

PROYECTO
FIN DE
CARRERA



ESTUDIOS DE INGENIERÍA
DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

*"Sistema de caracterización de
dispositivos RRAM"*

Alfonso Gómez Fontalba

Curso 2016/2017

Tutor: Andrés María Roldán Aranda

"Sistema de caracterización de
dispositivos RRAM"

Alfonso Gómez Fontalba

INGENIERÍA
DE
TELECOMUNICACIÓN





ESTUDIOS DE INGENIERÍA
DE TELECOMUNICACIÓN
PROYECTO FIN DE CARRERA

*“Sistema de caracterización de dispositivos
RRAM”*

CURSO: 2016/2017

Alfonso Gómez Fontalba



ugr

Universidad
de Granada

ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

“Sistema de caracterización de dispositivos RRAM”

REALIZADO POR:

Alfonso Gómez Fontalba

DIRIGIDO POR:

Andrés María Roldán Aranda

DEPARTAMENTO:

Electrónica y Tecnología de los Computadores

El tribunal constituido para la evaluación del proyecto PFC titulado:

"Sistema de caracterización de dispositivos RRAM"

Realizado por el alumno: Alfonso Gómez Fontalba

Y dirigido por el tutor: Andrés María Roldán Aranda

Ha resuelto asignarle la calificación de:

SOBRESALIENTE (9 - 10 puntos)

NOTABLE (7 - 8.9 puntos)

APROBADO (5 - 6.9 puntos)

SUSPENSO

Con la nota¹: puntos.

El Presidente:

El Secretario:

El Vocal:

Granada, a ____ de _____ de 2017

¹ Solamente con un decimal.

D. Andrés María Roldán Aranda, Profesor del departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, como director del Proyecto Fin de Carrera de D. Alfonso Gómez Fontalba,

Informa:

que el presente trabajo, titulado:

“Sistema de caracterización de dispositivos RRAM”

ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo nuestra dirección, y con esta fecha autorizo a su presentación.

Granada, a de Septiembre de 2017

Fdo.

Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Proyecto Fin de Carrera se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, a de Septiembre de 2017

Fdo.

Sistema de caracterización de dispositivos RRAM

Alfonso Gómez Fontalba

PALABRAS CLAVE:

RRAM, Resistive RAM, memristor, caracterización, mesa de puntas, microposicionadores, Matlab, GPIB, automatización, simulación, control remoto, instrumentación electrónica, analizador de parámetros, HP4145B, PCB.

RESUMEN:

Este proyecto tendrá como objetivo la realización de un sistema de caracterización de dispositivos RRAM. El trabajo se concentrará en el diseño de un escenario capaz de posicionarse sobre dichos dispositivos para aplicarle barridos de tensión y estudiar su comportamiento. El sistema incorporará un software específico para configurar el conexionado del sistema y lanzar el procedimiento de medida, controlando la instrumentación involucrada mediante bus GPIB. A su vez, el sistema permitirá representar gráficamente los datos medidos, así como guardarlos para poder ser cargados en otro momento.

KEYWORDS:

RRAM, Resistive RAM, memristor, characterization, probe station, head probes, Matlab, GPIB, automation, simulation, remote control, electronic instrumentation, parameter analyzer, HP4145B, PCB.

ABSTRACT:

This project will develop a RRAM devices characterization system. This work will be focused on the design of an stage capable of positioning over these devices while applying voltage sweeps on them in order to analyze their behavior. The system will also integrate a specific software to assist the setup procedure as well as for triggering the measurement, remotely controlling all the involved instrumentation through GPIB bus. In turn, the system will allow graphing the measured data, as well as save the data to be able to be loaded in another moment.

Dedicado a

*Mis padres, Alfonso y Carmen. Sin ellos nada de esto
hubiera sido posible.*

Agradecimientos:

En primer lugar, quisiera expresar todo mi agradecimiento a mi familia. Gracias a mis padres por el apoyo constante y la confianza depositada, por haber estado siempre a mi lado y por todo el esfuerzo que han dedicado a formarme. Gracias por comprenderme en todo momento y sacar lo mejor de mí en los momentos de flaqueza. Personalmente, gracias a mi padre por inculcarme siempre valores de esfuerzo y superación. A mi madre, gracias por conocerme como ninguna otra persona y saber sacarme siempre una sonrisa. Sin vosotros no habría llegado hasta aquí.

Darle las gracias también a mi hermanos, pues con ellos he compartido innumerables horas de trabajo y diversión durante todo este tiempo.

No quisiera olvidarme del resto de mi familia y amigos. Gracias a todos ellos por su afecto y estar siempre que se necesitan.

Mostrar también mis agradecimientos al Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Universidad de Granada, y muy especialmente a mi tutor, Andrés María Roldán Aranda. Gracias por tu constante dedicación, atención y supervisión durante todo este tiempo. Por tu trato cercano y amable, y por todo el conocimiento transmitido. Igualmente darle las gracias al Profesor Juan Bautista Roldán Aranda por toda la ayuda prestada y el conocimiento transmitido durante transcurso del proyecto.

Todos son igualmente partícipes de este trabajo.

ÍNDICE

Portada	i
Autorización Lectura	vii
Autorización Depósito Biblioteca	ix
Resumen	xi
Dedicatoria	xiii
Agradecimientos	xv
Índice	xvii
Índice de Figuras	xxiii
Índice de Listados	xxix
Índice de Tablas	xxxii

Glosario	xxxiii
1 Introducción.	1
1.1 Contexto	1
1.2 Contenido y estructura capitular	3
2 Especificaciones del sistema de caracterización.	5
2.1 Requisitos	6
2.1.1 Diferentes estructuras de los dispositivos RRAM	6
2.1.2 Instrumentación electrónica disponible	6
2.1.3 Instrumentación para asistir el posicionamiento	7
2.1.4 Control remoto de los equipos electrónicos	7
2.1.5 Herramienta <i>Software</i>	8
2.2 Planificación previa del proyecto	9
3 Análisis del sistema.	11
3.1 Estado actual de las memorias no volátiles.	11
3.2 Características básicas y tipos de memorias RRAM.	12
3.3 Metodología	14
3.3.1 Proceso de Forming	14
3.3.2 Procesos de SET/RESET	14
3.3.3 Cálculo de las tensiones de SET y RESET	17
3.4 Máscaras de los dispositivos	18
3.4.1 Máscaras del INESC-MN.	18
3.4.2 Máscaras del IMB-CNM.	20
3.5 Análisis del <i>Hardware</i> disponible	24
3.5.1 Analizador de parámetros HP 4145B	24
3.5.2 16058A Test Fixture	27
3.5.3 Mesa de puntas Karl Suss PSM6	30

3.5.4	Microposicionadores	34
3.5.4.1	Microposicionador PH 150	34
3.5.4.2	Microposicionador PH 100	36
3.5.5	Análisis de la adaptación triaxial-coaxial	37
3.5.6	Agujas o puntas de contacto	41
3.6	Representación global del sistema de caracterización	42
3.7	Análisis sobre comunicación GPIB	44
3.7.1	<i>General Purpose Interface Bus</i> - GPIB	44
3.7.1.1	Especificaciones físicas y mecánicas del bus	44
3.7.1.2	Especificaciones funcionales	45
3.7.1.3	Líneas de datos	45
3.7.1.4	Líneas de <i>handshaking</i>	46
3.7.1.5	Líneas de control general del bus	46
3.7.1.6	Tipos de mensajes	47
3.7.1.7	Protocolo de direccionamiento	47
3.7.1.8	Protocolo de <i>Polling</i>	48
3.7.2	MATLAB® <i>Instrument Control Toolbox</i>	48
3.7.2.1	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i> - SCPI	49
3.7.3	Driver GPIB Agilent y conexión de equipos	50
4	Desarrollo e Implementación del sistema.	55
4.1	Implementación <i>Hardware</i>	56
4.1.1	Diseño y Fabricación de PCB	56
4.1.2	Disposición estructural y localización del sistema	59
4.2	Implementación <i>Software</i> de la librería de comunicación GPIB	62
4.2.1	Funciones para GPIB	62
4.2.2	Estructura de la función/librería <i>HP4145_kpib494()</i>	63
4.3	Implementación <i>Software</i> de la herramienta de caracterización	66

4.3.1	Requisitos del <i>Software</i>	66
4.3.1.1	Caracterización de Forming, SET o RESET.	67
4.3.1.2	Caracterización de una secuencia de ciclos.	69
4.3.1.3	Caracterización de ciclos pulsados.	69
4.3.1.4	Comprobación del estado en el que se encuentra un dispositivo.	69
4.3.1.5	Curvas de datos.	70
4.3.2	Entorno de programación de la interfaz gráfica de usuario	70
4.4	Descripción y utilización de la herramienta de caracterización	72
4.4.1	Interfaz principal: <i>Characterization Data Center</i>	72
4.4.1.1	Importar curvas de datos	73
4.4.1.2	Funciones de copiado rápido en portapapeles	76
4.4.1.3	Función de guardado de datos	77
4.4.2	Interfaz de <i>Setup</i> de medida	79
4.4.2.1	Paneles <i>Forming</i> , <i>SET</i> y <i>RESET</i>	81
4.4.2.2	Panel <i>Repetitive Cycling</i>	82
4.4.2.3	Panel <i>Pulse Characterization</i>	82
4.4.2.4	Panel <i>Check Status</i>	83
4.4.3	Carga y guardado de una secuencia de ciclos.	84
4.4.4	Ventana de configuración del post-procesado.	85
5	Caracterización y resultados.	87
5.1	Testeo en otros dispositivos.	88
5.1.1	Análisis del tiempo de medida.	88
5.1.2	Análisis del ruido.	90
5.2	Medidas con dispositivos del INESC-MN.	91
5.3	Medidas con dispositivos del IMB-CNM.	93
5.3.1	Primeras medidas.	93
5.3.2	Rotura forzada de un dispositivo.	96

5.3.3	Caracterización utilizando las dos puntas.	97
5.3.4	Caracterización aplicando pulsos.	102
5.3.5	Resumen.	104
6	Conclusión y líneas futuras.	107
	Bibliografía	111
	Apéndices	113
6.1	Especificaciones de los microposicionadores	113
6.2	Códigos SCPI de instrucciones para el <i>Analizador de Parámetros HP4145B</i> controlado por bus GPIB	118
6.3	SCPI Codes HP4145B	119

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Ejemplo de sistema de caracterización de microcircuitos [12].	2
1.2	Diferentes dispositivos [4].	2
1.3	Esquemático del sistema de caracterización.	3
1.4	Flujo de fases de trabajo.	3
2.1	Diagrama de la composición del sistema.	5
2.2	Bus GPIB [4].	7
2.3	Principales fases de un proyecto [4].	9
2.4	Analogía de fases.	10
3.1	Mapa de los diferentes tipos de memorias y los dispositivos emergentes que se están valorando en la actualidad [14].	12
3.2	Representación de la estructura básica de una celda de memoria RRAM [18].	13
3.3	Resistive Switching unipolar y bipolar. Una corriente de compliance (I_{CC}) es usada para evitar una rotura permanente del óxido [19].	13

3.4	Representación esquemática de la operación de reset. Cuando aplicamos una tensión V_{reset} la temperatura interna se incrementa por efecto Joule activándose la ruptura del CF [17].	15
3.5	Representación esquemática de la formación y destrucción del CF dando como resultado las operaciones de <i>set</i> y <i>reset</i> respectivamente [9].	15
3.6	Curvas características (a) I-V y (b) R-V del proceso de reset [17].	16
3.7	Representación de la curva I-V variando la velocidad de cambio de la tensión aplicada [17].	16
3.8	Máscara del chips de dispositivos RRAM, con ampliación en superficies de contactos entre electrodos inferior y superior [16].	18
3.9	Chips cortados sin encapsular [16].	19
3.10	Fotografías de los chips encapsulados del INESC-MN.	19
3.11	Fotografía del trozo de oblea cedido por el IMB-CNM.	20
3.12	Vista general del conjunto CNM-733.	20
3.13	Vista general del chip.	21
3.14	Dimensiones de las estructuras MIS del grupo D.	22
3.15	Mapeo del trozo de oblea 7070-2.	23
3.16	Analizador de parámetros HP 4145B [6].	24
3.17	Esquema circuital de una unidad SMU.	25
3.18	Panel frontal de HP 4145B [6].	26
3.19	Panel trasero de HP 4145B [6].	26
3.20	16058A Test Fixture.	28
3.21	Panel trasero de HP 4145B y Fixture Test [6].	28
3.22	Esquema de conexionado entre el HP 4145B y el 16058A Test Fixture [6].	29
3.23	Zócalo y cables de conexión del Test Fixture.	29
3.24	Mesa de puntas PSM6 Karl Suss.	30
3.25	Módulo controlador y bomba de vacío.	31
3.26	a) Vista de uno de los chips. b) Dispositivos D3 y D5 (Tabla 3.1).	32
3.27	a) Punta sin contacto. b) Punta en contacto.	33

3.28	PH 150 Cascade Microtech Probe Head.	34
3.29	Vista lateral acotada de la PH 150 [1].	35
3.30	Detalle de la línea coaxial del brazo de la PH 150 [1].	35
3.31	PH 100 Cascade Microtech Probe Head.	36
3.32	Vista lateral acotada de la PH 100 [2].	36
3.33	Detalle de la línea coaxial y la punta del brazo de la PH 100 [20].	37
3.34	Colocación de las PH 100 sobre el <i>platen</i>	37
3.35	Estructura física y esquema circuital de una línea de transmisión coaxial [4].	38
3.36	Estructura física y esquema circuital de una línea de transmisión triaxial a la salida de una SMU [20].	38
3.37	Adaptación triax-coax para $I > 1$ nA [20].	39
3.38	Adaptación triax-coax para $I < 1$ nA [20].	39
3.39	a) 020-103672-01A Triaxial-Coaxial. b) 14949 PL 155-29 Coaxial-Miniature Coaxial.	40
3.40	Esquema gráfico del conexionado Analizador Paramétrico con las puntas. . .	40
3.41	Agujas de contacto (Puntas).	41
3.42	Diagrama conjunto HW.	43
3.43	Conector de 24 pines para bus GPIB [4].	45
3.44	Cronograma de señales de interfaz para handshaking [4].	46
3.45	Formato del mensaje de direccionamiento GPIB [4].	48
3.46	Instrument Control Toolbox [3].	48
3.47	Esquema de control de instrumentos vía GPIB con MATLAB® [3].	49
3.48	Estructura de acceso al bus GPIB mediante comandos SCPI.	49
3.49	GPIB 82350A PCI Interface Card de Agilent [7].	50
3.50	Icono IO Suite 16.3 en el taskbar de Windows.	51
3.51	Interfaz GPIB detectada y configurada.	51
3.52	Dispositivos GPIB reconocidos.	52
3.53	Conector GPIB/USB 82357A de Agilent [7].	52

3.54	Esquema de conexión GPIB/USB con el modelo 82357A [7].	53
4.1	PCB virgen V-109 [4].	56
4.2	Diseño de la placa PCB con Altium Designer.	56
4.3	Proceso de corte de la PCB.	57
4.4	Placa PCB ya cortada.	57
4.5	PCB acabada con uno de los dispositivos conectados en el 16058A Test Fixture.	58
4.6	Esquemático de localización HW general.	60
4.7	Panorámica del sistema de caracterización.	61
4.8	Diagrama de flujo de la función <i>HP4145_kpib494()</i> para el control de la comunicación GPIB.	65
4.9	Diagrama de flujo del proceso de medida de un RESET.	68
4.10	Panel principal de la interfaz SW.	72
4.11	Menú de herramientas.	73
4.12	Menú de iconos.	73
4.13	Ventana de elección del tipo de medida.	74
4.14	Ventana de selección de ficheros.	74
4.15	Selector de extensión de fichero.	74
4.16	Interfaz principal con curvas cargadas.	75
4.17	Opciones desplegadas en el menú <i>Edit</i>	76
4.18	Gráfica copiada.	76
4.19	Selección de texto.	77
4.20	Ventana de guardado.	77
4.21	Submenús Measure.	78
4.22	Interfaz de la ventana RRAM Measurement Setup.	79
4.23	Paneles de configuración de barridos.	81
4.24	Panel de medida de una secuencia de ciclos.	82
4.25	Panel de medida con pulsos.	82
4.26	Panel de comprobación de estado.	83

4.27	Test de comprobación de estado.	83
4.28	Nomenclatura de los datos de una secuencia de ciclos.	84
4.29	Ventana de selección de un directorio de ciclos.	84
4.30	Ventana de selección de un directorio para guardar una secuencia.	85
4.31	Ventana de configuración del Post-procesado.	85
5.1	Rampa de tensión aplicada a un diodo.	89
5.2	Comparativa del ruido con y sin la tapa del 16058A Test Fixture.	90
5.3	Intento de Forming en uno de los dispositivos del INESC-MN.	91
5.4	Forming en uno de los dispositivos del INESC-MN.	91
5.5	Intento de RESET en uno de los dispositivos del INESC-MN.	92
5.6	Medida de la resistencia de un dispositivo roto.	92
5.7	Esquema de conexión de dispositivos en el Probe Station.	93
5.8	Primer ciclo fallido (dispositivo A2-D5).	94
5.9	Ciclos en el dispositivo A5-D5.	95
5.10	Curvas R-V e I-V para un dispositivo roto.	96
5.11	Circuito equivalente de una celda RRAM con elementos parásitos [13].	97
5.12	8 ciclos SET-RESET (dispositivo A7-D3).	97
5.13	RESET no detectado por el software.	98
5.14	110 ciclos SET-RESET (dispositivo A7-D4.	98
5.15	RESET que vuelve a conmutar por no pararse a tiempo.	99
5.16	1448 ciclos SET-RESET (dispositivo B4-D3).	99
5.17	Gráficas I_{on} vs. I_{off} (dispositivo B4-D3).	100
5.18	Histogramas de las tensiones de SET y RESET (dispositivo B4-D3).	100
5.19	Gráficas I_{on} vs. I_{off} aportadas por el IMB-CNM.	101
5.20	Gráficas I_{on} vs. I_{off} , dispositivo B1-D4, 513 ciclos.	101
5.21	Gráficas I_{on} vs. I_{off} , dispositivo C10-D3, 324 ciclos.	101
5.22	Gráficas I_{on} vs. I_{off} , dispositivo C8-D4, 162 ciclos.	102

5.23	Esquema de un pulso de tensión.	102
5.24	Medida de un SET aplicando un pulso de tensión.	103
5.25	Medida de un RESET aplicando un pulso de tensión.	103
6.1	Plataforma calentamiento (a) y Criostato (b).	108
6.2	PCB para medir dentro del criostato.	109

ÍNDICE DE LISTADOS

4.1	Creación de objeto gpib y apertura del puerto de comunicación.	62
4.2	Envío de datos al instrumento.	62
4.3	Lectura de datos de respuesta del instrumento.	63
4.4	Función <i>HP4145_kpib494()</i> para comunicación por bus GPIB.	63
4.5	Llamadas a <i>HP4145_kpib494()</i>	65

ÍNDICE DE TABLAS

3.1	Dimensiones de las estructuras MIS del grupo D.	21
3.2	Límites I/V para P=2 W.	26
5.1	Resolución según el rango de corriente [6].	88
5.2	Tiempo de medida según el rango de corriente.	89
5.3	Parámetros utilizados para las medidas.	95
5.4	Resumen de los resultados.	104

GLOSARIO

ASCII *American Standard Code for Information Interchange*

CAD *Computer-Aided Design*

CC *Compliance Current*

CF *Conductive Filament*

CMOS *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

DC *Direct Current*

DIP *Dual In-line Package*

FR4 *Flame Retardant 4*

GPIO *General-Purpose Instrumentation Bus*

GUIDE *Graphical User Interface Development Environment*

HB *Hard Breakdown*

HRS *High Resistance State*

IMB-CNM *Instituto de Microelectrónica de Barcelona - Centro Nacional de Microelectrónica*

INESC-MN *Instituto de Sistemas y Computadores - Microsistemas y Nanotecnología*

LRS *Low Resistance State*

MIM	<i>Metal-Insulator-Metal</i>
MIS	<i>Metal-Insulator-Semiconductor</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
NAND	<i>Negative-AND</i>
NOR	<i>Negative-OR</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PCM	<i>Phase-Change Memory</i>
RAM	<i>Random-Access Memory</i>
RRAM	<i>Resistive Random-Access Memory</i>
RS	<i>Resistive Switching</i>
SB	<i>Soft Breakdown</i>
SCPI	<i>Standard Commands for Programmable Instruments</i>
SMU	<i>Source Monitor Unit</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN.

1.1 Contexto

Llegado el momento de hacer frente al *Proyecto Fin de Carrera* correspondiente a la titulación de Ingeniería de Telecomunicación, pretendo realizar un sistema de caracterización de dispositivos RRAM.

Los dispositivos RRAM (Resistive Random Access Memory), son un tipo de memoria no volátil de acceso aleatorio que basan su funcionamiento en la conmutación entre estados de diferente resistencia.

En la última década, el mercado de las memorias no volátiles ha estado plenamente ocupado por las memorias de tipo *flash*, tanto en su arquitectura NOR como NAND. Sin embargo, desde hace pocos años se viene anunciando que el escalado de estas memorias pronto alcanzará límites a partir de los cuales se presentan efectos que dificultan o impiden por completo su operación. Las memorias de tipo resistivo (RRAMs) se presentan como posibles candidatas para sustituir a las memorias *flash* para su fabricación en masa con fines comerciales.

Lo que se pretende con este proyecto, es crear un sistema capaz de caracterizar el comportamiento de este tipo de memorias, estudiando la conmutación entre estados al aplicarle distintos barridos de tensión de forma controlada. Para ello, nos localizaremos en el laboratorio L4 del Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Facultad de Ciencias, Universidad de Granada.

En esta localización, dispondremos el conjunto de equipos electrónicos y mecánicos necesarios para constituir el sistema de caracterización, que intentará emular a los laboratorios de caracterización establecidos en las salas blancas con capacidad para la fabricación de muestras sobre silicio, Figura 1.1.

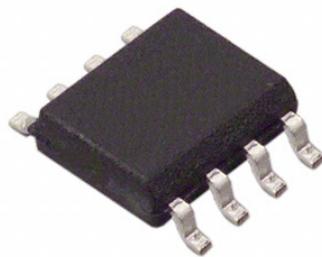
1



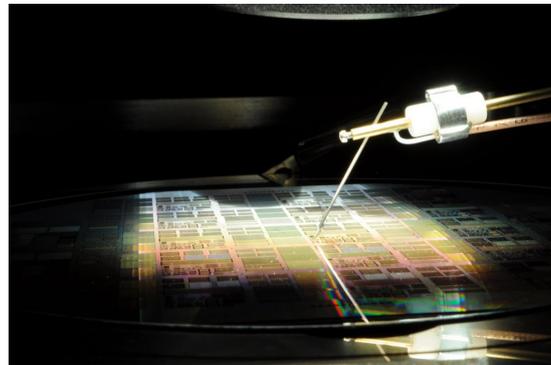
Figura 1.1 – Ejemplo de sistema de caracterización de microcircuitos [12].

El elevado número de medidas que se necesitan realizar para la caracterización y la necesidad de almacenar los datos medidos, nos plantea el reto de crear un sistema completamente automatizado por medio de un *software* ejecutado desde una estación de trabajo. Así podremos centralizar la configuración de todo el sistema de caracterización en el momento de efectuar una medida.

Además, debido a las diferencias morfológicas entre los dispositivos RRAM de los que disponemos (encapsulados y sin encapsular), Figura 1.2, será necesario plantear como llevar a cabo el posicionamiento y la conexión del dispositivo con los equipos de medida.



(a) Dispositivo encapsulado.



(b) Oblea sin encapsular.

Figura 1.2 – Diferentes dispositivos [4].

En la Figura 1.3 se muestra la composición del sistema de caracterización de un modo esquematizado y resumido.

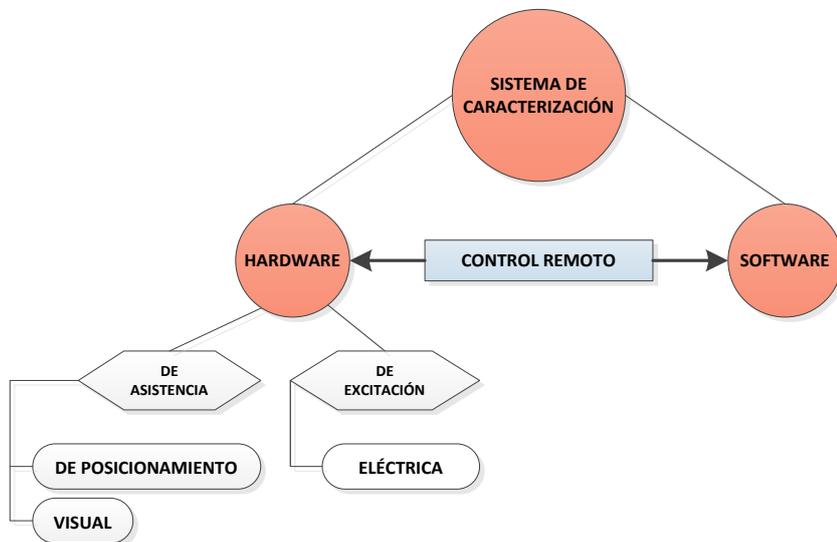


Figura 1.3 – Esquemático del sistema de caracterización.

1.2 Contenido y estructura capitular

Una vez se ha introducido el tema principal de este proyecto, consideramos el diagrama de flujo de las fases de trabajo que llevaremos a cabo, Figura 1.4.

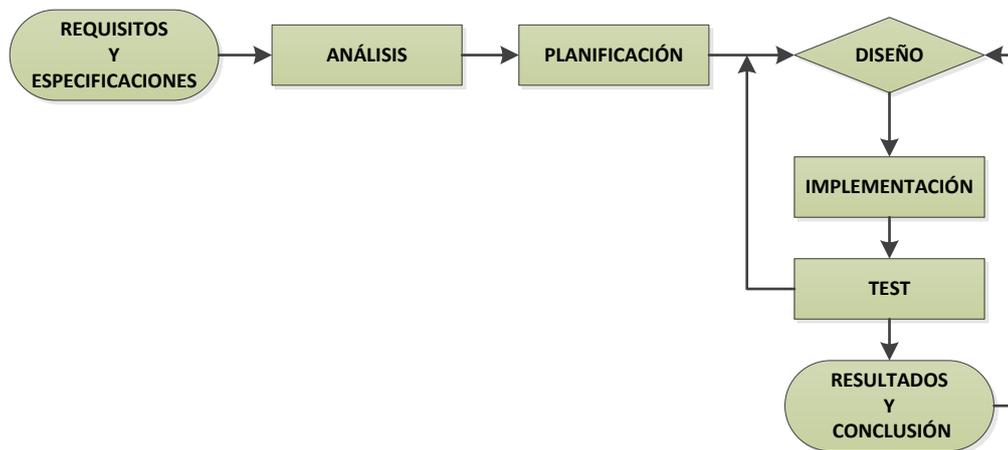


Figura 1.4 – Flujo de fases de trabajo.

Basándonos en dicho diagrama, se numerarán los diferentes capítulos de esta memoria. El eje común será el análisis de los dispositivos RRAM a través del sistema de caracterización que plantearemos.

Cada capítulo constará de una breve descripción de su contenido.

1

- **Capítulo 2:** En este capítulo se detallan todos los requisitos y especificaciones *hardware* y *software* del sistema. Además se plantea la metodología de trabajo y se enumeran las fases del proyecto.
- **Capítulo 3:** Analizamos las necesidades del sistema y cómo podemos cubrirlas mediante los equipos electrónicos y mecánicos disponibles. Estudiamos en detalle el funcionamiento de los dispositivos RRAM. Destacamos las funcionalidades de cada instrumento y decidimos cual será su función específica dentro del sistema. Estudiaremos las limitaciones de los instrumentos, especialmente en lo que se refiere a los tiempos de medida. Por último, determinaremos el tipo de conectividad utilizada para la comunicación remota y diseñaremos el diagrama de flujo del *software*.
- **Capítulo 4:** Mostramos los procesos de fabricación de los elementos *hardware* necesarios para el sistema de caracterización. Explicamos la estructura de las librerías de control de los instrumentos así como las funcionalidades de la herramienta *software* final. Se dará cohesión a todas las partes presentes en el sistema de caracterización.
- **Capítulo 5:** Validaremos el sistema al completo mediante la caracterización de diferentes dispositivos y el análisis de los resultados obtenidos.
- **Capítulo 6:** Breve conclusión y mención a las líneas futuras asociadas al proyecto.

CAPÍTULO

2

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN.

En este capítulo expondremos los requisitos y especificaciones del sistema de caracterización. Se diferenciará entre requisitos de tipo *hardware* y *software*. Igualmente, se considerarán aquellos requerimientos impuestos por la estructura de los propios dispositivos.

Inicialmente, los requerimientos vendrán impuestos por las especificaciones y/o restricciones de cada uno de los bloques que conforman el sistema, según la Figura 2.1.

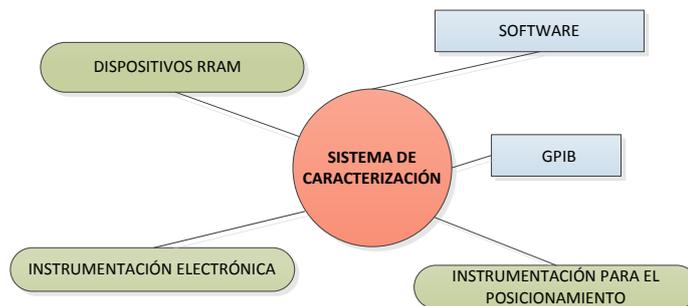


Figura 2.1 – *Diagrama de la composición del sistema.*

En las siguientes secciones se analizan los requerimientos y especificaciones derivadas de cada bloque.

2.1 Requisitos

2.1.1 Diferentes estructuras de los dispositivos RRAM

Los dispositivos que analizaremos pueden estar:

- Encapsulados.
- Sin encapsular.

Los dispositivos encapsulados se dispondrán sobre una PCB y su conexionado se realizará mediante el zócalo correspondiente al encapsulado que irá soldado a dicha placa.

En caso de no estar encapsulados, se utilizarán microposicionadores, con agujas de wolframio, para hacer contacto con los *pads* de los dispositivos RRAM.

2.1.2 Instrumentación electrónica disponible

Para este proyecto, tenemos una limitación en cuanto a los equipos disponibles en el laboratorio L4.

En un principio, se estudiaron los siguientes instrumentos para su posible uso en el sistema de caracterización:

- Analizador de parámetros HP 4145B y Fixture test 16058A.
- Fuente de Tensión/Corriente KEPCO BOP 50-8.
- Fuente de corriente DC Keithley 220.
- Multímetro digital HP 3478A.

Aunque finalmente nos quedamos con el analizador de parámetros HP 4145B y el Fixture test 16058A, ya que el resto de equipos no nos resultaron necesarios.

Aprovechando las funcionalidades de este equipo, deberemos ser capaces de crear el sistema de caracterización y cubrir todos los requerimientos del sistema, como veremos en la sección 3.5.

2.1.3 Instrumentación para asistir el posicionamiento

Para asistir el posicionamiento sobre los contactos de $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ de los dispositivos sin encapsular, se deberá utilizar una mesa de puntas con microposicionadores acoplados.

- Mesa de puntas Karl Suss PSM6.
- *Head probes* o microposicionadores.
- Cámara digital MVV3000.

La mesa de puntas incorpora a los microposicionadores para colocar cada aguja de wolframio de forma independiente sobre cada *pad*. Se necesitarán 2 microposicionadores para conectar un dispositivo RRAM.

La cámara digital se empleará para documentar gráficamente el posicionamiento. El *software* de procesamiento de imágenes utilizado será *Image Pro Plus*.

2.1.4 Control remoto de los equipos electrónicos

Para aumentar la eficiencia del sistema, el analizador de parámetros HP 4145B deberá controlarse de forma remota. Esto agilizará los procesos de medida, donde el *setup* del instrumento se realizará desde la interfaz gráfica de usuario del *software* que implementaremos. Con esto se evita tener que programar el equipo manualmente para cada tipo de medida que realicemos.

Debido a las características del equipo, la comunicación entre éste y la estación de trabajo (ordenador de sobremesa o portátil), se realizará mediante bus GPIB, Figura 2.2.



Figura 2.2 – *Bus GPIB [4]*.

La estación de trabajo necesitará que se le instalen los *drivers* de comunicación con la tarjeta GPIB. Por otro lado, el instrumento necesitará que se le programe una librería con los comandos de comunicación que precise para realizar cada una de sus funcionalidades de forma remota.

2.1.5 Herramienta *Software*

Todo el *software* se programará en MATLAB[®], versión R2011a sobre Windows 7 y XP (x32). El interfaz gráfico de usuario, las librerías de comunicación GPIB con el instrumento y los algoritmos de medida y procesado de datos obtenidos se programarán en esta plataforma.

El programa debe ser capaz de:

- Configurar medidas de dispositivos RRAM:
 - Caracterización de Forming, SET o RESET.
 - Programar una secuencia de ciclos.
 - Caracterización de ciclos pulsados.
- Conocer el estado en el que se encuentra un dispositivo RRAM:
 - *LRS* o estado de baja resistencia (ON).
 - *HRS* o estado de alta resistencia (OFF).
- Configurar el conexionado y el equipo HP 4145B.
- Realizar la medida seleccionada, comunicándose remotamente con el equipo.
- Representar las curvas de datos obtenidos:
 - Corriente en función de la tensión aplicada.
 - Resistencia en función de la tensión aplicada.
 - Tiempo de medida o *timestamp*.
 - Tensiones y corrientes de SET y RESET.
 - Niveles de corrientes para los estados de ON y OFF.
 - Histograma de las tensiones de SET y RESET
- Guardar resultados.
- Cargar curvas de datos medidas anteriormente.
- Post-procesado de las curvas obtenidas.

La aplicación debe ofrecer además compatibilidad de lectura con archivos de curvas obtenidos en el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM) del CSIC. Asimismo, toda la interfaz debe estar detallada en inglés para facilitar su uso en otras instituciones.

El código del programa debe ser lo suficientemente escalable como para integrar un algoritmo de configuración y control de la temperatura del dispositivo, como línea futura del sistema.

2.2 Planificación previa del proyecto

A continuación expondremos las fases constitutivas del transcurso del proyecto, Figura 2.3, describiendo su contenido de manera generalizada.

Una vez expuestas las fases, se considerarán fechas iniciales y finales para cada tarea, a fin de contemplar el alcance temporal que implica el desarrollo del proyecto al completo. Las fechas marcarán el transcurso del trabajo.

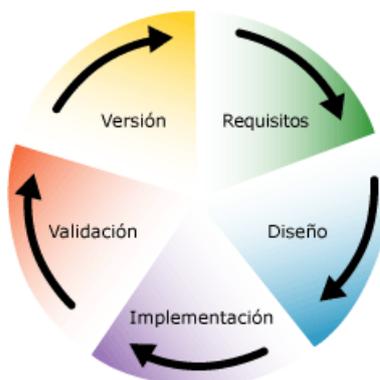


Figura 2.3 – Principales fases de un proyecto [4].

Las diferentes fases son:

- **FASE I- Especificaciones del sistema:** realizaremos un estudio detallado de los requerimientos del sistema de caracterización. Para ello será necesario obtener documentación sobre las memorias RRAM y su estado del arte actual.
- **FASE II- Análisis y Diseño:** en esta fase se agrupan todos los requerimientos y especificaciones de la fase anterior y se trata de concebir la composición del sistema. Repasamos los dispositivos RRAM en detalle, así como su estado del arte. Consideraremos todos aquellos elementos *hardware*, *software* y estructurales necesarios. Analizaremos las funcionalidades de cada equipo electrónico y/o mecánico utilizado, determinando su utilidad dentro del sistema. Estudiaremos las limitaciones temporales impuestas por el analizador de parámetros HP 4145B a la hora de realizar medidas. También analizaremos el protocolo de comunicación GPIB.
- **FASE III- Desarrollo e Implementación:** se fabrica todo el componente *hardware* detallado en la fase I y se realiza el conexionado de la instrumentación involucrada. Una vez analizados los diferentes equipos, y en especial el HP 4145B, comenzamos a programar sus librerías de comunicación GPIB. Tras realizar las primeras pruebas de comunicación y validar su correcto funcionamiento, implementaremos el *software* definitivo en MATLAB®. Desarrollaremos las interfaces gráficas de usuario, los algoritmos de medida y procesado de datos, e integraremos las librerías de comunicación del instrumento.
- **FASE IV- Testeo y Validación:** una vez se ha concluido el proceso de fabricación e implementación, solo queda validar el funcionamiento global del conjunto, resolviendo defectos y anomalías *hardware* y también depurando fallos *software* y aportando algunas mejoras puntuales. Tras esto, la obtención de datos y resultados.

