos [4] (simulan el funcionamiento del cerebro humano) construidos con hardware. Teniendo en cuenta que las redes neuronales artificiales funcionan habitualmente sobre software, podría alcanzarse una mejora sustancial de las mismas.

1.2. Objetivos de este trabajo

Los objetivos planteados para este proyecto son los siguientes:

- Elaborar una explicación razonada del funcionamiento y comportamiento de las memorias

resistivas, basada en experimentos “in situ”.

- Llevar a cabo varios procesos de experimentación documentados convenientemente.
- Automatizar los procesos de medición, filtrado y representación de los experimentos.

Capítulo 2

Planificación del proyecto

2.1. Planificación inicial

Inicialmente, y dada mi situación particular de trabajador dentro de la Universidad, la planificación temporal fue sencilla de acometer. El horario de trabajo establecido desde el comienzo del proyecto fue de 09:00 a 17:00, con 7 horas y media de tiempo real de trabajo.

Por otro lado, la planificación de tareas no se pudo establecer de manera tan exhaustiva debido a que en labores de investigación existe un alto grado de incertidumbre acerca de qué actividades proporcionarán mejores resultados y de cuáles consumirán más tiempo. Es por esto que la planificación de tareas a realizar fue adaptándose al tiempo disponible y al nivel de completitud de tareas anteriores.

2.2. Desarrollo real

En cuanto al horario mantenido por el estudiante durante todo el proyecto no cabe destacar ningún detalle puesto que siempre se ha mantenido en los mismos términos de la planificación inicial. Las tareas, como se ha explicado en el punto anterior, fueron sucediéndose de forma secuencial y principalmente consistieron en realizar medidas en el laboratorio y en analizar los datos que iban siendo recopilados.

2.3. Artefactos

Los artefactos que se han ido construyendo y/o mejorando son los siguientes:

- Plantillas de Excel para mejorar el filtrado de los datos.
- Scripts que automatizan el proceso de filtrado.
- Scripts que automatizan el proceso de generación de gráficas.

En el capítulo 4 se puede ver la descripción detallada de estos artefactos. Los scripts siguieron un proceso de mejora gradual y fueron programados “ad hoc”. Teniendo en cuenta que no fueron

planificados en ningún momento previo al comienzo de su desarrollo, se pueden considerar como artefactos adicionales.

2.4. Tareas

Todas las tareas, en términos globales, se han desarrollado ocupando una ventana temporal apropiada, equilibrada y ajustada a la situación (mayor o menor carga de trabajo) y a la importancia, por un lado de los resultados obtenidos y por otro del beneficio que reportó la concreción de las mismas.

En los dos apartados que siguen a estas líneas se describen las actividades periódicas llevadas a cabo dentro del proyecto y el correspondiente desglose de tareas.

2.4.1. Actividades periódicas

Inicialmente los lunes y posteriormente los miércoles por la mañana se ha venido realizando una reunión entre los miembros y estudiantes del grupo de investigación. Estas reuniones han servido para que los tutores obtuvieran retroalimentación del alumno relativa al estado actual del proyecto, algunas trabas o problemas y dudas o consultas. Otro objetivo fundamental era marcar metas a corto y medio plazo, que pudieran ser revisadas y comentadas en reuniones posteriores.

2.4.2. Desglose de tareas del proyecto

En las Fig. 2.1, 2.2 y 2.3 se muestra la organización temporal de las tareas del proyecto. En el Cuadro 2.1 se indican las tareas junto a la fecha planificada y las fechas de término. Las medidas en el laboratorio en realidad no tuvieron fecha planificada porque se realizaron “bajo demanda” (a medida que el grupo iba disponiendo de nuevas muestras). El diagrama de Gantt del desarrollo real del proyecto completo está representado en la Fig. 2.4.








Id		Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1			Tareas preliminares	7 días	mié 21/12/16	lun 16/01/17	
2			Lectura de bibliografía	3 días	mié 21/12/16	mar 10/01/17	
3			Primer uso de los equipos del laboratorio	3 días	mar 10/01/17	vie 13/01/17	2
4			Aprendizaje básico del funcionamiento de Origin	1 día	vie 13/01/17	lun 16/01/17	3

Figura 2.1: Planificación: Tareas preliminares del proyecto

5		Medidas y análisis de las muestras	67 días	lun 16/01/17	mar 09/05/17	
6		Lote 8356-1	11 días	lun 16/01/17	jue 02/02/17	4
7		Lotes 8343-X	12 días	jue 02/02/17	lun 20/02/17	
8		Lote 8343-3	3 días	jue 02/02/17	mar 07/02/17	6
9		Lote 8343-4	3 días	mar 07/02/17	vie 10/02/17	8
10		Lote 8343-5	3 días	vie 10/02/17	mié 15/02/17	9
11		Lote 8343-6	3 días	mié 15/02/17	lun 20/02/17	10
12		Lote C765	11 días	mar 21/02/17	mié 08/03/17	7
13		Lote de perovskita	11 días	mié 08/03/17	vie 24/03/17	12
14		Lote 38	11 días	vie 24/03/17	jue 20/04/17	13
15		Lote 37	11 días	jue 20/04/17	mar 09/05/17	14

Figura 2.2: Planificación: Medida y análisis de las muestras

16		Implementación de los scripts	54 días	lun 06/02/17	mar 09/05/17	
17	  	Scripts de filtrado	54 días	lun 06/02/17	mar 09/05/17	
18	 	Scripts de representación	16 días	lun 03/04/17	mar 09/05/17	

Figura 2.3: Planificación: Implementación de los scripts

Tarea	Comentarios	Fecha planificada inicialmente	Fecha de término
Tareas preliminares	Lectura de bibliografía, adaptación al laboratorio y aprendizaje básico de Origin	16/01/2017	16/01/2017
Medidas y análisis del lote de muestras 8356-1	Muestras bipolares	02/02/2017	02/02/2017
Medidas y análisis de los lotes 8343-[3-6]	Muestras unipolares multicapa	22/02/2017	22/02/2017
Implementación de los scripts de filtrado	Desde la 1ª versión hasta la última	05/04/2017	09/05/2017
Medidas y análisis del lote C765	Muestras bipolares multicapa	09/03/2017	09/03/2017
Medidas y análisis del lote de perovskita	Muestras bipolares con compuesto de perovskita	27/03/2017	27/03/2017
Medidas y análisis del lote 38	Muestras con aislante de ZrO_2	21/04/2017	21/04/2017
Implementación de los scripts de representación	Desde la 1ª versión hasta la última	28/04/2017	09/05/2017
Medidas y análisis del lote 37	Muestras con aislantes de ZrO_2 y Ta_2O_5	09/05/2017	09/05/2017

Cuadro 2.1: Hitos del proyecto

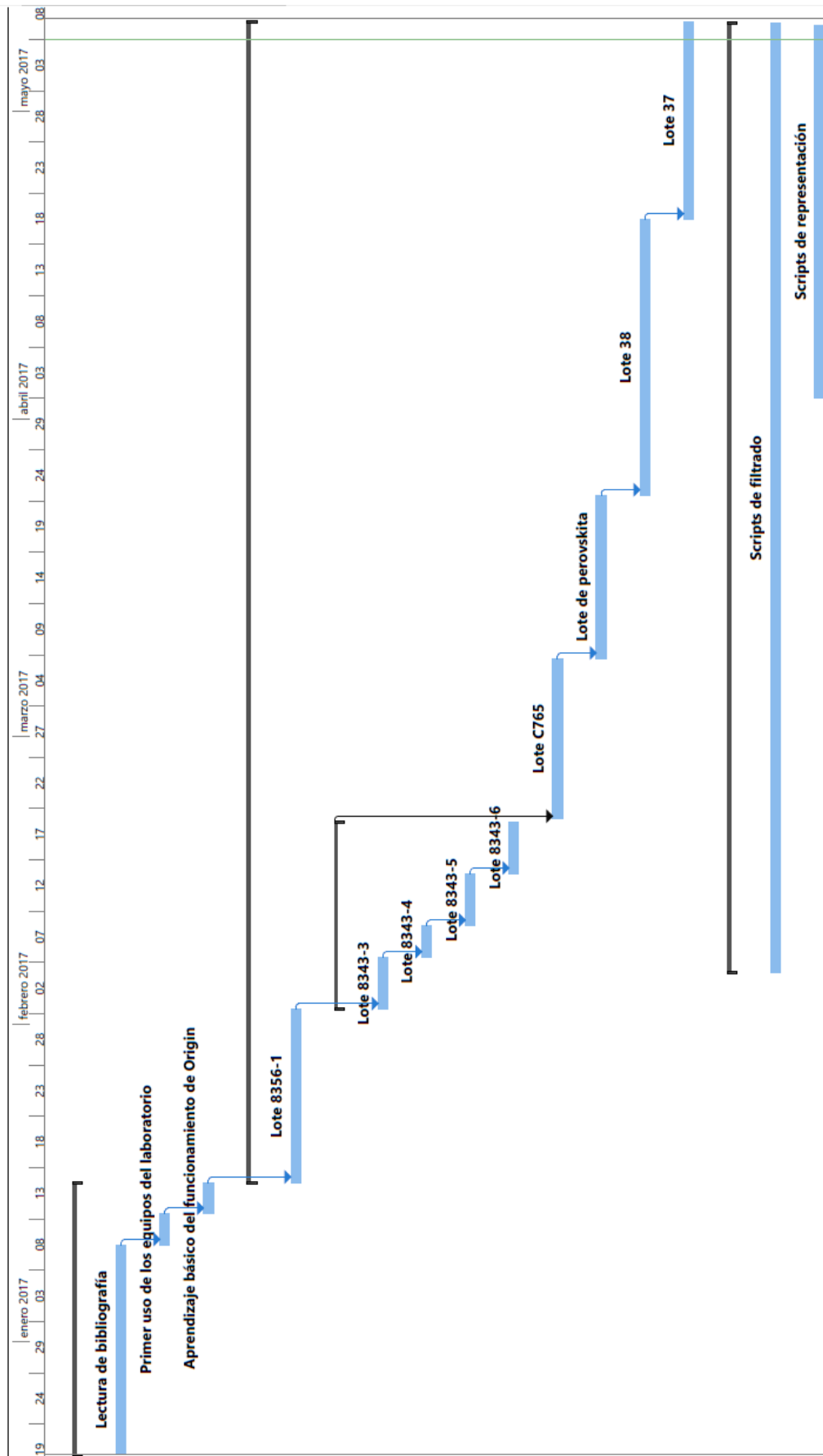


Figura 2.4: Diagrama de Gantt del proyecto en toda su extensión

2.5. Gestión de recursos

Los recursos esenciales para realizar el proyecto han sido los siguientes:

- Equipos de medida (*Se explicarán con más detalle en la sección 3.1*)
 - Máquina para experimentos comunes (medición de corrientes, voltajes, capacidades y conductancias).
 - Osciloscopio.
 - Máquina de “wire-bonding” (para soldar cables de unas micras de grosor).
 - Criostato (recipiente cuyo interior está completamente aislado del medio externo).
- Ordenador personal del estudiante.
- Elementos adicionales para las medidas
 - Nitrógeno líquido (para experimentos a baja temperatura).
 - Helio en estado gaseoso (combinado con el criostato permite aislar mejor la muestra).

2.5.1. Análisis de costes

Si se tienen en cuenta todos los recursos necesarios para desarrollar el proyecto, la mayor parte de ellos han sido adquiridos hace algún tiempo. En cuanto a los elementos adicionales, como no se ha usado una mayor cantidad de lo que sería habitual sin considerar el proyecto académico, tampoco se pueden valorar sus costes como “propios del proyecto”.

A pesar de que realmente no ha habido costes del proyecto *per se*, sí que han existido gastos derivados que han sido asumidos por el grupo de investigación a través de sus fuentes de financiación locales y nacionales.

2.6. Gestión de riesgos

A continuación se detalla cada uno de los riesgos potenciales en el proyecto. Los riesgos aquí listados se subdividen en distintos ámbitos: De planificación, del personal, de proceso, externos y del material de trabajo.

2.6.1. Riesgos identificados

Riesgos de planificación

R-01. Retraso en la fecha de finalización del proyecto

Fase: Cualquiera

Probabilidad: baja

- Inicio: muy baja

- Elaboración: muy baja
- Construcción: baja
- Transición: baja

Magnitud: alta

- Inicio: baja
- Elaboración: baja
- Construcción: media
- Transición: alta

Descripción: Durante el transcurso del proyecto pueden darse circunstancias de diversa índole que afecten a la fecha de finalización del proyecto. Este riesgo podría ser considerado como crítico si se pretende cumplir íntegramente con la planificación inicial.

Impacto: El impacto de este riesgo es mayor a medida que se avanza por las distintas fases, debido a que está más cercana la fecha de finalización planificada inicialmente.

Indicadores: La duración de una o más tareas se extiende demasiado, impidiendo de esta forma la finalización de las mismas o de otras en el plazo de tiempo planificado.

Plan de mitigación: Establecer un tiempo determinado para cada tarea a lo largo de un bloque temporal (días, semanas, etc.) y elaborar una estructura de prioridades de forma que las tareas críticas prevalezcan sobre el resto.

Plan de contingencia: En el caso de que la fecha de finalización del proyecto se extienda más allá de lo razonable, será necesario establecer una nueva fecha de finalización en la que será obligatorio haber completado las tareas inacabadas y, si procede, otras tareas distintas que amplíen el contenido del proyecto.

R-02. Decisiones incorrectas durante el proyecto

Fase: Cualquiera

Probabilidad: baja

- Inicio: muy baja
- Elaboración: muy baja
- Construcción: muy baja
- Transición: muy baja

Magnitud: alta

- Inicio: muy alta
- Elaboración: alta

- Construcción: media
- Transición: baja

Descripción: Tomar decisiones en determinados momentos del proyecto es algo ineludible, y los efectos posteriores a una mala decisión pueden repercutir tanto en el contenido final como en la fecha de finalización del mismo.

Impacto: La probabilidad de que se tomen malas decisiones es muy reducida en este tipo de proyectos, debido a que existe una estructura de trabajo organizada y establecida con bastante previsión. Por ello, el impacto es bajo, aunque hay que tener muy en cuenta que las consecuencias de tomar malas decisiones de planificación durante el proyecto son mucho mayores si se producen en etapas tempranas, por la sencilla razón de que podrían repercutir en el desarrollo futuro.

Indicadores: Una o más tareas se han enfocado de manera errónea y existen problemas para alcanzar sus metas, bien de la planificación temporal o bien del número o la calidad de los artefactos producidos.

Plan de mitigación: Elaborar una planificación individualizada (regulando el nivel de granularidad) para cada tarea o grupo de tareas, de forma que se tengan en cuenta posibles problemas y se disponga de diferentes vías para completarlas que puedan paliar las malas decisiones técnicas.

Plan de contingencia: Aprovechar las holguras conseguidas en algunas tareas para poder acometer la nueva planificación.

Riesgos del personal

R-03. Ausencia por enfermedad

Fase: Cualquiera

Probabilidad: baja

- Inicio: baja
- Elaboración: baja
- Construcción: baja
- Transición: baja

Magnitud:

- Inicio: media
- Elaboración: media
- Construcción: media
- Transición: media

Descripción: En general, las ausencias por enfermedad no se alargan durante mucho más que unos días y suceden muy eventualmente, pero es necesario tener en cuenta este riesgo de cara a los avances a realizar en el proyecto.

Impacto: El impacto sería bajo, siempre y cuando no se dé un caso excepcional y la ausencia se extienda a lo largo de un espacio temporal considerable.

Indicadores: Como indicador para este riesgo se puede valorar la posible prevalencia de enfermedades en diferentes épocas del año (p.ej. en invierno la gripe).

Plan de mitigación: Las medidas que pueden mitigar este riesgo dependen en gran parte del propio empleado/estudiante, ya que elaborar una planificación es factible, pero no es posible tener en cuenta variables tan impredecibles como las variaciones en la salud de un individuo.

Plan de contingencia: El plan de contingencia para este riesgo se ajusta al planteamiento genérico: aprovechar las holguras de tareas ya completadas, asignar nuevas prioridades a las tareas restantes y reorganizar el trabajo que queda por finalizar.

R-04. Falta de experiencia del estudiante

Fase: Cualquiera

Probabilidad: media

- Inicio: alta
- Elaboración: media
- Construcción: media
- Transición: baja

Magnitud:

- Inicio: baja
- Elaboración: media
- Construcción: media
- Transición: alta

Descripción: Dadas las circunstancias concretas de este proyecto, inicialmente un estudiante que procede de la rama de Informática carece de experiencia en el campo de la Electrónica. Por esta razón, hay que prestar gran atención a este riesgo con vistas a poder gestionarlo convenientemente.

Impacto: El impacto es medio porque a medida que avanza el proyecto, el estudiante adquiere una mayor experiencia que al inicio del mismo y, de manera opuesta, la necesidad de poseer experiencia en el tema que se está tratando va creciendo con el tiempo.

Indicadores: El ámbito de estudios del que procede el estudiante supone una mayor o menor predisposición a carecer de experiencia en el tema del trabajo.

Plan de mitigación: En este caso es muy complicado ofrecer medidas preventivas para el riesgo. Esto es, no hay una capacidad efectiva para formar al estudiante antes de que comience a trabajar *in situ*.

Plan de contingencia: Se puede aportar bibliografía al estudiante de forma que adquiera como mínimo una visión global más o menos pormenorizada del trabajo que va a realizar.