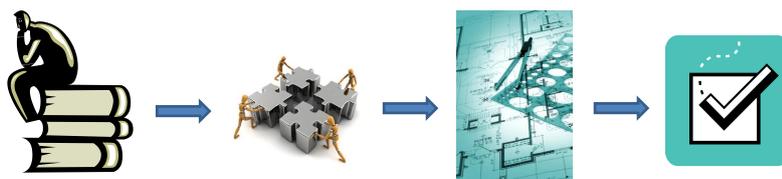


Figura 2.4 – Analogía de fases.

CAPÍTULO

3

ANÁLISIS DEL SISTEMA.

En este capítulo se detalla la fase de análisis del proyecto, realizando un estudio detallado sobre: el funcionamiento de los dispositivos RRAM, los tipos de dispositivos RRAM que el sistema podrá caracterizar, toda la instrumentación y *hardware* implicado, el análisis de las limitaciones de la instrumentación, el conexionado de las líneas de transmisión, así como la comunicación vía bus GPIB.

3.1 Estado actual de las memorias no volátiles.

Las actuales tecnologías de memorias NAND Flash, han hecho posible el transporte y manejo de información en las dos últimas décadas de una forma sin precedente. Su tamaño de celda, ha disminuido en un factor dos cada año con una reducción considerable del precio.

Lamentablemente, están llegando al límite de su escalado, por lo que es necesario buscar una solución de futuro.

La industria de los semiconductores, se encuentra en la actualidad con tres posibles líneas de avance. Uno de estos caminos, sería el desarrollo de nuevos materiales que permitan continuar explotando la actual tecnología CMOS más allá del escalado (lo que se conoce como “*More Moore strategy*”), mejorando por ejemplo las velocidades, las tensiones de funcionamiento, etc. La segunda línea de desarrollo consistiría en la utilización de las tecnologías CMOS en combinación con nuevas arquitecturas que permitan el procesado de la información más allá de lo que se consigue en la actualidad. Por último, desarrollar nuevos dispositivos

con principios de funcionamiento diferentes (lo que se conoce como “*More than Moore strategy*”) y que sustituyan a los actuales dándonos una solución a largo plazo sin alterar en gran medida los procesos de fabricación usuales.

Actualmente existen varias líneas de investigación, Figura 3.1, llamadas a sustituir a la actual tecnología de memorias. En nuestro caso, nos centraremos en la tecnología *Resistive Random Access Memory* (RRAM).

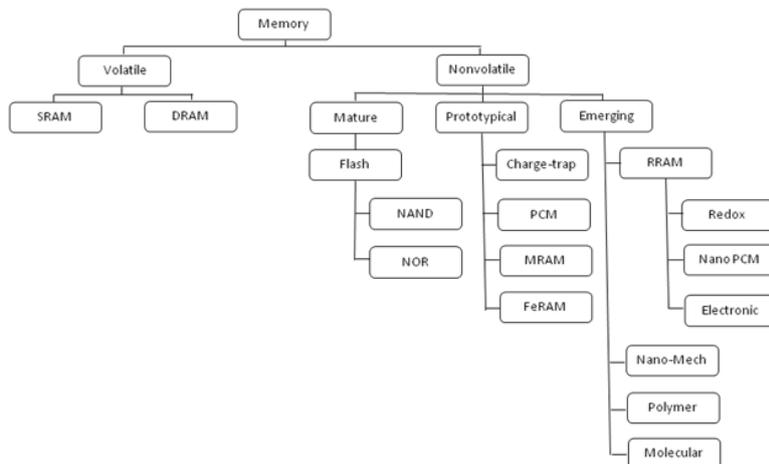


Figura 3.1 – Mapa de los diferentes tipos de memorias y los dispositivos emergentes que se están valorando en la actualidad [14].

3.2 Características básicas y tipos de memorias RRAM.

En el caso de las memorias no-volátiles, una línea importante de desarrollo es la tecnología RRAM (*Resistive Random Access Memory*). Estas memorias basan su funcionamiento en la conmutación entre estados de diferente resistencia. A la simplicidad de su estructura, escalable hasta los 8nm, hay que sumarle su bajo coste, su baja tensión de operación y su posibilidad de integración en estructuras con múltiples niveles.

El término RRAM engloba una familia de cinco tipos específicos de memorias, cada una de ellas con un mecanismo físico distinto que hace posible el almacenamiento de una unidad de información alternando entre dos estados de alta y baja resistencia. Los cinco grupos específicos son los siguientes [18]:

- Memorias de cambio de fase (PCMs).
- Memorias térmico-químicas.
- Memorias de balance de carga.
- Memorias de metalización electromecánica.
- Memorias de efectos electrostáticos/electrónicos.

En la mayoría de los casos las celdas de memoria están compuestas por una estructura metal-aislante-metal (MIM, *Metal-Insulator-Metal*), aunque también existen celdas de memoria compuestas por una estructura metal-aislante-semiconductor (MIS, *Metal-Insulator-Semiconductor*). En el caso de las memorias de cambio de fase, el mecanismo por el que varía de estado es puramente térmico y para el caso de las memorias de efectos electrostáticos/electrónicos los mecanismos son eléctricos. Sin embargo, para el resto, el mecanismo de cambio de estado se basa en el proceso químico de reducción-oxidación (Redox). A este grupo de tres se les denomina Redox-RAM. En la Figura 3.2 vemos la estructura básica de una celda de memoria RRAM.

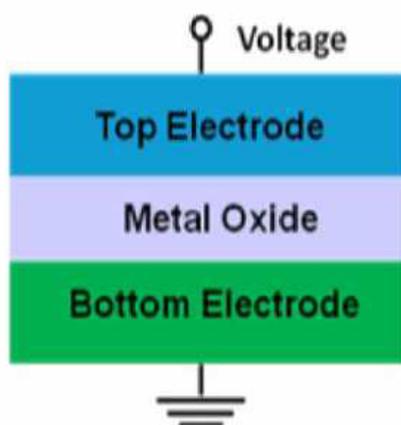


Figura 3.2 – Representación de la estructura básica de una celda de memoria RRAM [18].

Otra distinción que podemos hacer dentro de las memorias RRAM es si la conmutación de la resistencia (o *Resistive Switching*) es unipolar o bipolar, Figura 3.3. En el caso de ser unipolar, la conmutación no depende de la polaridad de la tensión aplicada al dispositivo. Por el contrario, si tenemos una conmutación bipolar, hay que aplicar tensiones opuestas para revertir el estado de la memoria. Desde el punto de vista de diseño, que el proceso sea unipolar es más conveniente.

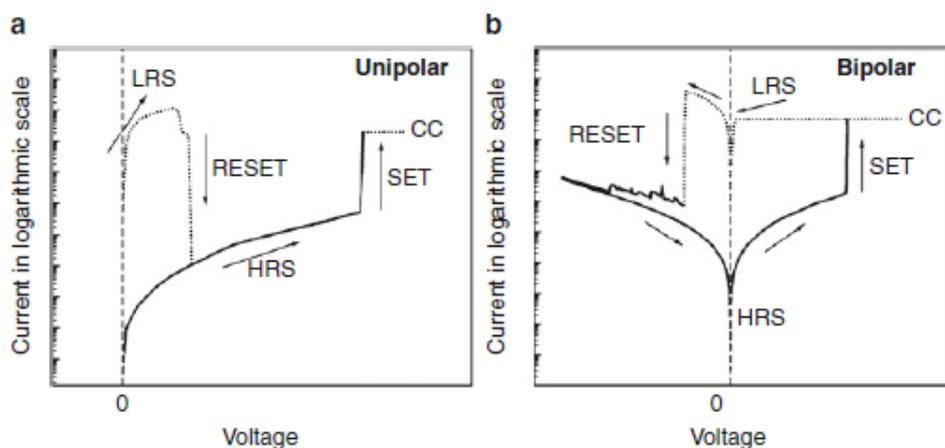


Figura 3.3 – Resistive Switching unipolar y bipolar. Una corriente de compliance (I_{CC}) es usada para evitar una rotura permanente del óxido [19].

3.3 Metodología

La celda de memoria RRAM está formada por una estructura sándwich de dos electrodos y una capa de óxido metálico entre ambos. Estas memorias están basadas en la capacidad que presentan algunos óxidos metálicos para variar su resistencia entre dos valores diferentes. Esto ocurre debido a la creación o destrucción de uno o varios filamentos conductores, en adelante CF (*Conductive Filament*), a lo largo del óxido alterando así el valor de la resistencia global de la estructura. Este filamento, de escala nanométrica, es el único encargado de la conmutación entre los dos estados resistivos. Gracias a esta simplicidad de funcionamiento, este tipo de memorias son de fácil y barata construcción.

3.3.1 Proceso de Forming

Definiciones previas (aunque estas definiciones no se utilizan mucho en el contexto de RRAMs, sí que se usan en el tema de fiabilidad de óxidos, que es un tema muy cercano, por ejemplo, fiabilidad de óxido de puerta en MOSFETs):

- **Soft Breakdown (SB):** rotura de óxido que se puede regenerar.
- **Hard Breakdown (HB):** rotura de óxido que no se puede regenerar (dispositivo roto).

El proceso de *Forming* es la creación en un dispositivo RRAM del primer filamento conductor, el cual está formado por átomos metálicos no oxidados. Este proceso es necesario para que el dispositivo empiece a presentar un Resistive Switching. También será necesario que el *Forming* no pase de un SB, ya que si se produce un HB se rompe el dispositivo.

3.3.2 Procesos de SET/RESET

Como se ha descrito, el efecto de conmutación entre los dos estados de resistencia está controlado por uno o más CFs. Cada uno de estos CFs se ha creado en el proceso de formación (*set*) en el que se somete el óxido a una tensión determinada. De este modo, la resistencia del dispositivo se reduce considerablemente. En las memorias RRAM unipolares se consigue destruir estos filamentos (*reset*) aplicando una tensión también de la misma polaridad que en el proceso de *set*.

La transición *reset* se produce por la ruptura del CF, Figuras 3.4 y 3.5. Esta destrucción se produce debido a que el aumento de temperatura por efecto Joule, que se produce al aplicar una tensión V_{reset} en los electrodos, activa un proceso de difusión, junto con otro proceso de oxidación, que disuelve el filamento en óxido.

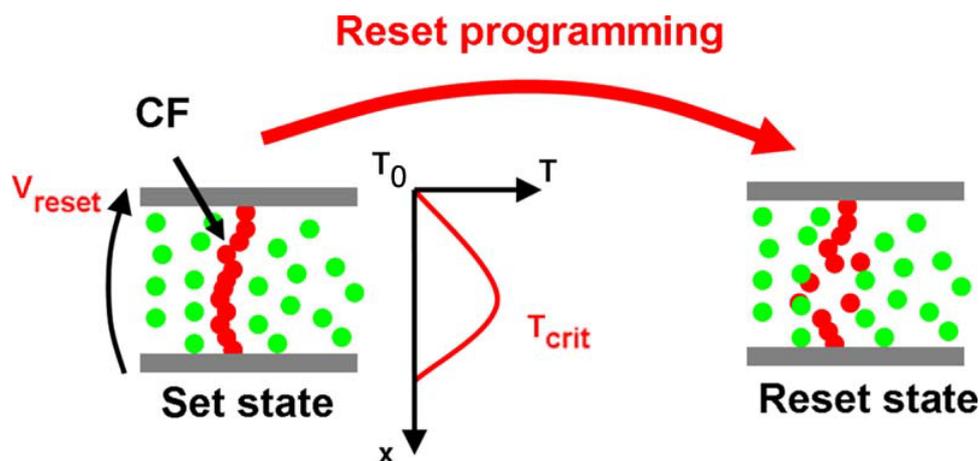


Figura 3.4 – Representación esquemática de la operación de reset. Cuando aplicamos una tensión V_{reset} la temperatura interna se incrementa por efecto Joule activándose la ruptura del CF [17].

Si los elementos conductores que quedan dentro del óxido (restos del CF roto) construyen un camino conductor que una a los dos electrodos, consideramos que un CF se ha creado, por lo tanto la memoria se encuentra en estado de *set* o baja resistividad (a la izquierda en la Figura 3.4).

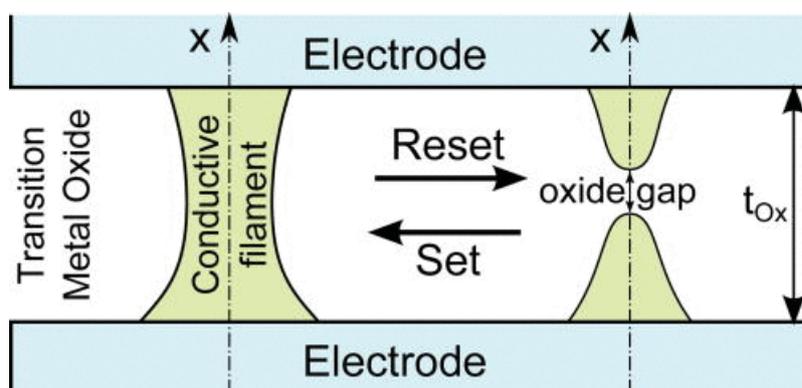


Figura 3.5 – Representación esquemática de la formación y destrucción del CF dando como resultado las operaciones de set y reset respectivamente [9].

En este trabajo se estudiará el comportamiento de los dispositivos de memoria RRAM al aplicarle barridos de tensión. En la Figura 3.6 mostramos los resultados que en [17] se aportan para el proceso de *reset*.

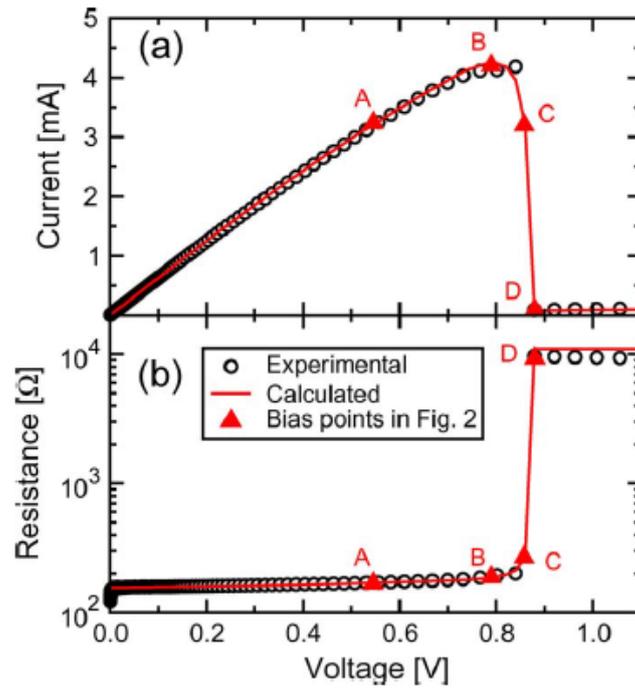


Figura 3.6 – Curvas características (a) I - V y (b) R - V del proceso de reset [17].

Otra característica que se considera del comportamiento de estos dispositivos es la dependencia del proceso de *reset* con la velocidad de la variación de la tensión aplicada (la pendiente de la rampa de tensión). Los resultados que se presentan en [17] se muestran en la Figura 3.7). Podemos observar que a mayor velocidad, mayor es la tensión de *reset*.

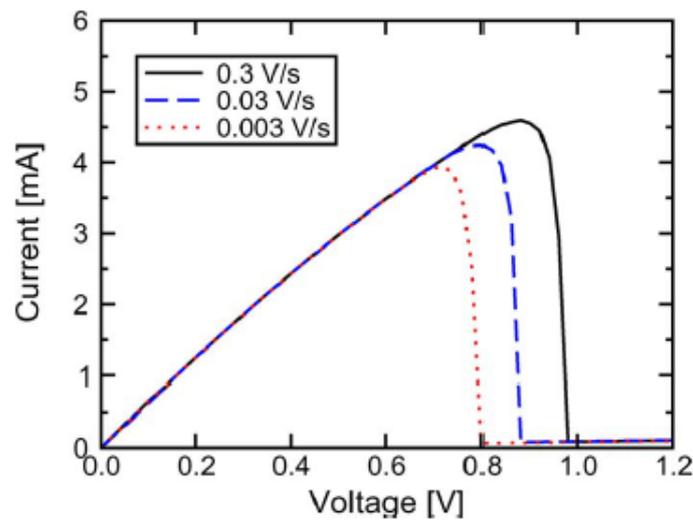


Figura 3.7 – Representación de la curva I - V variando la velocidad de cambio de la tensión aplicada [17].

3.3.3 Cálculo de las tensiones de SET y RESET

Para obtener las tensiones a las que se produce el cambio de estado en una curva (tensiones de SET y RESET), utilizaremos distintos métodos que hemos acordado durante el transcurso del proyecto.

En el caso de una curva de un proceso SET, el método de obtención de la V_{set} que utilizaremos será el siguiente:

$$V_{set} = V_{i+1} \quad si \quad I_{i+1} = a \cdot I_i \quad tal \ que \quad a \geq 2 \quad (3.3.1)$$

Es decir, que se considerará la tensión de SET cuando la corriente aumente de un punto a otro al menos al doble de su valor.

De igual modo, cuando se trate de un proceso Forming, la $V_{forming}$ se obtendrá con una ecuación idéntica a la anterior:

$$V_{forming} = V_{i+1} \quad si \quad I_{i+1} = a \cdot I_i \quad tal \ que \quad a \geq 2 \quad (3.3.2)$$

Y para el caso de un RESET, tenemos 4 métodos para obtener la tensión de reset:

$$V_{reset} = V_{i+1} \quad si \quad I_{i+1} = a \cdot I_i \quad tal \ que \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (3.3.3)$$

$$V_{reset} = V_i \quad si \quad I_i = b \cdot I_{max} \quad tal \ que \quad 0 \leq b \leq 1 \quad (3.3.4)$$

$$V_{reset} = V_{i+1} \quad tal \ que \quad I_{i+1} < I_i \quad (para \ la \ máxima \ I_i) \quad (3.3.5)$$

$$V_{reset} = V_i \quad si \quad I_i = I_{limit} \quad (3.3.6)$$

Estas ecuaciones serán utilizadas por el *software* de medida para el post-procesado de las curvas y así poder comparar la precisión de los distintos métodos.

3.4 Máscaras de los dispositivos

En esta sección analizaremos:

- Por un lado, el tipo de máscara diseñada por la Universidad de Granada y fabricada en colaboración con el Instituto de Sistemas y Computadores-Microsistemas y Nanotecnologías (INESC-MN) de Lisboa.
- Por otro lado, el tipo de máscara utilizado por el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM).

Estos diseños son los utilizados por las muestras que poseemos y que caracterizaremos.

La deposición de dispositivos sobre un sustrato de silicio, generalmente se realiza siguiendo una plantilla realizada mediante un *software* de diseño asistido que indica el área de posicionamiento de cada dispositivo. Esto es lo que se conoce como máscara del dispositivo.

3.4.1 Máscaras del INESC-MN.

En el Instituto de Sistemas y Computadores-Microsistemas y Nanotecnologías (INESC-MN) se realizó una fabricación de cuatro chips de área $8200 \times 8200 \mu\text{m}$ sobre un sustrato de óxido de silicio en el que los electrodos estarán formados por una aleación metálica de titanio wolframio (TiW) y el aislante de óxido de silicio (SiO_2). En la Figura 3.8 puede verse la máscara.

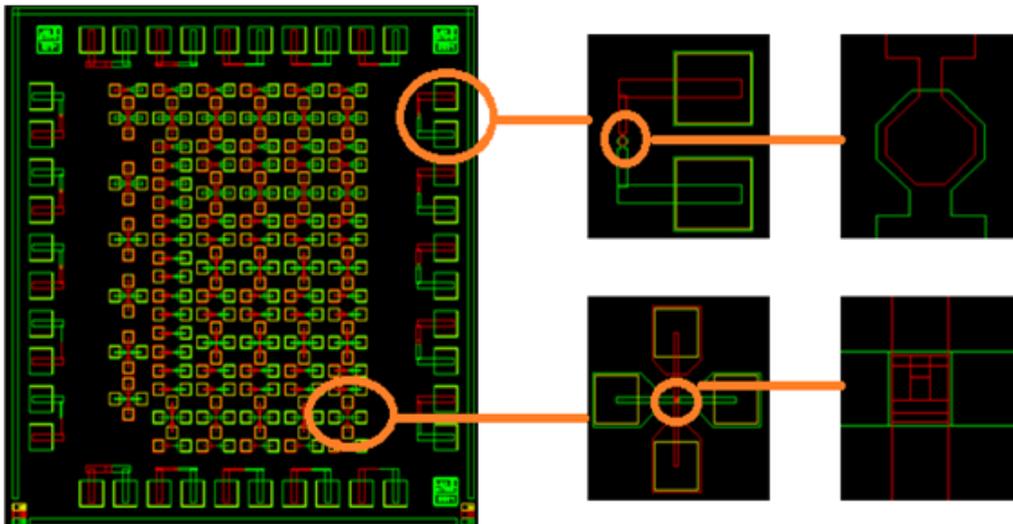


Figura 3.8 – Máscara del chips de dispositivos RRAM, con ampliación en superficies de contactos entre electrodos inferior y superior [16].

La fabricación de los chips, tuvo lugar a cabo en una sala blanca en el INESC-MN. En la Figura 3.9 podemos ver los chips cortados después de haber sido fabricados.

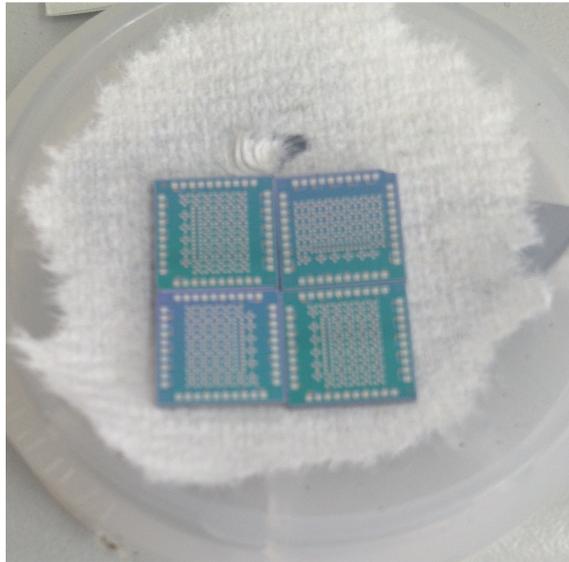


Figura 3.9 – *Chips cortados sin encapsular [16].*

En laboratorio L4 disponemos de dos de estos chips con un encapsulado DIP40 (Figura 3.10). Se trata de los chips ZN2TJ19 y ZN2TJ21.

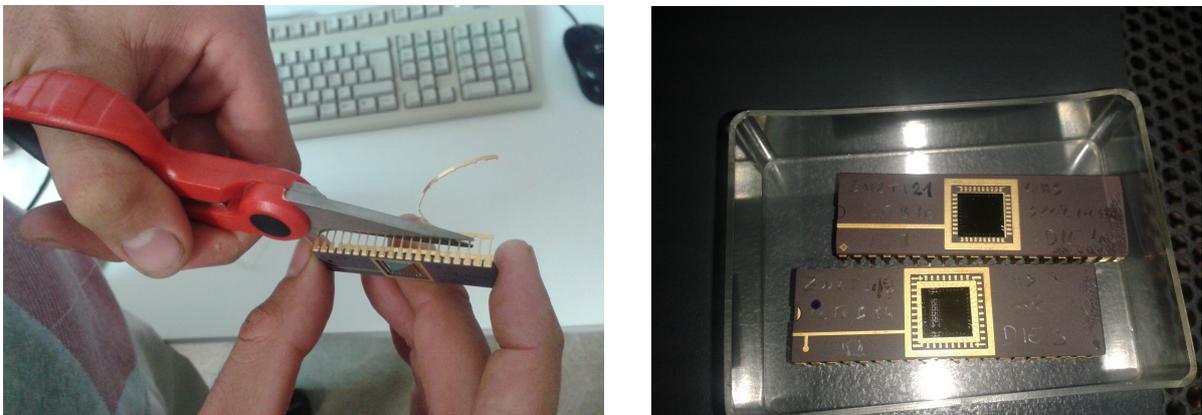


Figura 3.10 – *Fotografías de los chips encapsulados del INESC-MN.*

3.4.2 Máscaras del IMB-CNM.

Por otro lado, disponemos de un trozo de oblea cedido por el Instituto de Microelectrónica de Barcelona (IMB-CNM), que puede verse en la Figura 3.11 con una comparativa métrica.

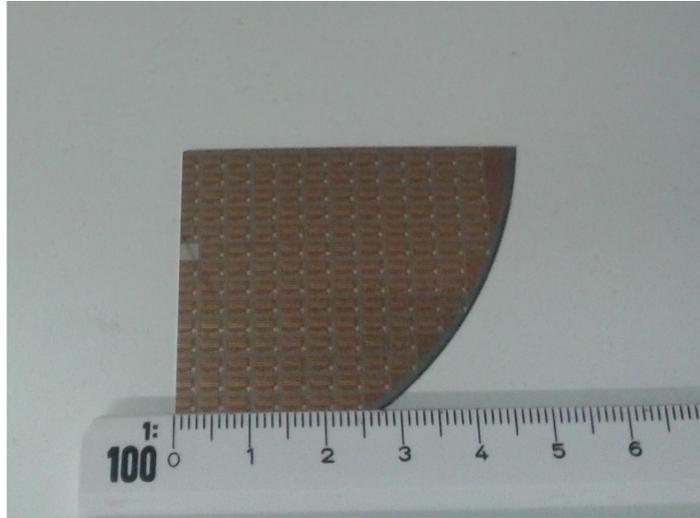


Figura 3.11 – Fotografía del trozo de oblea cedido por el IMB-CNM.

Se trata de un trozo del juego de máscaras CNM-733, que está diseñado para fabricar indistintamente estructuras Metal-Aislante-Semiconductor (MIS), Metal-Aislante-Metal (MIM), o ambas estructuras a la vez, Figura 3.12.

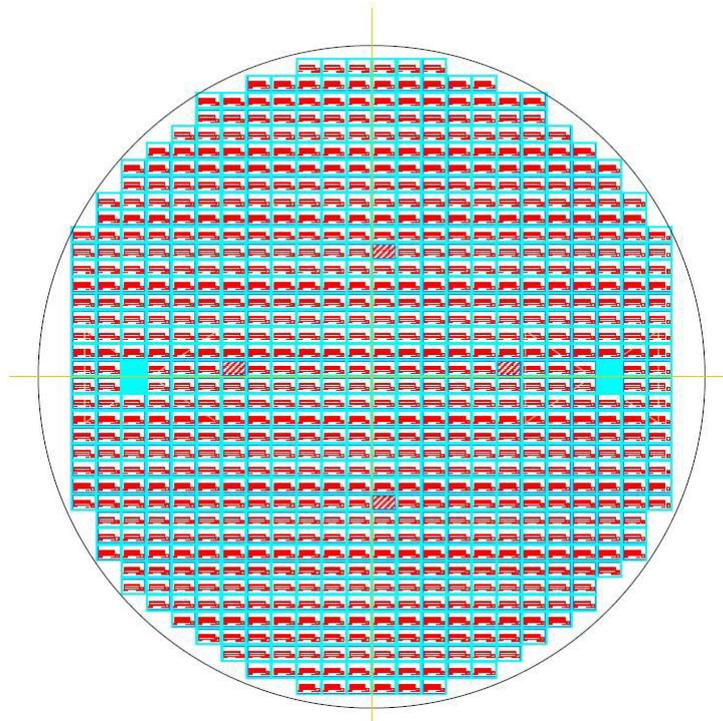


Figura 3.12 – Vista general del conjunto CNM-733.

El conjunto de máscaras CNM-733 contiene 716 chips (Figura 3.12) en obleas de 100mm de diámetro, siendo las dimensiones del chip de $3750\mu\text{m} \times 2525\mu\text{m}$ (Figura 3.13).

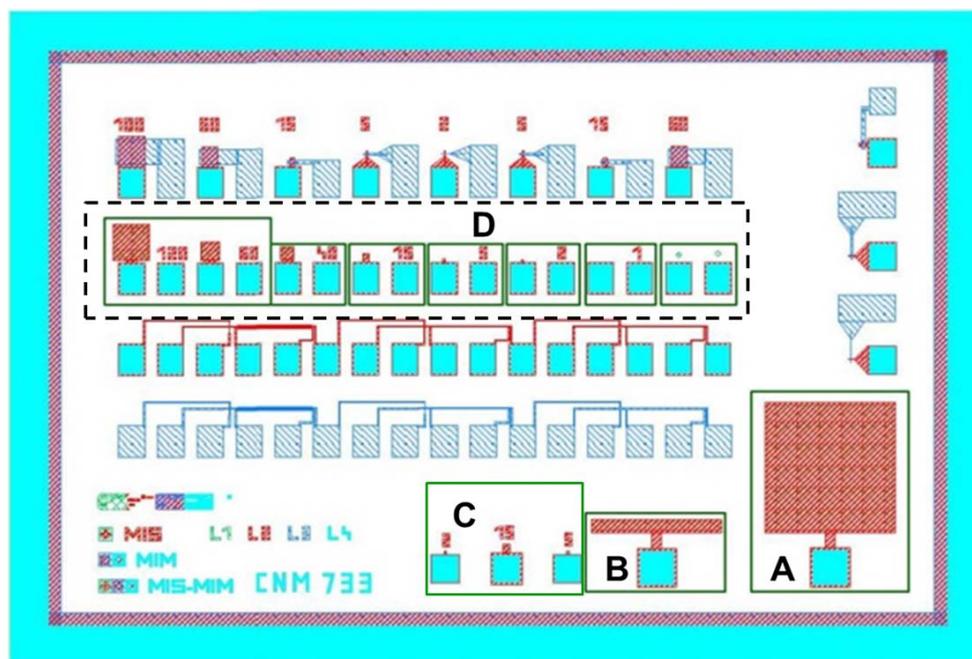


Figura 3.13 – Vista general del chip.

En este trabajo, se van a medir estructuras MIS ($\text{Ni}/\text{HfO}_2/\text{n}^+\text{Si}$) del grupo D (Figura 3.13). Este grupo consiste en 7 estructuras capacitivas de geometría cuadrada cuyo lado, en μm , se indica en la cifra de la derecha de la estructura. Las dimensiones de las estructuras MIS son las que se indican en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.14.

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

Tabla 3.1 – Dimensiones de las estructuras MIS del grupo D.

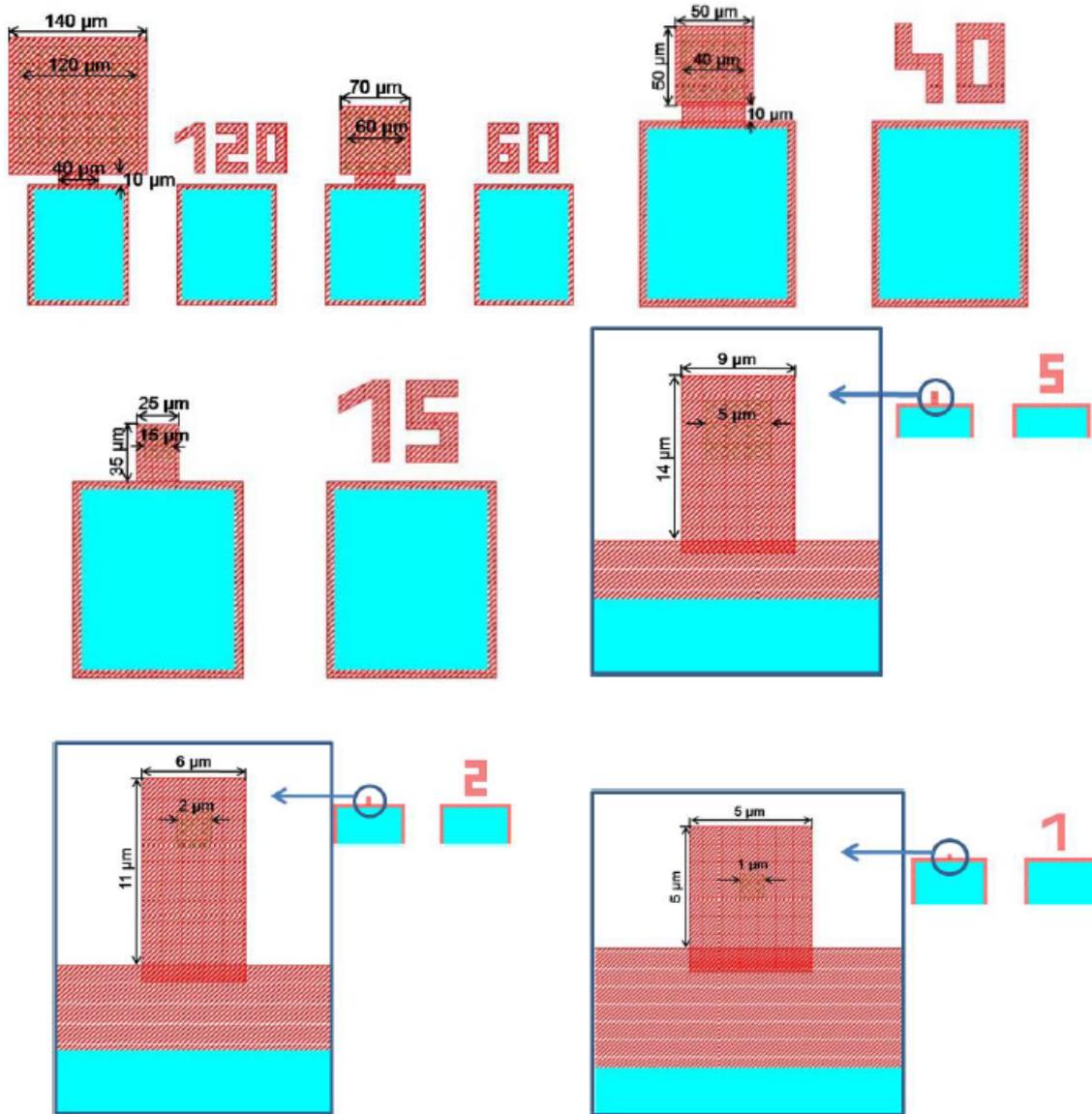


Figura 3.14 – Dimensiones de las estructuras MIS del grupo D.

3

El conjunto de chips del que disponemos en el laboratorio, se trata de un trozo de la oblea 7070-2 del conjunto de máscaras CNM-733 y dispone de 143 chips útiles que se pueden ver mapeados en la Figura 3.15.

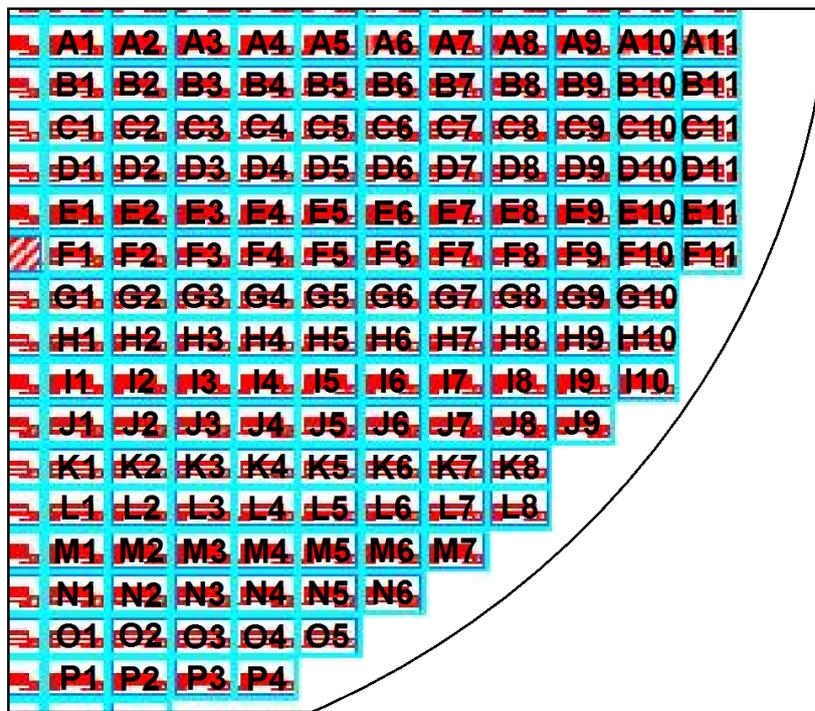


Figura 3.15 – Mapeo del trozo de oblea 7070-2.

Lo que haremos cuando tengamos que medir dispositivos de la oblea, será imprimir un mapa como el de Figura 3.15 por cada tipo de dispositivo que vayamos a medir. De este modo, vamos marcando cada vez que se mida un dispositivo.

3.5 Análisis del *Hardware* disponible

Durante esta sección analizaremos los equipos de instrumentación electrónica y posicionamiento mecánico que disponemos para crear el sistema de caracterización de dispositivos RRAM.

Detallaremos las características y funcionalidades de cada equipo, determinando cual será su finalidad dentro del sistema y como nos comunicaremos de forma remota, en caso de necesitarlo.