Riesgos de proceso

R-05. Tiempo excesivo dedicado a un conjunto de mediciones

Fase: Cualquiera

Probabilidad: Baja

- Inicio: Baja
- Elaboración: Baja
- Construcción: Baja
- Transición: Muy baja

Magnitud:

- Inicio: Baja
- Elaboración: Baja
- Construcción: Baja
- Transición: Media

Descripción: Como en cualquier proyecto, puede haber grandes desajustes temporales entre unas tareas y otras.

Impacto: Bajo. Llevando un ritmo ordenado del trabajo en el laboratorio, es poco probable que un lote de mediciones se alargue en el tiempo más de lo razonable. Además, dado que no existen fechas exactas de finalización para cada paquete de mediciones, la ocurrencia de este riesgo no provocaría repercusiones graves.

Indicadores: La recogida de datos sobre un conjunto de muestras se extiende más allá de lo adecuado.

Plan de mitigación: Establecer una política de prioridades a través de la cual se dé una mayor importancia a los plazos de las tareas críticas.

Plan de contingencia: Aprovechar las holguras obtenidas en tareas anteriores y replanificar las tareas restantes.

Riesgos externos**R-06. Eventos inesperados (Terremotos, inundaciones, incendios)**

Fase: Cualquiera

Probabilidad: Muy baja

Magnitud: Muy alta

Descripción: Un incendio podría destruir el entorno de pruebas, así como los equipos de trabajo. Por supuesto, también podría afectar al personal de trabajo.

Impacto: Bajo. El impacto no es muy elevado debido a que la probabilidad de que se produzca un incendio en el edificio es reducida.

Indicadores: No existen indicadores frente a este tipo de evento, puesto que suceden de manera inesperada.

Plan de mitigación: Protocolo de evacuación del edificio, ya establecido y programado para su puesta en marcha si es necesario.

Plan de contingencia: Si se produjera un incendio y acontecieran daños graves en la estructura del edificio, en el laboratorio, etc., no quedaría más remedio que retrasar la fecha de finalización del proyecto.

Riesgos del material de trabajo**R-07. Avería de los equipos de trabajo**

Fase: Cualquiera

Probabilidad: Baja

- Inicio: Baja
- Elaboración: Baja
- Construcción: Baja
- Transición: Baja

Magnitud:

- Inicio: Baja
- Elaboración: Media
- Construcción: Alta
- Transición: Baja

Descripción: Para poder realizar mediciones sobre las muestras es necesario disponer de equipos electrónicos operativos. Si uno de ellos dejase de funcionar, afectaría gravemente al desarrollo del proyecto y es posible que también al presupuesto del mismo (podría ser necesario adquirir un repuesto).

Impacto: Alto, puesto que las consecuencias de este riesgo hay que tenerlas muy en cuenta.

Indicadores: Uno de los equipos comienza a fallar con más frecuencia.

Plan de mitigación: Realizar revisiones periódicas del funcionamiento de los equipos de medición, con el fin de comprobar que funcionan de manera apropiada.

Plan de contingencia: El plan de contingencia consistiría en adquirir un equipo electrónico que sustituya al averiado o en repararlo. El gasto planificado para el proyecto posiblemente se vería trastocado, así como la duración de las tareas que tuviesen que ser efectuadas con los aparatos estropeados.

R-08. Anomalías en las mediciones (Desajuste en los equipos)

Fase: Cualquiera

Probabilidad: Baja

- Inicio: Baja
- Elaboración: Baja
- Construcción: Baja
- Transición: Baja

Magnitud:

- Inicio: Alta
- Elaboración: Alta
- Construcción: Alta
- Transición: Alta

Descripción: Los equipos de trabajo son susceptibles de sufrir desviaciones en su funcionamiento correcto, afectando a los resultados que requieran de una gran precisión.

Impacto: Medio, porque la probabilidad es reducida. De cualquier forma, la magnitud se puede considerar alta principalmente cuando la anomalía no es detectada a tiempo.

Indicadores: Teniendo en cuenta resultados de anteriores experimentos, los valores obtenidos son muy extraños y se percibe una pérdida de precisión.

Plan de mitigación: Comprobar frecuentemente el ajuste correcto de las medidas.

Plan de contingencia: Calibrar los equipos afectados con las herramientas disponibles.

Parte II

Estudio experimental

Capítulo 3

Caracterización de los experimentos

3.1. Equipos de medida

Los equipos de medida que más se han utilizado durante el proyecto han sido los siguientes:

- **Mesa de puntas *Cascade Microtech*:** En esta mesa de trabajo (Fig. 3.1) se colocan las muestras para proceder a su caracterización. Utilizando dos puntas de acero se establecen los contactos con los electrodos de la memoria.



Figura 3.1: Mesa de puntas

- **Criostatos de nitrógeno líquido *Oxford Instruments*:** Utilizando estas herramientas es posible caracterizar las memorias de una manera mucho más precisa, ya que al permanecer la muestra en el interior del recipiente se elimina la acción de cualquier agente externo. El criostato, al estar aislado térmicamente, hace factible la ejecución de pruebas a bajas

temperaturas (por ejemplo a la temperatura del nitrógeno líquido, $77\text{K} = -196^\circ\text{C}$). En la Fig. 3.2 se puede ver un criostato.

- **Equipo de wire-bonding *tpt HB05***: Esta máquina (Fig. 3.3) sirve para soldar cables muy finos (~ 25 micras) desde la placa de cobre sobre la que se depositan las memorias hasta los electrodos de la muestra. Como se puede deducir, su uso no es en absoluto trivial y requiere de una gran precisión.



Figura 3.2: Criostato de nitrógeno líquido



Figura 3.3: Equipo de wire-bonding

- **Sistema de caracterización de semiconductores Keithley 4200-SCS**: El Keithley 4200-SCS ha constituido un pilar fundamental dentro de la adquisición de datos a lo largo de todo el proyecto académico. Las herramientas software de las que dispone para controlar y monitorizar las mediciones posibilitaron la recopilación de datos de prácticamente todos los experimentos llevados a cabo. En la Fig. 3.4 se puede ver el aspecto de esta máquina.



Figura 3.4: Keithley 4200-SCS

3.2. Clasificación de los experimentos

Las pruebas experimentales que se han realizado durante el transcurso del proyecto se pueden clasificar en varios tipos:

- Atendiendo a las variables eléctricas utilizadas
 - **Experimentos de I-V:** Se aplica un voltaje (V) determinado y se mide la intensidad (I) generada.
 - **Experimentos de G-C:** Se miden dos variables, la G (conductancia) y la C (capacidad) a partir de un voltaje aplicado sobre la muestra.
- Atendiendo al objetivo del experimento
 - **Realización del forming:** El forming es el proceso a partir del cual la memoria adquiere un comportamiento resistivo.
 - **Ciclos de SET-RESET:** Se pueden medir tanto para I-V como para G-C.
 - **Estandarizados:** Se utiliza un rango de voltajes controlado y estabilizado.
 - **Lazos internos:** Se realizan ciclos incrementales de SET-RESET en cadena.
 - **Ciclos de escritura (SET)**
 - **Completos:** Hasta llegar al voltaje máximo estandarizado (o superior).
 - **Incrementales:** Con voltajes crecientes e intercalando un ciclo completo de RE-SET entre escrituras.

- **Acumulativos:** Con voltajes crecientes, habiendo realizado un único ciclo completo de RESET antes de comenzar el experimento.
- **Ciclos de borrado (RESET)**
 - **Completo:** Hasta llegar al voltaje máximo estandarizado (o superior).
 - **Incrementales:** Con voltajes crecientes e intercalando un ciclo completo de SET entre escrituras.
 - **Acumulativos:** Con voltajes crecientes, habiendo realizado un único ciclo completo de SET antes de comenzar el experimento.

- **Ciclos de histéresis**

Las memorias resistivas presentan un comportamiento histerético, por lo que conservan su estado anterior en ausencia de un estímulo externo (p. ej. una señal de voltaje).

- **Histerones de corriente**
- **Histerones de conductancia y capacidad**

- Atendiendo a las dependencias observadas

En algunos experimentos se han tenido en cuenta otras variables con el objetivo de analizar con mayor precisión el comportamiento de las memorias.

- **Relaciones G-C con la frecuencia:** Se ha realizado una comprobación experimental de la dependencia existente entre la conductancia y la capacidad con respecto a la frecuencia.
- **Transitorios:** Se trata de determinar la velocidad de cambio de estado de las memorias aplicando voltaje durante un período de tiempo determinado.

3.3. Descripción de las muestras

En este apartado se describen las memorias resistivas y se realiza una clasificación en distintas categorías.

3.3.1. Estructura de las memorias resistivas

Las memorias resistivas con las que se ha trabajado se pueden encuadrar en dos tipos bien diferenciados a partir de la composición de sus capas. Estas memorias tienen tres capas: Los electrodos superior e inferior y un nivel de aislante entre ellos.

- **El electrodo superior (TOP electrode):** La tensión se aplica a través de este electrodo. De manera habitual, se añade una pequeña capa de otro metal por debajo del electrodo superior con el objetivo de mejorar las prestaciones de la conmutación resistiva.
- **La capa central:** está formada por una o varias capas de aislante (dieléctrico). Cuando se aplica una tensión de SET (estado ON), dentro del aislante se forma un filamento que

une los dos electrodos permitiendo el paso de la corriente (baja resistividad). De forma opuesta, al aplicar una tensión de RESET (estado OFF), el filamento se destruye y se alcanza un estado de alta resistividad. Existen varias formas de creación del filamento, siendo las más comunes la relación antagónica entre reducción-oxidación [6] (se destruyen o forman aniones de oxígeno) y el CBRAM (Conducting Bridge RAM), en el que algunos átomos del metal forman el filamento al introducirse en el dieléctrico.

- **El electrodo inferior (BOTTOM electrode):** está conectado a tierra y sobre él no se aplica tensión directamente. Este electrodo es el que permite diferenciar los dos tipos de muestras.
 - Si es un material **semiconductor**, la memoria es de tipo **MIS** (Metal-Insulator-Semiconductor).
 - Si es un material **metálico**, la memoria es de tipo **MIM** (Metal-Insulator-Metal).

Es importante remarcar que el comportamiento que presentan las memorias resistivas viene dado por el proceso previo de “electroforming”.

Electroforming

El forming (electroforming) podría definirse, por analogía con las ciencias naturales, como la formación del cauce de un río, que primero debe amoldar el terreno a su recorrido encontrando los puntos con menor resistencia a la corriente. Una definición más precisa podría ser: “Un incremento gradual de voltaje que tiene un gran impacto sobre la corriente”. Obviamente, en este caso el voltaje ha de ser aplicado sobre un dispositivo capaz de comportarse como un conmutador resistivo.

El proceso real es el siguiente: Cuando la muestra está en estado prístino (virgen) se aplica una tensión creciente hasta llegar a un valor generalmente > 3 V. Previsiblemente, la corriente aumentará rápidamente hasta llegar a un valor que, por precaución, estará limitado para no dañar la muestra. Una vez realizado el forming, ya es posible realizar el primer SET a la memoria. La polaridad del SET será aquella sobre la que se realizó el forming por primera vez. El forming es un proceso irreversible y solo se puede completar una vez sobre la muestra.

La corriente límite (compliance current) para cada proceso de forming puede afectar a la formación del filamento conductor en el aislante. Es también muy importante limitar la corriente cuando se realiza el forming, ya que al crecer de manera exponencial se podría romper la muestra (la potencia alcanzaría valores muy elevados). En la Fig. 3.5 se muestra un proceso de electroforming.

3.3.2. Clasificación según su polaridad

La polaridad de una memoria electrónica determina el signo del voltaje aplicado para los dos estados posibles (SET y RESET). Además, en los cambios de estado el signo de la corriente¹ se

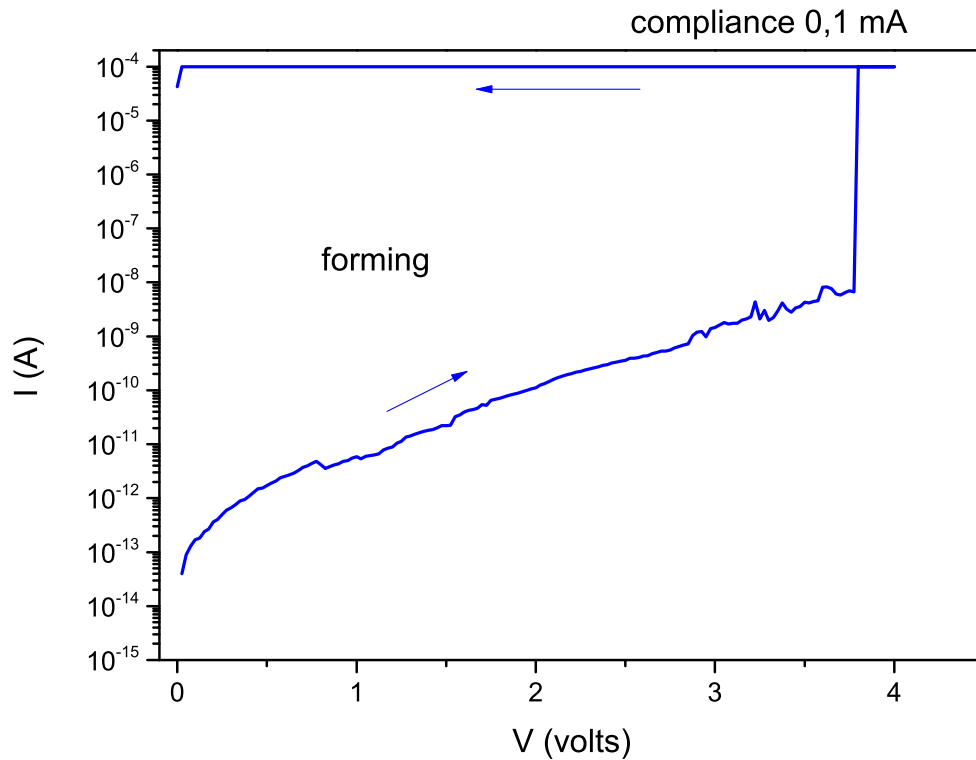


Figura 3.5: Proceso de electroforming | 10 nm | Lote 8356-1

invierte (pasa de ser positiva a ser negativa, o a la inversa).

Teniendo esto en cuenta, existen tres tipos de polaridad en las memorias resistivas: unipolares, bipolares y apolares.

Memorias resistivas unipolares

Las memorias encuadradas en esta categoría poseen la particularidad de que el signo de los voltajes de SET y RESET es el mismo y puede ser tanto positivo como negativo. La polaridad de la memoria queda determinada por el signo del voltaje al realizar el proceso de “electroforming”, a partir del cual se forma un filamento conductor en el dieléctrico. Sin embargo, el RESET necesita una polaridad específica debido al funcionamiento físico del proceso de oxidación, el cual genera los aniones de oxígeno que forman el filamento.

En las memorias resistivas, generalmente, la tensión a la que se alcanza el SET y el RESET no es la misma. Esto es debido a que la formación del filamento y su posterior destrucción normalmente no tienen el mismo coste energético (en términos de voltaje). Por ello, la caracterización de este tipo de memorias no es trivial, dado que es posible que la tensión de cambio de estado varíe entre diferentes ciclos y dificulte la automatización de las mediciones. Las herramientas que

¹En las visualizaciones que aparecen a lo largo del documento, el eje Y está representado en **valor absoluto**, aunque hay que saber que la corriente de una polaridad tiene el signo contrario al de la polaridad opuesta.

permiten realizar mediciones programadas implican un alto coste, bien temporal (programación de la herramienta concreta para llevar a cabo los tests) o bien económico (equipos de medida con prestaciones elevadas). En la Fig. 3.6 se pueden observar distintos ciclos (I/V) de SET y RESET, respectivamente.

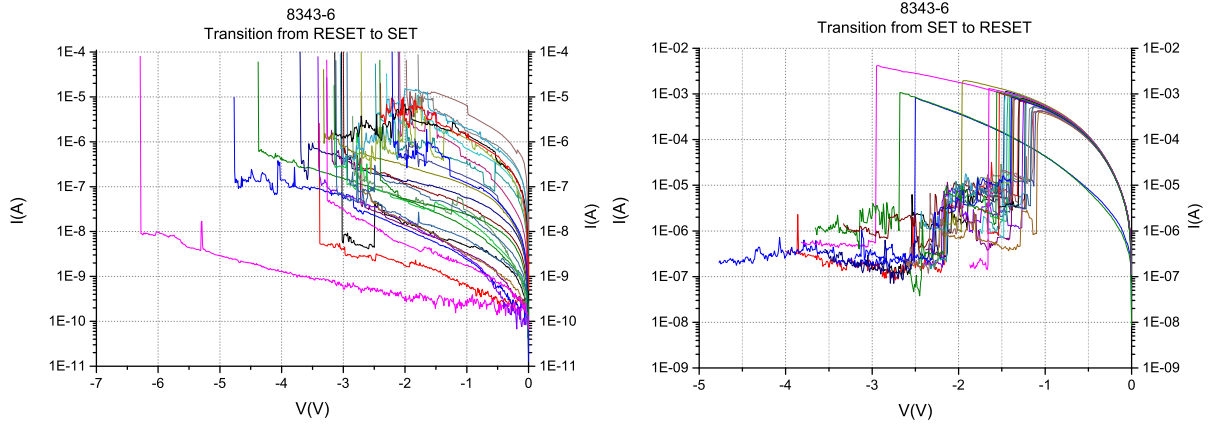


Figura 3.6: Ciclos de SET y RESET en una muestra unipolar | Lote 8343-6

Memorias resistivas bipolares

La bipolaridad en las RRAMs implica que existe una polaridad en la cual se realiza el SET, mientras que en la otra se realiza el RESET. Al igual que en las unipolares, la polaridad de SET viene marcada por la del “electroforming”. Esta clase de muestras son más sencillas de medir, dado que no hay que regular diferentes niveles de tensión en la misma polaridad. En la Fig. 3.7 se representa un ciclo completo de SET y RESET bipolar.

Memorias resistivas apolares

Acerca de este tipo de memorias no se ha investigado en profundidad, aunque se pueden inferir ciertos comportamientos característicos. Por ejemplo, la indeterminación de la polaridad de SET y RESET. Es posible que se produzca el cambio de estado en cualquier polaridad. Debido a este impedimento, este tipo de memorias no son adecuadas para su uso en sistemas reales.

3.3.3. Clasificación según la capa de aislante

Dependiendo del número de estratos de aislante, existen dos tipos de muestras: de capa única (“single layer”) o de múltiples capas (“multi-layer”).

Capa única

En la muestra solo existe una capa de aislante entre los dos electrodos metálicos. Dependiendo de la capacidad del aislante para aglutinar aniones de oxígeno (en el caso de la formación de filamentos de oxígeno) o de permitir la creación de un filamento que contenga átomos de metal,

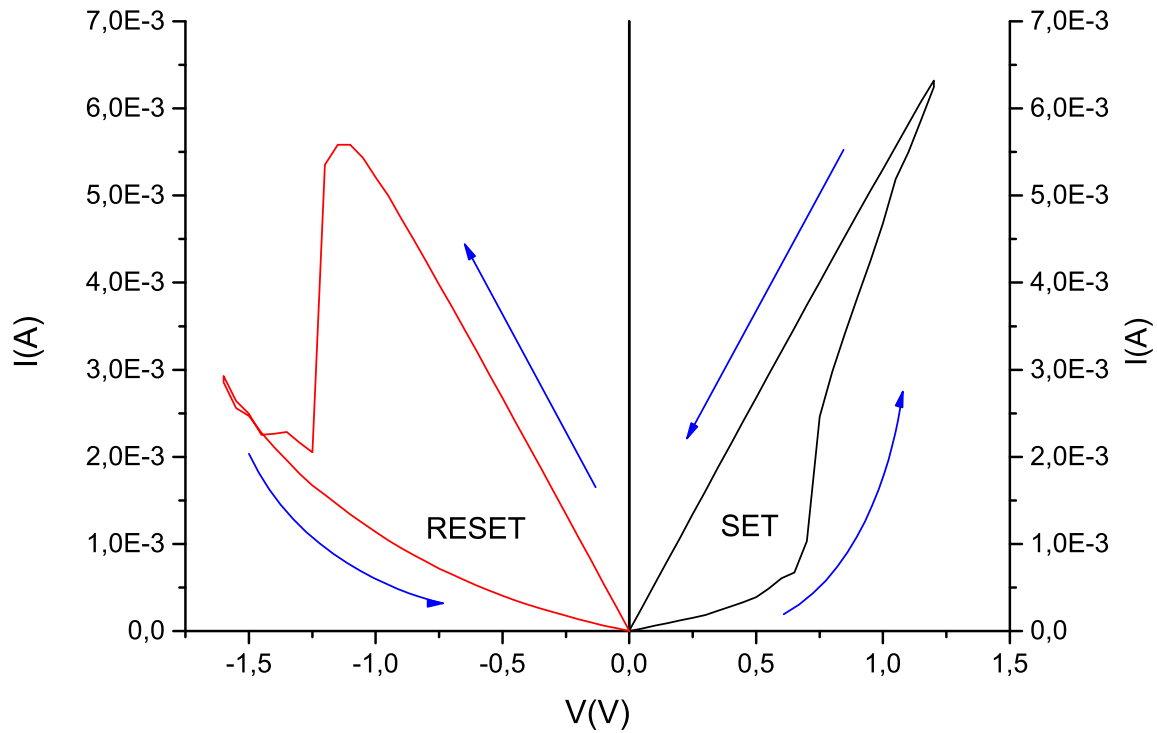


Figura 3.7: Ciclo completo de SET y RESET en una muestra bipolar | 20 nm | Lote 8356-1

podrán existir diferencias en el comportamiento de la memoria a medida que se aumente o reduzca la separación entre los electrodos.

Múltiples capas

Existe la posibilidad de que el aislante se subdivide en varios niveles simétricos, formándose así capas de grosor más reducido que en las muestras de una única capa. Es interesante tener en cuenta esta opción para caracterizar el comportamiento de diferentes configuraciones de memoria, ya que es posible obtener una mejor respuesta al usar componentes auxiliares al aislante central.

Capítulo 4

Procedimiento experimental

Dentro del ámbito de la investigación es esencial disponer de medidas cuantificadas para poder elaborar análisis y describir los comportamientos de la entidad/objeto bajo estudio.

Por ello, el proceso de **adquisición de datos** es extremadamente importante de cara a la validez de los resultados. Por otro lado, el proceso de **filtrado** debe ser lo más eficiente posible, puesto que esta fase intermedia no aporta información nueva ni permite analizar de manera eficaz los datos. Por último, la precisión del investigador al llevar a cabo el **análisis de los datos** determina la adecuación a la realidad del modelo de comportamiento inferido.

A continuación se describen los tres procesos mencionados anteriormente que se han llevado a cabo durante el proyecto.

4.1. Adquisición de datos

Para obtener datos susceptibles de ser analizados posteriormente, se ha hecho uso de los equipos de medida mencionados en el capítulo anterior. La metodología seguida tiene dos variantes que pueden ser clasificadas por el entorno de medición:

4.1.1. Mediciones en la mesa de puntas

En este tipo de medidas, se deposita un fragmento de oblea (muestra) en el soporte bajo las lentes del microscopio. Posteriormente, se conectan dos puntas de acero a los correspondientes electrodos de la muestra. Una vez completada esta tarea, se realiza la conexión por cable desde cada punta al equipo de medida.

El sistema de medición aplica una variable eléctrica (típicamente voltaje) sobre uno de los electrodos de la muestra y automáticamente se van almacenando los datos. El principal problema que surge al utilizar la mesa de puntas es la desnaturalización de los resultados debido a la acción agresiva de las puntas sobre los electrodos de la muestra. Por ello, siempre resultan más fiables las medidas dentro del criostato.

4.1.2. Mediciones en el criostato

Cuando se va a realizar una medida en el criostato hay que realizar los siguientes pasos:

1. Extraer el vástago del interior del criostato
2. Si fuera necesario, retirar la muestra actualmente conectada. Si se ha conectado mediante nitrato de plata, se puede usar acetona para separar los cables de conexión de la placa. En el caso de que esté soldada, será necesario utilizar un soldador para separar las conexiones.
3. Conectar la nueva muestra depositada en una placa base. Se aplica una capa de grasa (aislante) bajo la placa para conseguir que se quede adherida y que no conduzca hacia el propio vástago. También será necesario efectuar un corte sobre la placa para dividirla en dos secciones aisladas. De esta forma, no se producirá un cortocircuito al aplicar las conexiones.
4. Conectar una hebra de aluminio que una los electrodos de la muestra con las dos secciones en la superficie de la placa. Se consigue con la máquina específica para la tarea.
5. Insertar el vástago en el criostato
6. En caso de que sea necesario por el tipo de medición, se puede introducir nitrógeno líquido en una de las cavidades del criostato. Asimismo, también se puede conectar un sistema calefactor para regular la temperatura.
7. Por último, es necesario conectar el criostato al equipo de medida para realizar experimentos.

Como se ha descrito anteriormente, las medidas en el criostato son mucho más fiables que en la mesa de puntas, debido a que el habitáculo en el que se introduce el vástago está aislado del exterior. De la misma manera, utilizar el criostato también posibilita la medición con variaciones en la temperatura (útil para caracterizar el comportamiento de la memoria).

4.2. Filtrado de datos

Para realizar el filtrado de los datos se han usado dos técnicas a lo largo de proyecto. Son descritas a continuación:

4.2.1. Plantillas de Excel

Inicialmente se llevó a cabo el filtrado de los resultados (ficheros .xls) que proporcionaba la herramienta KITE con Excel. Esta tarea resultaba excesivamente ineficiente y propensa a errores, por lo que se decidió mejorar el proceso.

La mejora consistió en establecer un fichero-plantilla para cada tipo de experimento. De esta forma se podían filtrar con mayor celeridad los datos. Aun así, era demasiado engorroso y seguía suponiendo una pérdida notable de eficiencia. Por ello, se tomó la determinación de elaborar unos scripts que funcionasen en la herramienta de análisis Origin y automatizasen en gran medida el proceso. Cabe destacar que los scripts tuvieron como objetivo acelerar el filtrado para después construir representaciones gráficas.

4.2.2. Scripts de filtrado

Se explican con detalle en la sección 4.5.

4.3. Análisis de datos

El análisis de los datos se ha llevado a cabo con la misma herramienta de la fase de filtrado (Origin). En este caso, con las hojas resultado ya creadas, se trata de generar visualizaciones gráficas de los datos que permitan analizar el comportamiento de las muestras bajo estudio. Una hoja de datos de Origin tiene el aspecto de la Fig. 4.1.

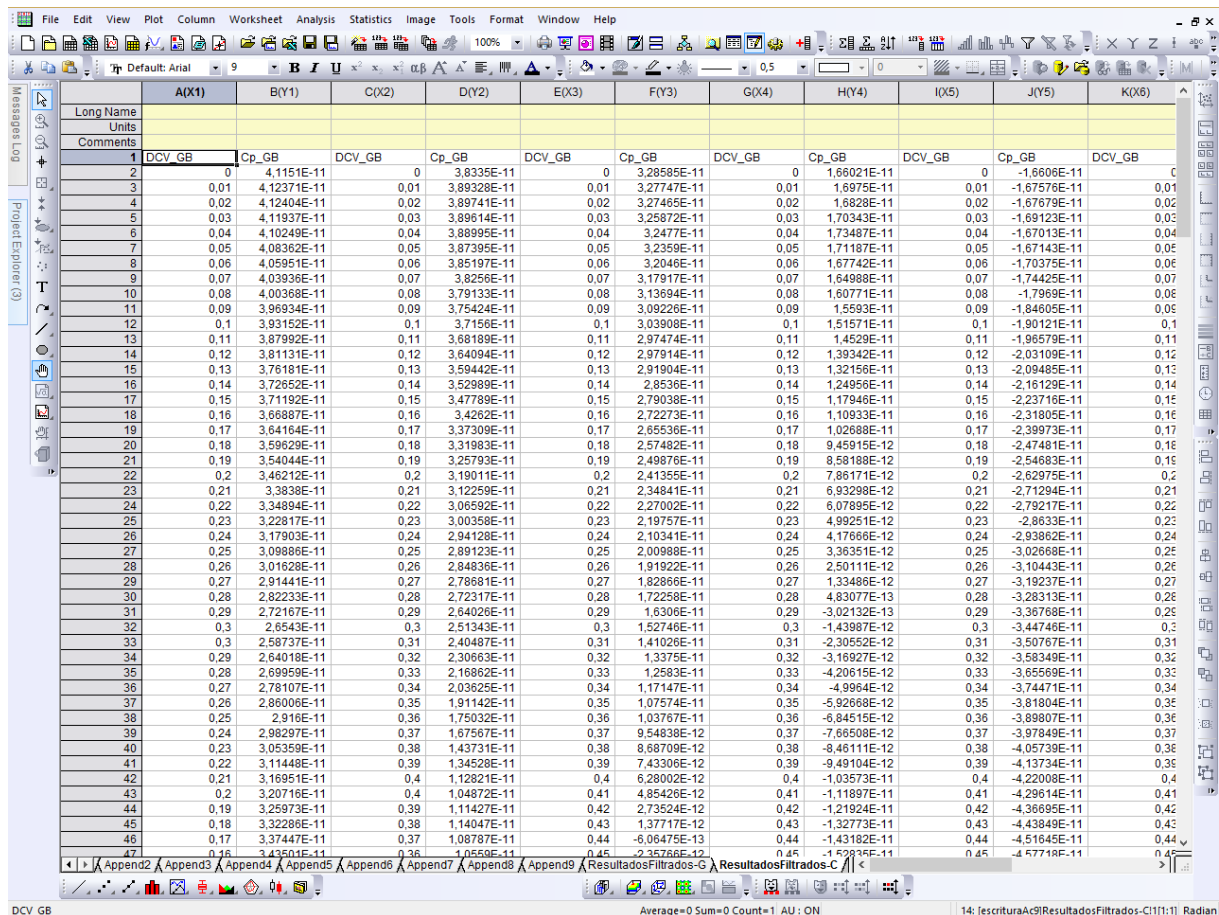


Figura 4.1: Hoja de datos en Origin

En el lado izquierdo de la interfaz se localizan las secciones de “Messages Log” y “Project Explorer” (Fig. 4.2) Al abrir el Explorador del Proyecto (Fig. 4.3) se puede navegar por la jerarquía de directorios del proyecto (parte superior) y acceder, crear, borrar o modificar distintos tipos de ficheros dentro de un directorio (workbooks, grafos, libros de Excel, etc.)

La mayoría de las visualizaciones son en 2 dimensiones, siendo habitualmente preferible subdividir las variables en dos o más diagramas frente a representar 3 variables en un diagrama 3D. Origin facilita en cierta medida la construcción de gráficas, ya que establece el rango de abscisas y ordenadas entre sus valores extremos (aunque añade un margen adicional).

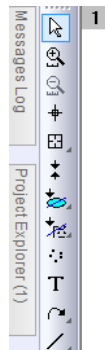


Figura 4.2: Secciones desplegables

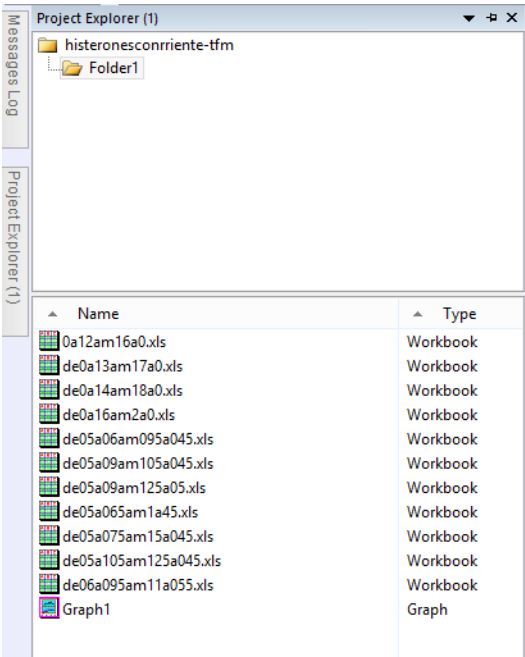


Figura 4.3: Explorador del proyecto

Para generar una visualización es necesario seleccionar primero el rango de columnas de datos deseado. A continuación, bien a través de los menús de la barra superior o usando un menú desplegable (Fig. 4.4), se obtiene una visualización básica. Las opciones de aspecto, rango de valores mostrado, escala, etc. pueden ser modificadas con un menú gráfico (Fig. 4.5).

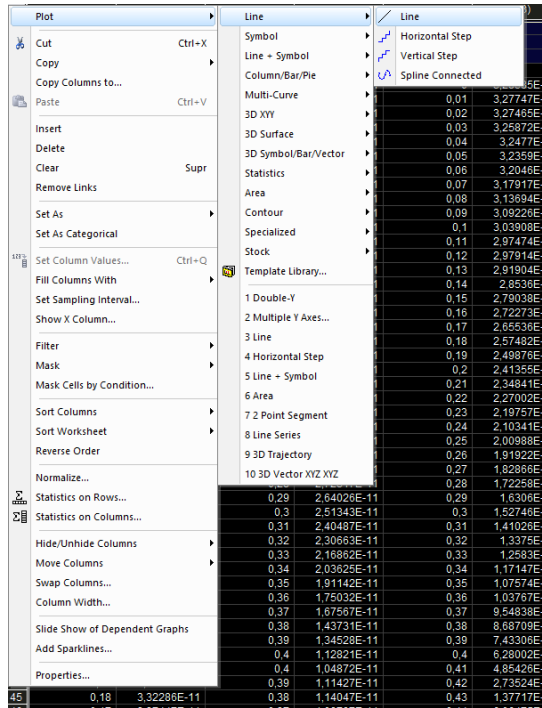


Figura 4.4: Menú de visualizaciones

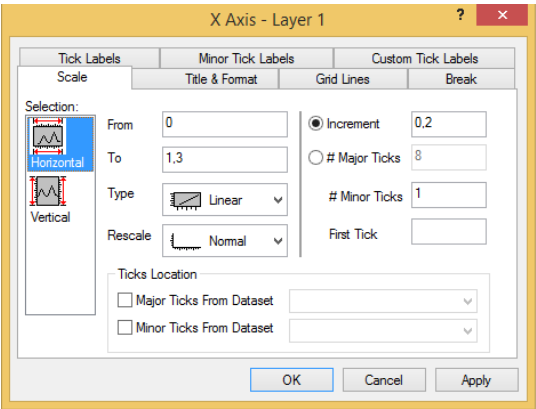


Figura 4.5: Configuración de la visualización

La herramienta permite generar representaciones gráficas a través de su Interfaz de Usuario y también a través de scripts. Para crear las visualizaciones, al igual que en la fase de filtrado, también se implementaron scripts en LabTalk.

4.3.1. Scripts de representación

Se explican con detalle en la sección 4.5.