3.5.1 Analizador de parámetros HP 4145B

El modelo *Semiconductor Parameter Analyzer* 4145B, Figura 3.16, pertenece a una gama de instrumentación electrónica de altas prestaciones, completamente programable y automatizada, diseñada para medir, analizar y representar gráficamente las características DC de un amplio rango de dispositivos semiconductores como diodos, transistores bipolares y de efecto campo, obleas, ICs, componentes pasivos, etc.

Las principales aplicaciones de este instrumento de medida tienen que ver con procesos de diseño de circuitos integrados asistido por computadora (CAD), test y evaluaciones de nuevos dispositivos, evaluación de materiales, control de procesos, control de calidad de semiconductores y selección de componentes circuitales.

En nuestro caso constituye una pieza fundamental de nuestro sistema ya que se utilizará para caracterizar los procesos de SET y de RESET de los dispositivos RRAM.



Figura 3.16 – *Analizador de parámetros HP 4145B [6].*

El HP 4145B está equipado con:

- Cuatro unidades programables SMU (*Source Monitor Units*).
- Dos fuentes de tensión programables V_s (*Voltage Source*).
- Dos unidades de monitorización de tensión V_m (*Voltage Monitor*).

Las SMU disponen de tres modos de funcionamiento:

- Fuente de corriente (I) con monitorizado de tensión.

- Fuente de tensión (V) con monitorizado de corriente.
- Modo común.

Cuando se trabaja en cualquiera de los dos primeros modos, la corriente o tensión suministrada puede tomar un valor constante o ser recorrida mediante un barrido lineal o logarítmico acotado por extremos y con un determinado paso o *step*. En modo común, anula la SMU realizando un cortocircuito a masa, Figura 3.17.

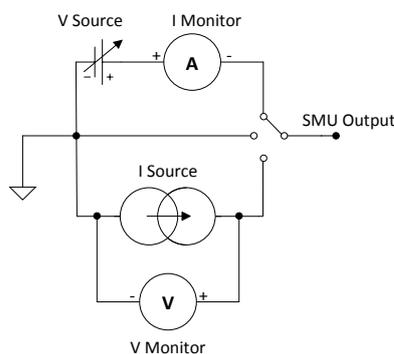


Figura 3.17 – Esquema circuitual de una unidad SMU.

El modo de operación se selecciona mediante un conmutador que acciona: una fuente de tensión regulable con un amperímetro en serie (modo fuente V), una fuente de corriente con un voltímetro en paralelo (modo fuente I), o directamente cortocircuita la salida a masa.

Cuando utilizamos el modo fuente de tensión V , la SMU puede programarse para dar una salida de tensión continua entre 0 V y $\pm 100\text{ V}$ mediante tres rangos diferentes de 0 V a $\pm 19.999\text{ V}$, de $\pm 20\text{ V}$ a $\pm 39.998\text{ V}$ y de $\pm 40\text{ V}$ a $\pm 100\text{ V}$, con resoluciones de 1 mV , 2 mV y 5 mV respectivamente.

Por otro lado cuando utilizamos la SMU como fuente de corriente I , esta puede suministrar una corriente continua desde $\pm 1\text{ pA}$ hasta $\pm 100\text{ mA}$ a lo largo de nueve rangos con una resolución que como máximo será de 1 pA . Además se puede fijar un límite o *compliance level* de corriente (en modo V) o tensión (en modo I) para evitar dañar el dispositivo que se está analizando.

Además, las fuentes de tensión V_s pueden también programarse a un valor constante de voltaje o puede especificarse un barrido lineal o logarítmico desde 0 V hasta $\pm 20\text{ V}$ con una resolución máxima de 1 mV . Por su parte los voltímetros V_m miden tensiones desde 0 V hasta $\pm 20\text{ V}$.

El límite de potencia del analizador de parámetros viene dado por la hipérbola $P=2\text{ W}$. Esto hace que debemos cumplir unos determinados niveles de operación acotados según el modo y rango en el que trabajemos, recogidos en la tabla 3.2.

- (1) Conectores de entrada V_{m1} y V_{m2} . Las conexiones de entrada son coaxiales macho 2-lug 04145-61630s.
- (2) Conectores de salida V_{s1} y V_{s2} . Las conexiones de entrada son coaxiales macho 2-lug 04145-61630s.
- (3) Conectores SMU de salida. Las SMU, al ser capaces operar con corrientes inferiores a 1 nA, utilizan cables triaxiales. Las conexiones de salida del HP 4145 son triaxiales macho 3-lug 04145-61622s.
- (4) Cortocircuito entre *Common* y Masa. Es muy importante saber además que el *Common* de cada SMU va a masa, por lo que una SMU podrá actuar como fuente de corriente, fuente de tensión o masa.
- (5) Conmutador de filtro. Este conmutador se utiliza para aplicar o no un filtro que reduce el ruido de las líneas de transmisión.
- (6) Conector de 24 pines para comunicación con el 16058A Test Fixture.
- (7) Línea de fusible.
- (8) Selector de línea de voltaje.
- (9) Conector a la red eléctrica AC.
- (10) DIP Switch para establecer la dirección GPIB del HP 4145B. En nuestro caso la dirección del dispositivo será 17 (10001 bin).
- (11) Conector GPIB.
- (12) Conectores CRT externos.

Llegado este punto, analizamos el conexionado que realizaremos entre el HP 4145B y los diferentes dispositivos RRAM que podemos caracterizar.

El principal elemento diferenciador de un dispositivo será si dispone o no de encapsulado. Para aquellos dispositivos en los que los contactos o *pads* no sean accesibles mediante elementos de conexión tradicionales, utilizaremos una mesa de puntas con microposicionadores acoplados, ver secciones 3.5.3 y 3.5.4 respectivamente.

Por otro lado, si los dispositivos están encapsulados, utilizaremos una caja de conexionado o *test fixture*, detallada en el apartado 3.5.2.

3.5.2 16058A Test Fixture

El 16058A Test Fixture, Figura 3.20, es un kit accesorio de medida adicional que permite conectar los terminales del dispositivo sometido a análisis, que se inserta en un zócalo dentro

de este modulo. Servirá para conectar los dispositivos RRAM encapsulados y alimentarlos eléctricamente.

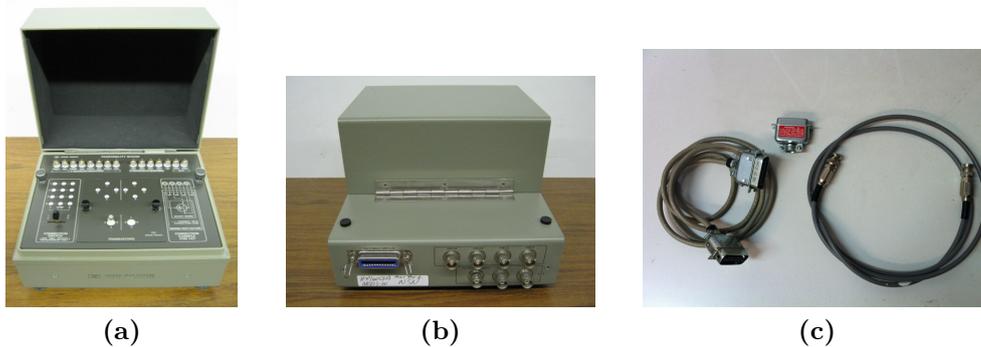


Figura 3.20 – *16058A Test Fixture.*

Las cuatro SMUs, las dos fuentes de tensión y los dos monitores de tensión se pueden utilizar a través del fixture, Figura 3.21. Para ello incorpora cuatro conexiones triaxiales macho 3-lug de entrada para las SMUs y el conector de 24 pines (Figura 3.20(c) izq.) a través del cual el HP 4145B controla las dos fuentes de tensión y los dos monitores de tensión.

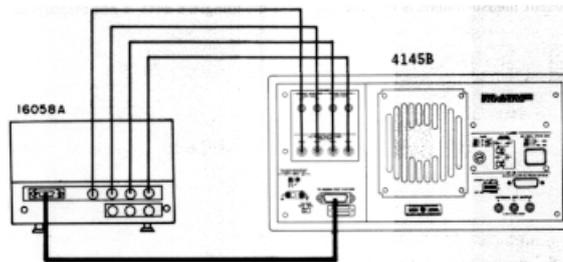


Figura 3.21 – *Panel trasero de HP 4145B y Fixture Test [6].*

En caso de no querer utilizar el 16058A Test Fixture para realizar medidas, el conector de 24 pines puede desconectarse del HP 4145, reemplazándolo por el *shorting connector* 04145-61623 (Figura 3.20(c) centro), que simula el cierre virtual de la compuerta del fixture.

La Figura 3.22 muestra el modo en el que están conectados el HP 4145B y el 16058A Test Fixture.

3.5.3 Mesa de puntas Karl Suss PSM6

En esta sección se introduce la mesa de puntas Karl Suss PSM6, Figura 3.24, diseñada para efectuar un posicionamiento preciso sobre los *pads* de dispositivos sin encapsular, depositados sobre sustratos de silicio.

La estructura de la mesa se asienta sobre una base anti-vibración de granito (*shock absorbing*) [5]. La mesa dispone de una plataforma regulable o *wafer stage*, también llamada *chunk*, donde se inmoviliza el dispositivo mediante una bomba de vacío.

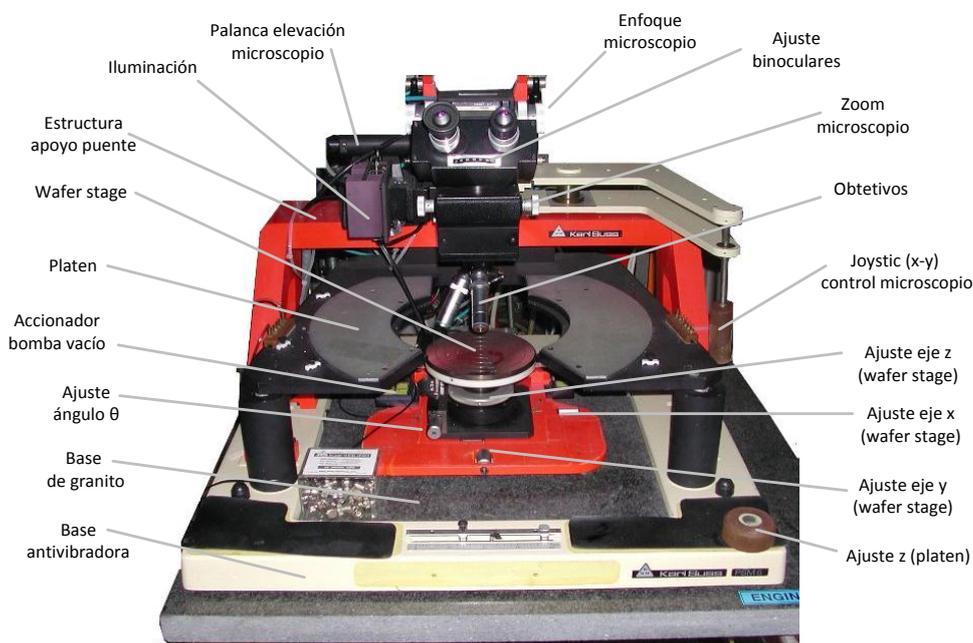


Figura 3.24 – Mesa de puntas PSM6 Karl Suss.

La superficie del *wafer stage* se regula en el eje X e Y mediante dos roscas micrométricas situadas en la base de la estructura. Un pistón neumático regulable con 30 mm de recorrido permite el movimiento en el eje Z.

El ángulo *theta*, que forma el dispositivo sobre el plano XY una vez se fija al *wafer stage*, también es regulable.

Las cabezas (*head probes*) se colocan sobre una plataforma o *platen*. El *platen*, mediante unas abrazaderas de sujeción, da cabida a un total de hasta ocho cabezas micrométricas PH 150 o doce PH 100 conectadas al dispositivo, ver sección 3.5.4.

El accionador de la bomba de vacío va conectado a una caja de control PSM6 mediante un cable de conexión de 24 pines. Para poder utilizar dicho mando es necesario que la caja esté encendida y la bomba de vacío conectada, Figura 3.25.

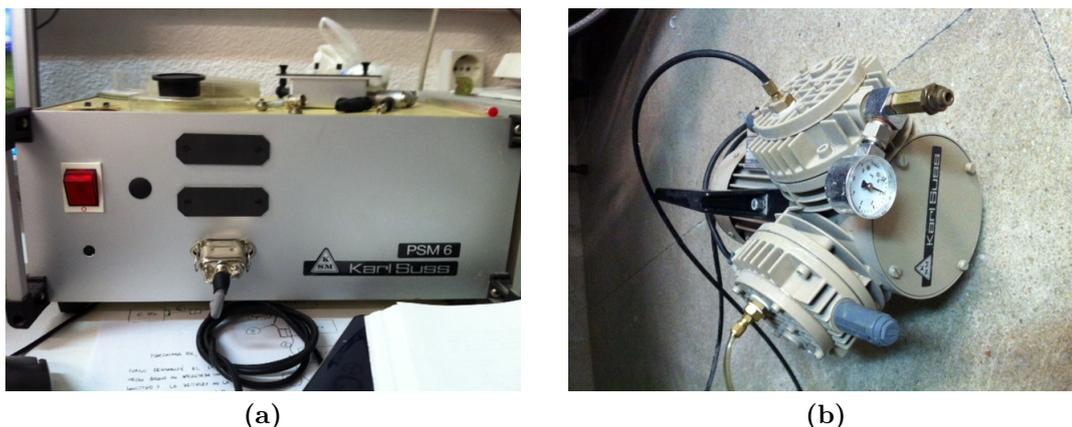


Figura 3.25 – Módulo controlador y bomba de vacío.

El mando accionador permite configurar diferentes posiciones del *wafer stage* según se precise:

Vac.: Si accionamos este botón y el motor está conectado y encendido, el *wafer stage* ejerce succión en toda su superficie mediante orificios que se reparten en cada muesca concéntrica de la plataforma. Una vez pulsado, se encenderá el led de dicho botón.

X-Only: Este pulsador bloquea el pistón neumático Y del *wafer stage* y únicamente permite movilidad en X y Theta para una rápida orientación del dispositivo. Cuando se acciona el freno, se enciende el led.

Stop: Bloquea la posición del *wafer stage* una vez se pulsa. Mientras esté bloqueado, se activa el led de dicho botón.

Load: Cuando se pulsa este botón (estando el led encendido), el pistón neumático del eje Z del *wafer stage* activa automáticamente un recorrido ascendente de 10 mm desde la posición en la que se encontrase antes de pulsar, y apaga el led. De manera opuesta, si el led está apagado y se pulsa el botón, el *wafer stage* baja 10 mm su posición e inmediatamente después enciende el led. Esto permite bajar la plataforma rápidamente para insertar o retirar el dispositivo que se está analizando.

La PSM6 incluye un microscopio trinocular *Microzoom II* de *Cambridge Instruments* con soporte para el acoplo de hasta cinco objetivos diferentes.

Los cuatro objetivos BAUSH & LOMB de aumento x50, x25, x8 y x2.25 respectivamente van roscados sobre un óculo giratorio.

Aparte de los binoculares, existe un tercer óculo a través del cual se puede acoplar una cámara digital conectada al PC por puerto USB para guardar capturas de los dispositivos.

De forma adicional y con objeto de poder documentar el escenario de posicionamiento de

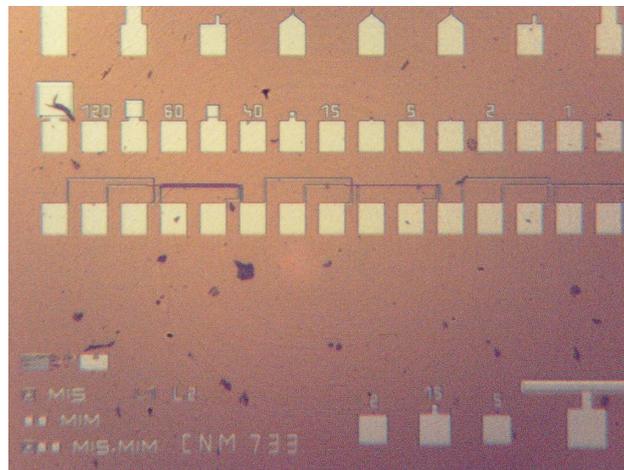
las puntas, hemos acoplado al microscopio una cámara digital modelo MVV 300 conectada mediante USB.

Desde el equipo de trabajo, podemos ejecutar el *software* de procesamiento de imagen *Image Pro Plus* que ofrece un conjunto de herramientas de captura secuencial, procesado, medida y análisis de las imágenes tomadas [8].

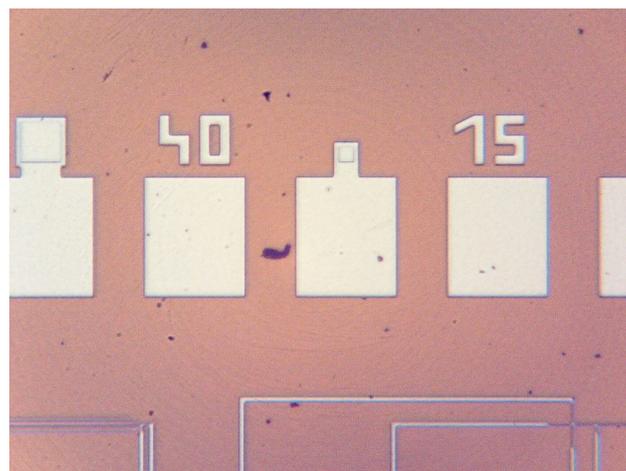
La cámara digital se ha colocado sobre un cilindro de aluminio hueco incrustado en el tercer óculo del microscopio, de tal forma que mantenga la distancia focal de la lente principal sobre el objetivo y permita la visualización simultánea a través de la cámara y de los binoculares del microscopio.

A continuación, un ejemplo de dos capturas sobre la oblea 7070-2 del conjunto de máscaras del CNM.

3



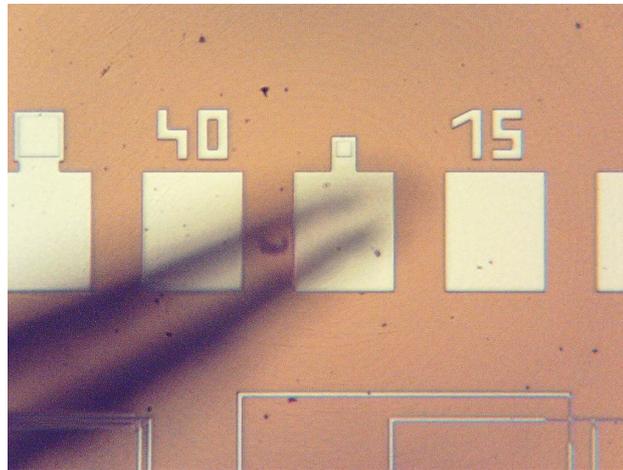
(a)



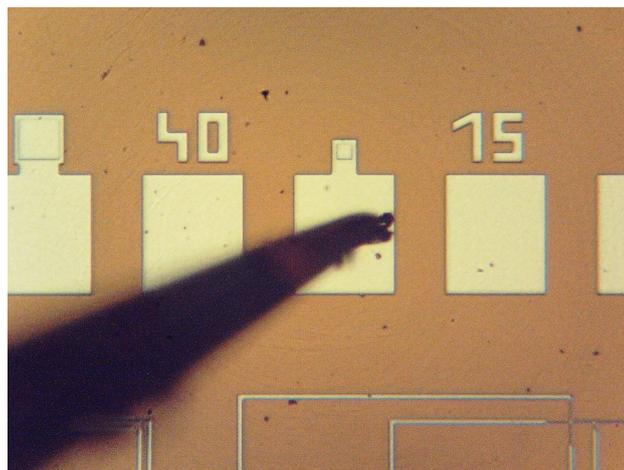
(b)

Figura 3.26 – a) Vista de uno de los chips. b) Dispositivos D3 y D5 (Tabla 3.1).

También se incluyen capturas del posicionamiento de una punta sobre un *pad* de la muestra, diferenciando entre la imagen 3.27(a) en la que la aguja aún está desenfocada con respecto a la base de la muestra y por tanto aun no se encuentra apoyada, y la imagen 3.27(b) en la que podemos apreciar con definición tanto el contorno del *pad* como la aguja ya posicionada y además incurriendo un pequeño roce con la superficie metálica, asegurando el contacto.



(a)



(b)

Figura 3.27 – a) *Punta sin contacto.* b) *Punta en contacto.*

Una vez descrita la estructura de la mesa de puntas o *probe station*, comentaremos los microposicionadores que utilizaremos.

3.5.4 Microposicionadores

Disponemos de dos tipos de microposicionadores (*head probes*) para situarnos sobre los contactos de los dispositivos:

- PH 150.
- PH 100.

Ambos son del fabricante Cascade Microtech Inc, actualmente al cargo de la división de *head probes* que antes dirigía Karl Suss Microtech.

3.5.4.1 Microposicionador PH 150

La PH 150, Figura 3.28, incorpora un sistema de posicionamiento independiente en los tres ejes, libre de desviaciones por efecto *crosstalk* mecánico. Está fabricada en aluminio y utiliza rodamientos con rodillos cruzados.



Figura 3.28 – PH 150 Cascade Microtech Probe Head.

Ofrece un rango de recorrido de 10 mm tanto en el eje X como en el Y, y 8 mm en el eje Z. Además, la placa frontal del microposicionador permite un movimiento adicional de ± 7.5 mm en el eje Z.

Las tuercas reguladoras de posicionamiento ofrecen una resolución de $250 \mu\text{m}/\text{revolución}$ y una resolución máxima de $0.5 \mu\text{m}$.

El brazo que sujeta la punta puede ser de tipo coaxial, triaxial o Kelvin según el modelo. La pinza de la punta del brazo, donde se acopla la aguja de contacto, esta chapada en oro y permite la firme sujeción de la aguja en tres ángulos predefinidos.

Las dimensiones de su base son $72 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$, lo que nos permite colocar hasta un máximo de 4 cabezas de este tipo por cada semicírculo del *platen*, para un total de 8 PH 150 como máximo. En la Figura 3.29 podemos ver la vista lateral de una de ellas, con sus dimensiones en milímetros.

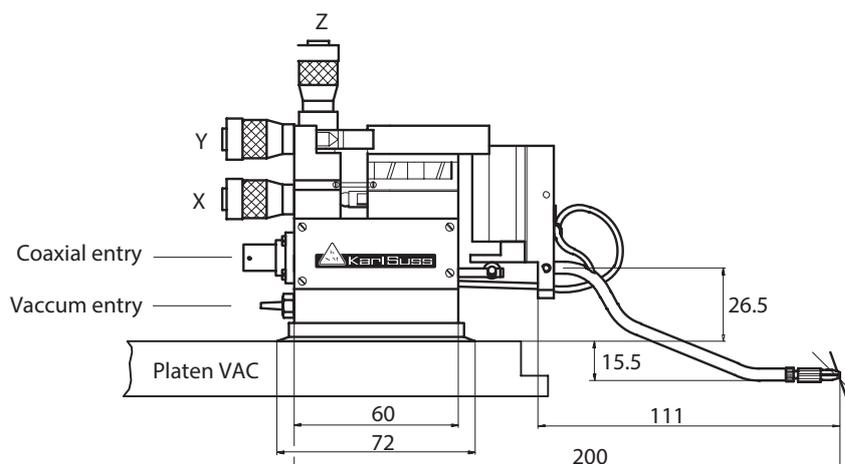


Figura 3.29 – Vista lateral acotada de la PH 150 [1].

Existen dos conexiones traseras, una de ellas de tipo coaxial. Esta será de gran utilidad para conectar el microposicionador a equipos como el HP 4145B, descrito en la sección 3.5.1. Las tomas de salida del HP 4145B son de tipo triaxial para permitir las medidas a muy bajas corrientes, por lo tanto necesitaremos adaptadores triaxial-coaxial que detallaremos en el apartado 3.5.5.

A continuación analizamos la línea de transmisión coaxial que incorpora el brazo de la PH 150, Figura 3.30. Se aprecia como la pinza donde se acopla la aguja está directamente conectada al *center conductor* del coaxial para transmitir la señal directamente al *pad* del dispositivo, mientras que el *outer conductor* que está a masa queda aislado sin hacer contacto con la rosca de sujeción de la pinza.

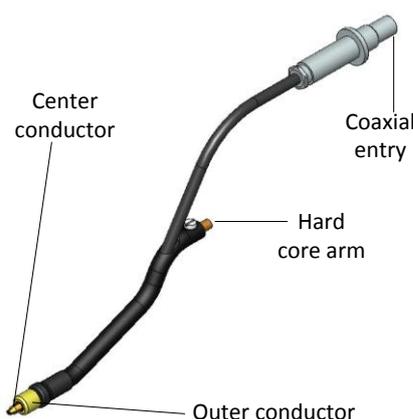


Figura 3.30 – Detalle de la línea coaxial del brazo de la PH 150 [1].

Antes de concluir con la descripción de este microposicionador, comentar que soporta un voltaje máximo de operación de 6.5 kV en continua en un rango de temperatura de operación entre los 25 °C y 300 °C. Puede posicionarse en *pads* inferiores a 100 μm x 100 μm .

3.5.4.2 Microposicionador PH 100

La cabeza PH 100 (Figura 3.31) es otro tipo de microposicionador del que disponemos. Es de menor tamaño, precisión y coste que la PH 150.



Figura 3.31 – PH 100 Cascade Microtech Probe Head.

Tiene el tamaño más reducido de toda la línea de cabezas micrométricas de la marca Cascade Michotech. Incorpora un sistema de etapa única con un recorrido lineal de 7 mm en el eje X, 8 mm en el eje Y y 25 mm en el eje Z.

Dispone de un reglaje de la presión que ejerce la punta sobre un contacto, entre 5 y 20 gramos. Su resolución es 10 veces menor que la del modelo PH 150 y se sitúa en aproximadamente $5\ \mu\text{m}$, con reglajes que varían $350\ \mu\text{m}/\text{revolución}$ en el eje X, $500\ \mu\text{m}/\text{revolución}$ en el eje Y y $70\ \mu\text{m}/\text{revolución}$ en el eje Z.

Las dimensiones de su base son $60\ \text{mm} \pm 20\ \text{mm}$ (Figura 3.32), por lo que cada semicírculo del *platen* tiene espacio para 6 cabezas de este tipo, lo que significa un total de hasta 12 en todo el *platen*. Está construida en aluminio y terminada en níquel.

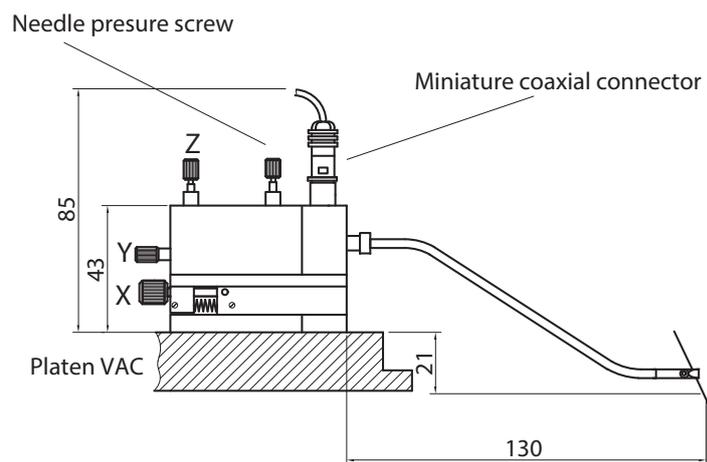


Figura 3.32 – Vista lateral acotada de la PH 100 [2].

La línea de transmisión coaxial se muestra en la Figura 3.33. El conector coaxial de entrada a la cabeza es de tipo *miniature*.

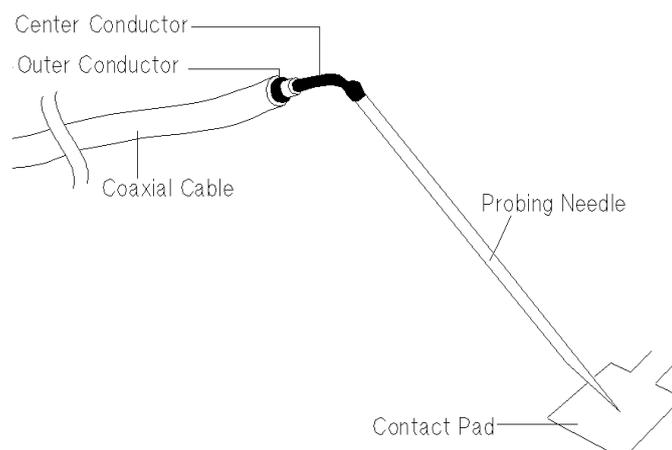


Figura 3.33 – Detalle de la línea coaxial y la punta del brazo de la PH 100 [20].

Esta cabeza micrométrica resulta válida para el posicionamiento sobre contactos (*pads*) siempre que estos sean de un tamaño mínimo de $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$.

En la Figura 3.34, se observa como quedan dispuestas un conjunto de cinco PH 100 sobre el *platen*. Para inmovilizarlas se utilizan unas abrazaderas en forma de tornillo sobre la superficie del *platen* por las cuales se hace pasar el raíl que hay en la base de las cabezas. Después se atornilla dicha abrazadera y se guían los cables para que no dificulten el manejo del dispositivo.

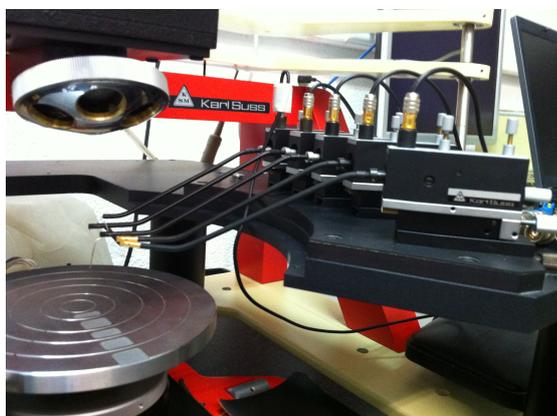


Figura 3.34 – Colocación de las PH 100 sobre el *platen*.

3.5.5 Análisis de la adaptación triaxial-coaxial

En este apartado consideramos la adaptación entre líneas de transmisión de tipo coaxial y triaxial, presentes entre los diferentes equipos disponibles para constituir nuestro sistema.

En el caso de las SMU del analizador de parámetros HP 4145B, sus conexiones son triaxiales, debido a que este tipo de instrumentos ofrecen la posibilidad de trabajar con rangos de corriente muy bajos ($<1\ \text{nA}$) donde pérdidas insignificantes en las corrientes de consigna debido a filtraciones entre las capas conductoras de un cable coaxial (Figura 3.35)

pueden alterar las medidas.

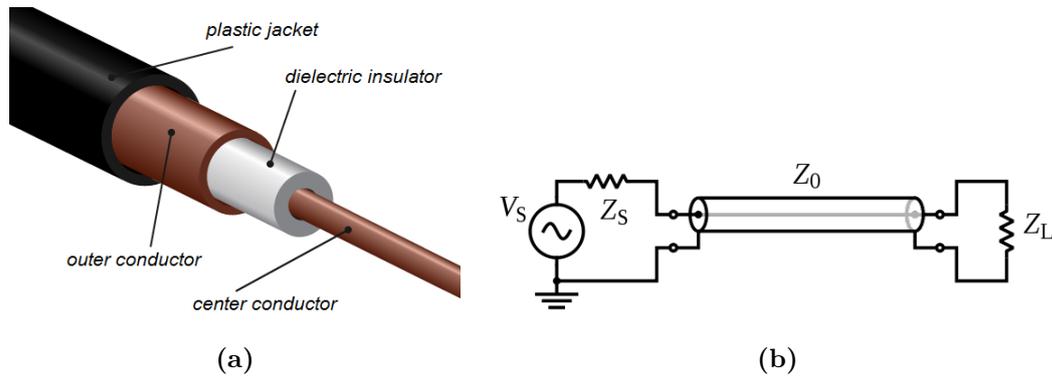


Figura 3.35 – Estructura física y esquema circuital de una línea de transmisión coaxial [4].

Supongamos que queremos transmitir mediante una fuente de corriente, una corriente de valor 1 nA a una carga de valor 10 M Ω . La tensión en el *center conductor* del coaxial, según la Figura 3.35(b) debería ser de 10 mV, y la tensión en el *outer conductor* debería ser 0 V (masa). Supongamos ahora que el aislante dieléctrico entre ambos conductores tiene una resistencia aproximada de 1 G Ω . Un simple cálculo nos permite comprobar que la corriente que se deriva o filtra desde el *center conductor* hasta el *outer conductor* es de 10 pA o 0.01 nA.

Obviamente, si estamos intentando operar con corriente cercanas a los picoamperios (10^{-12}), no podemos permitirnos usar cables con pérdidas de corriente de decenas de picoamperios. Para evitar esto, se utiliza el cable triaxial que incluye una capa conductora adicional llamada guarda (*guard*), entre el *outer* y el *center conductor*, que evita que haya pérdidas de corriente (*leakage current*) debidas a diferencias de potencial. Para ello, la guarda se mantiene a la misma tensión que se configura el *center conductor*, de manera que no pueda haber pérdida de corriente por diferencia de potencial. La estructura del cable triaxial puede verse en la Figura 3.36.

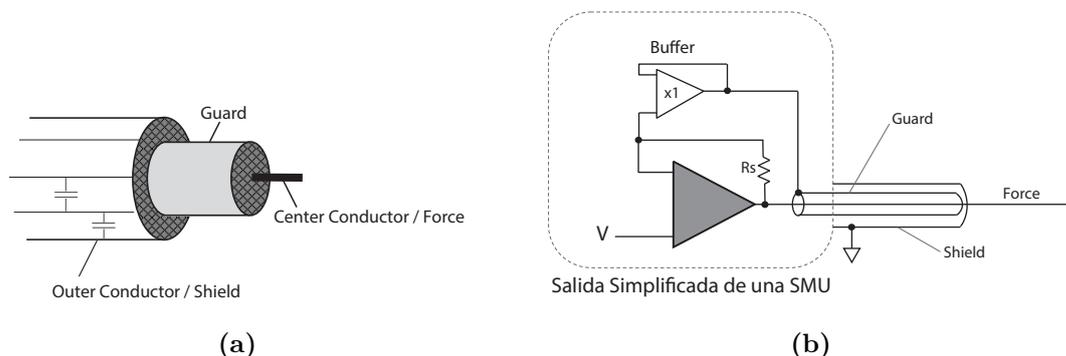


Figura 3.36 – Estructura física y esquema circuital de una línea de transmisión triaxial a la salida de una SMU [20].

Como puede observarse en 3.36(b), la guarda es controlada activamente mediante un *buffer* para mantener la misma tensión que el *force* o *center conductor*, eliminando los efectos de las capacidades parásitas de la imagen 3.36(a) al aislar la señal del punto de masa.

Imaginemos ahora el mismo caso que antes, donde la tensión en el conductor central es de 10 mV. Ahora la tensión en la guarda es de 10.0000001 mV. Con un dieléctrico de resistencia 1 G Ω , la corriente que se filtra sería 1×10^{-16} A ó 0.1 fA, con lo que concluimos en que el triaxial reduce la corriente filtrada en un factor de 10^5 , y por tanto su uso es aconsejable en medidas paramétricas con bajas corrientes.

Durante las medidas que llevaremos a cabo en este proyecto, las corrientes usadas durante los test de dispositivos RRAM serán generalmente superiores a 1 nA, por lo que la adaptación triaxial-coaxial que realizaremos es la expuesta en la Figura 3.37, pues a estos niveles de corriente no debemos preocuparnos por el *leakage current*.

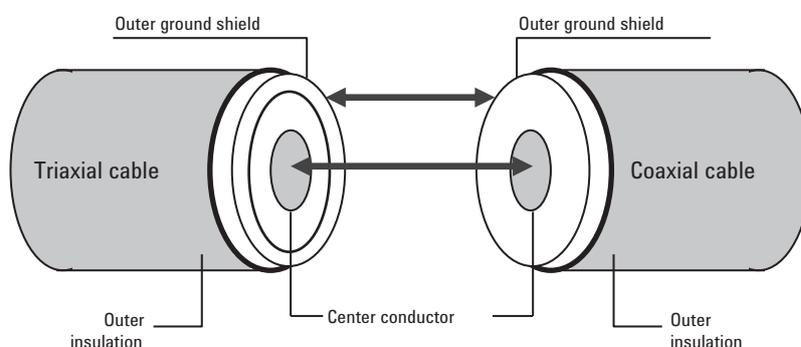


Figura 3.37 – Adaptación triax-coax para $I > 1$ nA [20].

En caso de que trabajásemos por debajo de 1 nA, sería conveniente realizar la adaptación de la Figura 3.38, por los motivos que hemos explicado antes.