4.4. Procedimiento general dentro de Origin

En este apartado se explica la secuenciación de las tres fases, desde la perspectiva de Origin. Normalmente, para procesar las medidas se sigue una serie de pasos:

1. **Carga de los ficheros** Excel que se obtienen como salida de la herramienta KITE (en el SCS-4200). Los nombres de las columnas de estos ficheros pueden ser redefinidos antes de completar la adquisición, aunque para que los scripts mencionados con anterioridad funcionen correctamente tienen que mantener los nombres de la configuración por defecto.
2. **Organización de los datos** en distintos directorios dentro de uno o varios proyectos de Origin. La separación en carpetas específicas favorece la aplicación de los scripts, ya que estos habilitan el procesamiento de todos los datos dentro de cada una de ellas. Habitualmente, durante el desarrollo de la investigación en el proyecto, se suelen dividir los datos en tres clases: IV, GCV e histerones. Estos son los tres tipos de experimentos más comunes. Si se hubieran efectuado otras pruebas (transitorios, G-C a distintas frecuencias, etc.), estas podrían ser agregadas en diferentes directorios, respetando la estructura jerárquica.

Dentro de cada directorio raíz una posibilidad es separar entre *datos* y *visualizaciones*. Asimismo, también existe la posibilidad de añadir un directorio raíz que englobe las representaciones visuales de todas las clases de experimentos. De igual modo, es esencial mantener un orden en la clasificación de los resultados.
3. **Ejecución de los scripts de filtrado y representación** sobre los datos en bruto. La precisión, sencillez y comodidad conseguidas al automatizar estos pasos facilita mucho la antes tediosa tarea de trabajar con los datos.
4. **Exportación de los datos** para su inclusión en artículos académicos. Origin permite exportar fácil y adecuadamente las gráficas obtenidas, así como personalizar sus datos (por ejemplo, el título o la leyenda).

La combinación de las tres fases resulta en la obtención de gráficas que pueden ser estudiadas y analizadas posteriormente. En la sección posterior se explica cómo están organizados y cómo funcionan los scripts de filtrado y representación.

4.5. Scripts de LabTalk

La programación de los scripts se completó dentro de la herramienta Origin, utilizando su propio lenguaje de scripting denominado “LabTalk”. Debido a que no se disponía de ningún tipo de experiencia con este lenguaje de programación, fue necesario pasar por un proceso de adaptación a la sintaxis, operadores, clasificación de las variables, etc. En el siguiente apartado se describen de manera muy resumida las características de LabTalk.

4.5.1. Descripción resumida de LabTalk

En LabTalk el código se organiza en secciones, cada una de ellas identificada por una etiqueta. Existe un conjunto de registros (símbolo “%” + {A-Z}) que permiten almacenar una variable de tipo string que es compartida entre todas las secciones de todos los ficheros que abarque el programa. Es habitual definir la primera sección del fichero ejecutable con el nombre “Main”, de tal forma que se pueda lanzar el programa de la forma más sencilla posible (por defecto, LabTalk ejecuta la sección “Main” de un fichero si no se le pasan parámetros específicos). En la sección “Main” se realizan las llamadas a las secciones del código (de forma análoga a la llamada a métodos en otros lenguajes). Además, también es posible pasar argumentos a las secciones.

En lo referente a los registros, cabe destacar que no es posible utilizar los 26 disponibles debido a que los rangos [%C–%I] y [%X–%Z] están reservados para su uso como variables del sistema. Tampoco es posible modificar el valor de los registros especiales que comienzan con el símbolo “@”, como p.ej. el registro %@F, que contiene el nombre del directorio activo dentro de Origin.

Este lenguaje permite utilizar sentencias que equivalen a GOTOs (saltos incondicionales hacia partes del código). Verbigracia, utilizando las etiquetas de sección es factible reiniciar el bloque de código directamente con una sola línea y sin tener que usar ningún tipo de bucle. También es posible hacer múltiples saltos entre secciones de distintos ficheros, pero obviamente esto puede complicar muchísimo la interpretación del código y su depuración. Un ejemplo de salto incondicional es el siguiente:

*** Las líneas de código en LabTalk acaban con punto y coma por regla general, aunque puede haber excepciones. ***

```
1 // GOTO sección 'objetivo' dentro del fichero 'Test.ogs'
2 ...
3 run.section(Test, objetivo);
4 ...
5 // GOTO sección 'destino' dentro del fichero 'Pruebas.ogs' pasando dos
   argumentos
6 string arg1$ = 'argumento1';
7 int arg2 = 1010;
8 run.section(Pruebas, destino, arg1 arg2);
9 ...
```

Dentro del código de los scripts se utilizan estas sentencias para distribuir el flujo de ejecución hacia el fichero correspondiente con los parámetros de entrada del usuario.

Se pueden construir funciones dentro de LabTalk para encapsular porciones de código reutilizables. Si se desea disponer de una función que pueda ser llamada desde cualquier fichero de un proyecto, es necesario utilizar el parámetro “@glob=1” para marcarla como global. Otra opción es declarar las funciones dentro de la misma sección del mismo fichero en el que son llamadas para que estén dentro del alcance (“scope”).

LabTalk obliga a definir el tipo de las variables (int, string, double, etc.) en la mayoría de casos. Existe un caso particular en el que no se declara el tipo de las variables: al crear variables globales a todo el proyecto de Origin para los tipos **double**, **string** y **dataset**. Obviamente, al no estar definido el tipo de manera explícita, se tiene que inicializar la variable a la vez que se declara.

Las variables de tipo string tienen una particularidad similar a la de otros lenguajes de scripting como Bash: para acceder a la cadena de texto que almacenan, así como para asignarles un valor, es necesario añadir el símbolo “\$” (puede ir al final del nombre de la variable o al principio si el nombre está entre paréntesis). A continuación se puede ver un ejemplo:

```
1 // Asignación de una cadena de texto a una variable de tipo string
2 string cadenaTexto$ = 'Hola, mundo!';
3
4 // Asignación de la variable de tipo string a un registro
5 %K = cadenaTexto$;
```

LabTalk posee una peculiaridad al utilizar estructuras condicionales: obligatoriamente son binarias. Esto implica que solo puede haber una sentencia “if” por cada sentencia “else”. No se permiten sentencias “else if”, aunque sí se permiten estructuras condicionales binarias anidadas. La alternativa a esta cuestión es utilizar una estructura “switch”, en la cual sí es posible diferenciar entre múltiples valores de una expresión o variable dada. Es bastante curioso que, por ejemplo, la expresión “else” deba estar seguida de un espacio en blanco para no dar lugar a un error al ejecutar el código. En el siguiente fragmento de código se puede ver un ejemplo de sentencia if-else con una sintaxis correcta.

```
1 // Sentencia if-else correcta
2 int flag = 1;
3 if(flag == 1)
4 {
5     // Se muestra una ventana de diálogo al usuario
6     type -b 'El valor de la bandera es 1';
7 }
8 else
9 {
10     type -b 'El valor de la bandera es 0';
11 }
```

Es posible gestionar errores en el programa a través de la comprobación de la variable de error de Origin. Primero es necesario almacenar el valor de la bandera de error de Origin. Posteriormente, se encapsula el código que puede producir el error y finalmente se realizan las acciones pertinentes para tratar el error. En Origin, cuando se produce un error en una sección

de un fichero y este es gestionado, primero se ejecuta el código del error (similar al tratamiento de excepciones en otros lenguajes) y después se retorna a la siguiente línea de código del programa desde el que se ha llamado a la sección correspondiente del fichero.

Por ejemplo, si se produce un error en la sección “Main” del fichero “plot_Graph”, después de gestionar el error se retorna a la sección “Plotting” del fichero “main_plot”, que es el que realiza la llamada a “plot_Graph”. La sección “Plotting” acaba y desde el “Main” se llama a la sección “MessageToUser” en la que, dependiendo del valor de la variable de error se muestra un mensaje distinto al usuario. En el siguiente fragmento de código se puede ver cómo funciona la gestión de errores en LabTalk.

```
1  int iNOE = @NOE;  // Guarda el valor de la bandera de salida de error de
    Origin
2  // Este fragmento de código puede generar un error
3  {
4      @NOE = 0; // Desactiva los mensajes de error de Origin
5      vErr = 1; // Asigna "true" a la variable de error
6      page.active$ = sheetName$; // Esta línea de código es la que puede
    producir el error
7      vErr = 0; // Si no hay errores, se reasigna la variable de error a "
    false"
8  }
9  @NOE = iNOE; // Se restauran los mensajes de error de Origin
10 if(vErr)
11 {
12     /* Se ha producido un error. Se muestra mensaje por consola y se asigna
        el valor "1" a la variable global de errores en el proceso de
        graficado (ERROR_PLOT = 1) */
13     ty ERROR AL GENERAR LA VISUALIZACIÓN;
14     ERROR_PLOT = 1;
15 }
```

La lectura de datos introducidos por el usuario se puede realizar utilizando un formulario generado a través de la función “getn”. La versión de LabTalk utilizada no permite utilizar listas de selección, por lo que es necesario introducir a mano las variables. Por otro lado, sí que permite utilizar selecciones binarias (checkboxes) para activar o desactivar algún parámetro. En cualquier caso, se puede fijar un valor predeterminado para cada variable del formulario. Los scripts en LabTalk tienen la extensión “ogs”.

4.5.2. Organización de los scripts

(Para consultar la estructura jerárquica de los scripts en un diagrama, véase la sección A.3)

- Para poder ejecutar los scripts es necesario disponer de la herramienta Origin (versión 9 o superior).
- Para que se puedan ejecutar directamente, es necesario almacenarlos en el directorio “User Files” generado al instalar Origin.

- *Los scripts que comienzan por “main_” son los que hay que ejecutar (contienen el código principal).*

Scripts para el filtrado de datos

Los scripts se organizan en diferentes ficheros que contienen las funciones de filtrado para cada tipo de experimento. La estructura de los scripts es la siguiente:

- **main_filtering:** Fichero principal y ejecutable. Gestiona la entrada de datos del usuario y las llamadas al resto de ficheros.
- **filtering-IV:** Filtrado de los datos para experimentos de corriente respecto al voltaje.
- **filtering-It:** Filtrado de los datos para experimentos de corriente respecto al tiempo.
- **filtering-GC-V:** Filtrado de los datos para experimentos de conductancia y capacidad respecto al voltaje.
- **filtering-GC-t:** Filtrado de los datos para experimentos de conductancia y capacidad respecto al tiempo.
- **filtering-GC-f:** Filtrado de los datos para experimentos de conductancia y capacidad respecto a la frecuencia.
- **histeron-IV:** Filtrado de los datos para ciclos de histéresis de la corriente respecto al voltaje.
- **histeron-GCV:** Filtrado de los datos para ciclos de histéresis de conductancia y capacidad respecto al voltaje.

Scripts para la representación de datos

Esta otra categoría de scripts se centra en generar una representación inicial de los datos, que deberá ser retocada (aunque se pretende que lo menor posible) para adaptarse a las características o a la apariencia deseada de cada tipo experimento. Por analogía con los anteriores programas, automatizan el proceso de creación de visualizaciones. Su estructura es como sigue:

- **main_plot:** Contiene el flujo de ejecución principal. Gestiona la entrada de datos y las llamadas a funciones.
- **plot_Graph:** Genera una visualización mejorada, (respecto a la básica de Origin) de manera automática y con gestión de errores.

4.5.3. Funcionamiento de los scripts

Scripts para el filtrado de datos

Con la aplicación Origin abierta y los ficheros Excel importados (ver sección A.2), se puede ejecutar el proceso de filtrado.

1. Desde la terminal de comandos de Origin (Fig. 4.6) se ejecuta el script principal (“main_filtering”).

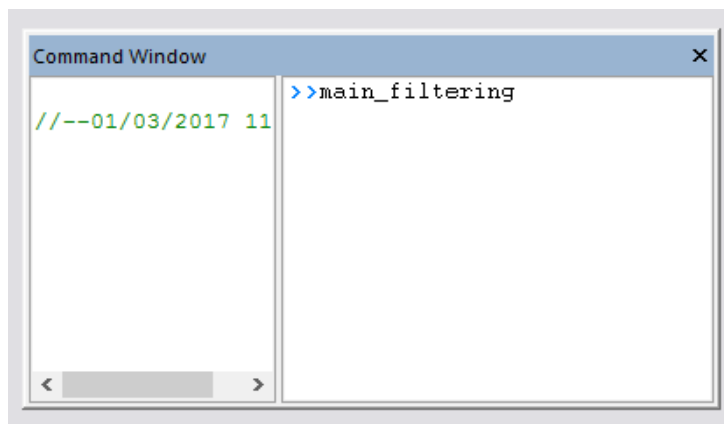


Figura 4.6: Consola de comandos: script de Filtrado

2. Se presenta al usuario el formulario de entrada de datos.

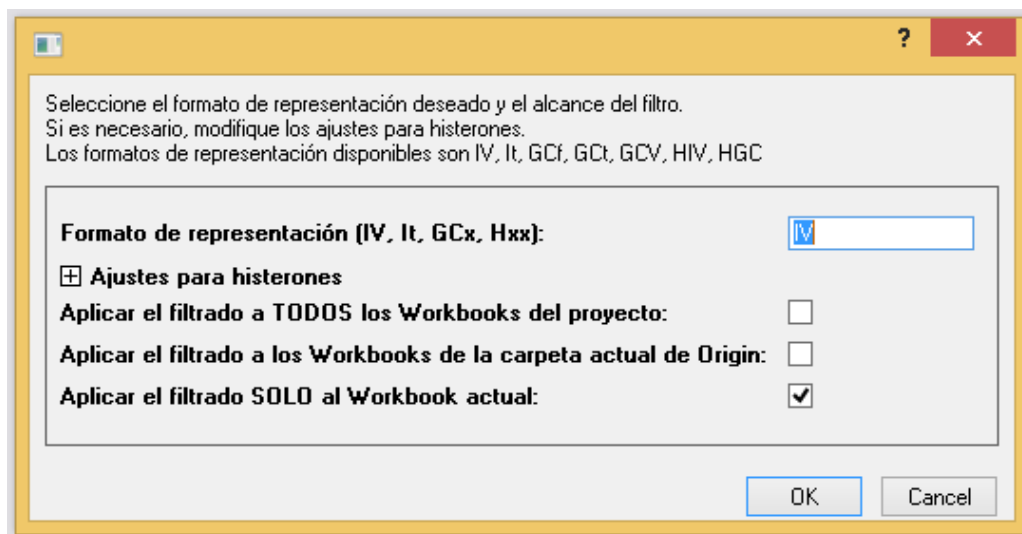


Figura 4.7: Formulario de entrada de datos: Filtrado

3. El usuario puede seleccionar los ajustes apropiados (Fig. 4.7). Se puede aplicar el filtrado a todo el proyecto, a la carpeta de Origin actual o solo al libro de datos (Workbook) actualmente seleccionado. Si el formato de representación es del tipo “Hxx” (histerones), es necesario modificar los ajustes para histerones.
4. Una vez introducidos los datos, se comprueba dentro de un bucle si los datos introducidos son válidos. Si hubiese algún dato inválido, se muestra la información del error al usuario en una ventana de alerta y se vuelve a activar la recogida de datos del usuario. Si el usuario quisiera salir del programa, el botón “Cancelar” lo permite.

5. Cuando el usuario haya seleccionado una configuración correcta, el proceso de filtrado comienza.
6. Dentro del fichero “main_filtering” existe una sección en la que un distribuidor (switch) encamina la tarea hacia su ejecución (cada grupo de funciones está en un fichero diferente).
7. Dentro de cada fichero hay una sola sección con funciones implementadas junto al código ejecutable. En Origin, salvo que se definan las funciones con el parámetro “@glob=1” antes de su definición, es necesario que las funciones estén declaradas dentro de la misma sección que el código que las invoca. Esta es la opción que he elegido para hacer los scripts. El ahorro en el tamaño del fichero respecto a tener tres secciones distintas prácticamente idénticas para gestionar el nivel de granularidad es de aproximadamente un 60 % (y esto está relacionado directamente con el número de líneas de código).
8. En algunos casos no se pasan argumentos a las funciones, sin embargo LabTalk permite enviar un número arbitrario de parámetros, así como enviarlos por referencia (es necesario incluir la palabra clave *ref* antes del tipo, en la declaración de los parámetros de la función).
9. Si la función ejecutada realiza un filtrado de los datos, es posible que Origin muestre una ventana en la que hay que elegir el comportamiento de los filtros. Si se escoge la opción de “Sí, y no volver a preguntar”, no será necesario pasar por el tedioso proceso de aceptar individualmente el ajuste para cada filtro.
10. Las hojas resultado (Fig. 4.8) tienen un nombre que concuerda con el formato de representación y con la variable proyectada sobre el eje Y.

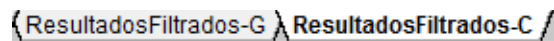


Figura 4.8: Nombre de las hojas filtradas

Una vez completado el proceso de filtrado, la siguiente fase consiste en representar los datos. En el siguiente apartado se desarrolla esta cuestión.

Scripts para la representación de datos

El proceso a seguir para generar la representación de los datos es muy similar al de filtrado (ver sección A.2).

1. Se ejecuta el script principal (“main_plot”) desde la consola de Origin (Fig. 4.9).
2. Se solicitan los datos de entrada al usuario (de la misma forma que en el filtrado).
3. El usuario puede seleccionar los ajustes apropiados (Fig. 4.10). Se puede aplicar el filtrado a todo el proyecto, a la carpeta de Origin actual o solo al libro de datos (Workbook) actualmente seleccionado. Otra opción permite seleccionar escala logarítmica para el eje Y.