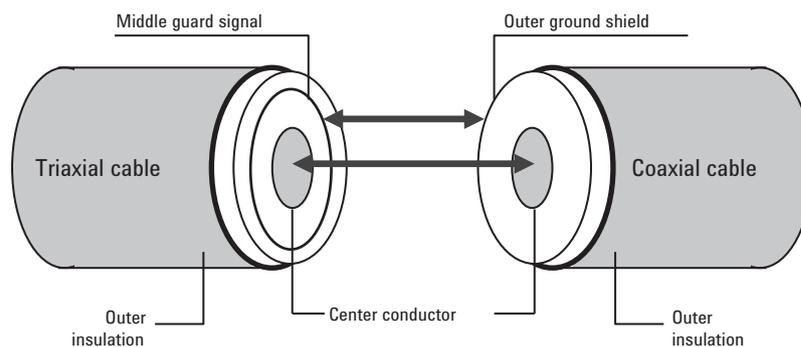


Figura 3.38 – Adaptación triax-coax para $I < 1$ nA [20].

En esta última configuración, la guarda puede alcanzar voltajes elevados (>40 V), por lo que el *outer shield* del coaxial estará a la misma tensión, la cual puede resultar peligrosa para el usuario si no se tiene cuidado con el aislamiento.

Los adaptadores triaxiales-coaxiales que hemos utilizado en nuestro caso, son del modelo

020-103672-01A del fabricante Trompeter, Figura 3.39(a). El adaptador de coaxial a *miniature* coaxial 14949 PL 155-29 de Trompeter, Figura 3.39(b), es necesario para conectar las PH 100.

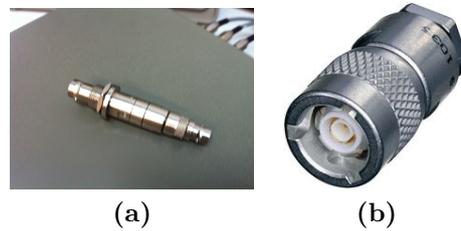


Figura 3.39 – a) 020-103672-01A Triaxial-Coaxial. b) 14949 PL 155-29 Coaxial-Miniature Coaxial.

En la Figura 3.40, se muestra un esquemático del conexionado entre triaxiales y los microposicionadores.

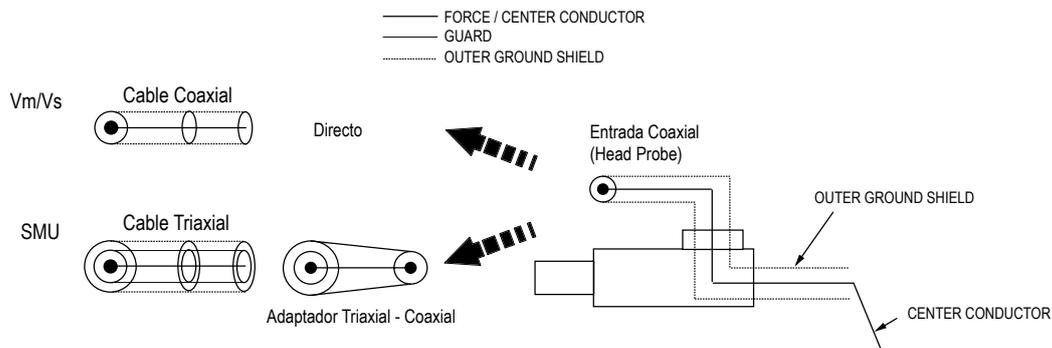


Figura 3.40 – Esquema gráfico del conexionado Analizador Paramétrico con las puntas.

3.5.6 Agujas o puntas de contacto

En la Figura 3.41, vemos las agujas de contacto utilizadas.

Se trata de un set de agujas de $5\ \mu\text{m}$ de diámetro fabricadas en carburos de wolframio. El wolframio o tungsteno es un conductor eléctrico eficiente, y sus carburos se comportan de manera similar al mismo elemento sin alear, siendo resistentes al ataque químico.



Figura 3.41 – *Agujas de contacto (Puntas).*

3.6 Representación global del sistema de caracterización

A continuación, se ofrece una visión global del despliegue *hardware* considerado en este sistema de caracterización.

En la Figura 3.42, mostramos un esquemático del agrupamiento e interconexión de los elementos del sistema.

Las posibilidades de conexionado entre elementos y equipos se encuentran detalladas con una leyenda explicativa, indicando el tipo de líneas de transmisión empleadas en cada caso.

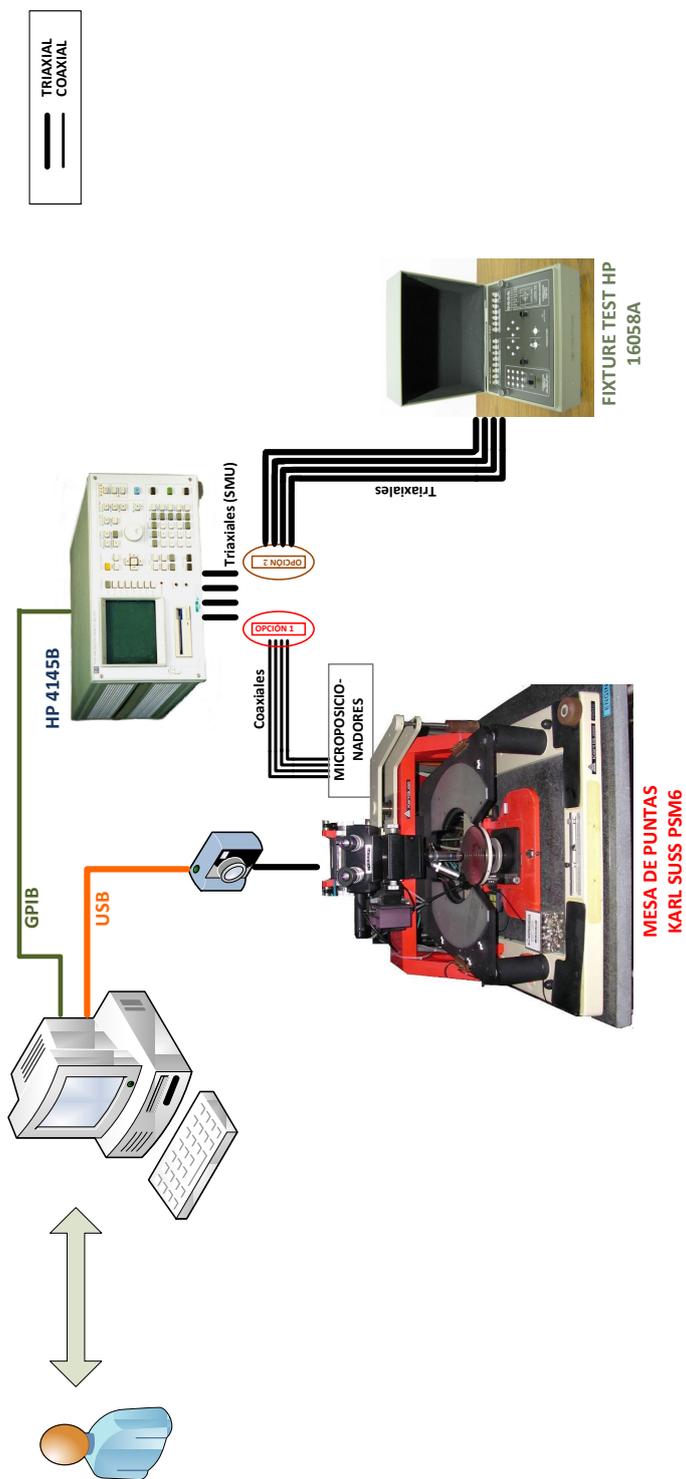


Figura 3.42 – Diagrama conjunto HW.

3.7 Análisis sobre comunicación GPIB

En esta sección se estudia el funcionamiento del bus GPIB y su protocolo de comunicación IEEE 488.2. La mayoría de los equipos que necesitamos controlar de forma remota implementan este tipo de comunicación.

Se considerará el tipo de conexión realizada entre los equipos y la estación de trabajo, así como la herramienta MATLAB® *Instrument Control Toolbox* que comunica los comandos desde MATLAB® a la interfaz GPIB.

3.7.1 *General Purpose Interface Bus - GPIB*

Es un sistema de interconexión de instrumentos programables, consistente en un bus simple formado por 24 líneas a las que elementos del sistema se conectan en paralelo-serie. La comunicación se realiza mediante el paso de mensajes que transportan datos y/o mensajes de control. Inicialmente el bus fue desarrollado por *Hewlett-Packard* en 1969 y lo llamo HP-IB (Hewlett-Packard Instrumentation Bus).

El IEEE estandarizó el bus en la norma que denominó IEEE 488, para proporcionar un interfaz estándar para la comunicación entre instrumentos.

Así, los objetivos principales de esta norma fueron:

- Crear un sistema de control de instrumentación donde dichos instrumentos se encuentren relativamente próximos.
- Compatibilidad entre equipos de diferente fabricante, funcionalidad y velocidad.
- No disminuir la funcionalidad de los equipos.

3.7.1.1 Especificaciones físicas y mecánicas del bus

A continuación se listan las restricciones físicas que impone la norma IEEE 488.2:

- El número máximo de dispositivos conectados es 15, y necesariamente uno de ellos ha de ser el controlador.
- La longitud del cable de interconexión total de los elementos está restringido a un máximo de 20 metros.
- Hay 16 líneas de señales, 8 para control y 8 para datos.
- La transferencia es asíncrona, controlada mediante líneas de *handshaking*.
- La velocidad máxima de transferencia es de 1MB/s, para distancias muy cortas (<50 cm).

- Se pueden direccionar hasta un total de 31 direcciones primarias aunque solo se puedan emplear 15 instrumentos. Además de las 31 direcciones primarias, existen otras 31 secundarias.
- Entre los 15 instrumentos puede haber más de un instrumento de control, sin embargo, solo puede haber uno activo al mismo tiempo.

El conector del bus GPIB, Figura 3.43, está formado por 24 pines y funciona simultáneamente como conector macho y hembra, facilitando la interconexión de instrumentos entre sí.

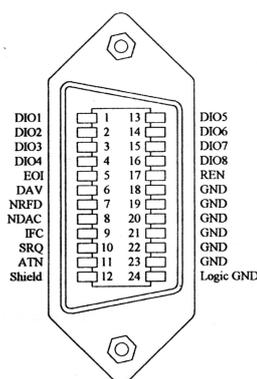


Figura 3.43 – Conector de 24 pines para bus GPIB [4].

3.7.1.2 Especificaciones funcionales

En toda comunicación con intercambio de datos dentro del bus se necesitarán al menos tres elementos funcionales de carácter básico:

- Un dispositivo actuando *controller*, es decir dirigiendo el flujo de datos de forma adecuada y controlando el sentido de la comunicación. Normalmente la mayoría de los sistemas GPIB consisten en un ordenador y varios instrumentos. Si hay varios ordenadores conectados entre si solo puede haber un *controler* en un mismo instante de tiempo, que se denomina CIC (*Controller In Charge*).
- Un dispositivo actuando como *listener*, es decir escuchando instrucciones o datos provenientes de bus. Se permite que haya varios *listeners* a la vez.
- Un dispositivo actuando como *talker*, es decir enviando información al bus. Solo puede haber un *talker* a la vez.

3.7.1.3 Líneas de datos

Las líneas de datos son bidireccionales y están destinadas a transportar mensajes usualmente en código ASCII de 7 bits (ver comandos SCPI en sección 3.7.2.1). La información

transferida va desde direcciones a órdenes de programación, información sobre el dispositivo o medidas tomadas por un cierto instrumento. Estas líneas de datos van desde el pin DIO7 al DIO0.

3.7.1.4 Líneas de *handshaking*

O líneas de control de transferencia de datos. Al ser un bus asíncrono, se necesitan ciertas líneas para coordinar la transferencia de datos y asegurar que nada se emita si todos los receptores no están preparados.

Éstas líneas de control son:

- **DAV:** (*Data Valid*). Controlada por el emisor, indica que en el bus hay un dato correcto y estable que puede ser aceptado sin errores.
- **NRFD:** (*Not Ready for Data*). Los receptores controlan esta línea de indicándole al emisor que están o no preparados para la recepción de datos por el bus.
- **NDAC:** (*Not Data Accepted*). *Flag* o bandera para que los receptores indiquen si han aceptado o no el dato enviado por el bus.

En la Figura 3.44, vemos el cronograma de líneas de *handshaking*.

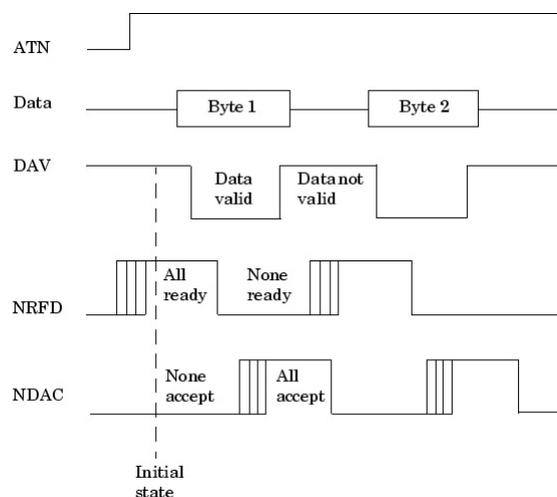


Figura 3.44 – Cronograma de señales de interfaz para *handshaking* [4].

3.7.1.5 Líneas de control general del bus

Las siguientes líneas son las encargadas de gestionar el flujo de información a través del bus GPIB:

- **IFC:** (*Interface Clear*). Inicializa el bus a un estado conocido.

- **ATN:** (*Attention*). Según el nivel lógico de esta línea los valores que circulen por el bus de datos serán considerados mensajes de interfaz o bien mensajes de datos ASCII correspondientes a comandos del instrumento.
- **REN:** (*Remote Enable*). El controlador informa de que dispositivos deben situarse en estado remoto y atender al bus.
- **EOI:** (*End Or Identify*). Esta línea tiene una doble función. Por una parte cuando un dispositivo actúa como transmisor de hacia el bus y quiere finalizar la transmisión, y por otro lado también se usa en los pollings paralelos para identificación.
- **SRQ:** (*Request of Service*). Esta será la línea que utiliza un determinado instrumento para notificar al controlador del bus que necesita de sus servicios.

3.7.1.6 Tipos de mensajes

- **Mensajes de interfaz:** son los mensajes dirigidos a la interfaz del GPIB y que no interactúan con el instrumento propiamente dicho, sino solo con la interfaz de comunicación. Estos mensajes serán los que mantengan el protocolo en el estado adecuado que permita enviar y/o recibir mensajes de dispositivo en cada momento.
- **Mensajes de dispositivo:** son los mensajes que no interaccionan con la interfaz lógica del bus, por tanto no afectan al estado actual en el que se encuentre el bus, sino que actúan sobre el propio instrumento al que van dirigidos, configurando cualquier funcionalidad del mismo.

Al trabajar desde la herramienta *Instrument Control Toolbox* de MATLAB® (apartado 3.7.2), no será necesario comunicarnos a bajo nivel con mensajes de interfaz, Figura 3.48(b). Tras instalar el *driver* del fabricante Agilent solo tendremos que preocuparnos por los mensajes de dispositivo y por la conversión e interpretación de los datos mandados y recibidos por el bus.

3.7.1.7 Protocolo de direccionamiento

Este protocolo lo utilizan dispositivos *controllers*, *talkers* y *listeners* para referenciarse entre ellos.

Antes de que tenga lugar cualquier transferencia de datos en el bus, es necesario que algún dispositivo sea direccionado como *talker* y algún otro como *listener*. El controlador es el encargado de nombrar a quién habla y quién escucha, disponiendo un mensaje de interfaz con las direcciones específicas, tal y como los mostrados anteriormente.

El formato del byte de mensaje de direccionamiento es el indicado en la Figura 3.45.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Data	0	TA	LA	GPIB Primary Address				

Figura 3.45 – Formato del mensaje de direccionamiento GPIB [4].

El contenido de los bits de la posición 0-4 se utiliza para indicar la dirección del dispositivo. Los bits 5 y 6 informan de si es una dirección *listener* o *talker* respectivamente.

3.7.1.8 Protocolo de *Polling*

Como se ha visto anteriormente, en el bus GPIB existe una línea de control, la SRQ, que activada informa al *controller* sobre la necesidad de atención por parte de uno de los instrumentos conectados al bus. Para descubrir quién ha activado esta línea, existen dos métodos: el *serial-polling* y el *parallel-polling*.

Al generarse un *serial poll*, el *controller* envía un mensaje de comando SPE (*Serial Poll Enable*) a cada dispositivo de forma serializada y especificando su dirección. De esta forma cuando dicho dispositivo se direcciona como *talker*, éste contesta al *controller* indicando si ha sido él o no el que ha realizado un SRQ. Al recibir el *controller* este byte, el *controller* devuelve a este mismo instrumento un SPD (*Serial Poll Disable*) con el que el instrumento regresa a su estado normal de *talker* o *listener*. En caso de ser un *parallel poll*, el envío del SPE se realiza en paralelo, pudiendo el *controller* identificar al instrumento demandando servicio de forma más rápida y eficiente.

3.7.2 MATLAB® *Instrument Control Toolbox*

Como el *software* será definitivamente implementado en MATLAB®, se hará uso de las funciones ofrecidas por la herramienta *Instrument Control Toolbox*, Figura 3.46, para conectar con los equipos de forma remota desde nuestra estación de trabajo.



Figura 3.46 – *Instrument Control Toolbox* [3].

Instrument Control Toolbox permite controlar y comunicarnos con dispositivos externos a través de los protocolos de comunicación GPIB y VXI directamente desde MATLAB®, siguiendo la estructura de la Figura 3.47 y Figura 3.48(b).

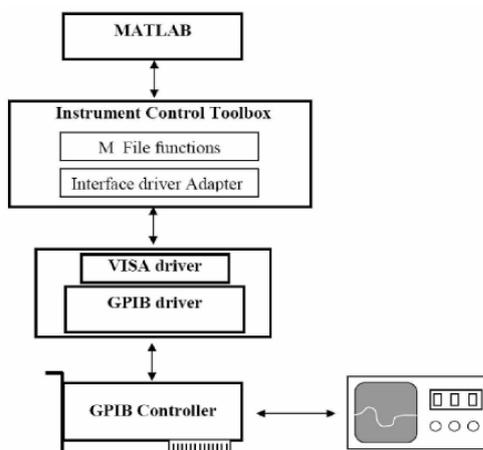


Figura 3.47 – Esquema de control de instrumentos vía GPIB con MATLAB® [3].

3.7.2.1 Standard Commands for Programmable Instruments - SCPI

Una ventaja a la hora de mandar los comandos de instrucción a cada dispositivo vía GPIB a través de funciones de MATLAB® *Instrument Control Toolbox*, es que la totalidad de los instrumentos utiliza cadenas de caracteres en formato ASCII para definir dichas instrucciones.

La norma SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) aparece en 1991 para conseguir una estandarización de los comandos de control y el formato de los datos de los instrumentos. El objetivo es que, independientemente del fabricante, equipos que tienen la misma funcionalidad respondan de igual forma a un conjunto estándar de comandos. La norma SCPI es el escalón más alto dentro de la jerarquía normativa para el control de sistemas de instrumentación.

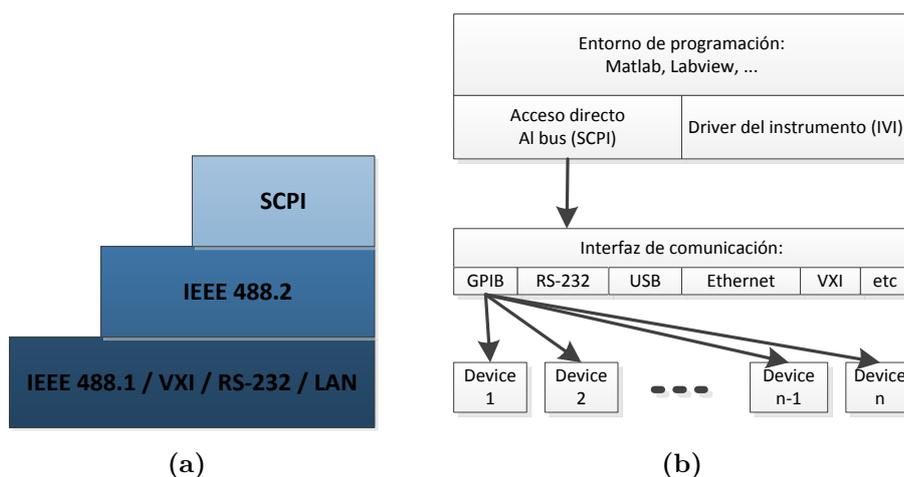


Figura 3.48 – Estructura de acceso al bus GPIB mediante comandos SCPI.

Tal como se puede ver en la Figura 3.48, la norma SCPI se asienta sobre la IEEE-488.2 y esta, a su vez, en la IEEE-488.1.

A pesar de esta jerarquía los comandos y la estructura de datos basados en la norma SCPI pueden usarse, y se usan, en sistemas de instrumentación que no estén basados en IEEE-488, por ejemplo en sistemas basados en VXI, RS-232 o LAN.

La norma SCPI reduce los costes de desarrollo y mantenimiento de programas de control de sistemas de instrumentación para pruebas automáticas:

- Facilitando el aprendizaje y uso de los comandos y los datos.
- Facilitando el desarrollo y mantenimiento de los programas.
- Posibilitando la sustitución de equipos con los mínimos cambios de *software*.

El manual de programación de las instrucciones SCPI, para controlar las funcionalidades del HP 4145B a través del bus GPIB, se encuentra referenciado en el apéndice.

- HP 4145B [ref].

3.7.3 Driver GPIB Agilent y conexión de equipos

A continuación, describimos los pasos de instalación y estructura de conexionado entre los equipos con interfaz GPIB y la estación de trabajo, que dispone de una *GPIB 82350A PCI Interface Card* de Agilent Technologies, Figura 3.49.

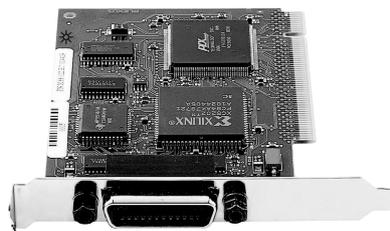


Figura 3.49 – *GPIB 82350A PCI Interface Card de Agilent [7].*

Lo primero que debemos de realizar antes de conectar algún dispositivo, es instalar la *suite* de librerías Agilent para el control de los puertos de entrada/salida del equipo de trabajo.

La *suite* se llama *IO Agilent Libraries Suite v16.3*. Estas librerías habilitan la comunicación con instrumentos para una gran variedad de entornos de desarrollo compatibles con puertos GPIB, USB, LAN, RS-232, PXI, AXIe y VXI de diferentes fabricantes. Una vez instalado el *software* en el PC, Figura 3.50, podemos conectar los equipos y ejecutar la aplicación.

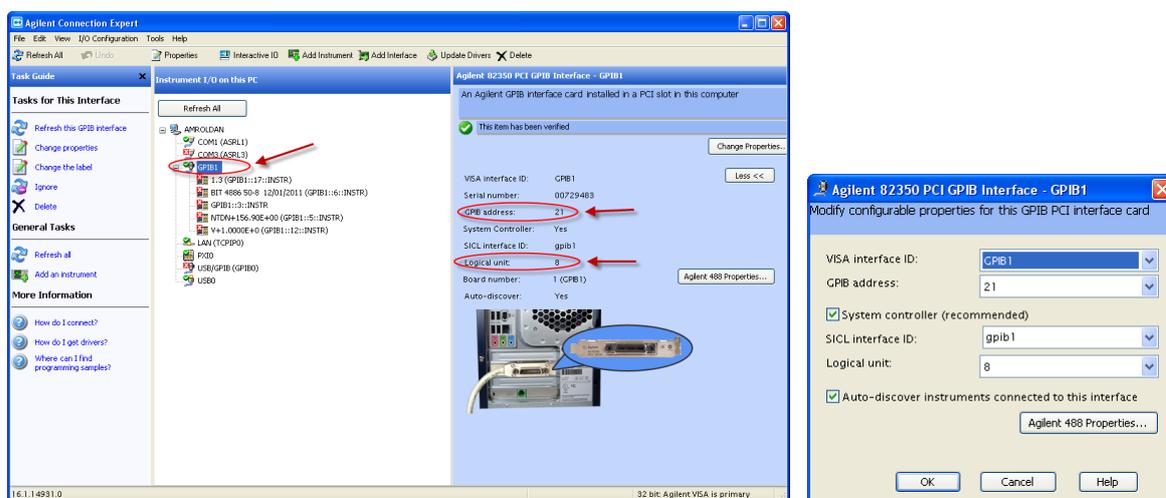


Figura 3.50 – Icono IO Suite 16.3 en el taskbar de Windows.

La conexión de la tarjeta GPIB PCIIA al PC se realiza mediante un zócalo de 80 conexiones presente en la gran mayoría de ordenadores. El bus de la tarjeta funciona a 16 bits, si bien, puede conectarse con un equipo cuyo bus sea de 32 bits si se dispone de un equipo en tal disposición, mediante el controlador gpib-32.dll incluido en las mencionadas librerías.

Una vez ejecutado el *software* de librerías I/O, nos aparecerá una pantalla en la que se detallan los diferentes puertos detectados en el PC, el GPIB entre ellos (Figura 3.51(a)).

Si seleccionamos la interfaz GPIB y hacemos click en el botón *Properties* accedemos al panel de configuración de la interfaz GPIB 82350A. En él, podemos modificar su dirección GPIB además de la unidad lógica, que permite diferenciar entre varias tarjetas de interfaz GPIB PCI instaladas en el mismo equipo (Figura 3.51(b)). En nuestro caso hemos dejado los valores por defecto, que asignan a esta interfaz la dirección 21 y la unidad lógica 8.



(a)

(b)

Figura 3.51 – Interfaz GPIB detectada y configurada.

El siguiente paso es determinar una dirección GPIB para cada instrumento. Generalmente, cada instrumento posee un conmutador DIP de 7 interruptores en el panel trasero, por medio del cual se fija la dirección con un binario equivalente a un decimal en el rango 0-30, ya que el máximo número de dispositivos conectados a la misma tarjeta es 31.

Cada dirección tiene una dirección primaria y otra secundaria, aunque en este caso solo emplearemos la dirección primaria. Para el caso Analizador de Parámetros HP 4145B se ha

utilizado la dirección 17.

Para la conexión de los dispositivos se ha utilizado cables 10833A y 10833D de Agilent, de 1 metro y 0.5 metros respectivamente.

Agilent recomienda determinadas restricciones en cuanto a la longitud del cable y número de elementos conectados para alcanzar determinadas tasas de datos en la comunicación por el bus. Para minimizar el riesgo de sobrecarga, no se deben acoplar más de tres tomas de 24-pines una encima de otra. Si queremos alcanzar tasas de transferencia superiores a 500 Kbytes/sec la longitud total de cable utilizado debe ser menor que 1 metro por el número de instrumentos conectados juntos.

Una vez conectados los dispositivos, al encenderlo y pulsar el botón *Refresh* del *software*, deberían aparecernos detallados bajo la interfaz a la que han sido conectados, en nuestro caso a la GPIB1, como muestra la Figura 3.52.

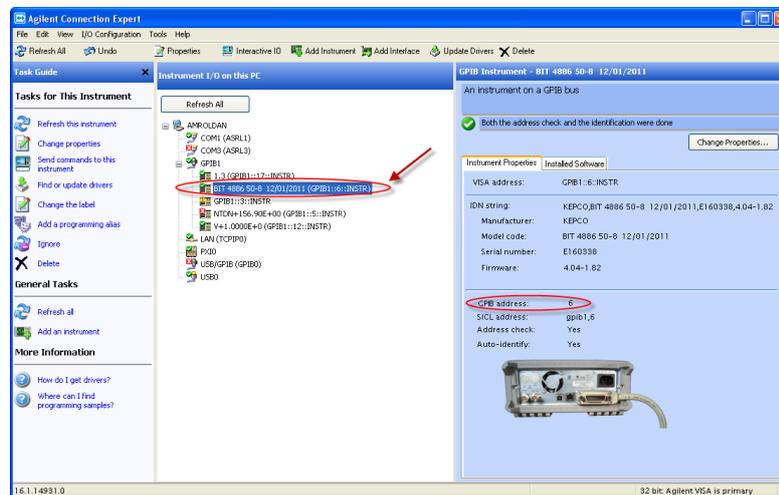


Figura 3.52 – Dispositivos GPIB reconocidos.

Además de la tarjeta GPIB 82350A PCI de Agilent, disponemos de un conector GPIB/USB modelo 82357A (Figura 3.53) de Agilent que permite la comunicación de hasta 14 dispositivos interconectados mediante conexiones GPIB de 24-pines a un PC por medio de un puerto USB.



Figura 3.53 – Conector GPIB/USB 82357A de Agilent [7].

En este caso, la conexión debe realizarse en base al esquema de la Figura 3.54. Notar que para este conector, la dirección GPIB de la interfaz es también 21, pero la unidad lógica es 7, para diferenciarse de la otra en caso de que se usen simultáneamente.

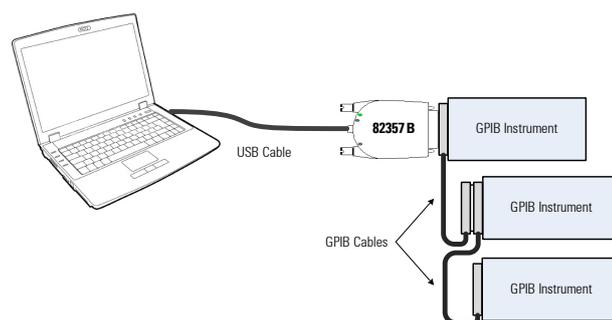


Figura 3.54 – Esquema de conexión GPIB/USB con el modelo 82357A [7].

3

CAPÍTULO

4

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.

Durante el presente capítulo se expondrán los procedimientos de fabricación *hardware* e implementación *software* del sistema de caracterización de dispositivos RRAM.

Detallamos el diseño y la fabricación de la placa de circuito impreso que será necesaria para el conexionado de dispositivos encapsulados.

Se describirán las estructuras de las librerías de comunicación GPIB, así como las funciones de MATLAB® *Instrument Control Toolbox* utilizadas.

Finalmente, la descripción de la herramienta *software* de caracterización, que controla la comunicación con los equipos involucrados para realizar las medidas y representa las curvas de datos y parámetros obtenidos, permitiendo su gestión y exportación como se especificó en 2.1.5.

4.1 Implementación *Hardware*

4.1.1 Diseño y Fabricación de PCB

En la presente sección, se mostrará el diseño y la fabricación de la placa de circuito impreso necesaria para medir los dispositivos encapsulados.

El diseño de la PCB se hará sobre una placa cortada a medida para que encajase en el 16058A Test Fixture (sección 3.5.2), para poder insertar la placa y cerrar la compuerta durante las medidas.

La placa Virgen de uso más común en el mercado es de espesor 1.5 mm y lámina de cobre de grosor $35\ \mu\text{m}$ sobre una base aislante que generalmente suele ser fibra de vidrio (FR4) aunque también puede ser baquelita (FR2) o CEM1 (Figura 4.1).

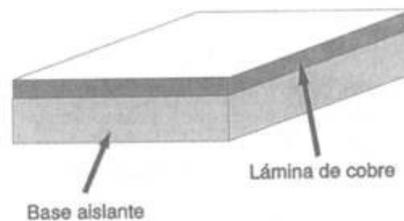


Figura 4.1 – PCB virgen V-109 [4].

La utilización de estas placas es ideal para la aplicación de film seco fotosensible y para trabajar con máquinas de control numérico de taladrado y fresado que permiten precisión y uniformidad para esta clase de proceso.

El diseño de la PCB para el conexionado de los contactos del dispositivo, se realizan con Altium Designer versión 10, Figura 4.2

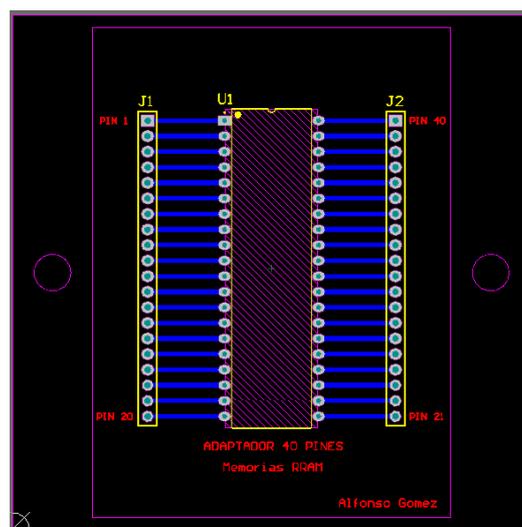
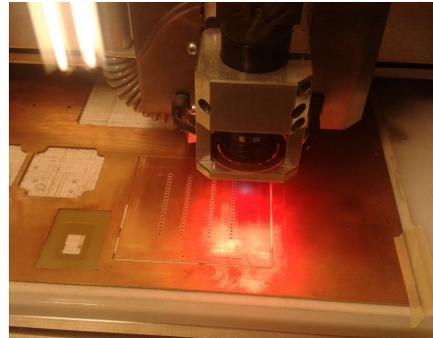


Figura 4.2 – Diseño de la placa PCB con Altium Designer.

En la siguiente imagen, Figura 4.3, incluimos dos capturas: de la fresadora LPKF ProtoMat S62 y de la placa FR4 y cobre siendo cortada por la fresadora.



(a) *ProtoMat S62 de LPKF*



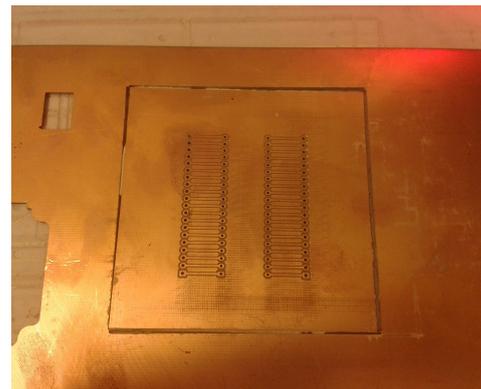
(b) *Placa PCB siendo cortada por la fresadora*

Figura 4.3 – *Proceso de corte de la PCB.*

Una vez que ha terminado de cortar la ProtoMat S62 de LPKF, Figura 4.4, separamos la PCB de la placa virgen para pasar a soldarle los componentes necesarios.



(a) *Parte frontal*



(b) *Parte trasera*

Figura 4.4 – *Placa PCB ya cortada.*

Para poder conectar un dispositivo DIP40, le hemos soldado con estaño un zócalo de 40 pines para ese tipo de encapsulado. También hemos soldado tiras de 20 pines macho a cada lado para poder conectar los latiguillos en el Fixture. En la Figura 4.5 podemos ver la placa ya acabada por completo, acoplada en el 16058A Test Fixture y con uno de los dispositivos conectados listo para realizar medidas.



Figura 4.5 – PCB acabada con uno de los dispositivos conectados en el 16058A Test Fixture.

4.1.2 Disposición estructural y localización del sistema

Es importante disponer el conjunto de equipos *hardware* de manera ordenada y estructurada según su utilización.

Teniendo en cuenta la longitud del cableado descrito en la sección 3.5.5 y las necesidades de proximidad entre determinados equipos que operan de manera conjunta, disponemos de la forma más eficientemente posible la totalidad del sistema, Figura 4.6.

También incluimos una imagen panorámica del laboratorio L4, ofreciendo más detalles del entorno de trabajo, Figura 4.7.