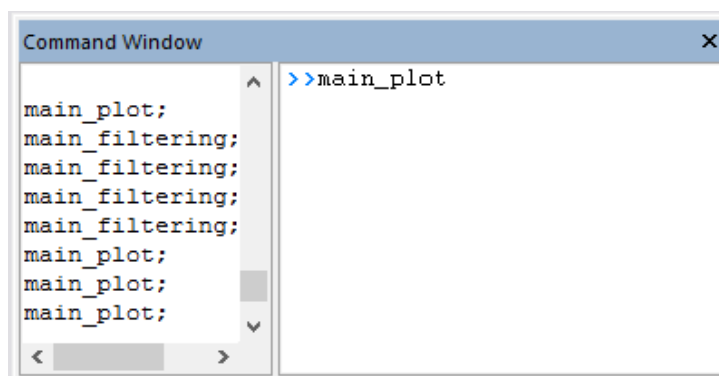


Figura 4.9: Consola de comandos: script de Representación

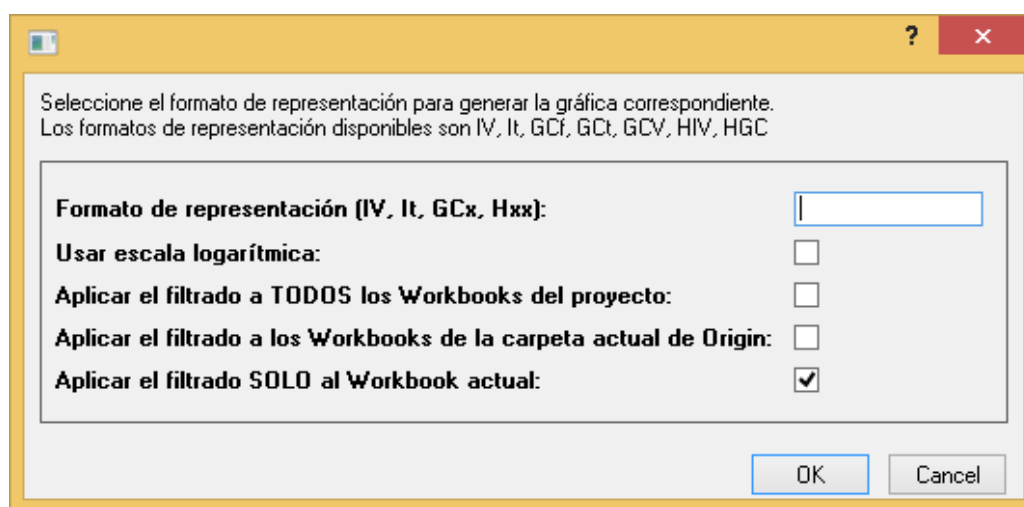


Figura 4.10: Formulario de entrada de datos: Representación

4. Una vez introducidos los datos, se comprueba dentro de un bucle si estos son válidos. Si hubiese algún dato inválido, se muestra la información del error al usuario en una ventana de alerta y se vuelve a activar la recogida de datos del usuario. Si el usuario quisiera salir del programa, el botón “Cancelar” lo permite.
5. Cuando el usuario ha seleccionado una configuración correcta, el proceso de filtrado comienza.
6. El fichero “main_plot” distribuye las llamadas a secciones de los ficheros correspondientes, en base a los datos de entrada del usuario (misma estructura que en el filtrado).
7. Si durante el proceso de generación de las gráficas se detectase algún fallo, se emite un aviso al usuario (Fig. 4.11) informándole de que se han producido errores y en el mismo mensaje se le sugieren medidas a tomar para solventar el problema.
8. Las gráficas resultado (Fig. 4.12) tienen el mismo nombre que los workbooks de datos de origen.

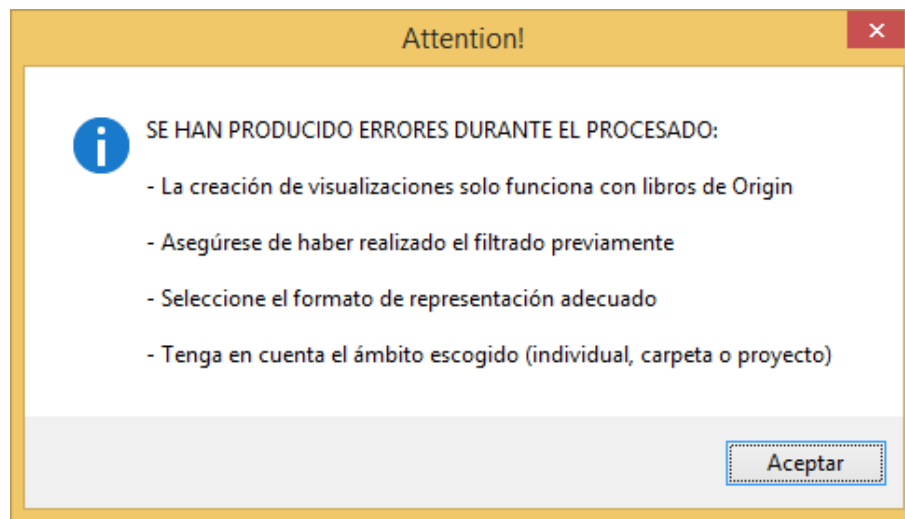


Figura 4.11: Mensaje de error en los scripts de representación

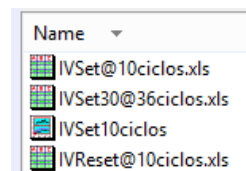
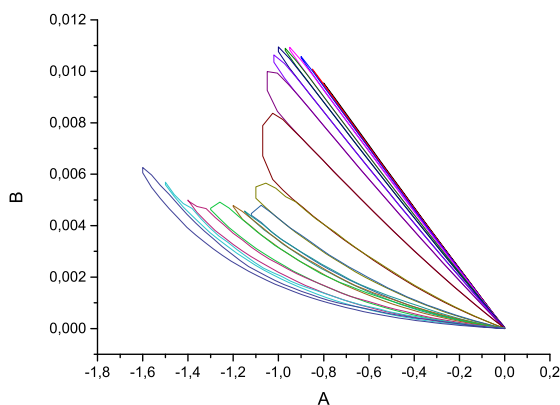
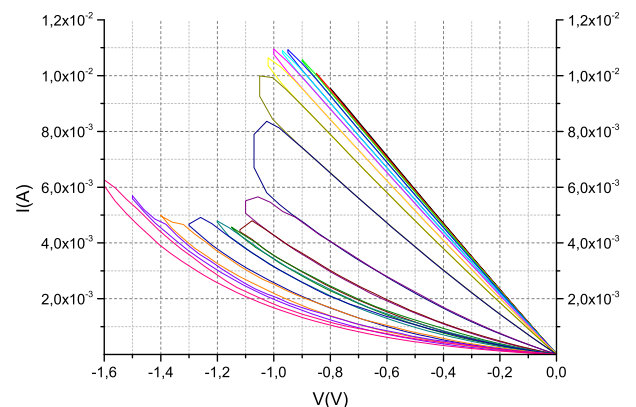


Figura 4.12: Nombre de las gráficas

Las diferencias entre una gráfica obtenida directamente desde los datos filtrados y otra generada a través del script de representación se pueden observar en la Fig. 4.13.



(a) Visualización sin usar el script



(b) Visualización usando el script

Figura 4.13: Diferencias entre la representación básica y la mejorada (script)

4.5.4. Interfaz de programación para LabTalk

Dentro de Origin 9 existe una interfaz integrada de desarrollo de scripts. Proporciona las funcionalidades básicas de cualquier IDE, como por ejemplo la posibilidad de depurar el código y ver el valor de las variables en tiempo de ejecución. La estructura visual de la herramienta también es muy similar a la de otros IDEs como Eclipse, con la estructura jerárquica, una consola para introducir comandos y la organización del código en pestañas.

Para poder ejecutar un fichero “.ogs” con código LabTalk, es necesario que exista al menos una sección con su etiqueta correspondiente. Se puede seleccionar la ejecución de una sección (que a su vez puede realizar llamadas a otras) o de un conjunto de líneas de código. El aspecto de la interfaz se puede ver en la Fig. 4.14.

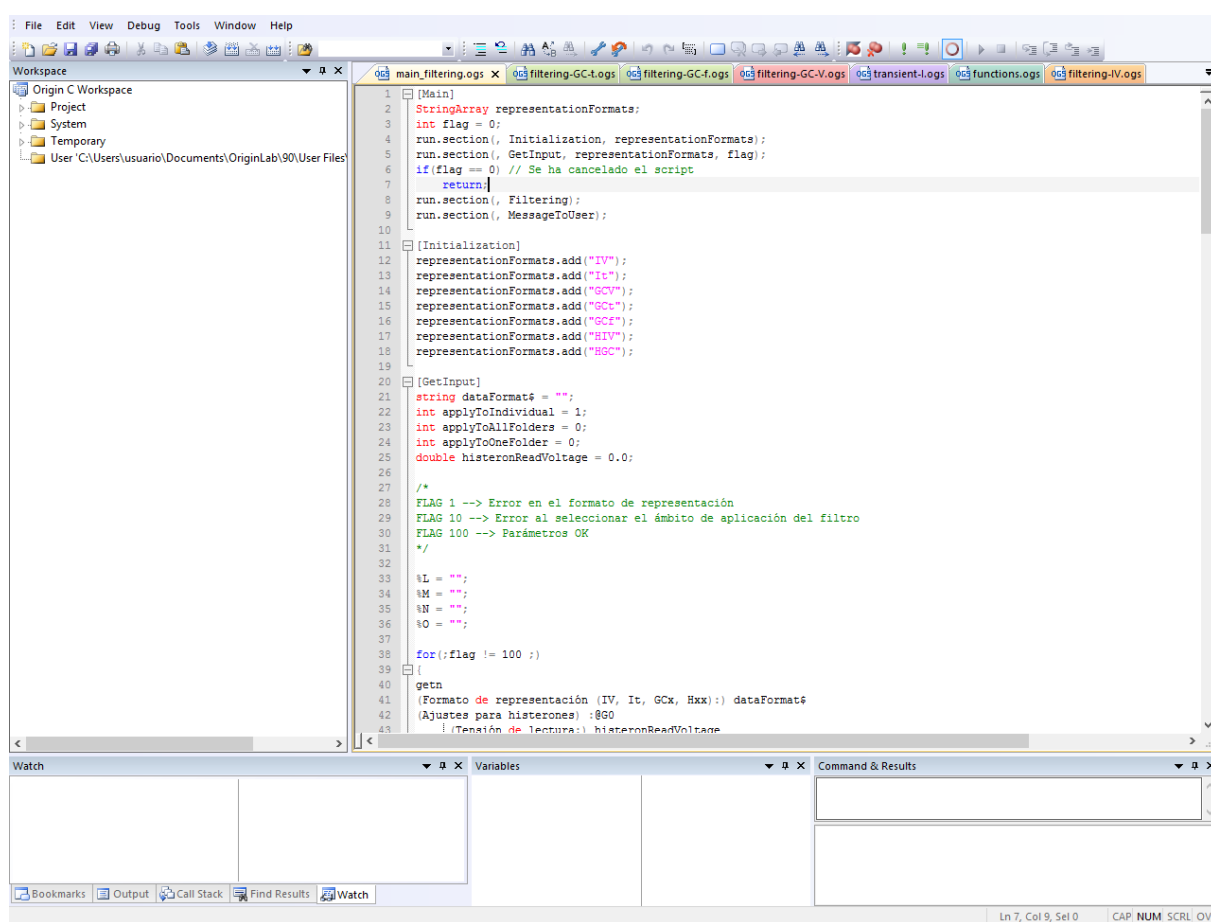


Figura 4.14: Vista general de la herramienta de programación

Parte III

Resultados obtenidos y discusión

Capítulo 5

Análisis y valoración de los resultados

5.1. Funcionamiento de la memoria

Las RRAMs, como ya se ha comentado, son memorias no volátiles y de acceso rápido. Al ser no volátiles almacenan el último estado alcanzado, siendo posible modificar este estado describiendo un ciclo de histéresis.

Cabe destacar que el comportamiento histerético puede ser de 3 tipos distintos para memorias resistivas: resistivo (memristores), inductivo (meminductores) y capacitivo (memcapacitores) [5].

5.1.1. Comportamiento resistivo

Los memristores fueron propuestos por L. Chua en 1971 [2], y basan la conmutación de estados en un cambio en la resistencia del aislante. Al producirse el SET, la resistencia del material se va reduciendo hasta que llega al estado LRS (Low Resistance State). De manera inversa, cuando se cambia al estado de RESET, la resistividad aumenta hasta que se alcanza el estado HRS (High Resistance State).

Para representar estos cambios de estado lo más sencillo es recurrir a una gráfica de corriente frente a voltaje (I/V). Aplicando la ley de Ohm, el cálculo de la resistencia en un determinado punto es directo.

En la Fig. 5.1 se pueden observar los diferentes ciclos de histéresis para corriente-voltaje en una muestra.

5.1.2. Comportamiento capacitivo

Los memcapacitores también desarrollan un comportamiento histerético respecto a la capacidad alcanzada en el SET y el RESET. Además, existe una correlación inversa entre la capacidad y la conductancia (la capacidad máxima se alcanza en el RESET y la mínima en el SET, mientras que la conductancia máxima se alcanza en el SET y la mínima en el RESET).

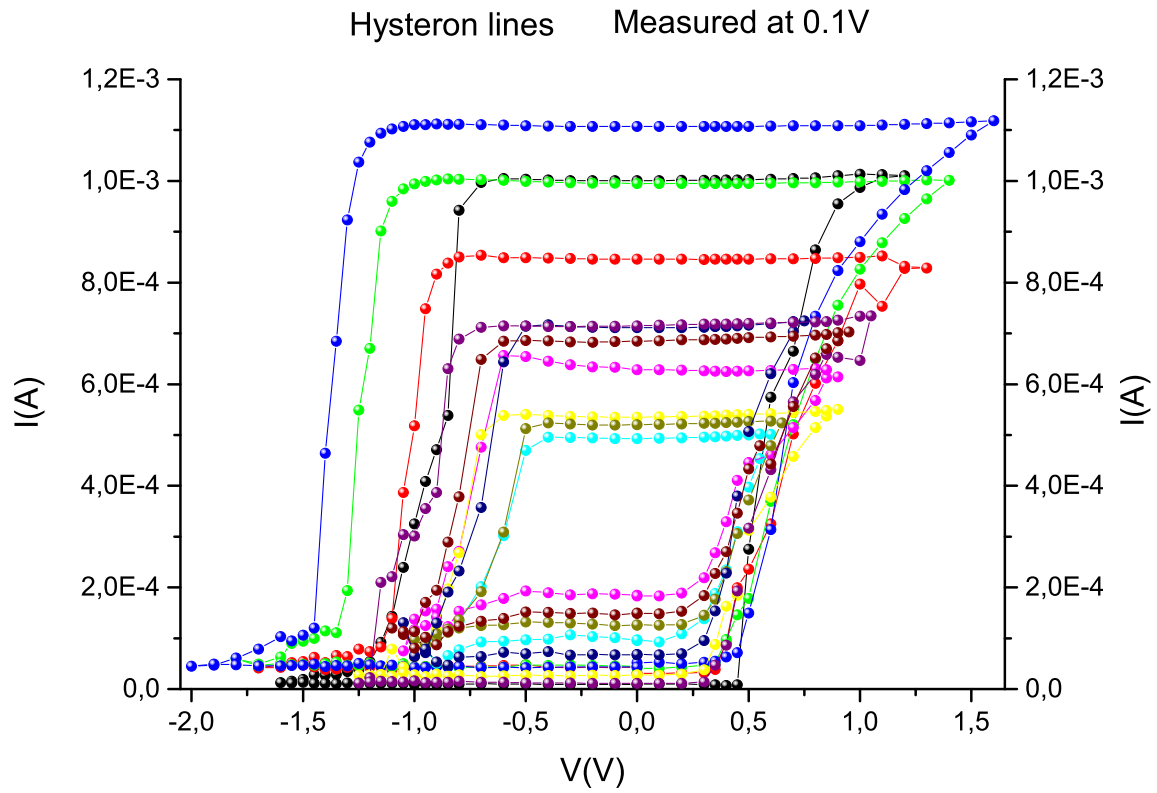


Figura 5.1: Comportamiento resistivo: ciclos de histéresis

La Fig. 5.2 representa los ciclos de histéresis para la capacidad (a la izquierda) y para la conductancia (a la derecha).

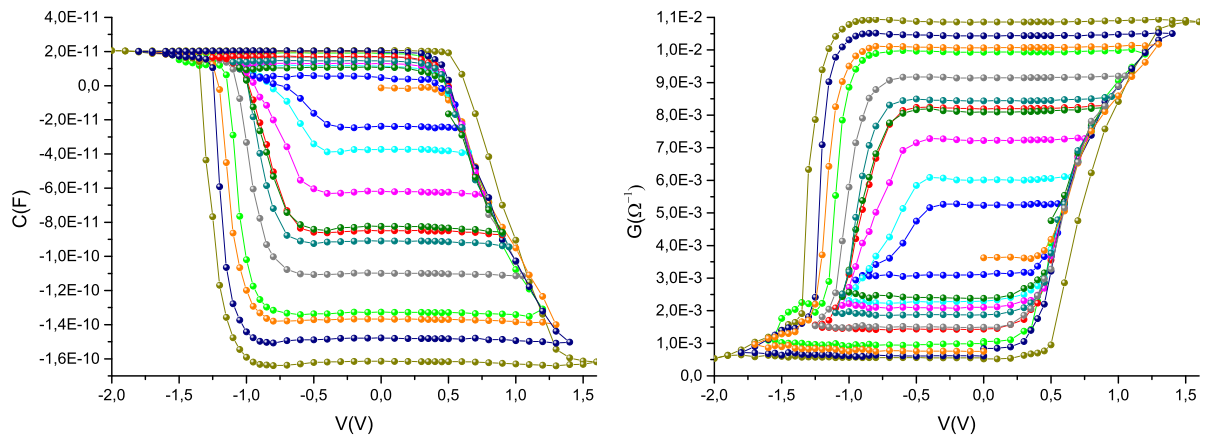


Figura 5.2: Comportamiento capacitivo: ciclos de histéresis

5.1.3. Comportamiento inductivo

Al igual que en los dos casos anteriores, algunas RRAMs presentan un tercer comportamiento histerético, en este caso respecto a la inductancia. Comparando el nivel de inductancia frente al de capacidad en un ciclo SET-RESET completo se puede observar que su comportamiento es antagónico. En la fase de SET, la inductancia crece hasta llegar al máximo (al contrario que la capacidad), mientras que en la fase de RESET alcanza un valor reducido.

5.1.4. Combinación de los tres comportamientos

Hasta hace algunos años, la posibilidad de que una memoria resistiva no volátil fuera memristor, memcapacitor y meminductor a la vez no había sido investigada en profundidad. Esto permite abrir una nueva ruta a través de la cual seguir explorando estas memorias, que pueden llegar a ser muy útiles y relevantes en el futuro.

La caracterización de la dependencia entre inductancia, capacidad y resistencia permitirá aplicar mayor precisión a las investigaciones y experimentos posteriores y aportará un mayor conocimiento de cara a la futura construcción de chips funcionales.

5.2. Resultados obtenidos

En la siguiente sección se describen los resultados recopilados y la caracterización inferida de las muestras bipolares analizadas.

5.2.1. Muestras bipolares

En este conjunto de experimentos se listan los que son realizados con mayor asiduidad sobre cualquier otra muestra de memoria resistiva.

Experimentos de corriente-voltaje

Este grupo de test abarca el conjunto de pruebas experimentales que caracterizaron la corriente frente al voltaje (I-V).

Experimento nº 1 (I-V)

Los primeros ciclos de I-V (SET y RESET) efectuados sobre las muestras mostraban una repetitividad excelente, así como una gran limpieza en las trayectorias de la corriente al conmutar entre estados (apenas había ruido en las medidas). En la Fig. 5.3 se puede ver un ciclo completo SET-RESET.

Experimento nº 2 (I-V)

Una vez establecido el “ciclo marco”, se procedió a realizar pruebas (I-V) a diferentes temperaturas dentro del criostato: primero durante el descenso desde temperatura ambiente hasta

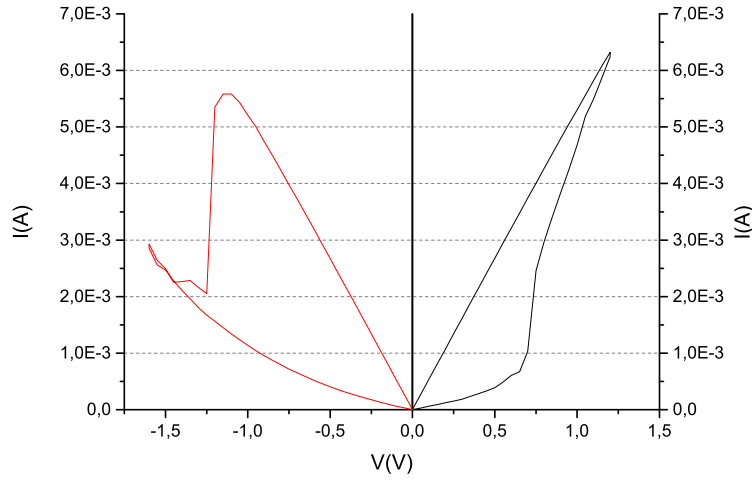


Figura 5.3: Experimento nº 1: ciclo marco

77K (temperatura del nitrógeno líquido) midiendo a 190K y a 150K. Los resultados se pueden ver en la Fig. 5.4

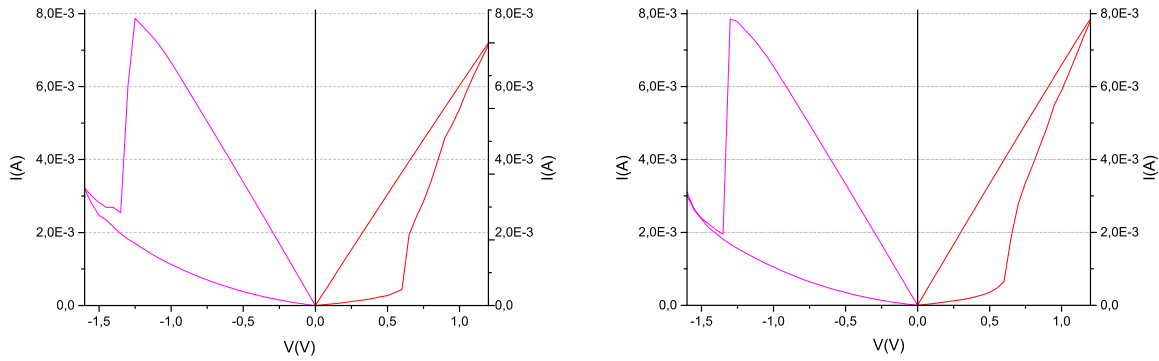


Figura 5.4: Experimento nº 2: medidas durante el enfriamiento

Experimento nº 3 (I-V)

Cuando se alcanzó la temperatura mínima se empezó a suministrar calor a través del radiador de un equipo auxiliar de medición. A las temperaturas de 100K, 125K, 150K, 175K, 200K, 225K, 250K y 300K se ejecutaron test de I-V y se separaron los cambios a SET de los cambios a RESET para facilitar su análisis. En las Fig. 5.5 y 5.6 se pueden observar dos test a diferentes temperaturas para sendos estados (SET y RESET).

El objetivo de estas medidas a diferentes temperaturas era comprobar si existía alguna correlación entre la temperatura a la que estaba sometida la muestra y los valores de corriente que alcanzaba la misma. El resultado fue que las variaciones no eran significativas, aunque aumentaban con la temperatura.

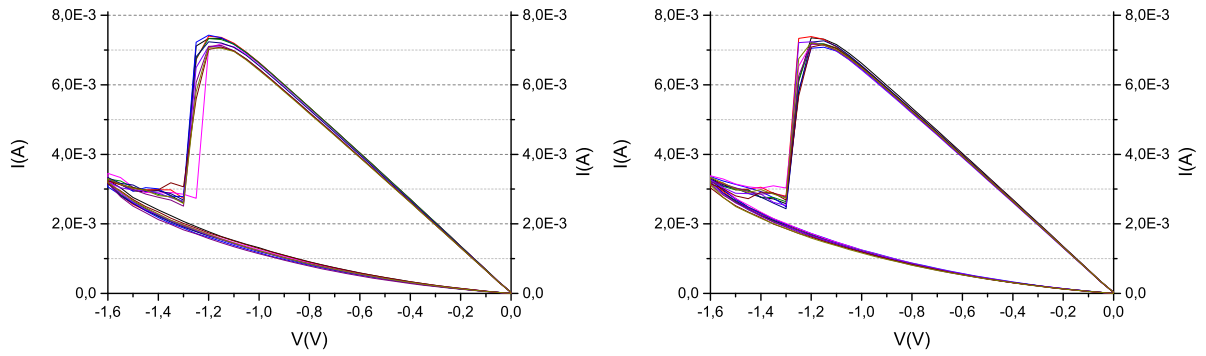


Figura 5.5: Experimento n° 3: medidas a temperatura estable (I)

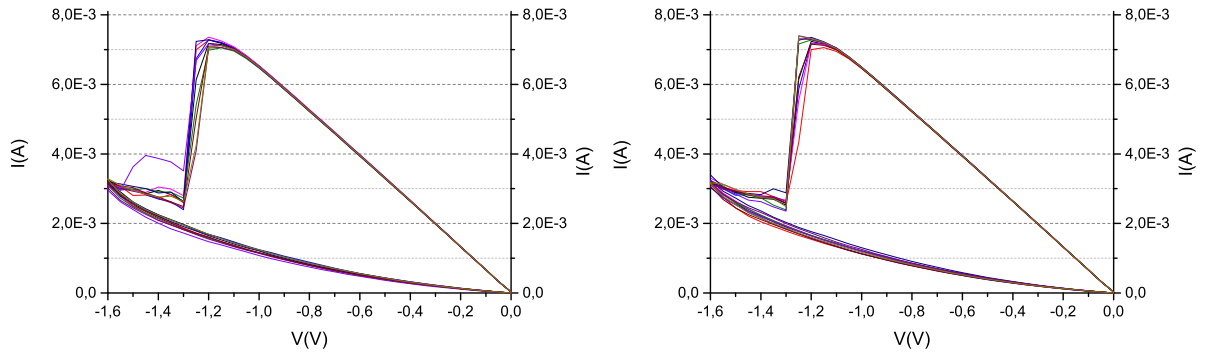


Figura 5.6: Experimento n° 3: medidas a temperatura estable (II)

Experimento n° 4 (I-V)

El 4º experimento consistió en probar el comportamiento dinámico de la muestra. Para ello se midieron transitorios de corriente a diferentes voltajes (0.3, 0.45, 0.5, 0.6, 0.8, 1). Antes de realizar cada medida para SET y RESET, se llevó la muestra al estado contrario (para no desvirtuar los resultados). El propósito de este experimento era determinar la velocidad de crecimiento de la corriente para voltajes suficientemente altos como para empezar a producir un cambio de estado. Para ello, se normalizaron los datos (los valores absolutos difieren bastante de los normalizados). En la Fig. 5.7 se pueden ver los transitorios de corriente para SET y RESET, respectivamente.

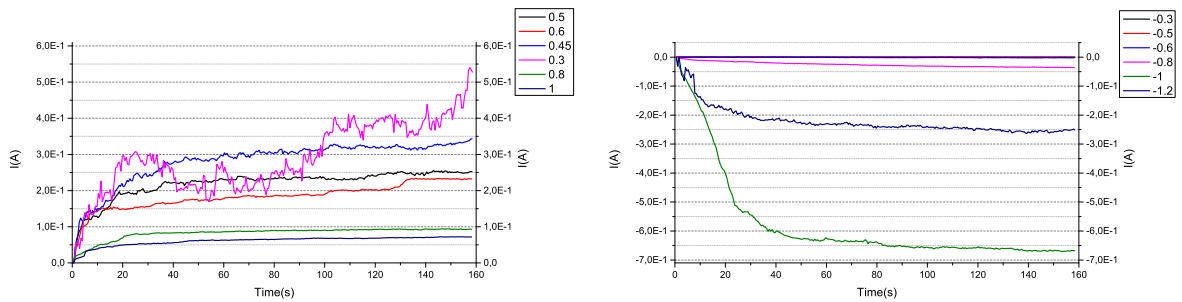


Figura 5.7: Experimento n° 4: transitorios de corriente normalizados

Dentro del experimento n° 4 también se realizaron dos grupos de iteraciones de SET y RESET acumulativos. Sirvieron para mostrar el excelente nivel de control del cambio de estado de estas muestras. En la Fig. 5.8 se muestran las gráficas de estos test.

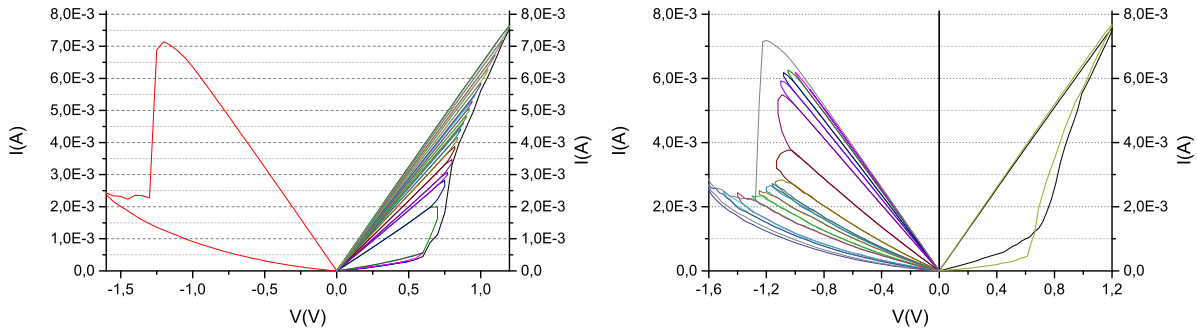


Figura 5.8: Experimento n° 4: control de SET y RESET acumulativos

Experimento n° 5 (I-V)

El 5º experimento (Fig. 5.9) constó de grupos de 10 ciclos de escritura y borrado (SET y RESET) acumulativos a diferentes voltajes. Se trataba de pruebas a voltajes que no fueran lo suficientemente altos como para producir un cambio de estado completo, con el fin de caracterizar los niveles de tensión a partir de los cuales comenzaba a ampliarse la ventana de SET o RESET.

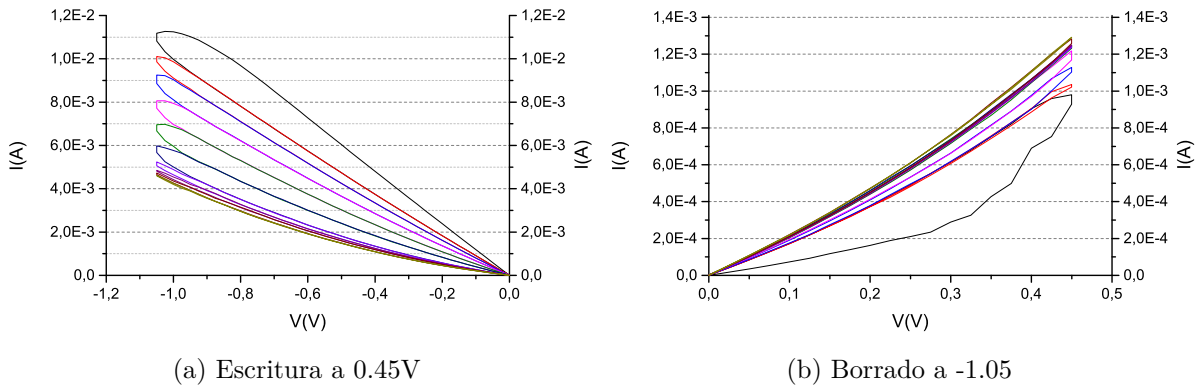


Figura 5.9: Experimento n° 5: 10 ciclos de escritura y borrado acumulativos

Experimento n° 6 (I-V)

En el 6º experimento se estudió el efecto de la “Set compliance” (limitación de la corriente de SET) sobre el RESET. Se aplicó 5 veces un mismo voltaje con una corriente límite distinta en cada iteración. A cada ejecución en la polaridad de SET le siguió un RESET completo (hasta -1.6V). El resultado se puede ver en la Fig. 5.10.

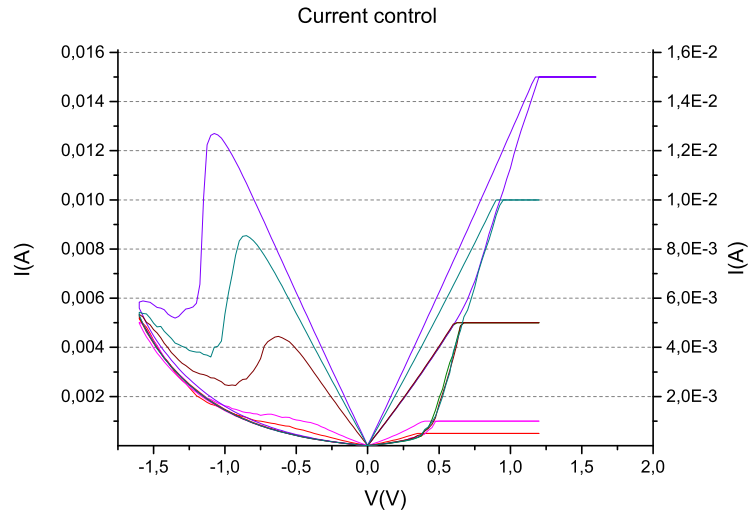


Figura 5.10: Experimento nº 6: efecto de la limitación de corriente en el SET

Experimento nº 7 (I-V)

El test (Fig. 5.11) consistió en una ejecución secuencial de ciclos alternos de SET y RESET con voltajes crecientes (bucles anidados). El paso previo fue la realización de un ciclo completo SET-RESET. Se comenzó a un voltaje pequeño que se fue incrementando en saltos de 0.1V. Este experimento indica (al igual que el 4º) que el control sobre la memoria es óptimo.