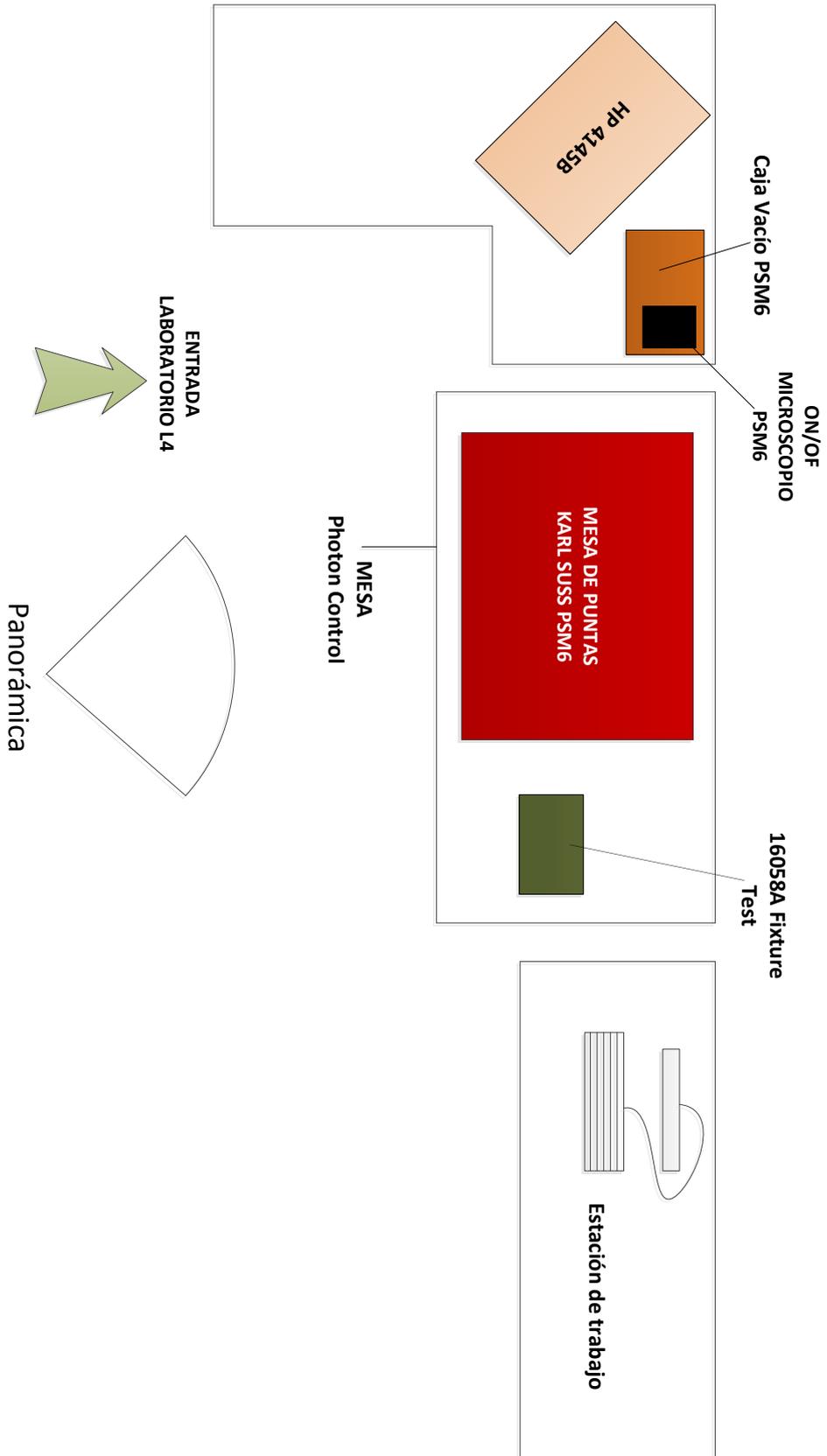


Figura 4.6 – Esquemático de localización HW general.



Figura 4.7 – Panorámica del sistema de caracterización.

4.2 Implementación *Software* de la librería de comunicación GPIB

A lo largo de esta sección, comentamos el desarrollo *software* de la librería de comunicación GPIB del Analizador de Parámetros HP 4145B, así como aspectos relacionados con el protocolo de intercambio de datos.

Como introdujimos en la sección 3.7.2, la comunicación GPIB se implementará a través de MATLAB® *Instrument Control Toolbox*.

4.2.1 Funciones para GPIB

La herramienta anterior ofrece una amplia variedad de funciones para llevar a cabo una comunicación directa entre el controlador de bus y el instrumento.

Para comunicarse con un determinado instrumento es necesario crear un objeto GPIB mediante la función *gpib()*, indicando:

- El fabricante del driver de la tarjeta GPIB instalada.
- El número de la tarjeta GPIB.
- La dirección del instrumento.

Una vez creado dicho objeto identificador de la conexión GPIB con el dispositivo, se abre el puerto de comunicación entre el controlador y el dispositivo mediante la función *fopen()*, Listado 4.1.

```
1 io = gpib('agilent',8,21); %Definición de objeto GPIB para comunicación con el HP4145B
2 fopen(io); %Apertura del puerto de comunicación
```

Listado 4.1 – Creación de objeto *gpib* y apertura del puerto de comunicación.

Con el puerto de comunicación entre el controlador y el instrumento abierto, empleamos los códigos SCPI particulares de cada instrumento para controlar sus diferentes funcionalidades.

Para enviar datos e información por el bus hacia el instrumento, tendremos que referenciarlo mediante su objeto GPIB y utilizar la función *fprintf()* para mandar los comandos al dispositivo. Dada la naturaleza de los comandos SCPI, sección , todos los comandos se mandan como texto ASCII acotándolo con comillas simples ('comando'), que es la forma de declarar una cadena de caracteres en lenguaje MATLAB®, Listado 4.2.

```
1 fprintf(io, 'CURR:RANG?'); %Petición del rango de corriente utilizado (KEPCO BOP 50-8)
```

Listado 4.2 – Envío de datos al instrumento.

Según el comando utilizado, deberemos esperar o no una respuesta con un mensaje de datos por parte del dispositivo. Estos datos quedan en el *buffer* de datos asociado al objeto GPIB del instrumento.

Para leer datos de respuesta del instrumento cuando actúa en modo *talker* utilizaremos la función **fscanf()**. Esta función devuelve los datos (cadena de caracteres) de respuesta del dispositivo. Podemos indicar la conversión de los datos leídos, como vemos en el Listado 4.3 vemos un ejemplo:

```
1 | lectura = fscanf(io, '%s'); %Lectura del buffer del objeto io
```

Listado 4.3 – *Lectura de datos de respuesta del instrumento.*

Por último destacamos otras tres funciones de MATLAB® *Instrument Control Toolbox* que hemos empleado usualmente:

- **fclose()**: cierra la conexión entre el objeto de la interfaz GPIB creado y el instrumento.
- **clrdevice()**: borra el buffer del instrumento.
- **disp()**: muestra un resumen detallado del objeto creado.

4.2.2 Estructura de la función/librería *HP4145_kpib494()*

Para optimizar el código, hemos utilizado la función de comunicación GPIB del Analizador de Parámetros HP 4145B, que utiliza la sintaxis de MATLAB® y en la que la comunicación realizada dependerá de sus argumentos.

Esta función ha sido creada en ha sido creada en el laboratorio L4 para facilitar la comunicación con dicho instrumento y ha sido reutilizada en este proyecto, adaptándola a las necesidades del sistema.

La función en cuestión se denomina *HP4145_kpib494()* y su definición puede observarse en el Listado 4.4.

```
1 | function retval = HP4145_kpib494(Instrument, command, value, channel, aux, verbose)
2 |     gpib_interface_BOARDINDEX=Instrument.Logical_Board_Index; %Obtenemos el
3 |     identificador de la interfaz o tarjeta GPIB utilizada
4 |     instrument=Instrument.Name; %Obtenemos el nombre del instrumento
5 |     GPIB=Instrument.Gpib_Address %Obtenemos la dirección GPIB asignada al instrumento
6 |
7 |     if (strcmpi(instrument, 'HP_4145') || strcmpi(instrument, 'all')) %Comprobamos
8 |         que se trata del HP 4145B
9 |         io = port(GPIB, instrument, 18*401, verbose, gpib_interface_BOARDINDEX); %
10 |         Mandamos la información de conexión para crear el objeto y comprobar su
11 |         puerto
12 |         if (io ~=0) && (strcmp(get(io, 'Status'), 'open') ~=0) %Comprobamos si ese
13 |         puerto ya se encuentra abierto
14 |         switch command %Comienza el switch para comprobar el comando o instrucció
15 |             n insertada
16 |             %.. continua
17 |             switch value
18 |                 %.. continua
19 |             switch channel
20 |                 %continua
```

Listado 4.4 – *Función *HP4145_kpib494()* para comunicación por bus GPIB.*

Como vemos en la línea 2,3 y 4 del Listado 4.4, se hace uso de estructuras de datos para declarar la tarjeta y dirección GPIB del instrumento así como su nombre, reduciendo la sintaxis. La función analiza el estado del objeto GPIB pasado como argumento, considerando

su puerto y confeccionando la instrucción en la sucesión de *switchs* anidados que comprueban los argumentos y confeccionan la sintaxis de la instrucción final:

- **command:** comando con la acción que se desea realizar, como configurar o leer del instrumento.
- **value:** estructura con la configuración del instrumento.
- **channel:** utilizado para especificar el canal o fuente utilizada por el equipo, si tiene más de una.
- **aux:** argumento auxiliar.
- **verbose:** para indicar la cantidad de mensajes tipo *acknowledgment* que el programa muestra por pantalla tras realizar la comunicación.

Tras recorrer los switch según que argumentos se hayan pasado a la función, esta compondrá la instrucción final (cadena de caracteres) y la enviará al instrumento.

Dependiendo de si se envían datos o se lee información del instrumento, la función mandará un mensaje o interpretará los datos de la lectura devolviendo un valor mediante `retval`, línea 1 del Listado 4.4.

Para una mayor comprensión del funcionamiento de `HP4145_kpib494()`, en la Figura 4.8 se incluye su diagrama de flujo.

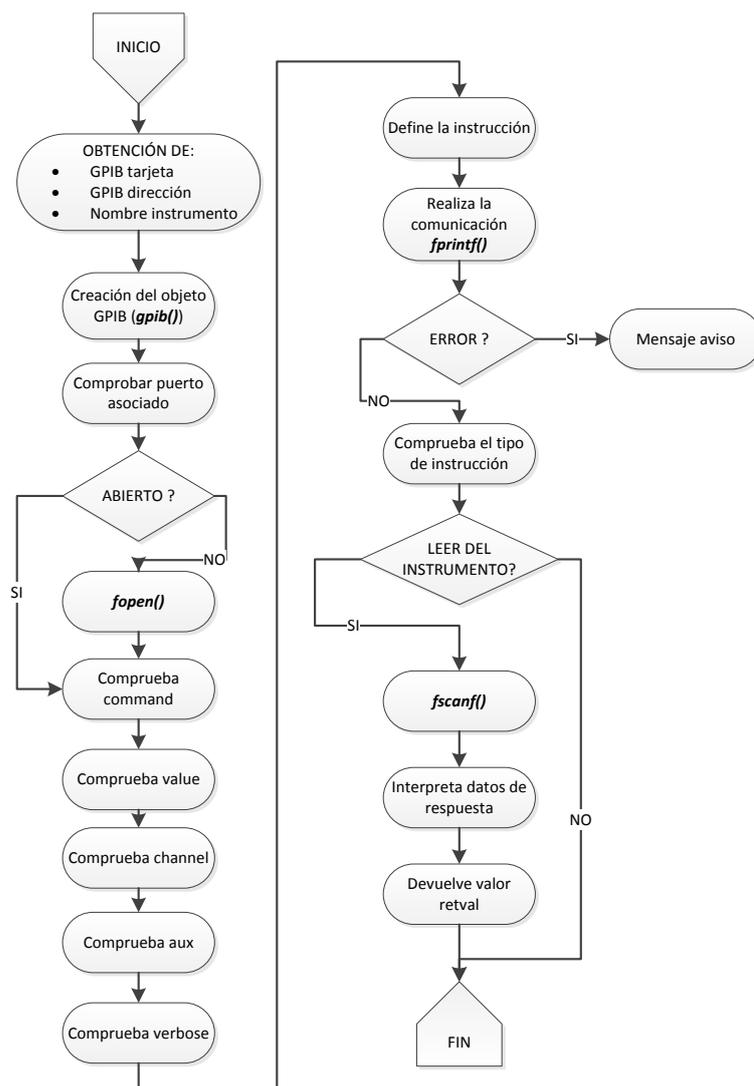


Figura 4.8 – Diagrama de flujo de la función *HP4145_kpib494()* para el control de la comunicación GPIB.

Finalmente y a modo de ejemplo, incluimos unas cuantas llamadas a dicha función en el Listado 4.5.

```

1  io = HP4145_kpib494(HP4145,'init',0, 0, 0, 3);    %Se inicializa la comunicación y se
2  obtiene el puerto GPIB
3
4  instr_mngmnt.Integration_Time=IntegrationTime;    % ('SHORT', 'MEDIUM', 'LONG')
5  instr_mngmnt.Auto_Calibration='ON';    % ('ON', 'OFF')
6  instr_mngmnt.Data_Ready_Service_Request='OFF';    % ('ON', 'OFF')
7  HP4145_kpib494(HP4145,'instr_mngmnt',instr_mngmnt, 0, 0, verbose);    %Se configura el
8  instrumento
  
```

Listado 4.5 – Llamadas a *HP4145_kpib494()*.

Estas llamadas a la función tienen lugar en el algoritmo de medida, donde el instrumento desempeña una funcionalidad determinada según la configuración que haga el usuario.

4.3 Implementación *Software* de la herramienta de caracterización

En esta sección se expone la aplicación diseñada para configurar y controlar el proceso de caracterización de diferentes dispositivos RRAM, en base a las especificaciones *software* detalladas en 2.1.5.

Comenzaremos con una introducción sobre las funcionalidades de medida, una descripción sobre los parámetros de entrada para realizar dichas medidas y parámetros característicos extraídos de las curvas.

Finalmente, desglosaremos las funcionalidades del *software*, explicando la utilización de la interfaz orientada a la configuración del sistema, la obtención de medidas y la gestión de archivos de datos. El análisis seguirá una línea *top-down*, comenzando por la interfaz principal y derivando hacia las diferentes interfaces subyacentes de esta.

4.3.1 Requisitos del *Software*

El objetivo del *software* es configurar y controlar el entorno de caracterización de dispositivos RRAM, obteniendo datos y extrayendo parámetros de interés.

El *software* también nos permitirá representar los datos obtenidos durante la medida así como guardar los datos o cargar curvas medidas anteriormente.

Este programa va a permitirnos configurar los siguientes tipos de medidas en dispositivos RRAM:

- Caracterización de Forming.
- Caracterización de SET.
- Caracterización de RESET.
- Caracterización de una secuencia de ciclos.
- Caracterización de ciclos pulsados.
- Comprobación del estado en el que se encuentra un dispositivo.

4.3.1.1 Caracterización de Forming, SET o RESET.

En primer lugar, el *software* nos permitirá hacer un barrido de tensión para realizar, individualmente, un proceso Forming, SET o RESET en un dispositivo.

Para ello, en los 3 casos, necesitaremos introducir los siguientes parámetros de entrada para el barrido:

- **Minimum Voltage:** Valor mínimo de la rampa de tensión.
- **Maximum Voltage:** Valor máximo de la rampa de tensión.
- **Step Voltage:** Valor del incremento de tensión entre un punto y otro de la de la rampa.
- **Compliance Current:** Corriente límite que fijamos para que se pare la medida si se alcanza.

Además, también necesitaremos introducir parámetros necesarios para iniciar el método con el que queremos obtener las tensiones V_{forming} , V_{set} y V_{reset} , sección 3.3.3.

Tanto en un Forming como en un SET, el barrido sólo se para si se alcanza el *compliance*, de lo contrario, el barrido continuará hasta el valor máximo.

Sin embargo, en el caso de que el barrido sea buscando un RESET, el algoritmo de parada es distinto. Después de medir cada punto, aparte de comprobar si se ha alcanzado el *compliance*, se comprueba si se la corriente ha caído a un 30% de su valor, y en ese caso, se considera ese punto como la tensión de RESET. Una vez alcanzada la tensión de RESET, si el siguiente punto de la rampa es mayor o igual a 2.5 V, se para la medida por seguridad, si no, se dejan 0.25 V más de barrido para observar el comportamiento a alta resistencia. En la Figura 4.9 podemos ver un diagrama de flujo del proceso de medida de un RESET.

El *software* también dispondrá de un botón para que el usuario pueda parar la medida manualmente en caso de que sea necesario.

Para alimentar dispositivo RRAM, utilizamos dos unidades SMU, llamadas SMU TOP y SMU BOTTOM. La SMU TOP ejerce como fuente de tensión, alimentando el contacto superior del dispositivo. En éste SMU se programa el barrido de tensión. Por otra parte, la SMU BOTTOM ejerce como modo común, funcionando como punto de tierra.

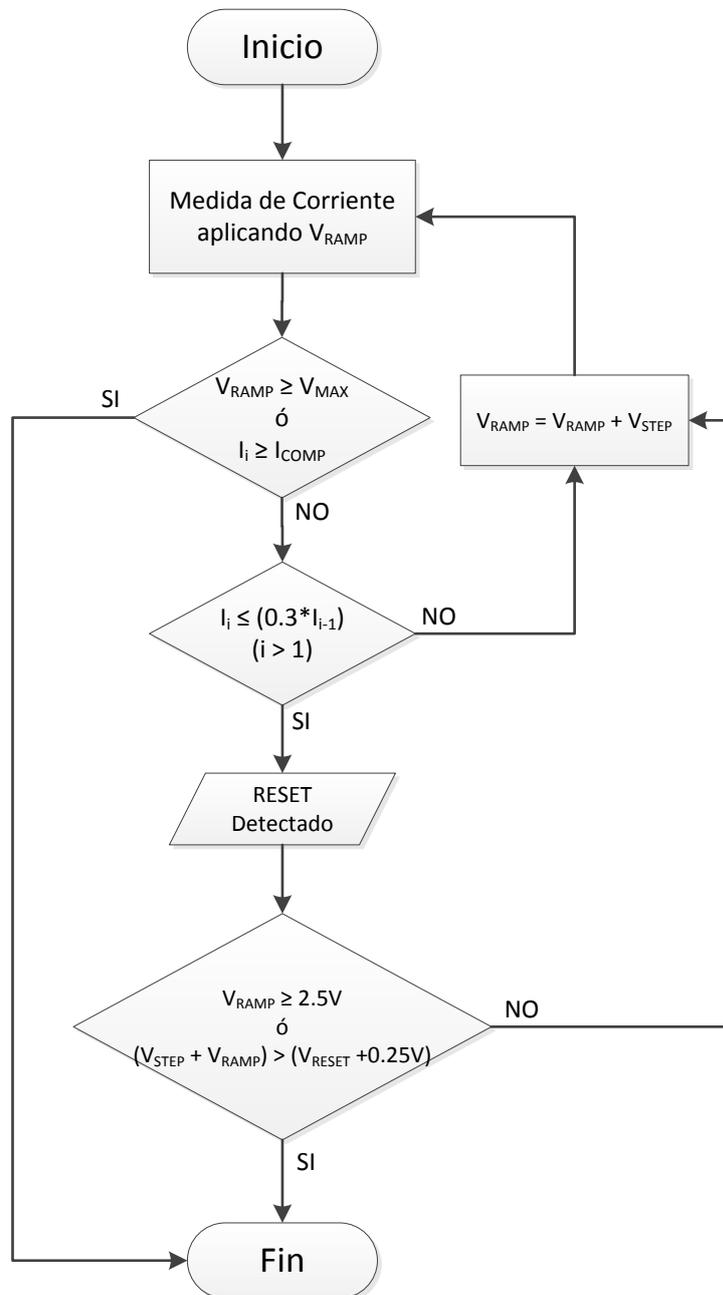


Figura 4.9 – Diagrama de flujo del proceso de medida de un RESET.

4.3.1.2 Caracterización de una secuencia de ciclos.

El *software* también nos dará la posibilidad de programar una secuencia de ciclos SET-RESET.

Para ello, además de los parámetros de entrada de los barridos SET y RESET, necesitaremos introducir los siguientes parámetros de entrada para el barrido:

- **Inicial Cycle:** Indica si empezamos el ciclo con midiendo un SET o un RESET.
- **Start Cycle:** Indica el número de ciclo que corresponde al primer ciclo que se va a medir.
- **Number of Cycles:** Número total de ciclos que se quieren medir.

4.3.1.3 Caracterización de ciclos pulsados.

También está disponible una caracterización sin barridos, aplicando pulsos de tensión, y comprobar que se pueden hacer SET y RESET pulsados (como en el funcionamiento normal de las memorias).

En este caso serán necesarios los siguientes parámetros de entrada:

- **Pulse Amplitude:** Tensión o amplitud del pulso.
- **Pulse Width:** Duración del pulso.
- **Compliance Current (SET):** Corriente límite (SET).
- **Compliance Current (RESET):** Corriente límite (RESET).
- **Switching Cycle:** Indica si buscamos un SET o un RESET.

El pulso se parará siempre que se alcance el *compliance* o, en el caso del RESET, si se detecta que se ha producido la conmutación.

4.3.1.4 Comprobación del estado en el que se encuentra un dispositivo.

Otra funcionalidad muy interesante del *software* es la capacidad de detectar en que estado de resistencia se encuentra el dispositivo (HRS ó LRS). Esto se consigue aplicando una pequeña tensión al dispositivo y calculando la resistencia a través de la corriente medida.

Para realizar este test, se introducen estos tres parámetros:

- **Voltage Test:** Pequeña tensión de test.

- **Resistance Limit:** Resistencia límite para decidir si la resistencia medida se trata de HRS o LRS.
- **Compliance Current:** Corriente límite.

4.3.1.5 Curvas de datos.

Una parte muy importante de este *software* es la representación de las curvas de los datos obtenidos para poder caracterizar y estudiar los dispositivos.

Los tipo de representaciones que el *software* permitirá conseguir se listan a continuación:

- Corriente en función de la tensión aplicada.
- Resistencia en función de la tensión aplicada.
- Tiempo de medida o *timestamp*.
- Tensiones y corrientes de SET y RESET.
- Niveles de corrientes para los estados de ON y OFF.
- Histograma de las tensiones de SET y RESET

4.3.2 Entorno de programación de la interfaz gráfica de usuario

Para el desarrollo de este *software* se ha partido de una herramienta ya diseñada para caracterización de dispositivos magnetorresistivos [15], reutilizando algunas funcionalidades, como la comunicación GPIB o el uso de la interfaz principal.

La idea es integrar el sistema de caracterización de dispositivos RRAM con el sistema de caracterización de magnetorresistencias, creando de este modo un centro de caracterización de medidas adaptado al laboratorio L4. De forma paralela, se han ido integrando otros sistemas de caracterización que se han ido desarrollando en otros proyectos.

Dicha herramienta está diseñada con una interfaz gráfica de usuario que utiliza el entorno GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) de MATLAB®.

Este entorno permite crear paneles de configuración estructurando el contenido e incluyendo controles Java y ActiveX para implementar cuadros de diálogo, ventanas interactivas, barras de progreso, etc.

El tipo de archivos que encontraremos en el directorio del código fuente serán:

- **.m:** todas las funciones implementadas, librerías de comunicación, scripts de ejecución secuencial y funciones de *callback* de los paneles de la interfaz gráfica se encuentran en archivos con esta extensión.

- **.fig**: es la extensión utilizada por los archivos de diseño gráfico de GUI (*Graphical User Interface*). En ellos se diseña la disposición de los paneles y controles de la interfaz gráfica de usuario.
- **.mat**: son ficheros de variables de MATLAB[®], donde el usuario puede guardar los valores de dichas variables y cargarlos posteriormente. Las curvas de datos que midamos con esta herramienta *software* se estructuran dentro de este tipo de ficheros. Las variables de configuración, con los nombres y direcciones GPIB de los instrumentos utilizados, también se guardan en este tipo de ficheros.

4.4 Descripción y utilización de la herramienta de caracterización

Una vez nos localizamos en el directorio raíz donde se encuentra el programa, iremos a la ventana de comando de MATLAB® (*Command Window*) y ejecutaremos el fichero correspondiente al interfaz principal del *software* tecleando MagnetoMeasure y pulsando la tecla *intro*.

Lo que realmente estamos haciendo es lanzar la interfaz principal mediante la ejecución del fichero *MagnetoMeasure.fig* en el que se como hemos comentado antes se encuentra el esqueleto estructural de la interfaz y las funciones de llamada o *callback* asociadas a la pulsación o modificación de los controles, botones, listas, casillas y menús de herramientas e interactivos de la interfaz.

Desde esta interfaz principal, que es sencilla e intuitiva, cualquier funcionalidad del sistema de caracterización es accesible.

Lo que haremos en las siguientes secciones es tratar de dar una visión más detallada de las características de la interfaz, mostrando al usuario una especie de guía o manual de uso para poder efectuar sus propias medidas o analizar curvas ya existentes.

4

4.4.1 Interfaz principal: *Characterization Data Center*

Al ejecutar el comando **MagnetoMeasure**, la interfaz principal emergerá a una posición central en la pantalla y ahora será sensible a que el usuario interactúe con ella. Esta interfaz principal tiene el título de *Characterization Data Center* y su apariencia se muestra en la Figura 4.10.

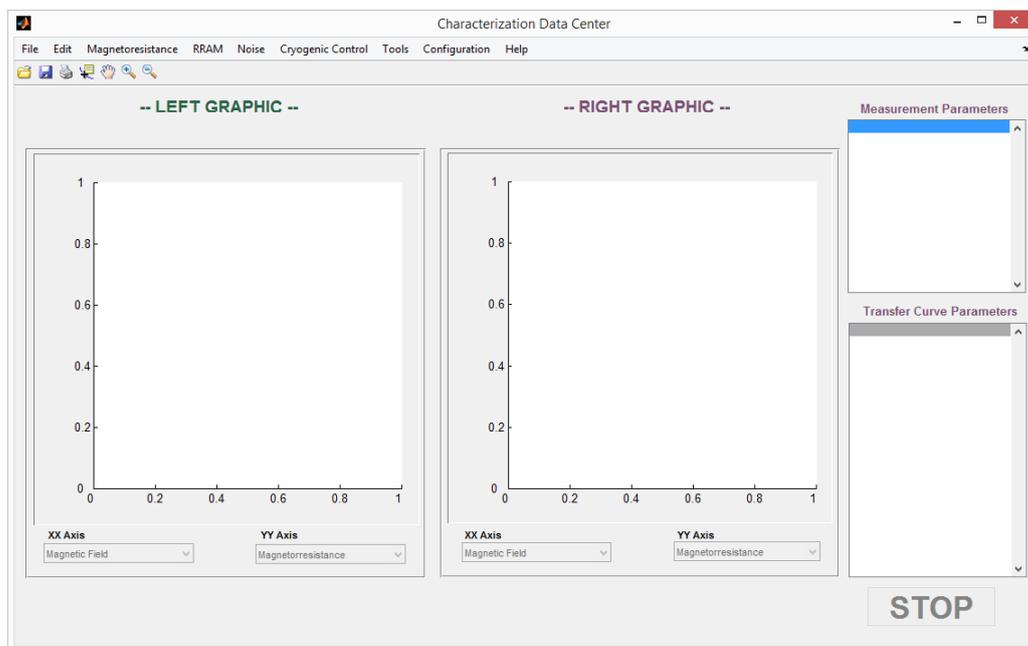


Figura 4.10 – Panel principal de la interfaz SW.

Como elementos diferenciables en el panel de la interfaz encontramos:

- **Menú de Herramientas:** es el típico menú de herramientas y de direccionamiento de paneles para la navegación por la interfaz y sus diferentes pantallas y funcionalidades (Figura 4.11). En el presente proyecto, la opción que más nos interesa del menú, es la opción RRAM, donde se encuentran las funcionalidades de configuración de medidas, procesados y carga de curvas.

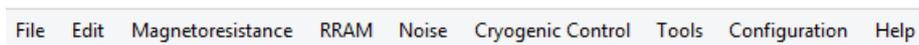


Figura 4.11 – *Menú de herramientas.*

- **Menú de iconos:** ofrece una serie de herramientas de uso frecuente destinadas a la gestión de archivos y a la edición del área gráfica de representación de curvas que incorpora la interfaz principal, Figura 4.12.



Figura 4.12 – *Menú de iconos.*

- **Área gráfica interactiva:**
 - Gráficas de representación de curvas de caracterización.
 - Desplegables de selección de ejes de representación.
 - Paneles de exposición de parámetros característicos de la medida y la curva representada.

En esta interfaz principal es donde representamos las curvas que importamos de ficheros guardados o que medimos mediante este *software*. Unificar la zona de representación da un orden estructural al interfaz y evita que el usuario se pierda entre numerosas ventanas emergentes y gráficas independientes.

4.4.1.1 Importar curvas de datos

Por la colaboración que se mantiene con el IMB-CNM, se consideró la compatibilidad con sus ficheros de datos, de manera que podamos importarlos y consultarlos en nuestro programa.

Para cargar un archivo de datos pulsamos sobre el menú de herramientas *File*, y luego sobre *Open*, o bien podemos utilizar directamente el icono correspondiente en la barra de iconos.

Una vez hecho esto, se nos abrirá una ventana de confirmación preguntándonos qué tipo de medida queremos abrir, Figura 4.13. Esto se añadió para que la herramienta pueda ser compatible con los dos tipos de medida.

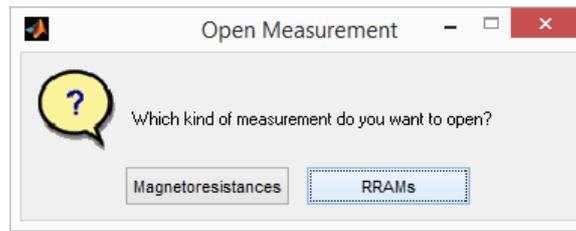


Figura 4.13 – Ventana de elección del tipo de medida.

Le damos a RRAMs se nos abrirá una ventana emergente en la que podremos filtrar la búsqueda del archivo y movernos en diferentes directorios, Figura 4.14.

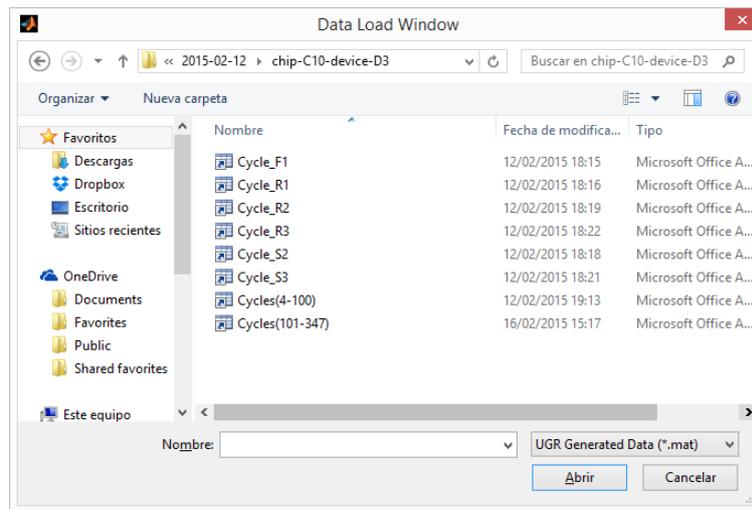


Figura 4.14 – Ventana de selección de ficheros.

El filtro de extensiones permite abrir ficheros .mat, que son los ficheros de medida generados por este *software*, y ficheros .txt, que son los generados por el IMB-CNM (aunque nuestro *software* también permite generar este tipo de fichero), Figura 4.15.

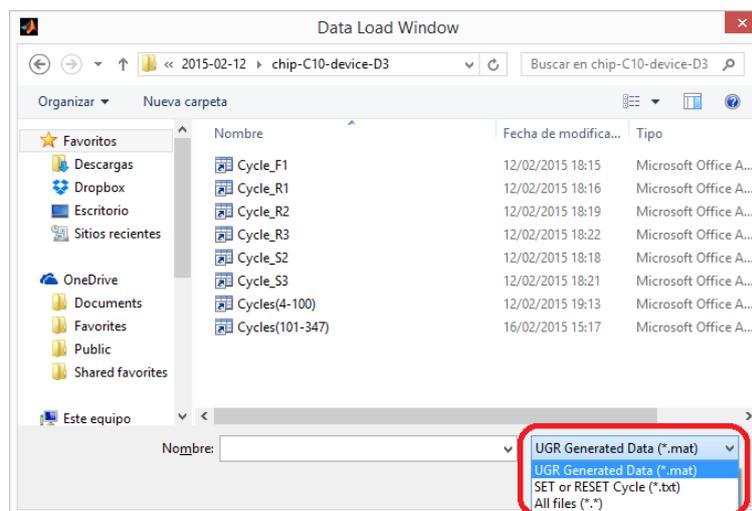


Figura 4.15 – Selector de extensión de fichero.

Cuando localicemos el archivo que queremos cargar, hacemos *click* sobre él y pulsamos en *Abrir*, obteniendo una representación como muestra la Figura 4.16.

Puesto que hay una amplia variedad de opciones dentro de la interfaz de representación, detallaremos sus principales aspectos.

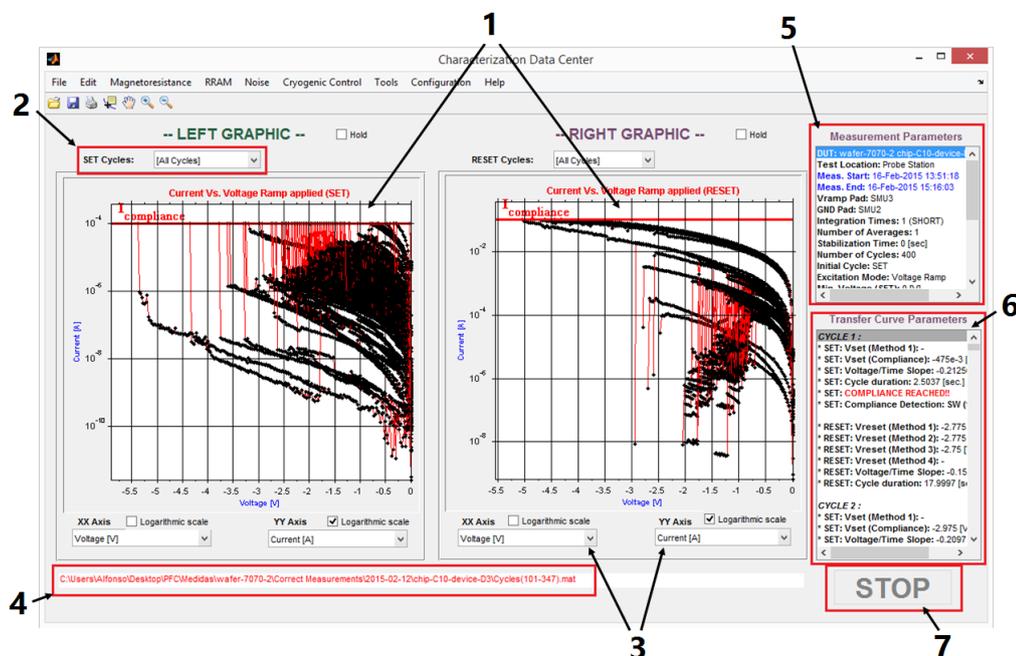


Figura 4.16 – Interfaz principal con curvas cargadas.

1. **Áreas de representación gráfica:** Cada una es independiente y representará los datos que se le especifiquen mediante los menús desplegables que cada una tiene asociados. El motivo de tener dos gráficas es poder comparar diferentes resultados sin saturar el área de representación.
2. **Menús de selección de ciclo:** este *software* se caracteriza, entre otras cosas, por dar la posibilidad de desempeñar numerosos barridos seguidos sobre un dispositivo para conseguir una secuencia de ciclos SET y RESET. Este selector permite obtener la curva de caracterización individual correspondiente a cada ciclo. Si dejamos marcado el *checkbox* Hold, podemos superponer varias gráficas. Y seleccionando la opción All cycles se superponen todos los ciclos.
3. **Menús de representación de ejes X e Y:** mediante estos menús *popup* desplegables escogemos la representación gráfica deseada, ya que tenemos varias posibilidades.
4. **Path y nombre del fichero importado:** es útil mantener visible en todo momento el nombre del fichero que está siendo representado, así como su *path* completo en caso de querer renombrarlo o guardarlo en otro directorio diferente.
5. **Panel de parámetros generales de medida:** cada caracterización es susceptible de ser realizada de forma diferente en cuanto a conexionado del dispositivo, excitación,

número de ciclos, etc. Por lo que en este panel se indica como se ha realizado la medida que está siendo representada en las gráficas. Estos parámetros sólo estarán disponibles en los datos guardados con la extensión `.mat`, ya que los ficheros `.txt` se limitan a almacenar los datos de tensión, corriente y *timestamp* obtenidos.

6. **Panel de parámetros característicos de la curva:** una vez se toman todos los puntos de una determinada curva, se procesan los datos para obtener los parámetros obtenidos tras el post-procesado.
7. **Botón STOP:** aunque aún no hemos llegado a la interfaz de medida, introducimos el botón de STOP o parada de emergencia de una medida. Este pulsador permanecerá deshabilitado mientras no se esté llevando a cabo una medida.

4.4.1.2 Funciones de copiado rápido en portapapeles

En aquellas ocasiones donde guardar las gráficas externamente, podemos copiarlas al portapapeles de Windows y pegarlas en otro destino. Pulsando el menú de herramientas *Edit* se despliegan dos submenús (Figura 4.17) que ofrecen la opción de copiar cualquiera de las dos áreas de representación gráfica.

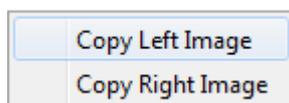


Figura 4.17 – Opciones desplegadas en el menú *Edit*.

Incluso es posible realizar un ampliado de la gráfica con los iconos de la barra de herramientas y luego copiar el área ampliada, Figura 4.18.