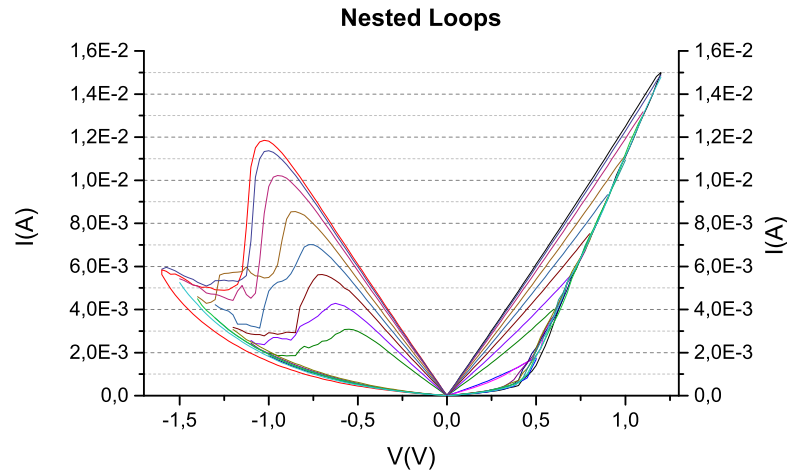


Figura 5.11: Experimento nº 7: bucles anidados

Experimento nº 8 (I-V)

Aquí (Fig. 5.12) se completó una serie de ciclos de borrado parciales y acumulativos. Por ello, este experimento se denomina de "Borrado Parcial". Antes de realizarlo es necesario ejecutar un SET completo.

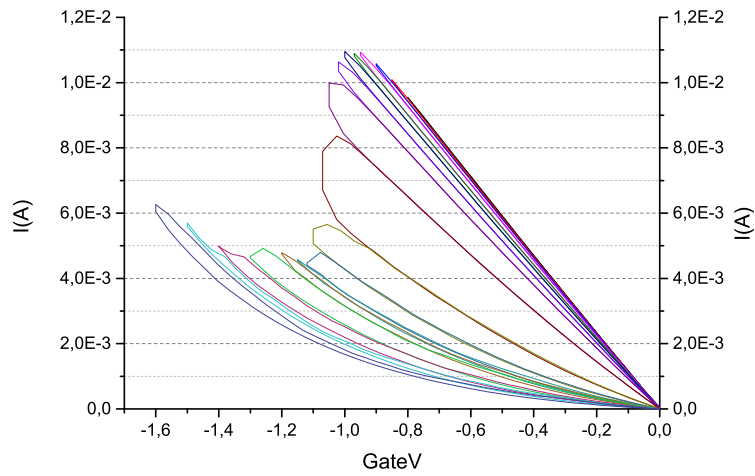


Figura 5.12: Experimento nº 8: ciclos de borrado parciales y acumulativos

Experimento nº 9 (I-V)

Este experimento de escritura parcial (Fig. 5.13) es el complementario del anterior. El planteamiento es el mismo, pero cambiando borrado por escritura (RESET por SET).

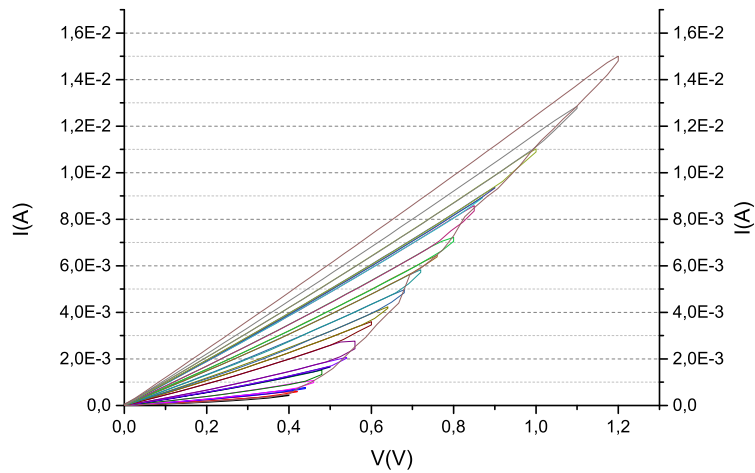


Figura 5.13: Experimento nº 9: ciclos de escritura parciales y acumulativos

Experimento nº 10 (I-V)

Cuando una muestra se encuentra en estado prístino, (estado virgen, sin presentar conmutación resistiva) es necesario realizar el “electroforming” sobre la misma para poder realizar pruebas con ella. En este experimento (Fig. 5.14) se han realizado tres procesos de “forming” (electroforming) sobre tres muestras distintas y así poder observar el comportamiento de la

corriente a medida que la tensión aumenta.

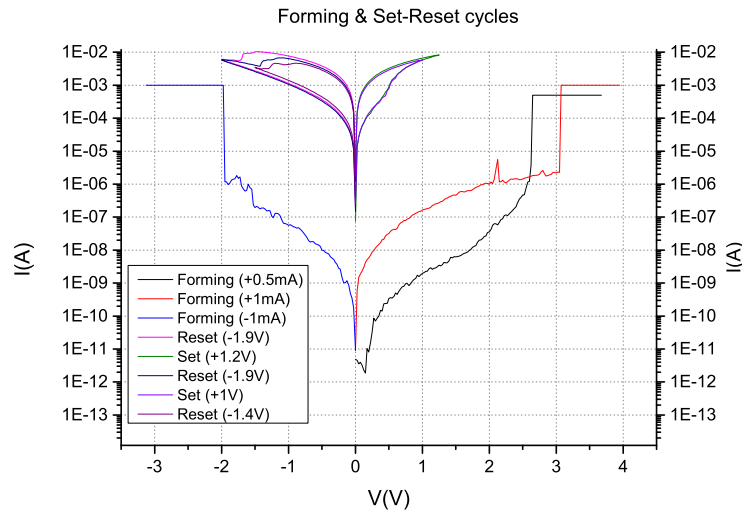


Figura 5.14: Experimento nº 10: Electroforming

Experimentos de capacidad-conductancia

Sobre estas muestras de comportamiento bipolar también se realizaron experimentos de C-G (Capacidad-Conductancia frente al voltaje). A continuación se explica el contexto y el desarrollo de cada prueba.

Experimento nº 1 (C-G-V)

En esta prueba (Fig. 5.15) se pretendía caracterizar la variación de capacidad y conductancia al someter la muestra a diferentes frecuencias para los mismos valores de voltaje. La hipótesis que se quería validar consistía en que a mayores frecuencias la conductancia tiende a disminuir mientras que la capacidad aumenta, y a la inversa. El resultado fue que la capacidad mostraba una variación fácilmente perceptible y de acuerdo a lo esperado. En cambio, la conductancia presentaba cambios menos evidentes (salvo al probar a 5MHz, pero esta anomalía era producida por una resonancia con el propio equipo de medición).

Experimento nº 2 (C-G-V)

Se hizo un barrido de frecuencias (Fig. 5.16) para diferentes niveles fijos de voltaje. Se comprobó que tanto la capacidad como la conductancia son dependientes de la frecuencia.

Experimento nº 3 (C-G-V)

Test de escritura y de escritura acumulativa (Fig. 5.17), de manera análoga a los de I-V. Se realizan de la misma forma:

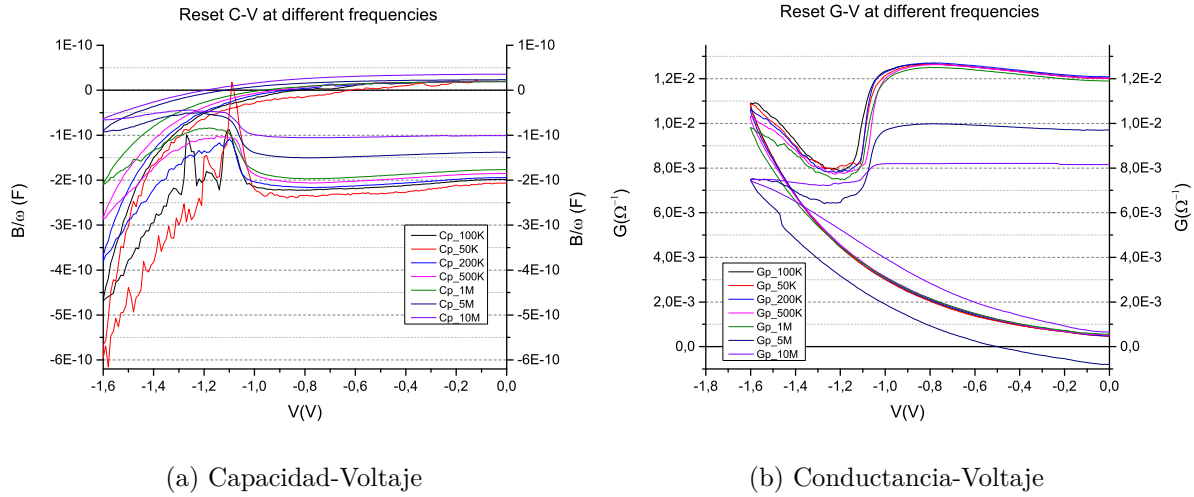


Figura 5.15: RESET a diferentes frecuencias

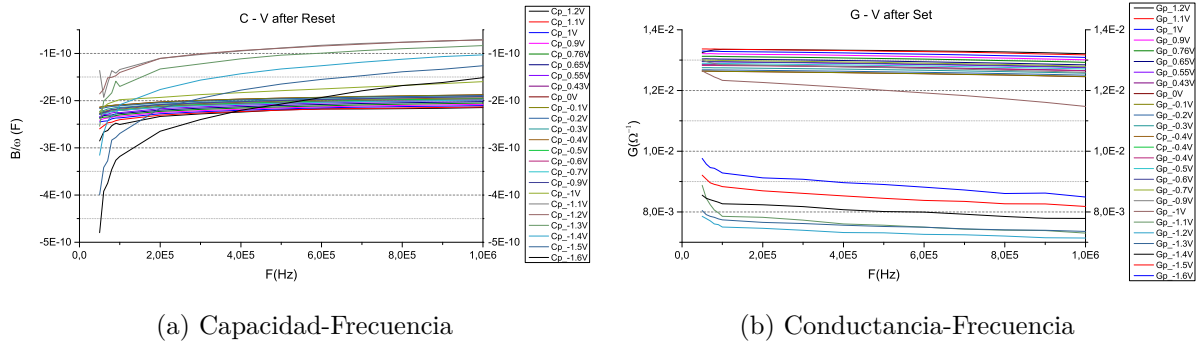


Figura 5.16: Barridos de frecuencia

- Escritura: antes de cada SET se hace un borrado completo y los voltajes de SET son crecientes.
- Escritura acumulativa: un solo borrado completo antes de empezar y posteriormente voltajes de SET crecientes.

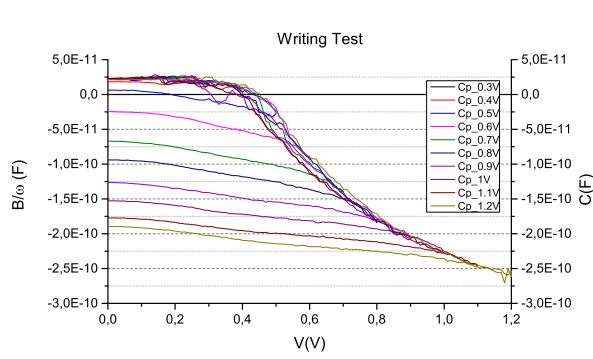
El control del cambio de estado es excelente, al igual que en I-V.

Experimento nº 4 (C-G-V)

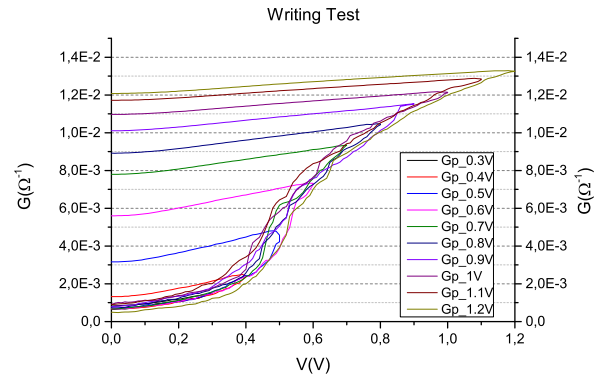
Test iguales a los del Experimento nº 3, pero cambiando escritura por borrado. El aspecto de las gráficas obtenidas se puede comprobar en la Fig. 5.18.

Experimento nº 5 (C-G-V)

Transitorios de SET y RESET para voltajes fijos (Fig. 5.19). Los voltajes de SET han sido 0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1; los de RESET, -0.9, -1.0, -1.1 y -1.2. Antes de cada medida se realizó un cambio al estado opuesto.

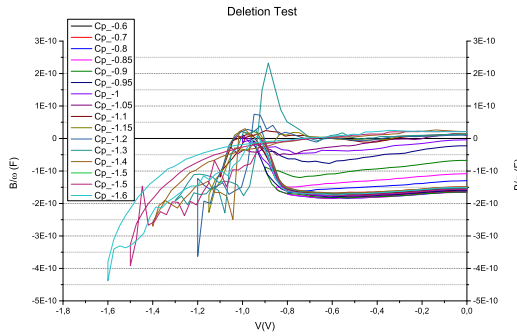


(a) Capacidad-Voltaje

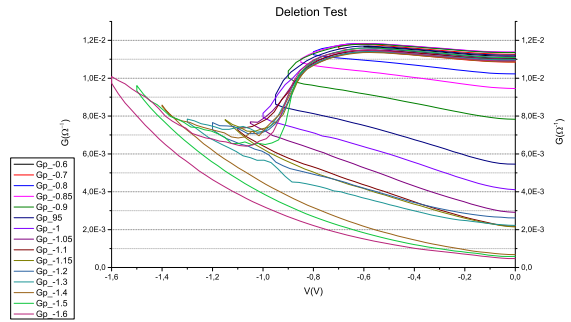


(b) Conductancia-Voltaje

Figura 5.17: Test de escritura

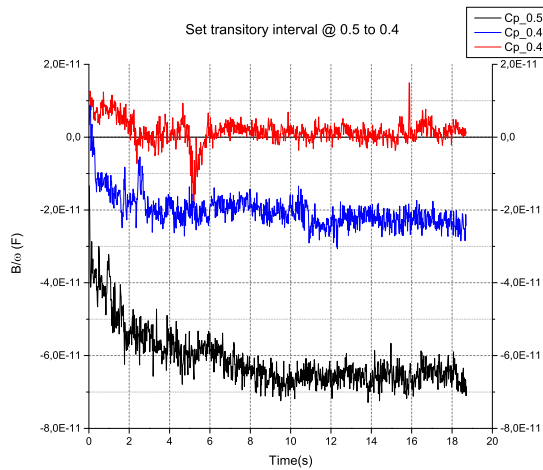


(a) Capacidad-Voltaje

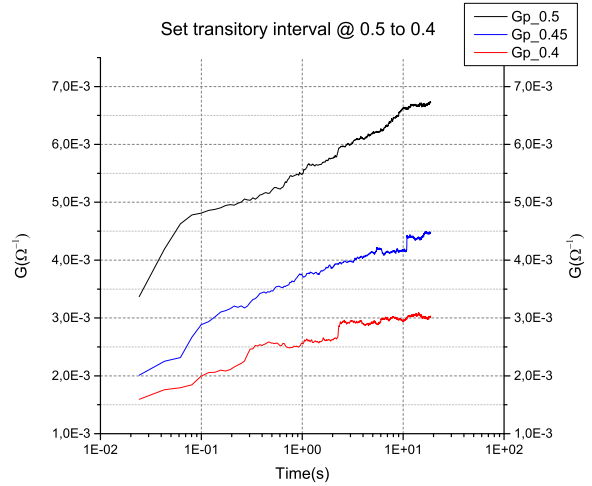


(b) Conductancia-Voltaje

Figura 5.18: Test de borrado



(a) Capacidad-Tiempo



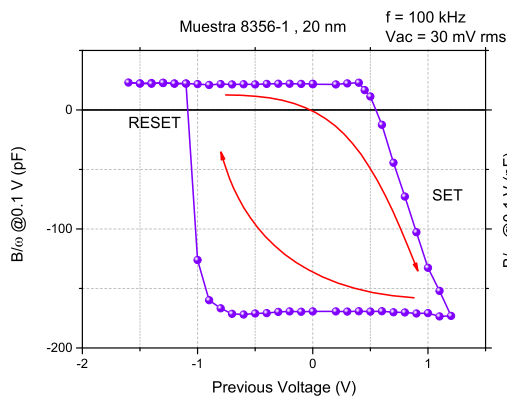
(b) Conductancia-Tiempo

Figura 5.19: Transitorios de SET

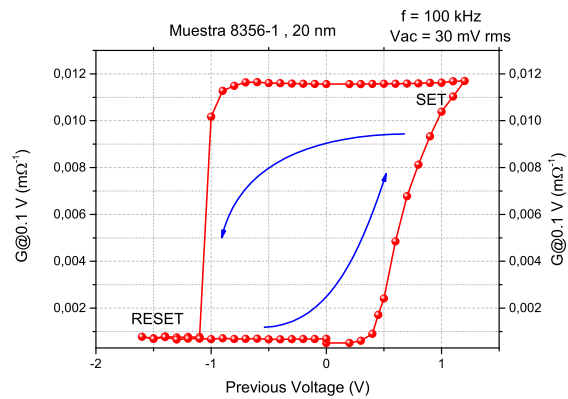
Experimento nº 6 (C-G-V)

Experimentos de histéresis o “histerones” (Fig. 5.20). Tenían como objetivo encontrar una relación análoga entre C-G-V e I-V. Es decir, verificar que estas memorias tienen un comportamiento dual *memristor-memcapacitor*. El procedimiento consiste en realizar un ciclo completo SET-RESET, con inicio y final en 0V y voltaje de lectura en 0.1V (primera prueba) y 0V (segunda prueba). Por ejemplo, para la prueba de lectura en 0V, el desarrollo de las medidas sería el siguiente:

Apply 0.0 → Read at 0
 Apply 0.1 → Read at 0
 Apply 0.2 → Read at 0
 ...
 Apply 1.2 → Read at 0
 Apply 1.1 → Read at 0
 ...
 Apply -1.6 → Read at 0
 Apply -1.5 → Read at 0
 ...
 Apply -0.2 → Read at 0
 Apply -0.1 → Read at 0
 Apply 0.0 → Read at 0



(a) Capacidad-Voltaje



(b) Conductancia-Voltaje

Figura 5.20: Experimentos de histéresis

Experimento nº 7 (C-G-V)

Este experimento consistió en la realización de **pruebas de robustez** sobre las muestras de las que se dispuso.

Las pruebas de robustez aplicadas sobre una muestra de memoria resistiva consisten en realizar ciclos de SET y RESET durante un período de tiempo prolongado. El objetivo de esta

clase de pruebas es determinar el aguante de la memoria al reproducir conmutaciones de estado rápidamente. El resultado con las muestras tratadas ha sido de una excelente robustez que, combinada con la no volatilidad, supone un gran aliciente de cara a la futura competición entre memorias FLASH y RRAMs.

En una memoria bipolar es bastante sencillo realizar esta prueba. Consiste en ejecutar un número bastante elevado de ciclos (600 iteraciones) y realizando una lectura a 0.1V después de cada SET y RESET. Los voltajes de SET y RESET son “instantáneos”, es decir, se aplica directamente el voltaje de SET y RESET sin ningún intervalo incremental. En la Fig. 5.21 se puede observar que los valores de capacidad y conductancia medidos tras cada cambio de estado (a la tensión de lectura) se mantienen en un rango controlado y con muy pocos valores atípicos.

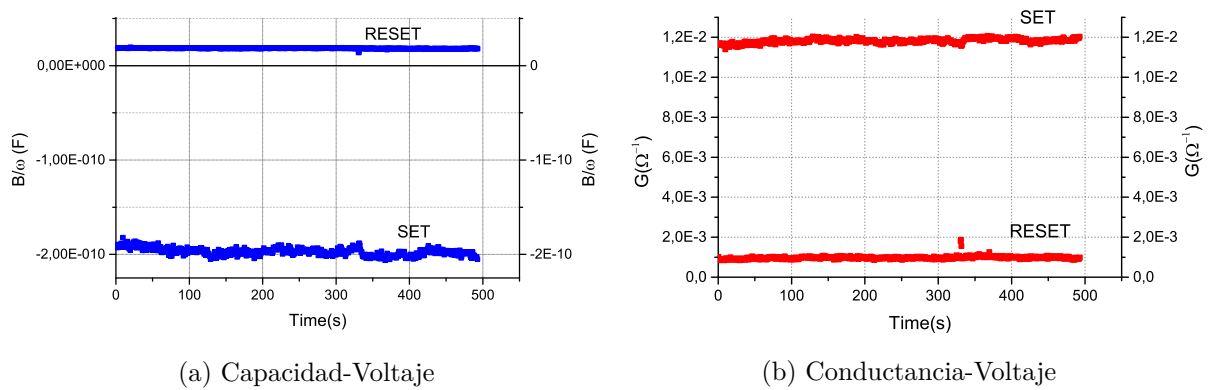


Figura 5.21: Pruebas de robustez. Lectura a 0.1V

Comparación entre muestras de diferente espesor

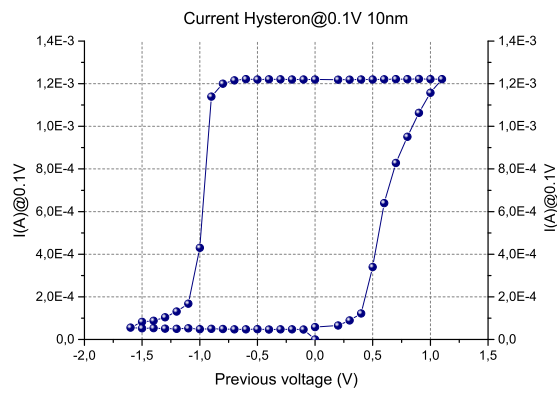
En una memoria resistiva, el aislante ubicado entre las dos capas de metal es la clave de su funcionamiento. El espesor del aislante, así como la temperatura a la que se realiza el ALD (Atomic Layer Deposition) [1] junto al número de iteraciones de deposición son los factores principales que determinan el comportamiento de este tipo de memorias.

En este experimentos hemos realizado una prueba con la muestra original de 20nm de espesor del HfO₂ y la hemos comparado con el resultado obtenido con otra muestra de 10 nm, también de HfO₂.

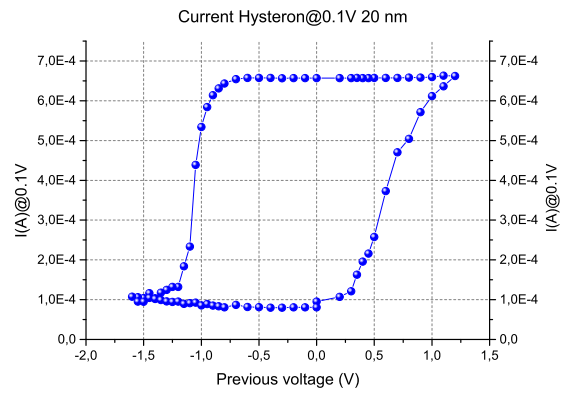
Correlaciones y desviaciones en los histerones de corriente

Al realizar la comparación entre ambas muestras, se puede constatar una mayor distorsión en la de 20nm respecto a la de 10nm (Fig. 5.22).

El análisis a través de la comparativa de resultados, en un contexto genérico, podría facilitar la determinación del espesor óptimo de cara a una posible implantación comercial de la memoria. Debería darse la condición, no obstante, de que todas las pruebas sobre dicha memoria reflejaran un mejor funcionamiento, si bien no necesariamente absoluto en contextos específicos, sí en términos globales y en la mayor parte de los particulares.



(a) 10nm de espesor del aislante



(b) 20nm de espesor del aislante

Figura 5.22: Comparativa entre 10 y 20nm de espesor del aislante

Parte IV

Conclusiones

Capítulo 6

Valoración del trabajo realizado

6.1. Objetivos cumplidos

Los objetivos que se han ido consiguiendo son los siguientes:

- Realización de pruebas experimentales y su posterior documentación.
- Elaboración de una explicación del funcionamiento de las memorias, a partir de los conocimientos que se han ido adquiriendo a lo largo del tiempo.
- Creación de aplicaciones informáticas que permitan automatizar el proceso de filtrado y representación, así como facilitar las tareas de investigación en su conjunto.

Estos hitos aquí indicados están conformados por muchas iteraciones: los experimentos se basan en el ensayo-error (método empírico), el funcionamiento de la memoria se determina por deducción (método científico) y la elaboración de los programas informáticos está sustentada por la formación académica del estudiante.

6.2. Competencias adquiridas

Al trabajar dentro de un grupo de investigación como el Grupo de Caracterización de Materiales y Dispositivos Electrónicos de la Universidad de Valladolid, con integrantes que alcanzan los 30 años de experiencia en trabajos de investigación, es bastante difícil que se dé una situación en la que no se saque provecho de las enseñanzas, los automatismos adquiridos o las ideas documentadas y razonadas de las que ellos disponen.

Ha sido una magnífica oportunidad para concurrir a la publicación de documentos académicos en diferentes revistas y congresos, mejorada si cabe por la situación de Técnico Investigador Contratado en la que me encuentro.

6.3. Conclusiones

Como conclusiones de este proyecto, se puede extraer que:

- La labor científica ha de ser realizada, controlada y gestionada de manera metódica, precisa y continua. De otro modo, los resultados (por buenos que sean) podrían verse consecuentemente afectados por cuestiones de eficiencia, volumen, calidad, etc.
- La distribución del trabajo dentro de un grupo de investigación es clave: en la mayoría de situaciones lo deseable es que cada integrante del grupo tenga un grado de autonomía elevado para poder avanzar por diferentes vías de manera separada. En el caso de que fuera necesario proporcionar una guía a un estudiante/nuevo trabajador del grupo, sería razonable y necesario priorizar su formación frente a las tareas actualmente en desarrollo.
- Las reuniones periódicas son necesarias: a pesar de que en muchas ocasiones pueden ser contraproducentes de cara al aprovechamiento del tiempo, sirven para establecer objetivos claros a corto y medio plazo. El coordinador del grupo siempre tiene una perspectiva global del proyecto y de los obstáculos que pueden impedir alcanzar las metas planteadas.

6.4. Trabajo futuro

Como parte del trabajo futuro habría que continuar con el desarrollo de los scripts de filtrado y representación. En concreto, los scripts de filtrado cumplen correctamente con su función, pero tienen un problema de eficacia en ciertos casos. Por ejemplo, si se selecciona un filtro para I-V y los datos son de G-C-V, se ejecutará el proceso, no se obtendrá ningún resultado y se habrá perdido tiempo y capacidad de cómputo (con el gasto energético asociado). Para usuarios noveles con conjuntos de medidas extensos esto podría suponer una molestia. Por ello, no basta con avisar al usuario de cómo tiene que utilizar la aplicación. Sería también necesario gestionar los errores, tanto los de concepto como los que se derivan de un despiste, etc.

Esta gestión de errores sí que está implementada en los scripts de representación. La segunda fase de los scripts comenzó en una etapa más “madura” respecto al conocimiento de la programación en LabTalk.

Adicionalmente, sería necesario ampliar el conjunto de experimentos filtrables y representables en los scripts, de manera que (idealmente) pudieran funcionar como una “navaja suiza” al trabajar con Origin.

Parte V

Apéndices y Bibliografía

Apéndice A

Contenido del CD-ROM y manuales

A.1. Contenido del CD-ROM

El CD-ROM contiene este informe en formato PDF (“memoria.pdf”) y el código de los scripts de filtrado y representación descritos en la sección 4.5. Los scripts no necesitan ser compilados, pero requieren de una versión de Origin igual o superior a la 9.0.

A.2. Manual de usuario

Aquí se describe información auxiliar referida a cómo usar los scripts de LabTalk. Es importante tener claro que es código interpretado, no compilado, por lo que no es necesario completar ningún proceso antes de ejecutar estos programas.

A.2.1. Carga y ejecución de los scripts

1. El primer paso una vez abierta una ventana de Origin es abrir una terminal de comandos. Para ello es necesario abrir la Ventana de Comandos, que en Origin se llama “Command Window”.
 - **View** → **Command Window**
 - **Alt + 3** (Atajo de teclado)
2. Ahora hay que copiar todos los scripts (los ficheros, sin ningún nivel intermedio) al directorio “User Files” dentro de la carpeta de instalación de Origin. En Windows 7, 8 y 10, la ruta completa por defecto es:
“C:\Users\<nombre-de-usuario>\Documents\OriginLab\90\User Files”
3. A continuación, para poder probar el funcionamiento de los scripts es necesario importar los ficheros Excel a procesar, teniendo en cuenta que deben haber sido generados por la herramienta KITE (en el equipo Keithley SCS-4200). Esto se puede conseguir navegando por la interfaz a **File** → **Import** → **Excel** y seleccionando los ficheros objetivo.

4. Si se han copiado todos los scripts al directorio “User Files”, ya se pueden ejecutar. Hay dos ficheros ejecutables, **main_filtering** y **main_plot**, que contienen el código necesario para completar el filtrado y la representación, respectivamente. Hay que escribir su nombre completo en la Ventana de Comandos y pulsar la tecla “Enter”. El proceso a seguir a partir de este momento se explica en la sección 4.5.3.
5. (*) Si se quisiera consultar el código de manera cómoda, se pueden importar los scripts en el Constructor de Código, llamado “Code Builder” en Origin. Navegando a **View** → **Code Builder** o con el atajo de teclado **Alt + 4** se abre la ventana del IDE integrado en Origin. En este entorno se puede programar y depurar aplicaciones en LabTalk. Si dentro del IDE navegamos a **File** → **Open** podemos abrir los ficheros **.ogs** en el editor.

A.3. Manual de desarrollador

A.3.1. Esquema jerárquico de los scripts

En la Fig. A.1 se muestra la estructura jerárquica de los scripts.

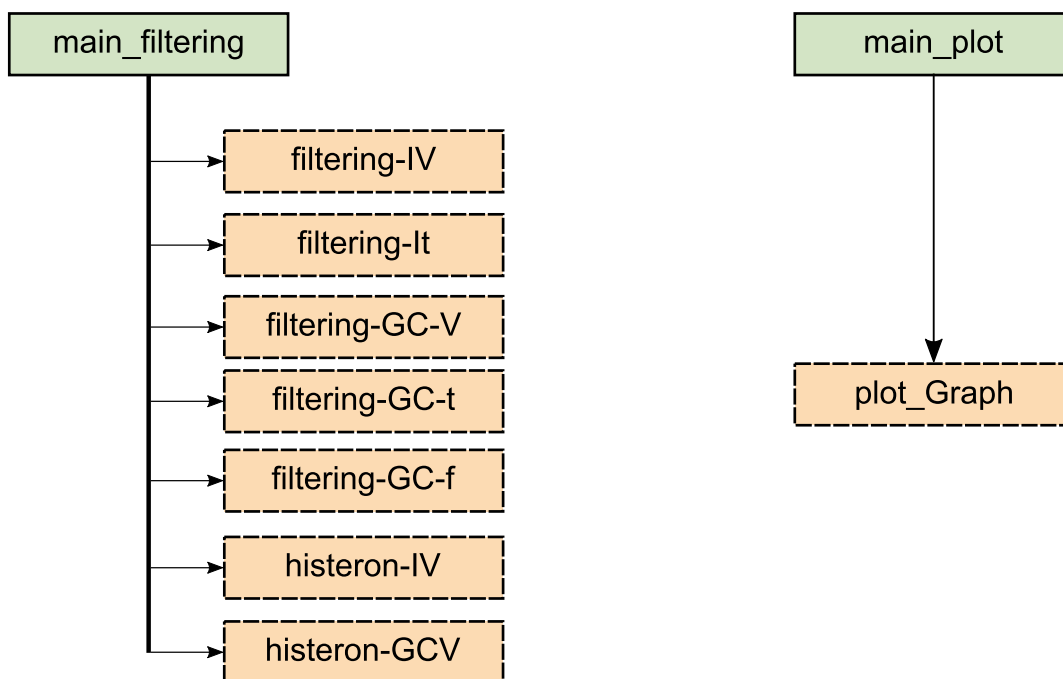


Figura A.1: Esquema jerárquico de los scripts

A.3.2. Árbol de directorios (Sistema de Ficheros)

El árbol de directorios para el código de LabTalk es el siguiente:

- Scripts-labtalk → *Directorio raíz*
 - Filtrado
 - main_filtering → *Fichero maestro*
 - filtering-IV
 - filtering-It
 - filtering-GC-V
 - filtering GC-t
 - filtering GC-f
 - histeron-IV
 - histeron-GCV
 - Representacion
 - main_plot → *Fichero maestro*
 - plot_Graph

Apéndice B

Publicaciones como coautor

Durante el desarrollo de mi actividad laboral dentro del grupo de investigación, he colaborado en algunas publicaciones siendo coautor de las mismas. A continuación se indica el listado de publicaciones.

B.1. Listado de publicaciones como coautor

- *Accurate control of admittance parameters of RRAM devices during writing and erasing operations*
Congreso: International Conference on Memristive Materials, Devices & Systems MEMRISYS Abril 2017 - Atenas, Grecia
Autores: Salvador Duenas, Oscar G. Ossorio, Luis A. Dominguez, Helena Castan, Hector Garcia, Enrique Miranda, Mireia B. Gonzalez, Francesca Campabadal
- *The role of defects on the resistive switching behavior of Ta2O5-TiO2 based metal-insulator-metal (MIM) devices for memory applications*
Congreso: 17th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors
DRIP Octubre 2017 - Valladolid, España
Autores: S. Duenas, H. Castán, H. García, O. G. Ossorio, L. A. Domínguez, K. Kalam, H. Seemen, U. Joost, A. Tamm, K. Kukli
- *Admittance memory cycles of Ta2O5:ZrO2-based RRAM devices*
Congreso: XXXII Conference on Design of Circuits and Integrated Systems DCIS Noviembre 2017 - Barcelona, España
Autores: S. Dueñas, H. Castán, O. G. Ossorio, L. A. Domínguez, H. García, K. Kalam, K. Kukli, M. Ritala, and M. Leskelä

Bibliografía

- [1] F. Campabadal, J. M. Rafi, M. B. González, M. Zabala, O. Beldarrain, M. C. Acero, and M. Duch. Thin dielectric films grown by atomic layer deposition: Properties and applications. In *2013 Spanish Conference on Electron Devices*, pages 1–4, Feb 2013.
- [2] L. Chua. Memristor-the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 18(5):507–519, Sep 1971.
- [3] Doo Seok Jeong, Reji Thomas, R S Katiyar, J F Scott, H Kohlstedt, A Petraru, and Cheol Seong Hwang. Emerging memories: resistive switching mechanisms and current status. *Reports on Progress in Physics*, 75(7):076502, July 2012.
- [4] Xiaojuan Lian, Jordi Suñé, and Universitat Autònoma de Barcelona. Resistive switching statistics in mim structures for non-volatile memory applications. 2014.
- [5] M. Di Ventra, Y. V. Pershin, and L. O. Chua. Circuit elements with memory: Memristors, memcapacitors, and meminductors. *Proceedings of the IEEE*, 97(10):1717–1724, Oct 2009.
- [6] Rainer Waser, editor. *Nanoelectronics and Information Technology: Advanced Electronic Materials and Novel Devices*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2003.