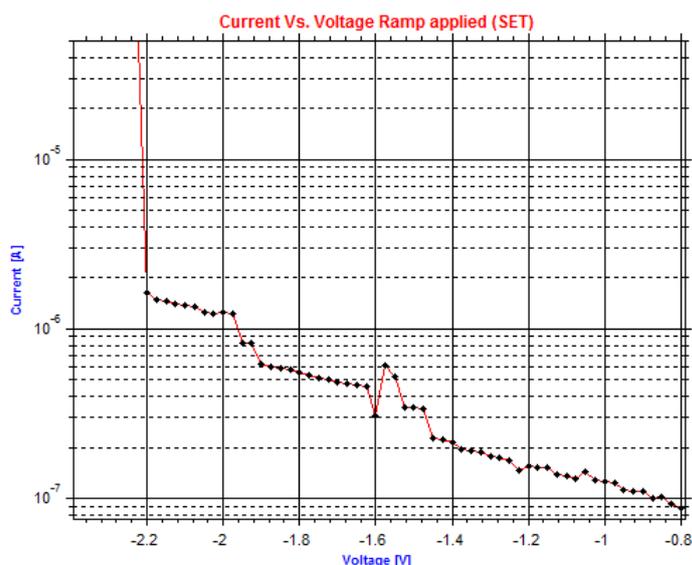


Figura 4.18 – Gráfica copiada.

De manera similar, se puede copiar el texto de los dos paneles de datos (5) y (6) de la Figura 4.16 con solo pinchar y arrastrar hasta seleccionar los datos de interés, Figura 4.19 y luego pulsando Ctrl+c para copiarlos al portapapeles.

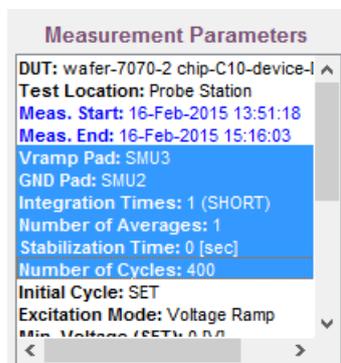


Figura 4.19 – Selección de texto.

4.4.1.3 Función de guardado de datos

Una vez tengamos representados unos datos de medida en la interfaz principal, bien hayan sido medidos con nuestro *software*, o bien hayan sido importados de un fichero guardado previamente, podemos guardar los datos pulsando *File* y el submenú *Save* o bien pulsando directamente el icono de la barra de herramientas.

Los ficheros pueden guardarse en cualquier directorio, no tiene por qué ser el directorio de trabajo donde se encuentran los ejecutables del *software* en MATLAB®, ya que el algoritmo se encarga de direccionarlos por su *path* y guardarlos o abrirlos desde el directorio en el que se encuentren.

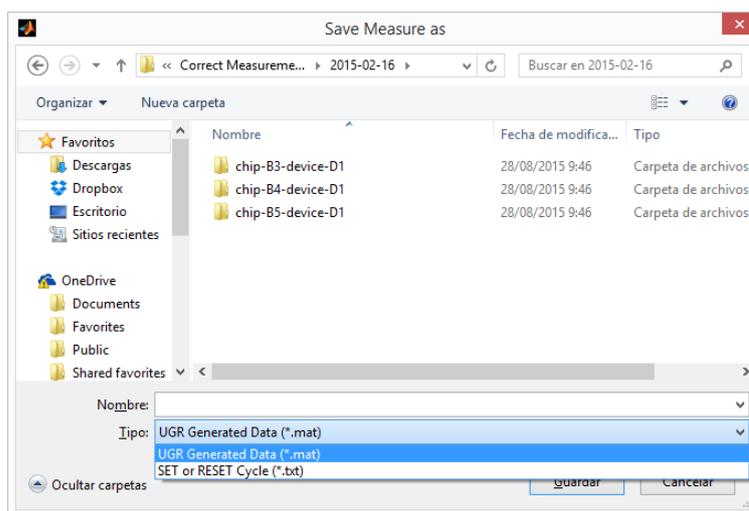


Figura 4.20 – Ventana de guardado.

El formato de los ficheros de salida podrá ser *.mat* o *.txt*, como podemos ver en la Figura 4.20.

Por último, en el menú de herramientas, tenemos la pestaña *RRAM*, con las opciones del sistema de caracterización de dispositivos RRAM. Este menú *RRAM* muestra cinco submenús diferenciados en tres grupos, Figura 4.21.

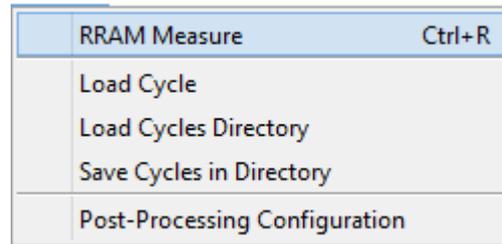


Figura 4.21 – *Submenús Measure.*

La primera opción, *RRAM Measure*, conduce al panel de configuración de medida de un dispositivo. De las tres opciones siguientes, las dos primeras son para cargar ciclos, ya sean individuales o un directorio que contenga una secuencia de ciclos en formato .txt (como los del IMB-CNM), y la tercera es para guardar una secuencia de ciclos en ese mismo formato. Y la última opción del menú, es para configurar los parámetros del post-procesado.

4.4.2 Interfaz de *Setup* de medida

Para realizar la caracterización de un dispositivo RRAM, es necesario especificar una configuración funcional y una configuración paramétrica del análisis.

La configuración funcional consiste en detallar el conexionado y el tipo proceso de medida que se desea realizar.

La configuración paramétrica implica detallar los valores de excitación eléctrica, así como los tiempos de estabilización y toma de medidas, el número de iteraciones, etc.

Para ello se ha implementado una interfaz intuitiva donde el usuario llevará a cabo esta configuración de forma estructurada, donde se pueden configurar distintos tipos de medida.

En la siguiente Figura 4.22 se muestra el aspecto de la ventana de esta interfaz de medida:

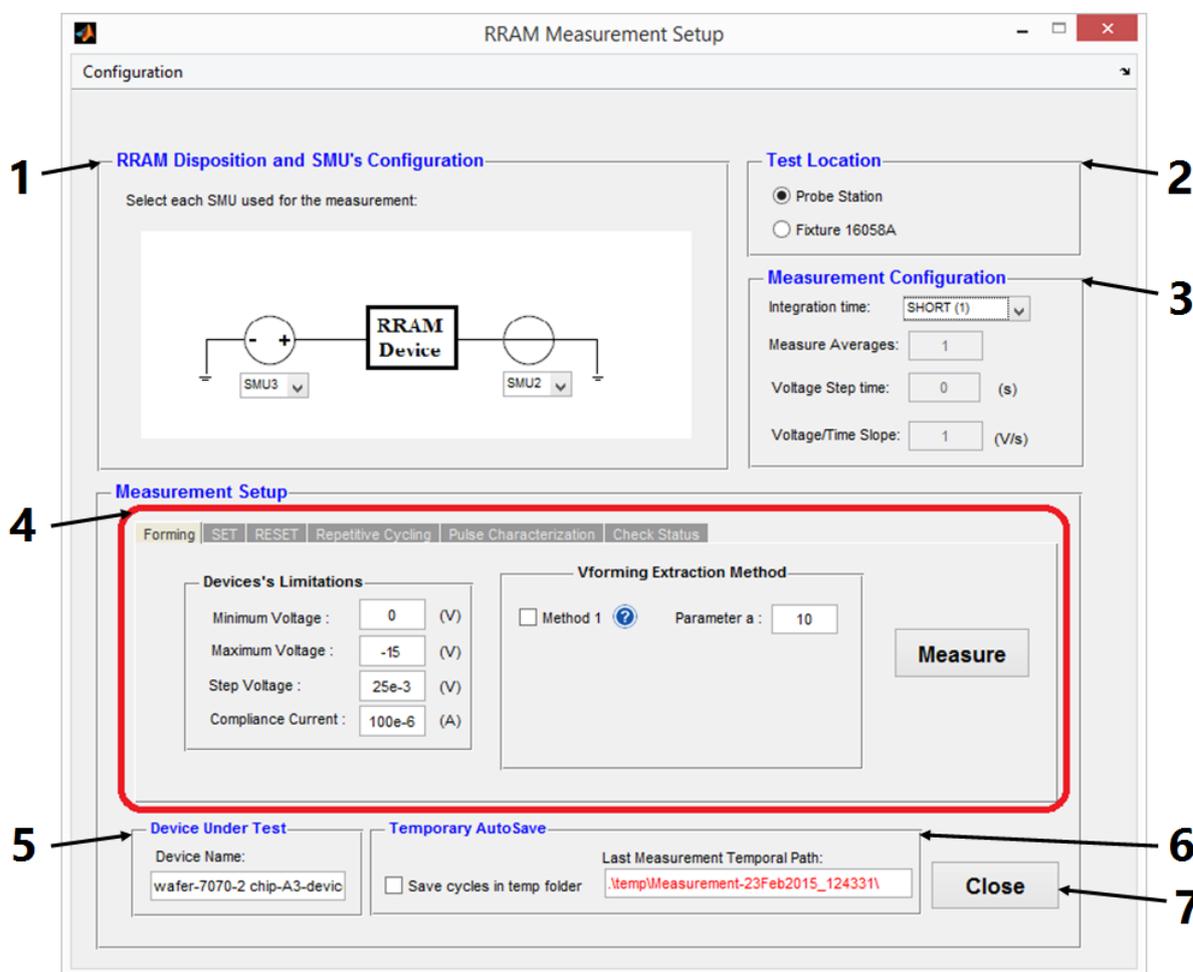


Figura 4.22 – Interfaz de la ventana RRAM Measurement Setup.

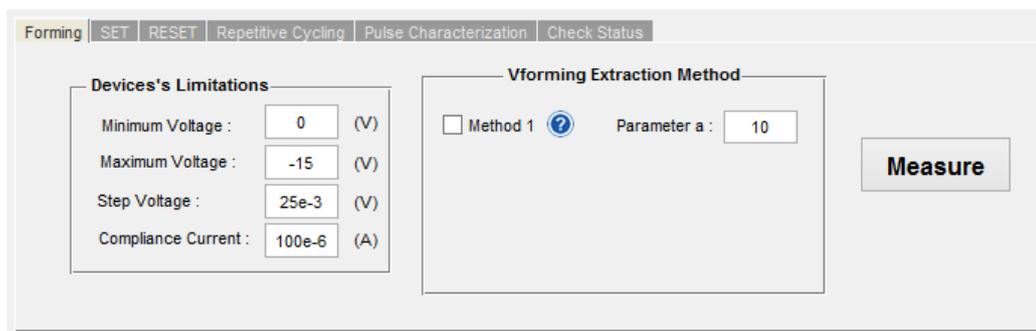
En la siguiente lista se enumeran los bloques y campos editables de interés durante el proceso de *setup* de la medida:

1. Panel de selección de las SMUs utilizadas en cada nodo del dispositivo, siendo la SMU TOP la que funcionará como una fuente de tensión y la SMU BOTTOM irá conectada a tierra.
2. Localización del dispositivo durante el análisis:
 - En la mesa de puntas: nos conectaremos al dispositivo por medio de los microposicionadores.
 - En el 16058A Test Fixture: utilizaremos los latiguillos y conectores del fixture para conectar el dispositivo.
3. Panel de configuración de la toma de medidas:
 - Tiempo de integración del HP 4145B.
 - Número de medias en cada punto.
 - Tiempo de estabilización de la medida.
 - Pendiente Tensión/Tiempo deseada.
4. Bloque de configuración específica de la medida. Consta de una serie de pestañas para acceder a varios paneles donde se podrán configurar distintos tipos de medida:
 - Proceso Forming.
 - Proceso SET.
 - Proceso RESET.
 - Secuencia de ciclos.
 - Caracterización pulsada.
 - Comprobación del estado del dispositivo.
5. Panel donde se indica el nombre del dispositivo que vamos a medir, para que quede guardado junto a los datos.
6. Panel de auto-guardado. Podemos indicar si queremos que la medida se vaya guardando en un directorio temporal (cada vez que termine un barrido, se guarda su curva). De este modo, si se para el programa, ya sea por un fallo eléctrico en la estación de trabajo o un fallo en MATLAB®, podremos recuperar los datos de la medida. Del mismo modo, se muestra el *path* donde fueron guardados temporalmente los datos de la última medida.
7. Botón de cerrado de la ventana de *setup*. Al cerrar, se guardarán en un fichero de configuración todos los datos que se hayan introducido en los distintos campos de la ventana, de forma que cuando la volvamos a abrir, aparecerán precargados.

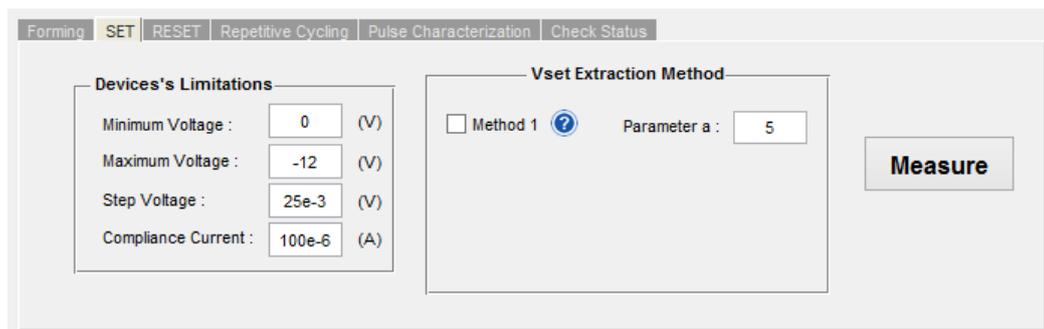
4.4.2.1 Paneles *Forming*, *SET* y *RESET*.

Estos tres paneles, muy similares entre sí, son para configurar los parámetros de los barridos de los procesos Forming, SET y RESET.

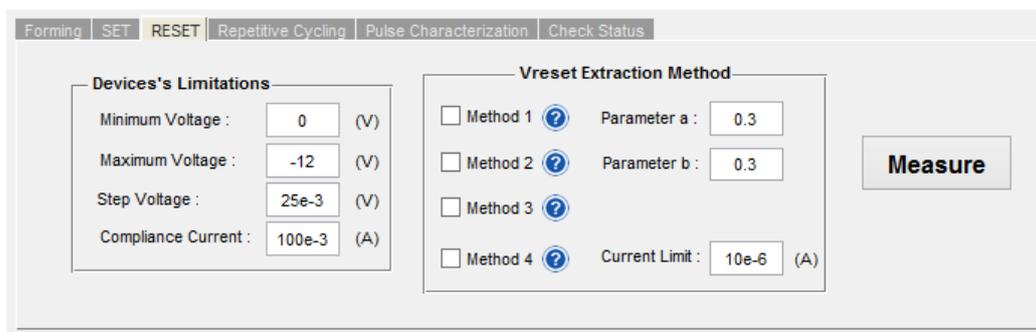
En el bloque de la izquierda están los propios parámetros del barrido, tal y como se indica en la sección 4.3.1.1, y en el bloque de la derecha se muestran los métodos para calcular las tensiones de conmutación del dispositivo. En este último bloque, se dispone de una ayuda contextual o *tooltip* que permite consultar la ecuación de cada método. En la Figura 4.23 se puede ver la vista de estos tres paneles.



(a) Panel de medida *Forming*.



(b) Panel de medida *SET*.



(c) Panel de medida *RESET*.

Figura 4.23 – Paneles de configuración de barridos.

Los datos numéricos se introducirán, o bien en formato decimal, por ejemplo 0.0015, o en formato científico utilizando la expresión exponencial, $1.5e-3$. El *software* los convertirá automáticamente a formato ingeniería para que sean más legibles para el usuario.

4.4.2.2 Panel *Repetitive Cycling*.

Por otro lado, tenemos el panel *Repetitive Cycling*, destinado a configurar la medida de una secuencia ciclos SET y RESET.

Este panel se complementa con los de SET y RESET, ya que los datos de los barridos de los ciclos a medir, habría que introducirlos en dichos paneles. En el panel *Repetitive Cycling*, Figura 4.24, tenemos los campos correspondientes para configurar la secuencia, como se indica en la sección 4.3.1.2.

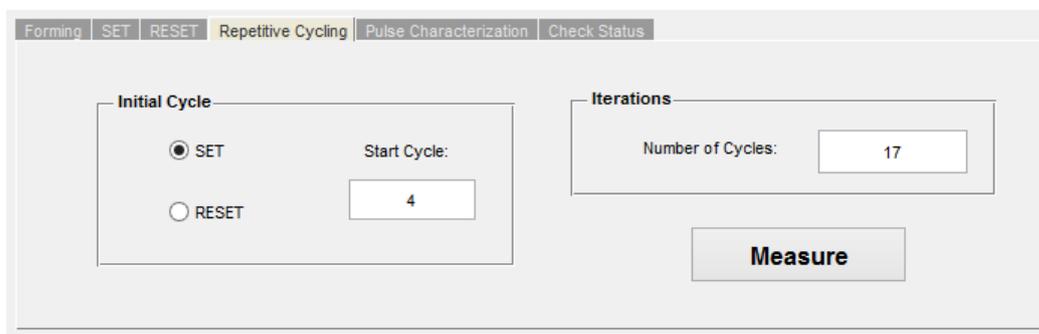


Figura 4.24 – Panel de medida de una secuencia de ciclos.

4.4.2.3 Panel *Pulse Characterization*.

El siguiente panel nos permitirá configurar una medida aplicando un pulso de tensión para realizar ciclos pulsados.

En la Figura 4.25 podemos ver el aspecto de este panel con los campos que fueron descritos en la sección 4.3.1.3.

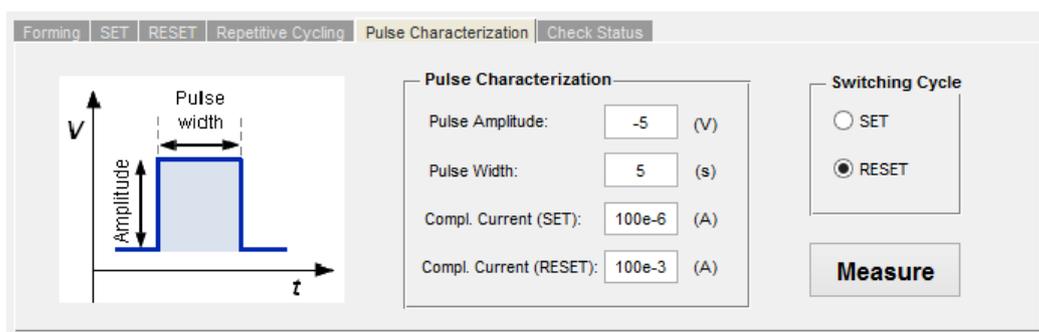


Figura 4.25 – Panel de medida con pulsos.

4.4.2.4 Panel *Check Status*.

El último panel de la ventana de *setup* de medidas RRAM, sirve para testear el estado de un dispositivo, que puede ser LRS (ON) o HRS (OFF). En la Figura 4.26 se puede ver el panel.

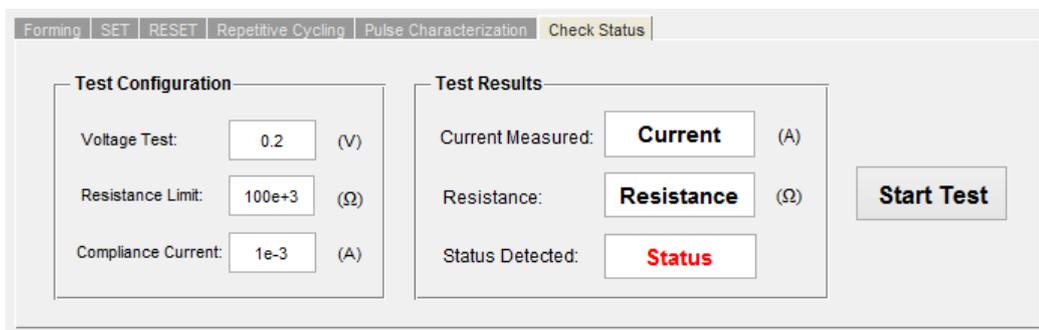


Figura 4.26 – Panel de comprobación de estado.

Esto resulta muy útil a la hora de retomar las medidas en un dispositivo en el que ya habíamos tomado datos. De este modo, se podrá saber el estado en el que se encuentra y tenerlo en cuenta para elegir empezar la secuencia de ciclos por un RESET o un SET.

A continuación, vemos un ejemplo del resultado de test de comprobación de estado, Figura 4.26.

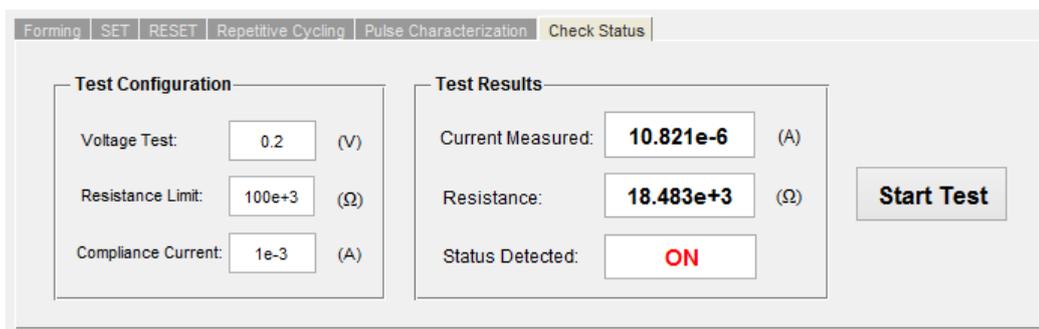


Figura 4.27 – Test de comprobación de estado.

4.4.3 Carga y guardado de una secuencia de ciclos.

Como hemos visto anteriormente, la pestaña RRAM del menú principal tiene opciones para la carga y el guardado de secuencias de ciclos. Estas opciones son exclusivamente para ficheros de medida .txt, por compatibilidad con los datos del IMB-CNM, para que se puedan cargar sus datos y poder analizarlos.

Para que funcione la carga de ciclos y *software* pueda saber a qué corresponde cada fichero, estos seguirán una nomenclatura, como vemos en la Figura 4.28. La "S.º la R" nos indicará si el barrido guardado en el fichero se trata de un SET o un RESET. La cifra que le sigue indica el número de ciclo al que corresponde.

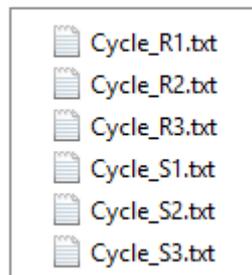


Figura 4.28 – Nomenclatura de los datos de una secuencia de ciclos.

A continuación, en la Figura 4.29 se muestra la ventana que nos permitirá seleccionar el directorio donde se pretende cargar la secuencia de ciclos.

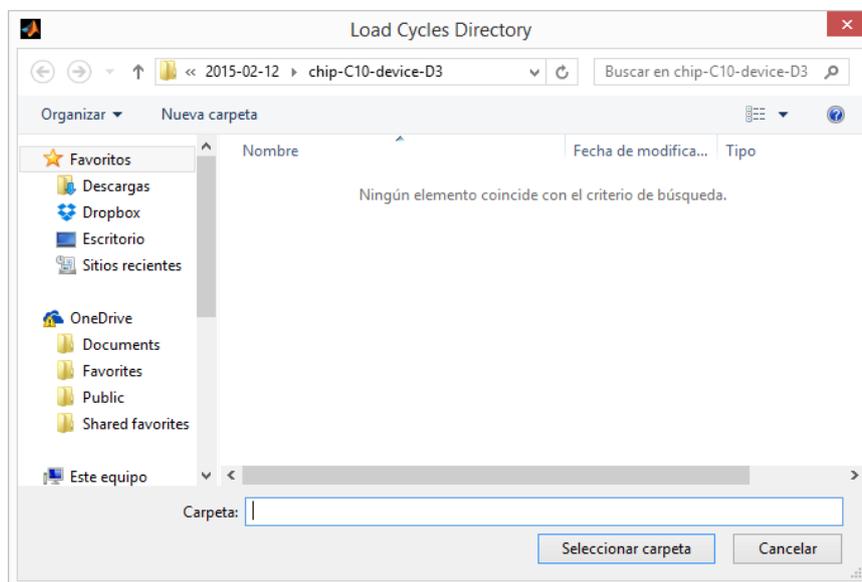


Figura 4.29 – Ventana de selección de un directorio de ciclos.

De igual modo, en la Figura 4.30 podemos ver la ventana que permite guardar una secuencia de ciclos que se encuentra cargada en la interfaz principal, ya sea porque se acaban de medir o porque se han cargado datos anteriormente guardados.

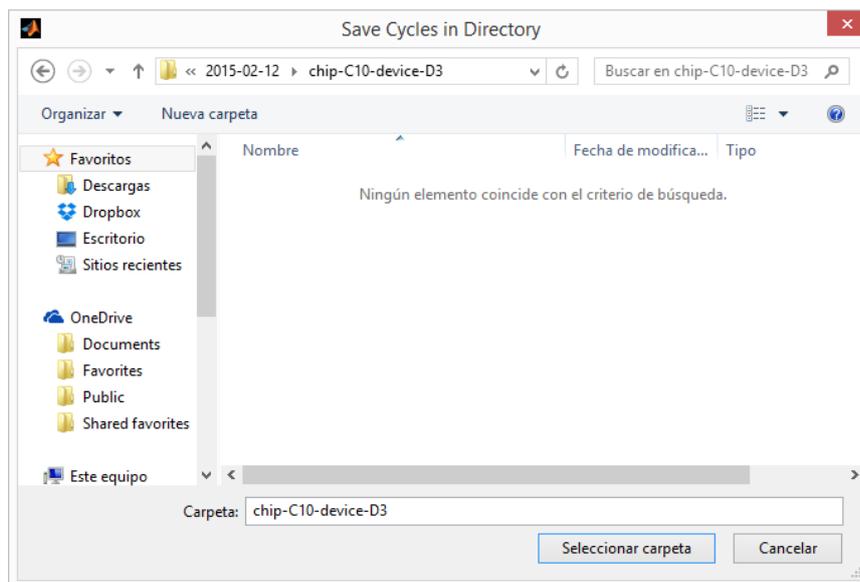


Figura 4.30 – Ventana de selección de un directorio para guardar una secuencia.

4.4.4 Ventana de configuración del post-procesado.

Por último, nos encontramos con la ventana de configuración del post-procesado, Figura 4.31, cuya utilidad es poder cambiar los parámetros de los métodos de post-procesado cuando tenemos datos cargados en la interfaz principal. De este modo, cuando le damos a Save & Close, se recargan los datos post-procesados aplicando la nueva configuración.

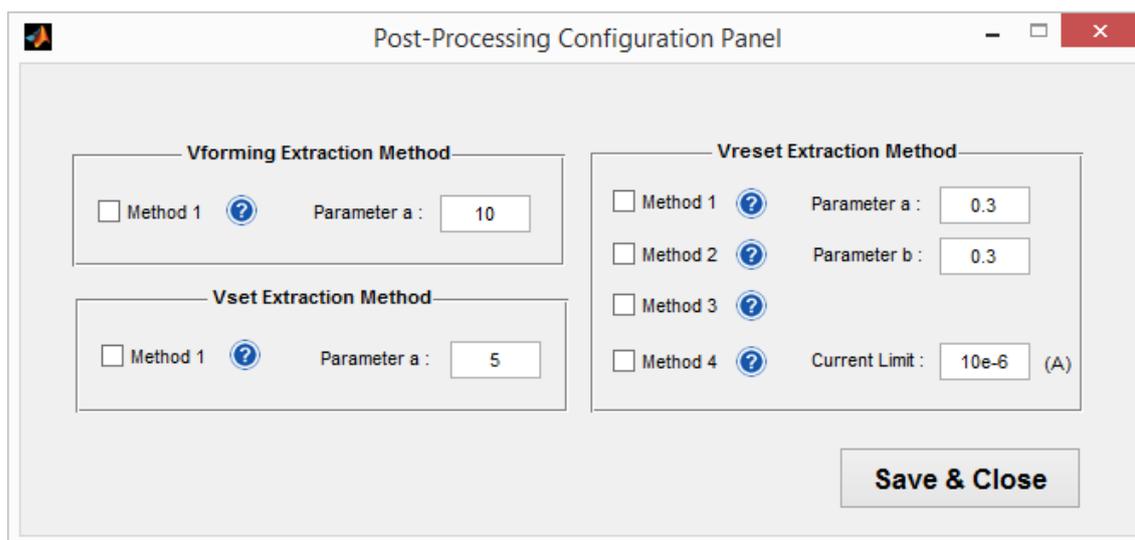


Figura 4.31 – Ventana de configuración del Post-procesado.

Con esto concluimos la descripción de la herramienta *software* del sistema de caracterización y en el siguiente capítulo pasaremos a validar el sistema, analizando los resultados obtenidos.

CAPÍTULO

5

CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS.

Una vez constituido en su totalidad el sistema de caracterización de dispositivos RRAM, llegamos a la fase de testeo y validación del sistema en su conjunto.

Tras haber validado el correcto funcionamiento del Analizador de Parámetros HP 4145B, controlado de forma remota, nos centramos en un análisis global del comportamiento del sistema, cuya forma más eficiente de validación es la de medir el tipo de dispositivos para los que el sistema ha sido diseñado.

Esta validación no pretende convertirse en una exhaustiva publicación sobre el completo análisis y comportamiento de los dispositivos caracterizados, sino la verificación de los procedimientos de caracterización por sí mismos, que deben llegar a resultados coherentes.

Por ello, lo que haremos será citar el tipo de dispositivo que se ha analizado, estudiando su comportamiento al aplicarle barridos de tensión, concluyendo con una breve explicación de los resultados obtenidos.

5.1 Testeo en otros dispositivos.

Antes de proceder a realizar medidas en dispositivos RRAM, hemos testeado el funcionamiento del Analizador de Parámetros HP 4145B y su control desde MATLAB con diodos y resistencias, realizando una serie de barridos de tensión para comprobar que se detecta cuándo se ha alcanzado el *compliance*.

También hemos analizado los tiempos de medida que presenta el instrumento, así como la afección por el ruido.

5.1.1 Análisis del tiempo de medida.

Se ha utilizado un diodo 1N4002 para hacer barridos de tensión como prueba. En dichos barridos hemos detectado que el tiempo de medida o timestamp depende de la corriente que se está midiendo. Analizando el manual de operación del HP 4145B, [6], no hemos encontrado ninguna referencia directa a esa dependencia del tiempo de medida con la corriente, pero sí que hemos encontrado que se definen rangos de corriente y que cada uno de estos rangos tiene una resolución de medida determinada, Tabla 5.1, lo cual puede ser la causa del mayor tiempo de medida a menor corriente.

Current Range	Resolution	Accuracy	Max. Voltage
±100mA	100μA	±(0.3%+100μA+2μA*Vo)	20V (>50mA)
			40V (>20mA)
±10mA	10μA	±(0.3%+10μA+200nA*Vo)	100V (≤20mA)
±1000μA	1μA	±(0.3%+1μA+20nA*Vo)	
±100μA	100nA	±(0.3%+100nA+2nA*Vo)	
±10μA	10nA	±(0.3%+10nA+200pA*Vo)	
±1000nA	1nA	±(0.5%+1nA+20pA*Vo)	
±100nA	100pA	±(0.5%+100pA+2pA*Vo)	
±10nA	10pA	±(1%+15pA+200fA*Vo)	
±1000pA	1pA	±(1%+6pA+20fA*Vo)	

Tabla 5.1 – Resolución según el rango de corriente [6].

A continuación, en la Figura 5.1 se muestra una captura del osciloscopio Agilent DSO5032A donde se ve la rampa de tensión que se le está aplicando al diodo y se aprecia como los tiempos de los primeros puntos de la rampa son mayores que los de los últimos, debido a que para los primeros puntos, las corrientes que se están midiendo son menores.

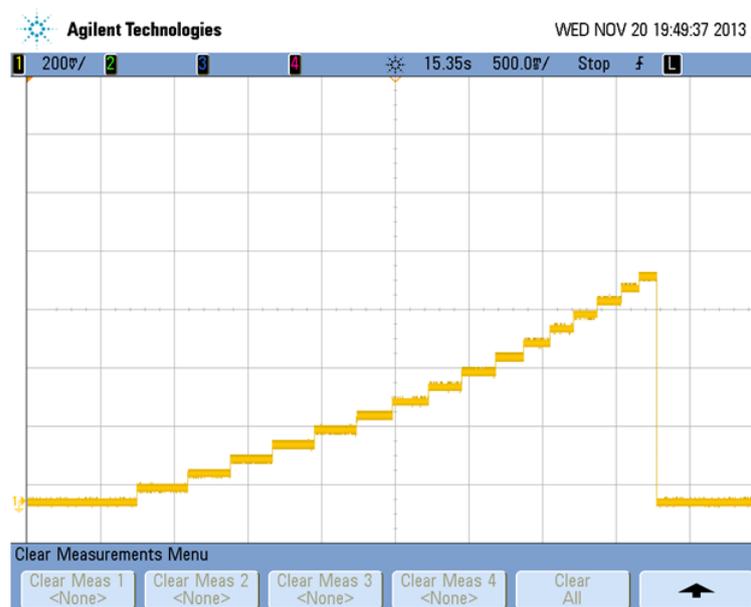


Figura 5.1 – Rampa de tensión aplicada a un diodo.

En la tabla 5.2 se pueden ver los tiempos de medida que se han obtenido experimentalmente para cada rango de corriente.

Rango de corriente	Tiempo de medida
$\pm 100 \text{ mA}$	62 ms
$\pm 10 \text{ mA}$	101 ms
$\pm 1 \text{ mA}$	117 ms
$\pm 100 \mu\text{A}$	150 ms
$\pm 10 \mu\text{A}$	166 ms
$\pm 1 \mu\text{A}$	207 ms
$\pm 100 \text{ nA}$	267 ms
$\pm 10 \text{ nA}$	396 ms
$\pm 1 \text{ nA}$	542 ms

Tabla 5.2 – Tiempo de medida según el rango de corriente.

Como vemos, tenemos una limitación de tiempos de medida considerable, por lo que si queremos meter una rampa con una pendiente (V/s) determinada, no siempre será posible.

5.1.2 Análisis del ruido.

Para estudiar la afección por el ruido, hemos hecho uso del 16058A Test Fixture, conectando el diodo dentro de éste y haciendo un barrido con la tapa cerrada y otro con la tapa abierta. En la Figura 5.2 se muestra la comparativa.

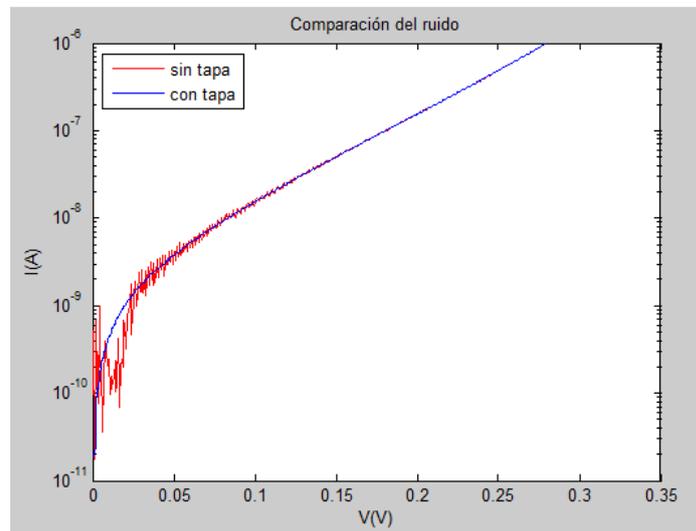


Figura 5.2 – Comparativa del ruido con y sin la tapa del 16058A Test Fixture.

Como vemos, el ruido afecta bastante a las medidas a bajas corrientes, del orden de nanoamperios.

Esto, en principio, no es un gran problema para los dispositivos que vamos a medir, ya que el *Resistive Switching* se da a corrientes mayores.

5.2 Medidas con dispositivos del INESC-MN.

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos con los dispositivos RRAM del INESC-MN. Cabe destacar que no se han realizado muchas pruebas con estos dispositivos, debido a que los resultados no resultaron satisfactorios, por lo que se dio paso a las pruebas con los dispositivos del IMB-CNM. Para las pruebas se ha utilizado el conjunto de dispositivos RRAM encapsulado ZN2TJ19, descrito en la sección 3.4.1, conectándolo dentro del 16058A Test Fixture a las SMUs correspondientes a través de la placa PCB que hemos fabricado (sección 4.1.1) .

Se han realizado varios intentos de Forming en distintos dispositivo que sin resultado. En la Figura 5.3 podemos ver un ejemplo en el que pasa esto.

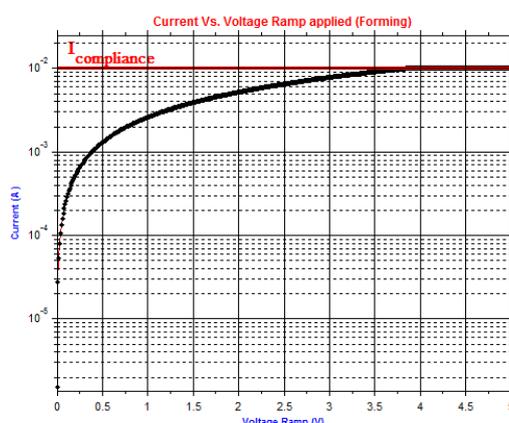


Figura 5.3 – Intento de Forming en uno de los dispositivos del INESC-MN.

Se puede observar que se comporta como una resistencia muy baja, como si el filamento conductor ya se hubiese formado y hubiese sufrido un *Hard Breakdown*.

Después de realizar varias pruebas, finalmente, hemos conseguido realizar un Forming con uno de los dispositivos, Figura 5.4

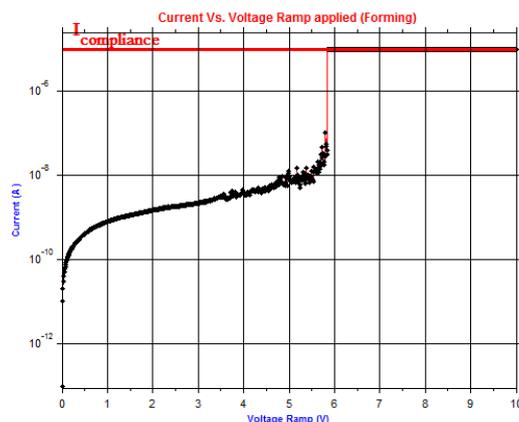


Figura 5.4 – Forming en uno de los dispositivos del INESC-MN.

El error, por parte del *software* de medida, en dicho Forming, ha sido no parar el barrido en cuanto saltó el *compliance*, por lo que el barrido ha seguido hasta llegar al voltaje máximo de la rampa (10V). Esto hace que se haya producido un *Hard Breakdown* formando un gran filamento conductor y dejando el dispositivo en un estado de baja resistencia. Podemos ver en la Figura 5.5 un intento de RESET donde se ve que está en un estado de baja resistencia sin lograr conmutar.

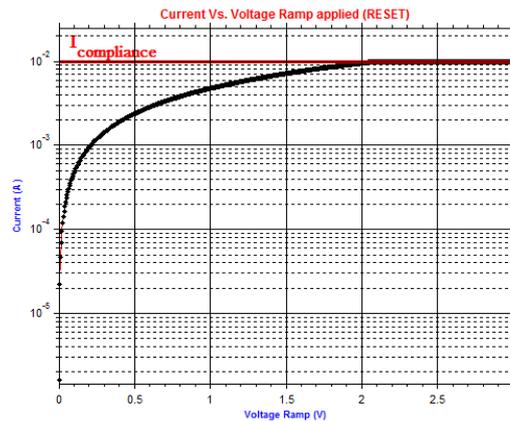


Figura 5.5 – Intento de RESET en uno de los dispositivos del INESC-MN.

Probamos a medirle la resistencia al dispositivo con el Multímetro digital HP 3478A, conectando las pinzas a los pines correspondientes de la PCB, Figura 5.6. Como se puede observar en la imagen se obtiene una resistencia de 385 Ω . Al tratarse de una resistencia tan baja, podemos confirmar que el dispositivo está roto.



Figura 5.6 – Medida de la resistencia de un dispositivo roto.

El motivo por el que muchos de los dispositivos están “rotos” puede ser porque tengan desperfectos y problemas de fabricación que pueden hacer que no funcionen como deben, aunque también podría ser debido a una mala manipulación del dispositivo.

Debido a que, en los chips del INESC-MN, no hemos encontrado dispositivos con los que conseguir ciclos de SET y RESET, pasamos las pruebas a los dispositivos del IMB-CNM, que trataremos en la siguiente sección.

5.3 Medidas con dispositivos del IMB-CNM.

Damos paso a las pruebas en dispositivos RRAM del trozo de oblea 7070-2 del conjunto de máscaras CNM-733, descrito en la sección 3.4.2. Es conveniente revisar dicha sección para entender la nomenclatura de los chips y dispositivos que vamos a medir. En concreto, como comentamos en dicha sección, nos centramos en las estructuras MIS del grupo D, por lo que sería aconsejable revisar las figuras 3.13 y 3.15 y la tabla 3.1 de dicha sección.

5.3.1 Primeras medidas.

El posicionamiento sobre los *pads* de estos dispositivos se realiza en la mesa de puntas Karl Suss PSM6, descrita en la sección 3.5.3. Es muy importante comprobar que está se está haciendo vacío, ya que en caso contrario no tendremos un buen contacto.

Por la información suministrada por el IMB-CNM, sabemos que los dispositivos que vamos a medir son unipolares y se les debe aplicar una rampa negativa. Esto lo hacemos conectando a tierra la SMU que va a al sustrato (SMU BOTTOM) y conectando a modo fuente de tensión negativa la SMU que va al contacto superior del dispositivo (SMU TOP) con una punta (utilizando uno de los microposicionadores).

En unas primeras pruebas, conectamos la SMU BOTTOM al *Chunk*, ya que al hacer vacío, el *Chunk* hace contacto directamente con el sustrato, quedando como se representa en la Figura 5.7.

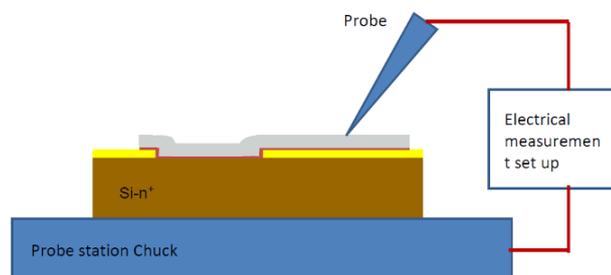


Figura 5.7 – Esquema de conexión de dispositivos en el Probe Station.

En una primera toma de contacto, probamos a hacer nuestro primer Forming en la oblea en el dispositivo D5 ($5 \times 5 \mu\text{m}^2$) del chip A2. A partir de ahora, vamos a nombrar los dispositivos indicando el chip en el que se encuentran y el tipo de dispositivo, de modo que el dispositivo que hemos comentado sería el A2-D5.

Se ha conseguido el Forming, pero no se ha parado la medida al conmutar y alcanzar el compliance debido a que no estaba bien implementada la comprobación *software* de que se haya superado dicho límite para corrientes negativas. Tampoco se estaba realizando la comprobación *hardware* (del propio HP 4145B), debido a que no se le estaba mandado correctamente al instrumento. Por lo tanto, se ha producido un Hard Breakdown en el dispositivo y ya no es posible realizar más ciclos en él, Figura 5.8. A la derecha de la figura vemos la gráfica del intento de RESET, sin llegar a conmutar debido a la rotura del dispositivo.

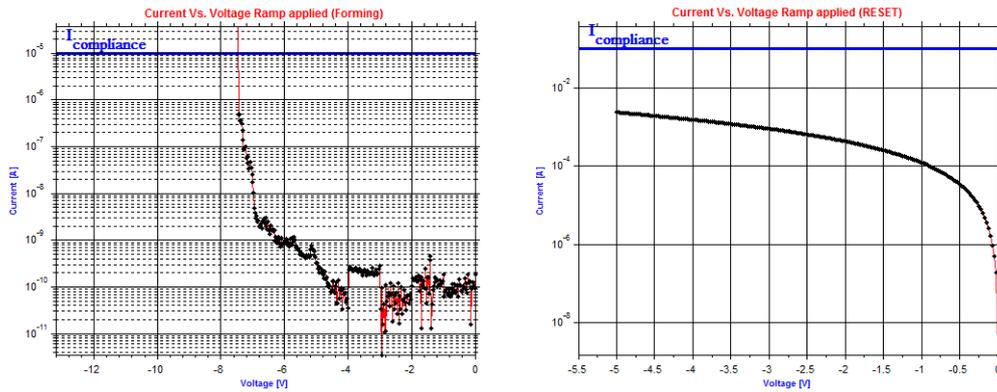
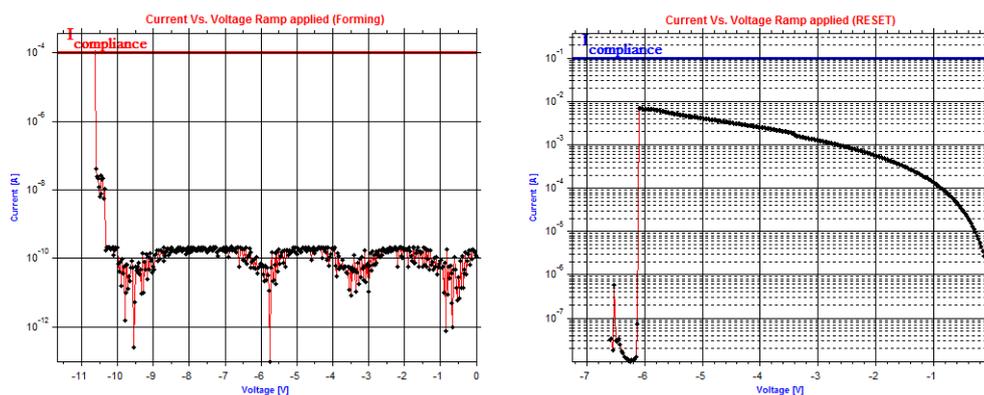


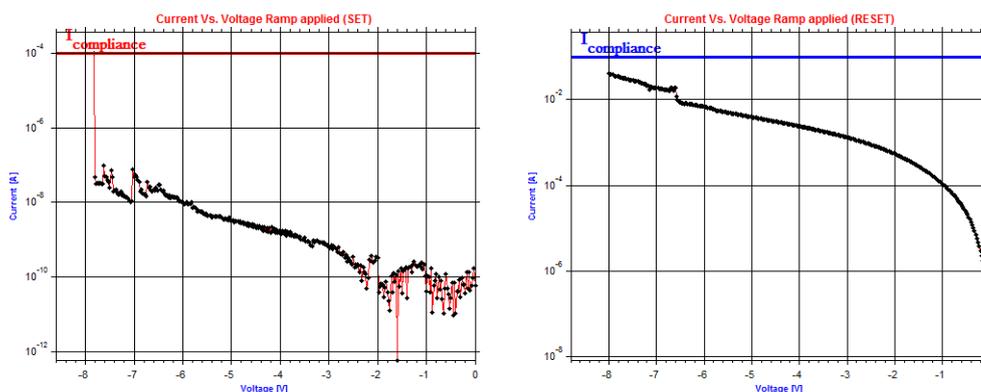
Figura 5.8 – Primer ciclo fallido (dispositivo A2-D5).

Antes de seguir con las medidas en dispositivos RRAM, hemos probado a hacer barridos negativos a diodos *zener* para perfeccionar técnica de comprobar si se ha alcanzado la corriente de *compliance*, de modo que el verifiquemos que el *software* pare las medidas inmediatamente cuando se haya alcanzado dicho límite.

Una vez corregido el problema, pasamos a medir algunos dispositivos más de distintas dimensiones pero no conseguimos muchos ciclos más de dos o tres ciclos hasta que se rompe el dispositivo. En la Figura 5.9 podemos ver uno de estos ejemplos.



(a) Primer Forming y primer RESET



(b) Segundo ciclo de SET y RESET

Figura 5.9 – Ciclos en el dispositivo A5-D5.

Los parámetros de medida que hemos utilizado son similares a los observados en las medidas del IMB-CNM, Tabla 5.3.

	Forming	SET	RESET
$I_{compliance}$	100 μ A	100 μ A	100 mA
V_{min}	0 V	0 V	0 V
V_{max}	-12 V	Entre -8 y -10 V	Entre -4 y -6 V
V_{step}	25 mV	25 mV	25 mV

Tabla 5.3 – Parámetros utilizados para las medidas.

Estos valores pueden depender de en qué ciclo nos encontremos, ya que primeros 2-3 ciclos suelen conmutar con una tensión más alta de lo habitual hasta que el dispositivo se estabiliza.

Hemos podido ver en las medidas que la corriente de *compliance* a $100 \mu\text{A}$ se puede quedar algo corta en algunas ocasiones, por lo que se probará a subirla hasta los $500 \mu\text{A}$ en medidas posteriores.

Como hemos visto que los resultados no están siendo del todo satisfactorios, vamos a probar a conectar la SMU BOTTOM al substrato de otra forma.

5.3.2 Rotura forzada de un dispositivo.

Vamos a romper un dispositivo haciéndole un Forming con la corriente de *compliance* muy alta (a 100mA) para que se forme un filamento conductor muy grande y nos sirva de camino óhmico hacia el substrato. Le aplicamos varios barridos más similares para asegurarnos de que el dispositivo está roto y no conmuta.

Para ello, utilizamos los dispositivos de mayor área, los D1, D2 y D3 principalmente, de $120 \times 120 \mu\text{m}^2$, $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ y $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ respectivamente, para que el camino óhmico sea lo más ancho posible.

Medimos la resistencia y vemos que varía con la tensión, Figura 5.10, o dicho de otra forma, la curva V-I dibuja una parábola.

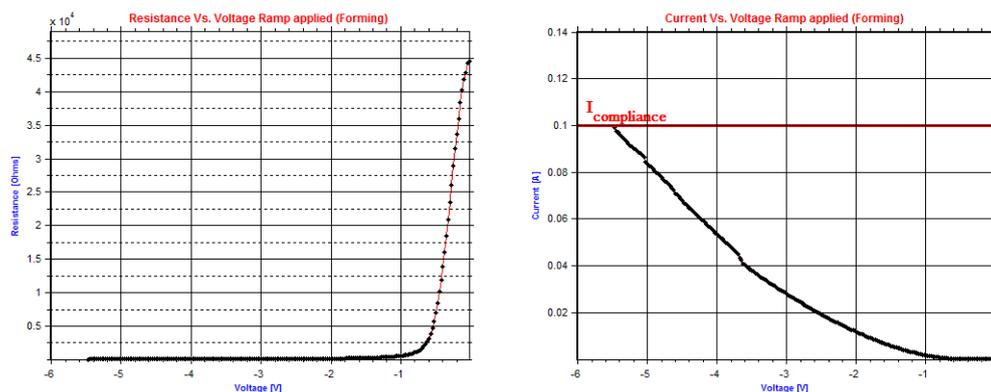


Figura 5.10 – Curvas R-V e I-V para un dispositivo roto.

Esto es debido a que tenemos como dos resistencias parásitas en paralelo, Figura 5.11. Por un lado está la resistencia óhmica del filamento, que tiene un comportamiento lineal, y por otro lado está la resistencia del túnel, cuyo comportamiento es cuadrático. Para tensiones bajas predomina la resistencia del túnel, por eso la curva tiene cierto parecido a una parábola.

Para tensiones altas (por encima de los 3 V), el comportamiento de la curva I-V comienza a ser lineal y el valor está entre 50 y 70Ω , por lo que son valores aceptables para que el dispositivo sea utilizado como puente al substrato para realizar medidas en otros dispositivos.

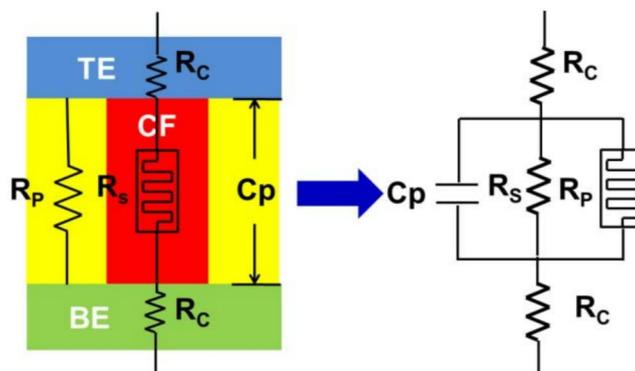


Figura 5.11 – Circuito equivalente de una celda RRAM con elementos parásitos [13].

Cabe destacar que, debido a que el microscopio de la mesa de puntas no tiene un rango de movimiento muy amplio, las puntas de los SMU TOP y SMU BOTTOM tienen que estar relativamente cerca (a dos o tres chips de distancia), por lo que hemos tenido que romper más dispositivos a lo largo de las medidas. También se han aprovechado en algunos casos algunos de los dispositivos que se han roto en otras medidas.

5.3.3 Caracterización utilizando las dos puntas.

Pasamos a realizar medidas conectando una punta en el contacto del dispositivo roto (SMU BOTTOM) y otra punta en el contacto del dispositivo a medir (SMU TOP).

En la primera prueba tenemos un poco más de suerte y conseguimos varios ciclos seguidos, Figura 5.12, pero se rompe el dispositivo al octavo ciclo.

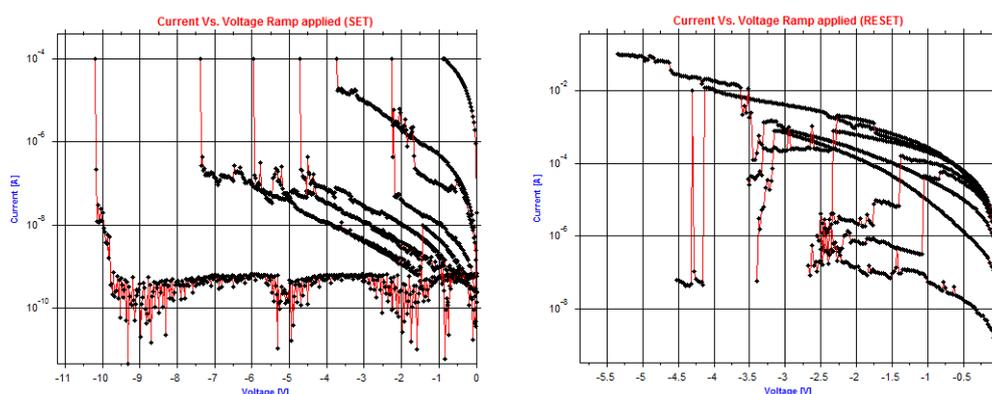


Figura 5.12 – 8 ciclos SET-RESET (dispositivo A7-D3).

El dispositivo se ha roto debido a que el *software* no ha detectado el octavo RESET, por lo que el barrido continuó después de producirse éste y volvió a conmutar al estado baja resistencia, Figura 5.13. El barrido ha continuado con el dispositivo en estado de baja resistencia ya que la corriente de *compliance* estaba fijada a 100mA (porque se trataba del barrido de un RESET).

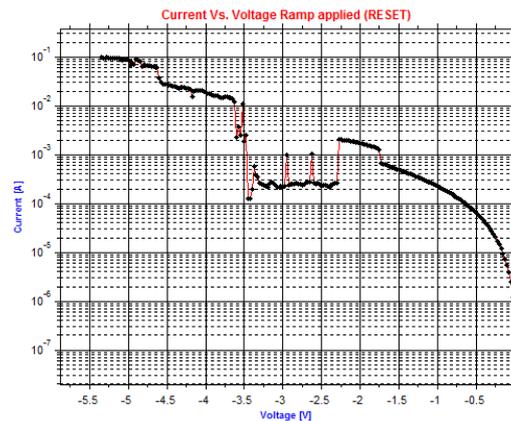


Figura 5.13 – *RESET no detectado por el software.*

El motivo de que no se haya detectado el RESET por *software* ha sido debido a que el algoritmo de detección consideraba que la corriente tenía que bajar al menos a un 10 % de su valor y en este caso no se ha cumplido. Para las siguientes medidas, hemos cambiado dicho factor de reducción de 10 % al 30 %.

Pasamos a medir al dispositivo A7-D4 y conseguimos 110 ciclos, Figura 5.14, pero se rompe en el último ciclo.

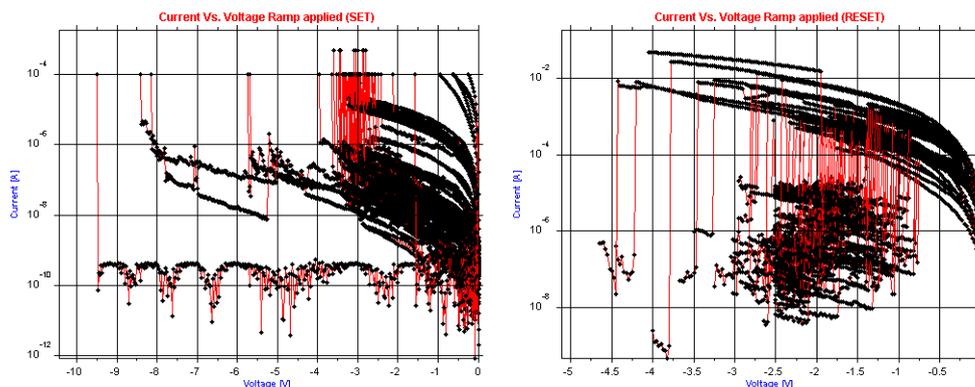


Figura 5.14 – *110 ciclos SET-RESET (dispositivo A7-D4).*

En este caso, también se trata de que el dispositivo a vuelto a conmutar después de producirse el RESET, por lo que, al igual que el caso anterior, se rompe el dispositivo, Figura 5.15.

El motivo por el que no se ha parado el RESET en esta medida ha sido que teníamos implementado que el barrido llegase al menos a 2.5V, aunque se hubiese detectado el RESET, lo cual ha hecho que siga el barrido y que haya vuelto a conmutar antes de los 2.5V

Para evitar este problema, para las siguientes medidas, se ha cambiado la condición de parada de la medida, haciendo que el barrido siga sólo 0.25V más si no se han alcanzado los 2.5V. En caso de que sí se hayan alcanzado los 2.5V, se para el barrido instantáneamente.

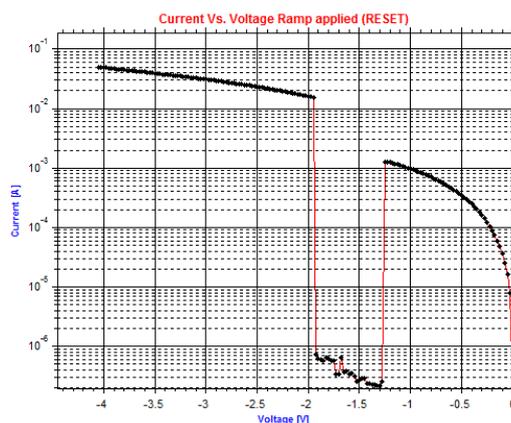


Figura 5.15 – *RESET que vuelve a conmutar por no pararse a tiempo.*

Para evitar este problema, para las siguientes medidas, se ha cambiado la condición de parada de la medida, haciendo que el barrido siga sólo 0.25V más si no se han alcanzado los 2.5V. En caso de que sí se hayan alcanzado los 2.5V, se para el barrido instantáneamente. En la Figura 4.9 del capítulo 4 podemos ver un diagrama de flujo del proceso de medida de un RESET con las últimas modificaciones.

Una vez reprogramado el algoritmo de parada en medidas de RESET, hacemos varias medidas más, consiguiendo una con 1448 ciclos en el dispositivo B4-D3. Para ello, tuvimos que dejar el sistema conectado realizando medidas durante toda la noche, ya que en un principio pretendíamos hacer 2000 ciclos y debido a las limitaciones de tiempo que tenemos, es un proceso de muchas horas. Finalmente se acabó rompiendo el dispositivo en el ciclo 1449, por lo que nos quedamos con 1448 ciclos útiles.

A continuación mostraremos las gráficas con las curvas obtenidas en esta medida en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18.

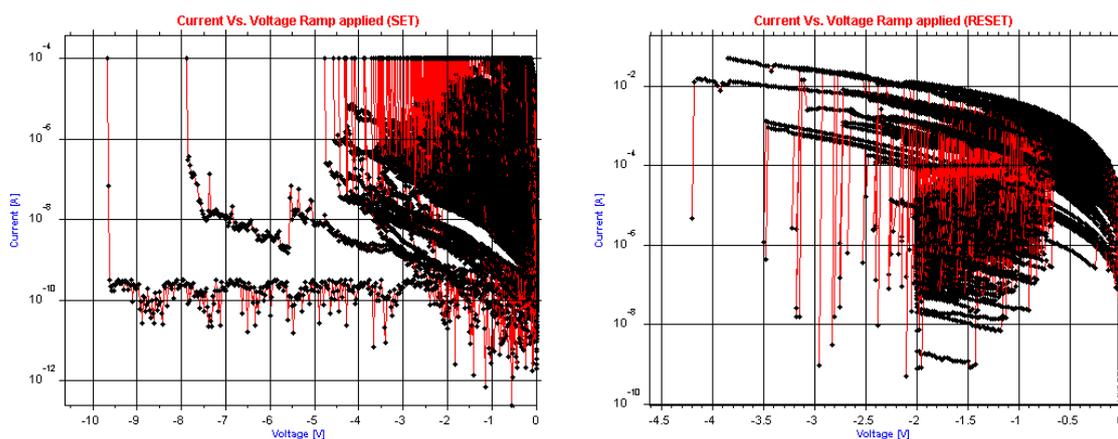


Figura 5.16 – *1448 ciclos SET-RESET (dispositivo B4-D3).*

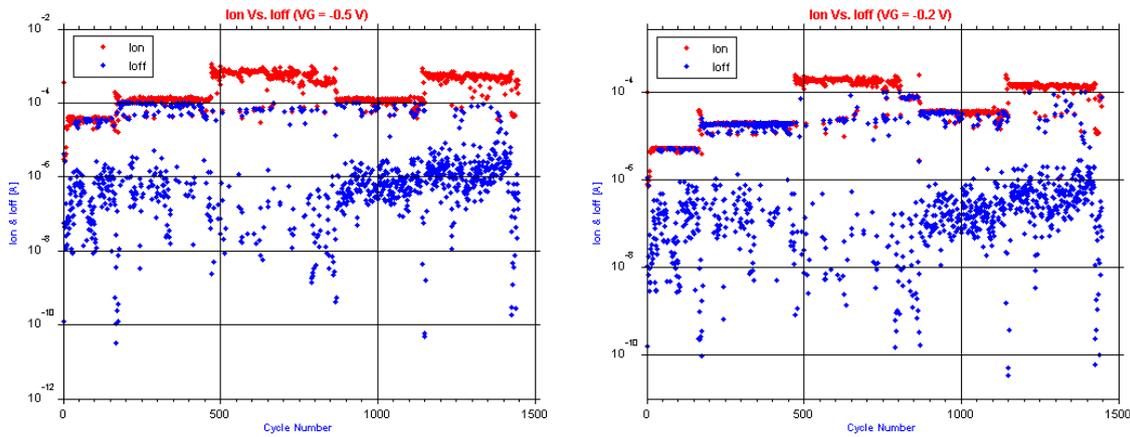


Figura 5.17 – Gráficas I_{on} vs. I_{off} (dispositivo B4-D3).

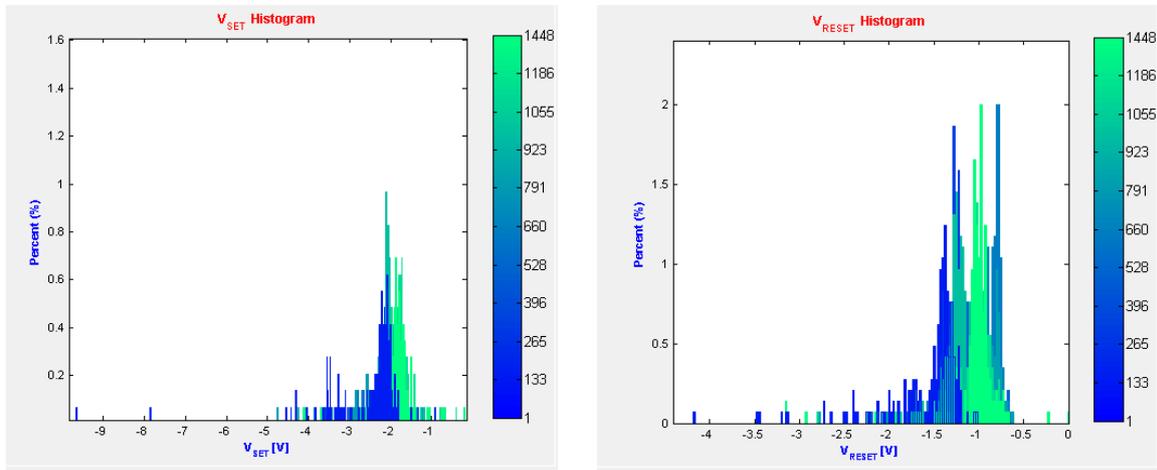


Figura 5.18 – Histogramas de las tensiones de SET y RESET (dispositivo B4-D3).

Analizando los gráficos anteriores, podemos ver que los resultados no han sido muy buenos para dicha medida, a pesar de haber conseguido numerosos ciclos. Concretamente vemos que las gráficas de I_{on} vs. I_{off} no son coherentes.

La I_{on} representa la corriente en estado de baja resistencia (LRS) para una tensión determinada, y la I_{off} , de forma similar, representa la corriente en estado de alta resistencia (HRS) para dicha tensión.

Llegamos a la conclusión de que los resultados obtenidos en las gráficas de I_{on} vs. I_{off} no son correctos porque en muchos casos la I_{off} se solapa con la I_{on} , lo cual no tiene lógica. Por lo tanto, deducimos que no se ha realizado el *resistive switching* en el dispositivo correctamente.

A continuación, vemos un ejemplo de una medida realizada por el IMB-CNM, con 2818 ciclos, Figura 5.19, donde sí se obtienen valores coherentes.

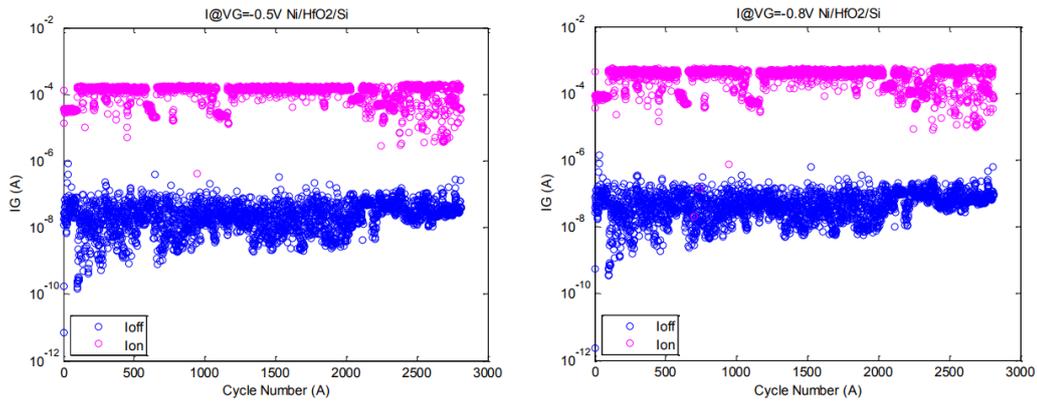


Figura 5.19 – Gráficas I_{on} vs. I_{off} aportadas por el IMB-CNM.

En otras medidas que hemos realizado, sí hemos conseguido gráficas I_{on} vs. I_{off} con datos más coherentes, pero con menor número de ciclos. En las Figuras 5.20, 5.21 y 5.22 podemos ver tres ejemplos, donde se puede observar como hay una clara diferencia entre los valores de la I_{on} y los valores de la I_{off} .

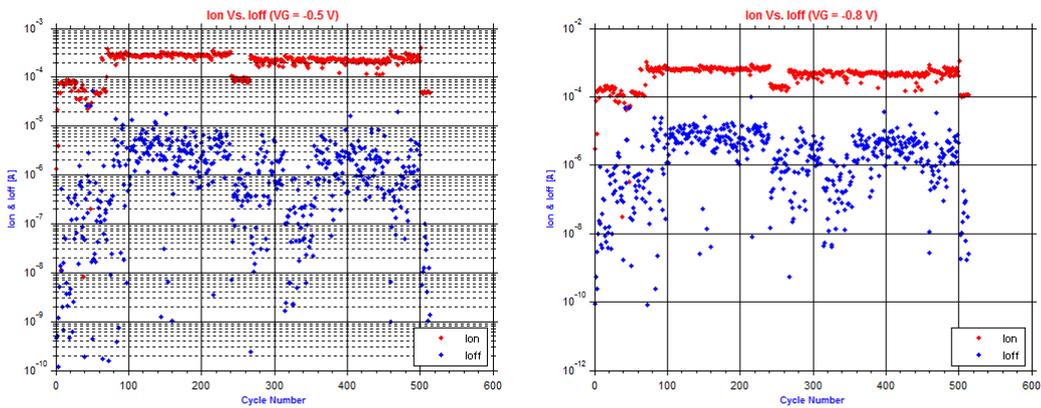


Figura 5.20 – Gráficas I_{on} vs. I_{off} , dispositivo B1-D4, 513 ciclos.

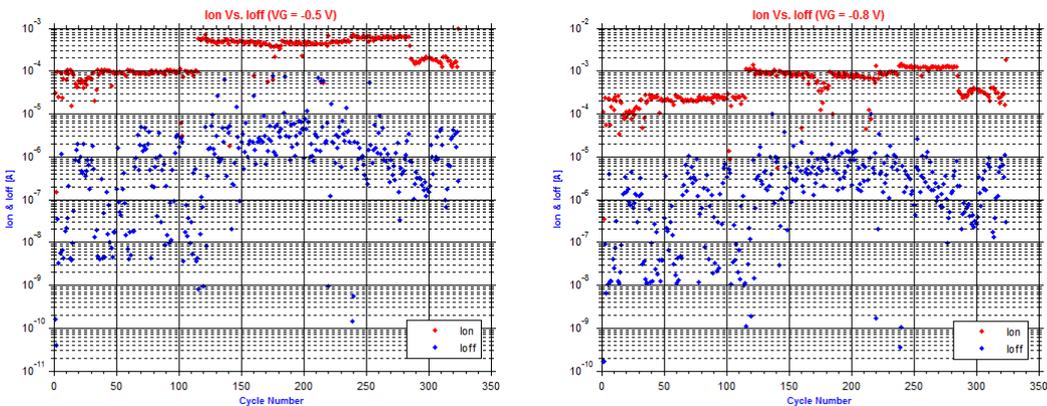


Figura 5.21 – Gráficas I_{on} vs. I_{off} , dispositivo C10-D3, 324 ciclos.

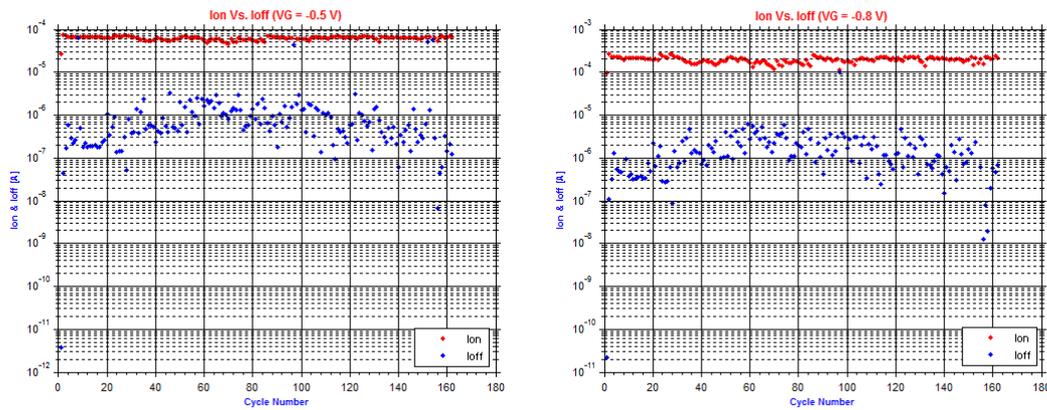


Figura 5.22 – Gráficas I_{on} vs. I_{off} , dispositivo C8-D4, 162 ciclos.

5.3.4 Caracterización aplicando pulsos.

Como última medida, pasamos a probar una caracterización sin barridos, aplicando pulsos de tensión, Figura 5.23, a un dispositivo RRAM para estudiar su comportamiento y comprobar que se pueden hacer SET y RESET pulsados, como vemos en [11].

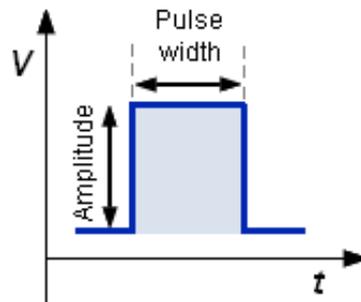


Figura 5.23 – Esquema de un pulso de tensión.

Seleccionamos inicialmente un dispositivo que no ha sido usado, concretamente el A3-D2. Le hacemos el Forming y luego medimos varios ciclos del modo habitual (aplicando rampas de tensión) para comprobar que el dispositivo está funcionando correctamente. Concretamente se aplican 20 ciclos y el vemos que el dispositivo conmuta sin ningún problema.

Después de los 20 ciclos, el dispositivo se encuentra en estado de alta resistencia (HRS) y le he hemos aplicado un pulso de tensión negativa para conseguir el SET y que pase al estado de baja resistencia (LRS).

El pulso aplicado en principio ha sido de una duración de 5 segundos y una tensión de -5 V, pero el *software* ha cortado el pulso antes de 1 segundo, ya que se ha alcanzado el *compliance*. En la Figura 5.24 podemos ver a la izquierda el pulso aplicado y a la derecha la curva obtenida de corriente en función del tiempo.

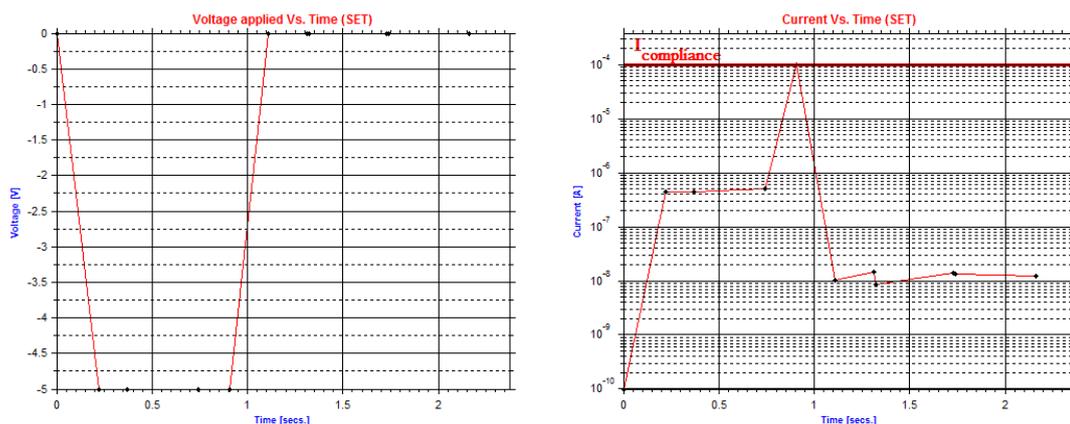


Figura 5.24 – Medida de un SET aplicando un pulso de tensión.

Como vemos, sí se ha producido el *switching* a *LRS*, por lo que vamos a pasar a aplicarle otro pulso para comprobar que vuelve a conmutar, consiguiendo un RESET.

Volvemos a aplicar un pulso al dispositivo con los mismos parámetros (duración de 5 segundos y tensión de -5 V). En este caso, el *software* detecta que se produce el RESET a los 3.4 segundos, por lo que se corta el pulso para evitar dañar el dispositivo, Figura 5.25.

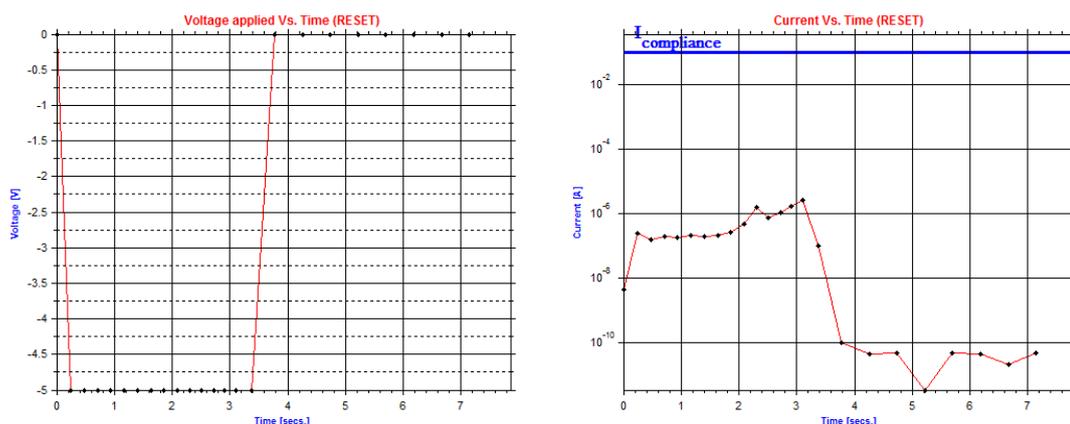


Figura 5.25 – Medida de un RESET aplicando un pulso de tensión.

En este último pulso medido, el resultado no ha sido el esperado, ya que se supone que el dispositivo se encontraba en estado *LRS*, pero las corrientes obtenidas son muy bajas, por lo que el resultado no es del todo coherente.

Para medir pulsos con mayor precisión, se necesitarían tiempos de medida más pequeños. Al tener la limitación de tiempos de medida del Analizador de Parámetros HP 4145B, no podemos conseguir buenos resultados al aplicar pulsos, por lo que no hemos realizado más medidas de este tipo.

5.3.5 Resumen.

A continuación se muestra una tabla resumen con los datos de las medidas más satisfactorias que se han obtenido a lo largo de numerosas medidas, considerando los dispositivos en los que hemos conseguido más de 100 ciclos, Tabla 5.4

Chip	Dispositivo	Compliance	Rampa	STEP	Nº Ciclos Correctos	Promedio V_{SET}	Promedio V_{RESET}
A7	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	110	-3.21 V	-1.7 V
A8	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	121	-3.57 V	-1.63 V
A9	D5 (5x5 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	111	-2.73 V	-1.37V
B1	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	513	-2.17 V	-1.24 V
B4	D3 (40x40 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 50 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	1448	-2.24 V	-1.17 V
B2	D5 (5x5 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 30 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 30 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	114	-2.69 V	-1.3 V
B6	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	194	-2.41 V	-1.38 V
C3	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	156	-2.81 V	-1.8 V
C4	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -10 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	513	-1.98 V	-1.1 V
C7	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -12 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -12 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 50 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 50 \text{mV}$	101	-2.7 V	-1.62 V
C8	D4 (15x15 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -12 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -12 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 50 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 50 \text{mV}$	162	-2.21 V	-1.32 V
C10	D3 (40x40 μm^2)	$I_{COMP}^{(SET)} = 100 \mu\text{A}$ $I_{COMP}^{(RESET)} = 100 \text{mA}$	$V_{RAMP}^{(SET)} = 0\text{V} \rightarrow -12 \text{V}$ $V_{RAMP}^{(RESET)} = 0\text{V} \rightarrow -12 \text{V}$	$V_{STEP}^{(SET)} = 25 \text{mV}$ $V_{STEP}^{(RESET)} = 25 \text{mV}$	324	-2.21 V	-1.18 V

Tabla 5.4 – Resumen de los resultados.

Como vemos, los dispositivos tipo D3, D4 y D5 son los que mejores resultados han dado. Aunque de los dispositivos D1 y D2 (de $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ y $60 \times 60 \mu\text{m}^2$ respectivamente) no tenemos muchos datos, ya que se han realizado pocas medidas con ellos debido a que son de poco interés por su gran tamaño y su poca aplicación práctica.

Vemos que los valores medios de V_{SET} están comprendidos entre -2 V y -3.5V aproximadamente y los valores medios de V_{RESET} entre -1.1 V y -1.8 V. Los valores obtenidos son similares a los obtenidos con los 2818 ciclos suministrados por el IMB-CNM, donde obtenemos una V_{SET} promedio de -2.95 V y una V_{RESET} promedio de -1.67 V.

Estas tensiones de SET y RESET varían mucho de un dispositivo a otro porque la formación del CF es un proceso aleatorio, pudiéndose formar más de un CF. También, como

vimos en la Figura 3.7 del capítulo 3, esto depende de la velocidad de la tensión aplicada (la pendiente de la rampa de tensión). A mayor velocidad, mayor es la tensión de RESET.

También cabe destacar que en dispositivos tipo D6 y D7 (de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ y $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ respectivamente) no hemos obtenido resultados satisfactorios, ya que en las pruebas realizadas, a los pocos ciclos, pasa el dispositivo a un estado irreversible de resistencia muy alta, obteniéndose corrientes del orden de nanoamperios. Esto es debido a que se rompe el capacitor por los fuertes campos eléctricos. También ha ocurrido esto, en menor medida, en dispositivos tipo D4 y D5 (de $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ y $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ respectivamente). Esto puede ser debido a los altos tiempos de medida que tenemos con el Analizador de Parámetros HP 4145B, que hace que los dispositivos estén expuestos más tiempo del deseado.

En conclusión, hemos podido validar el funcionamiento completo del sistema de caracterización, puntualizando sus limitaciones *hardware*. También hemos podido medir y analizar experimentalmente el comportamiento de numerosos dispositivos RRAM, mejorando la técnica de medida en cada nueva iteración, por lo que el resultado general de la validación es satisfactorio.

CAPÍTULO

6

CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS.

Finalmente, la consecución de todas las fases descritas inicialmente y la unión de la parte *hardware* y *software* del proyecto, ha dado lugar a un sistema de caracterización de dispositivos RRAM completo, preciso y eficiente.

Hemos conseguido sacar partido a un conjunto de equipos electrónicos y de posicionamiento del laboratorio L4, a fin de establecer un entorno de trabajo propicio para investigación y caracterización de este tipo de dispositivos. Se ha colocado por tanto la primera piedra para continuar progresando en el análisis y la investigación de RRAMs. Ahora disfrutamos de la posibilidad de llevar a cabo nuestros propios tests de pruebas, pudiendo con ello dar lugar a futuras publicaciones y artículos de interés sobre esta materia.

El *software* implementado permite el control completo del proceso de medida de estos dispositivos, facilitando a cualquier usuario su curva de aprendizaje en lo que a manejo y utilización de la instrumentación involucrada se refiere. No es necesario por tanto que aprendamos a manejar el panel frontal del Analizador de Parámetros HP 4145B ni su programación, sino simplemente aprender a manejar la herramienta *software* final, al igual que habría que familiarizarse con el uso de la mesa de puntas y los microposicionadores.

La flexibilidad del *software* es otro punto a destacar, pudiendo compartir los resultados con otras instituciones que de forma paralela llevan sus propias investigaciones pero que colaboran estrechamente con la Universidad de Granada.

También destacar que la herramienta *software* desarrollada podría ser reutilizada con otro analizador de parámetros distinto al modelo HP4145B. Sólo habría que adaptar la librería de comunicación con el instrumento y algún pequeño detalle más. Sería una línea futura interesante, ya que si se trabaja con un analizador de parámetros que disponga de unos tiempos de medida menores, se podrían obtener resultados más precisos.

Quisiera expresar mi entera satisfacción por el trabajo realizado y el resultado conseguido. El aprendizaje llevado a cabo ha sido muy transversal, permitiéndome trabajar en diferentes disciplinas dentro de un enfoque tanto *hardware* como *software*. Este proyecto ha supuesto para mí un aumento de la capacidad de ingenio y desarrollo.

Este proyecto de investigación abre además otros frentes de mejora. La caracterización de los dispositivos RRAM contempla un amplio abanico de factores influyentes en su comportamiento, entre los que se encuentran la temperatura y el campo magnético. Ambos factores se presentan a día de hoy como las principales líneas futuras de este sistema.

Control de la temperatura.

Para la caracterización de dispositivos RRAM en condiciones de temperatura variable, se utilizará el sistema criogénico y de control de temperatura diseñado en el laboratorio L4 [10].

Dicho sistema dispone de una plataforma de calentamiento y un criostato con el que descender la temperatura de trabajo del dispositivo, , Figura 6.1. Los equipos son del fabricante *LEYBOLD-HERAEUS*, concretamente el modelo *Variotemp HR1*.



Figura 6.1 – *Plataforma calentamiento (a) y Criostato (b).*

La plataforma de calentamiento consiste en una plancha de aluminio similar a un *wafer stage*, con un engraving en espiral donde se coloca un *thermocoax* o hilo resistivo de alta disipación térmica que incrementa la temperatura de forma homogénea sobre la plancha. Se emplea una pt100 de platino acoplada a la plancha, cuya resistencia indicará el valor de temperatura aproximado.

El criostato por su parte dispone de una conexión a la toma de agua y se empleará para estudiar el comportamiento del dispositivo a temperaturas inferiores a la ambiente.

En el presente proyecto se ha diseñado la placa PCB a medida para conectar dispositivos RRAM encapsulados dentro del criostato, Figura 6.2

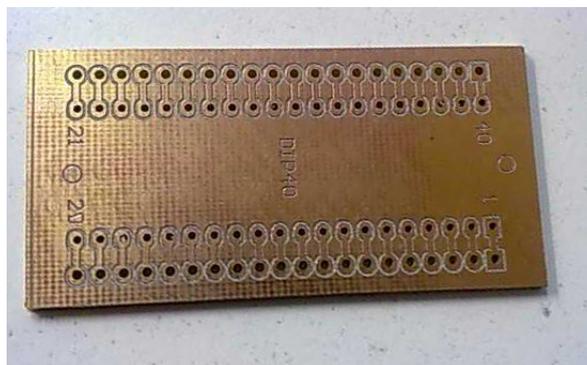


Figura 6.2 – PCB para medir dentro del criostato.

La línea de trabajo futura consistirá en la integración de dicho sistema de control de la temperatura con el sistema de caracterización de dispositivos RRAM para poder llevar a cabo de forma cómoda y eficiente el estudio del comportamiento de los dispositivos a distintas temperaturas.

Estudio de la influencia de campos magnéticos.

De forma adicional, se llevará a cabo un estudio de de la influencia de campos magnéticos en el comportamiento de dispositivos RRAM. Se contemplará la fabricación y utilización de bobinas de Helmholtz para inducir campo magnético a los dispositivos durante su caracterización.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Karl-Suss Microtech. *Probe Head PH-150 Specification Sheet*.
- [2] Karl-Suss Microtech. *Probe Head PH-100 Specification Sheet*.
- [3] MathWorks. *Instrument Control ToolBox*.
- [4] Wikipedia. *The Free Encyclopedia*.
- [5] Karl-Suss Microtech. *PSM6 Probe Station User Reference* (1988).
- [6] Hewlett-Packard. *HP 4145 Semiconductor Parameter Analyzer Operation Manual 1*, 1 (1989), 256.
- [7] Agilent Technologies. *IEEE 488.2 GPIB General Purpose Interface Bus*, Agilent (2007).
- [8] Media Cybernetics. *Image Pro Plus Reference Guide* (2009), 1180.
- [9] BOCQUET, M., DELERUYELLE, D., MULLER, C., AND PORTAL, J. *Self-consistent physical modeling of set/reset operations in unipolar resistive-switching memories*. Appl. Phys. Lett. 98, 263507, 2011.
- [10] CÓRDOBA, J. M. *Control de temperatura y caracterización de un sistema criogénico*. Universidad de Granada, 2015.
- [11] GAO, B., CHEN, B., CHEN, Y., LIU, L., LIU, X., HAN, R., AND KANG, J. Pulse voltage dependent resistive switching behaviors of hfo₂-based rram. *IEEE*, 13 (December 2010).

- [12] HARRIS, A. HF Radio Astronomy Lab Apparatus. *University of Maryland*.
- [13] HUANG, P., LIU, X. Y., CHEN, B., LI, H. T., WANG, Y. J., DENG, Y. X., WEI, K. L., ZENG, L., DU, B. G. G., ZHANG, X., AND KANG, J. F. A physics-based compact model of metal-oxide-based rram dc and ac operations. *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES* 60, 12 (December 2013).
- [14] HUTCHBY, J., AND GARNER, M. Assessment of the potential and maturity of selected emerging research memory technologies. In *Workshop and ERD/ERM. Working Group Meeting* (April 2010).
- [15] LÓPEZ, I. R. *Sistema de caracterización de dispositivos magnetorresistivos*. Universidad de Granada, 2013.
- [16] RÍOS, C. G. *Fabricación y medida de sensores magnetorresistivos*. Universidad de Granada, 2014.
- [17] RUSSO, U., CAGLI, C., AND LACAITA, A.-L. Self-accelerated thermal dissolution model for reset programming in unipolar resistive-switching memory (rram) devices. *Transactions on Electronic Devices* 56 (February 2009).
- [18] SÁNCHEZ, M. A. V. *Estudio, modelado y simulación de memorias RRAM unipolares*. Universidad de Granada, 2012.
- [19] TETZLAFF, R. *Memristors and Memristive Systems*. Springer Science, 2014.
- [20] WADSWORTH, A. The Parametric Measurement Handbook. *Agilent Technologies*, Third Edition (2010), 214.

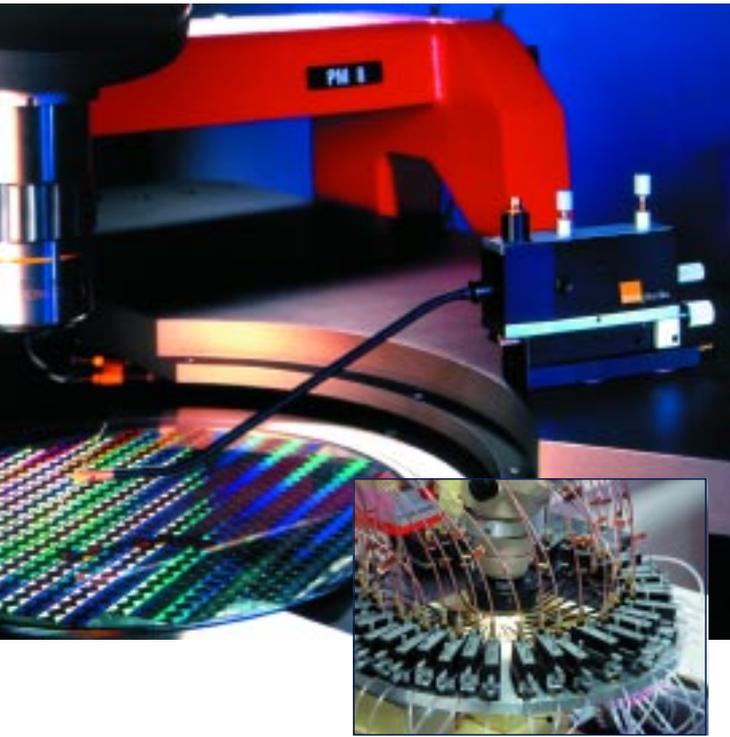
APÉNDICES

6.1 Especificaciones de los microposicionadores

A continuación incluimos las especificaciones sobre las dimensiones y precisión de los microposicionadores utilizados en el sistema de caracterización:

- PH100 Head probe (ref).
- PH150 Head probe (ref).

MANUAL PROBEHEAD PH100



SUSS PH100 Miniature ProbeHead

The SUSS line of manual ProbeHeads offers the advantages of proven high quality, superior mechanical and ergonomic design, and complete product line compatibility.

Features and Benefits

- Low cost probing
- Extremely small footprint: up to 46 independent ProbeHeads can be placed on the platen
- Probe-tip pressure adjustment
- Single arm with gold-plated clamping
- Suitable for probing pads down to 100 x 100 μm

The SUSS PH 100 is the most cost-effective ProbeHead that SUSS offers. It has the smallest footprint of the product line enabling the configuration as a flexible probecard. Over 20 years of proven reliability with users throughout the world are testimony to its successful concept.

The PH100 incorporates a unique stage system with a linear X axis travel of 7 mm and a pivoting Y axis of 8 mm.

The Z axis has a pivoting motion of 25 mm, and features a tip-pressure adjustment of 5 to 20 grams.

This stage system is very robust, and has a resolution down to 5 microns which makes it ideal for I/O pad probing.

The PH 100 is compatible with all SUSS probes and accessoires.

Lithography

Bonding

Wet Processing

Testing

www.suss.com

SUSS MicroTec

Technical Data: SUSS PH100 Manual Miniature ProbeHead

Travel Range

Travel Range X 7 mm

Travel Range Y 8 mm

Travel Range Z 25 mm

Resolution

Feature Resolution 5 μ m

Screw Resolution X 350 μ m/rev (70 tpi)

Screw Resolution Y 500 μ m/rev (50 tpi)

Screw Resolution Z 70 μ m/rev (350 tpi)

Bases

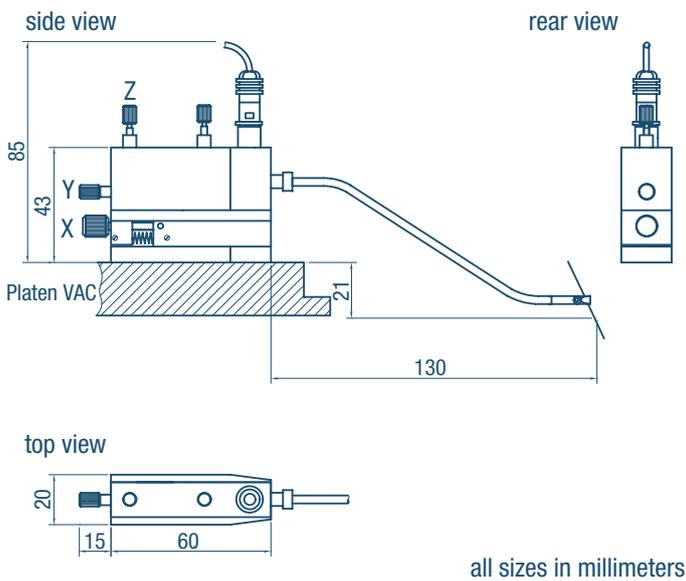
Choose between Vacuum

Magnetic

Clamping

Footprint

Footprint Dimension 60 x 20 mm



ASIA

SUSS MicroTec KK (Japan)

GITC 1-18-2, Hakusan, Midori-ku

Yokohama, Kanagawa, Japan 226-0006

Phone (+81)-45-9 31-56 00 · Fax (+81)-45-931-56 01

SUSS MicroTec (Shanghai) Co., Ltd.

580 Nanjing W. Rd

Nanzheng Building Room 606 · 200041 Shanghai PRC

Phone (+86) 21-52 34 04 32 · Fax (+86) 21-52 34 04 30

SUSS MicroTec (Taiwan) Co., Ltd.

8F-11 · No. 81 · Shui-Lee Road · Hsin-Chu · 300 · Taiwan

Phone (+886)-(3)-5 16 90 98 · Fax (+886)-(3)-5 16 92 62

SUSS MicroTec Co., Ltd. (South and Northeast Asia)

3388/92-93 · 25th Floor · Sirinrat Building

Rama IV Road · Klongtoey · Bangkok 10110 · Thailand

Phone (+66)-(0)-23 50 60 38 · Fax (+66)-(0)-26 33 57 28

EUROPE

SUSS MicroTec S.A.

Avenue des Colombières · F-74490 Saint Jeoire · France

Phone (+33)-(0) 4 50 35 83 92 · Fax (+33)-(0) 4 50 35 88 01

SUSS MicroTec Test Systems GmbH

Süss-Strasse 1 · D-01561 Sacka/Dresden · Germany

Phone (+49)-(0) 35240-73-0 · Fax (+49)-(0) 35240-73-700

NORTH AMERICA

SUSS MicroTec Inc.

228 Suss Drive · Waterbury Center, VT 05677 · USA

Phone (+1) (802) 244-5181 · Fax (+1) (802) 244-7853

SUSS MicroTec Inc.

Western Regional Sales Office

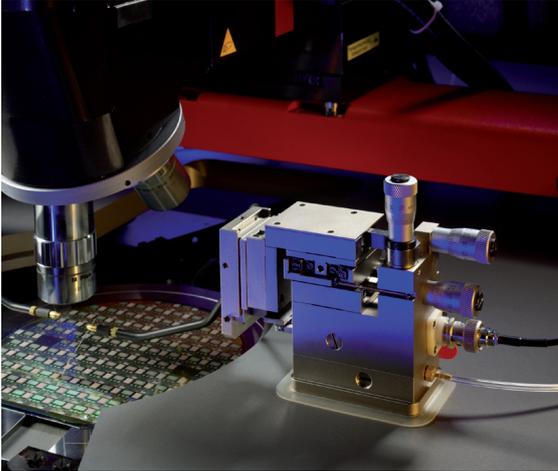
8240 So. Kyrene Road Suite 101

Tempe, AZ 85284-2117 · USA

Phone (+1) (480) 557-9370 · Fax (+1) (480) 557-9371

Cascade Microtech, Inc.

SPECIFICATION SHEET



Manual probe head with
superior mechanical design

PH150

Manual ProbeHead™

Cascade Microtech's manual ProbeHeads offers the advantages of proven high quality, superior mechanical and ergonomic design, and complete product line compatibility. The PH150 has proved to be the most accurate and robust positioner in the market. By using the finest precision components and expert assembly techniques, PH150 achieves true submicron positioning with zero backlash.

The PH150 incorporates an independent and uninfluenced X, Y and Z stage system which is free of mechanical crosstalk deviation. Each stage is made of aluminum and uses precision cross roller bearings assembled under exact torque measurements.

In addition to superior mechanical design, Cascade Microtech always adheres to detail regarding ergonomics and flexibility. The PH150 has a travel range of 10 mm on both the X and the Y axis and 8 mm in Z.

The faceplate of the PH150 provides additional coarse Z movement of ± 7.5 mm for maximizing the flexibility of the ProbeHead. Additionally, all probe arms can be fixed in different places on the faceplate to broaden the positioning scope. This highly precise positioner is designed with interchangeable arms such as triax, Coax, and Kelvin, as well as arms for backside probing. This variety gives the operator highest application flexibility, covering DC and HF as well as high-voltage and low-leakage testing with the one ProbeHead body.

Cascade Microtech's gold-plated collet clamping design provides maximum flexibility and freedom to adjust the needles to three predefined angles while guaranteeing that the tip is held firmly in place.

The user has the choice of a Z axis with a left- or right-handed thread. The PH150 vacuum base allows PH150 to be rigidly mounted on the platen, as the entire footprint is encompassed by a rectangular rubber lip. Actuation is controlled by a convenient, body-mounted, "easy touch" lever to avoid gross probe needle deviation in Z direction. Magnetic or clamping bases are also available.

FEATURES AND BENEFITS

Robust, backlash-free, submicron probing

Superior mechanical and ergonomic design

True, independent X, Y and Z linear travel

Adjustable faceplate for additional coarse Z movement

Variable positioning of arms on the faceplate

Precision cross roller slides and bearings

High-resolution micrometers

FEATURES AND BENEFITS CONTINUED

- High-resolution micrometers
- Strong vacuum base with "easy touch" lever for deviation-free release
- Single and double arms with gold-plated collect clampings
- Available in both 50 and 100 tpi screw resolution

SPECIFICATIONS

Travel Range

X	10 mm
Y	10 mm
Z coarse adjustment	± 7.5 mm

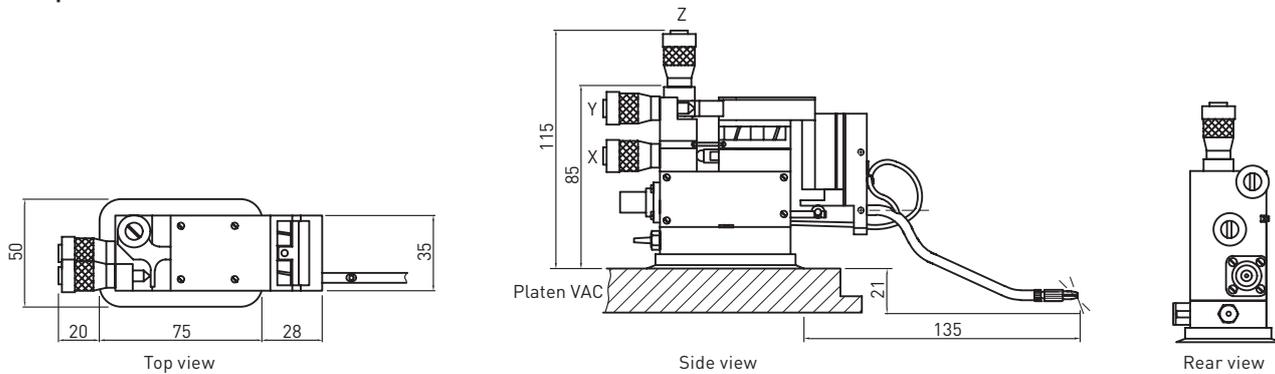
Resolution

Feature resolution	0.5 µm
Screw resolution (X/Y/Z)	250 µm/rev (100 tpi) or 500 µm/rev (50 tpi)

Bases	Vacuum, magnetic, or clamping
--------------	-------------------------------

PHYSICAL DIMENSIONS

Footprint 75 mm x 50 mm



AVAILABLE OPTION

High-Voltage Probe Arm (B50-119254-02)*

- Ideal for high-voltage application (up to 6.5 kV DC)
- Coaxial cable (2 m) with SHV male connector
- Compatible with ProbeHeads PH110/120/150/400

*For your safety, the high-voltage probe arms must be used with Cascade Microtech's high-power probing system.

Specifications

Maximum operation voltage	6.5 kV DC
Maximum leakage* at 6.5 kV DC	< 10 nA
Safety test voltage	11.5 kV
Temperature range**	25 °C - 300 °C
Humidity*	< 40 % is sufficient

*In a testing environment specified by Cascade Microtech, Inc.

**With Cascade Microtech's thermal chuck



Copyright 2010 Cascade Microtech, Inc.
All rights reserved. Cascade Microtech is a registered trademark and ProbeHead is a trademark of Cascade Microtech, Inc. All other trademarks are the property of their own respective owners.

Data subject to change without notice

PH150-SS-0610

Cascade Microtech, Inc.
toll free: +1-800-550-3279
phone: +1-503-601-1000
email: cmi_sales@cmicro.com

Cascade Microtech GmbH
phone: +49-811-60005-0
email: cmg_sales@cmicro.com

Cascade Microtech Japan
phone: +81-3-5615-5150
email: cmj_sales@cmicro.com

Cascade Microtech Shanghai
phone: +86-21-3330-3188
email: cmc_sales@cmicro.com

Cascade Microtech Singapore
phone: +65-6873-7482
email: cms_sales@cmicro.com

Cascade Microtech Taiwan
phone: +886-3-5722810
email: cmt_sales@cmicro.com

www.cascademicrotech.com



6.2 Códigos SCPI de instrucciones para el *Analizador de Parámetros HP4145B* controlado por bus GPIB

A continuación incluimos los códigos SCPI de instrucciones en texto ASCII para el *Analizador de Parámetros HP4145B*, con el que nos hemos comunicado remotamente vía bus GPIB:

- HP 4145B Parameter Analyzer (ref).

3-124. Remote Program Codes and Parameter Setting

3-125. Figure 3-52 shows the remote available program codes and parameter settings. Program codes are divided into three categories: (1) System Mode program codes, (2) User Mode program codes, and (3) program codes common to both modes. User functions, OUTPUT SEQUENCE, PURGE and DISC COPY can not be programmed.

Programming notes:

1. Numeric values can be entered in fixed decimal format or floating decimal format. (max. 12 char and max. 2 digits exponent.)
Example: Fixed decimal: 25.32
Floating decimal: 2.532E+01
2. Voltage (V), current (A), and time (s) units are not required when entering numeric values.
3. Terminator (; or CR or LF) is required at the end of each parameter setting on a program line. In the examples given below, (TERM) represents the terminator.
4. Channel names must be enclosed in apostrophes (' ').

SYSTEM MODE PROGRAM CODES

Following program codes are used when the 4145B is set to System Mode.

Direct Paging (to change page):

DE: CHANNEL DEFINITION Page
SS: SOURCE SETUP Page
SM: MEAS & DISP MODE SETUP Page
MD: Display Page (page selected for DISPLAY MODE)
US: User Mode

Notes

1. When the 4145B receives a Direct Paging command, it checks the setup on the displayed page before proceeding to the specified page. If an illegal setup is detected, an error message will be displayed, the SRQ bit will be turned on, and the page will not be changed.
2. Display returns to the MENU page when the 4145B receives a Device Clear command.

CHANNEL DEFINITION Page (program code "DE")

Setup for SMUs 1 through 4

$$\text{CH } \underset{(1)}{N^*}, \underset{(2)}{\text{'XXXXXX'}}, \underset{(3)}{\text{'XXXXXX'}}, \underset{(4)}{N}, \underset{(5)}{N(\text{TERM})}$$

- (1) SMU channel number (1 - 4)
- (2) V NAME (up to 6 characters)
- (3) I NAME (up to 6 characters)
- (4) SOURCE MODE (1 - 3)
 - 1: V
 - 2: I
 - 3: COM**
- (5) SOURCE FUNCTION (1 - 4)
 - 1: VAR1
 - 2: VAR2
 - 3: CONST
 - 4: VAR1'

* If nothing is specified after the channel number, the channel is turned off (NOT USE).

** When SOURCE MODE is set to 3 (COM), SOURCE FUNCTION must be set to 3 (CONST).

Setup for Vs1 and Vs2

$$\text{VS } \underset{(1)}{N^*}, \underset{(2)}{\text{'XXXXXX'}}, \underset{(3)}{N(\text{TERM})}$$

- (1) Vs channel number (1 or 2)
- (2) V NAME (up to 6 characters)
- (3) SOURCE FUNCTION (1 - 4)
 - 1: VAR1
 - 2: VAR2
 - 3: CONST
 - 4: VAR1'

* If nothing is specified after the channel number, the channel is turned off (NOT USE).

Setup for Vm1 and Vm2

$$\text{VM } \underset{(1)}{N^*}, \underset{(2)}{\text{'XXXXXX'}(\text{TERM})}$$

- (1) Vm channel number (1 or 2)
- (2) V NAME (up to 6 characters)

* If nothing is specified after the channel number, the channel is turned off (NOT USE).

Following program codes are valid on any page.

AUTO SEQ codes

AS1: START
AS2: CONTINUE
AS3: STOP

SAVE Function

SV 'X (1) (2) XXXX (3) (4) XXXXXX' (TERM) (5)

- (1) File type
 - P: Program file
 - D: Program/Data file
 - S: ASP file
- (2) Space
- (3) File name (up to 6 characters)
- (4) Space
- (5) Comment (up to 8 characters)

* (4) and (5) are optional.

GET Function

GT 'X (1) (2) XXXX' (TERM) (3)

- (1) File type
- (2) Space
- (3) File name

Assignment of Data Output Channel

DO 'XXXXX' (1)

- (1) Monitor channel NAME (must be one of the monitor channel names specified on the MEAS & DISP MODE SETUP page).

PRINT Function

PR: PRINT function ON*
PF: PRINT function OFF

* After PF is sent, send the following statement to set the ATN line to Inactive.

"SEND 7;UNT UNL TALK 17 LISTEN 1 DATA"

Address of the 4145B; 17
Address of the printer; 1

Graphics Language (GL1) Mode (only on the GRAPHICS PLOT Page)

GL1: Graphics Display mode ON
GL0: Graphics Display mode OFF

USER MODE PROGRAM CODES

Following program codes are used when the 4145B is set to User Mode.

User Mode

US: User mode ON*

* To release the 4145B from this mode, send a page command ("DE", "SS", "SM", or "MD") or a device clear command.

Output command for SMUs

$$\frac{XX}{(1)} \frac{N^*}{(2)}, \frac{N}{(3)}, \frac{\pm N.NNNN}{(4)}, \frac{N.NNNN(TERM)}{(5)}$$

(1) SOURCE MODE (DV or DI)

DV: Voltage Source

DI: Current Source

(2) SMU channel number (1 - 4)

(3) Output Range

For voltage source (0 - 3)

0: AUTO

1: 20V

2: 40V

3: 100V

For current source (0 - 9)

0: AUTO

1: 1nA

2: 10nA

3: 100nA

4: 1μA

5: 10μA

6: 100μA

7: 1mA

8: 10mA

9: 100mA

(4) Output value

(5) COMPLIANCE value

* If nothing is specified after the channel number, the channel is turned off (NOT USE).

Output command for Vs

$$\text{DS } \frac{N}{(1)}, \frac{\pm N.NNNN(\text{TERM})}{(2)}$$

- (1) Vs channel number (1 or 2)
- (2) Output value

Triggering (Measurement)

$$\frac{XX}{(1)} \frac{N}{(2)}$$

- (1) Measurement mode of the channel to be triggered
 - TV: Voltage Monitor
 - TI: Current Monitor
- (2) Channel number
 - 1: SMU1
 - 2: SMU2
 - 3: SMU3
 - 4: SMU4
 - 5: Vm1
 - 6: Vm2

Graphics Language (GL2) Mode

GL2: Graphic Display mode ON
GL0: Graphic Display mode OFF

Note

In User Mode, measurement cannot be performed with the fixture lid open because of the protective function. To perform the measurement without closing the fixture lid, use the Shorting Connector as shown in Figure 3-37.

COMMON PROGRAM CODES

Following program codes are available in the System Mode or in the User Mode.

INTEGRATION TIME

IT1: SHORT
IT2: MEDIUM
IT3: LONG

SELF TEST: SFData Ready Service Request

If "DR1" is sent (Data Ready Service Request ON), bit 1 (Data Ready) and bit 7 (RQS) of the 4145B's STATUS BYTE are set to 1 when measurement data is valid.

DR0: OFF
DR1: ON

HP-IB Data Buffer Clear

To clear the HP-IB data output buffer and bit 1 (Data Ready) of the Status Byte. Buffer Clear must be performed before data output from the 4145B.

BC

Auto Calibration

CA0: OFF
CA1: ON*

* Auto calibration in the User Mode is performed only once when "CA1" is sent. Also, if the mode is changed, Auto Calibration is set to OFF.

PLOT function

PL $\frac{NNN}{(1)}$, $\frac{NNN}{(2)}$, $\frac{NNNN}{(3)}$, $\frac{NNNN}{(4)}$ (TERM)

- (1) Xmin
- (2) Ymin
- (3) Xmax
- (4) Ymax

PF: PLOT function OFF (Refer to paragraph 3-140 for instruction covering HP-IB controlled plot operations.)

Note

After PF is sent, send the following statement to set the ATN line to Inactive.

"SEND 7; UNT UNL TALK 17 LISTEN 5 DATA"

Address of the 4145B; 17
Address of the plotter; 5

ID: Identification output (Refer to paragraph 3-134.)