

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Sistema computarizado basado en analizador de dispositivos
semiconductores Agilent B1500A para caracterización eléctrica de
películas dieléctricas delgadas”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ingeniería

PRESENTA:

Abraham Arias León

DIRECTOR

Nicola Radnev Nedev

CO-DIRECTOR

Mario Alberto Curiel Alvarez

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a Dios por permitirme lograr una de mis metas y mas grandes sueños de pequeño; el incursionar en el mundo de la ciencia e investigación. Más que un paso dado, es también un triunfo para mis padres, quienes han estado cerca de mi a lo largo de este camino. Es de ellos el mérito por todo lo que han aportado a mi vida y una oportunidad para llenarles de orgullo y proporcionarles una sonrisa .

A todas esas personas tan especiales en mi vida que han contribuido en el forjamiento de este logro. Compañeros de clase, de equipo, de trabajo, de vida. Algunos jóvenes, algunos viejos, otros muy viejos. Que siempre brindaron palabras de aliento, que escucharon y sobre todo alentaban a continuar el camino que había emprendido.

A la UABC, especialmente al Instituto de Ingeniería, a todo su personal por la atención y hospitalidad brindada. Aún sin ser egresado de esta institución me arroparon de manera singular brindándome su apoyo, confianza y herramientas para continuar mi preparación profesional.

De manera muy especial a mis directores, quienes mas que dirigir se convirtieron prácticamente en guías de vida. Al Dr. Nicola, por su paciencia y dedicación impresa en cada cátedra impartida. A el que resolvió todas aquellas dudas, que por mas tontas que fueran, siempre tuvo el tiempo y forma para esclarecer ese mundo desconocido para mi persona. Al Dr. Mario, que aún sin contar con tiempo suficiente para él mismo, encontró tiempo para realizar revisiones, aportaciones y comentarios de mi trabajo. A el que siempre buscó la manera de que me diera cuenta que es posible mejorar día con día los trabajos que realizamos, buscador inalcanzable de la excelencia y perfección.

A mis instructores Dr. Fernando González, Dr. Michael Schorr, Dra. Lydia Álvarez, Dr. Rogelio Ramos; por su gran labor docente y principales motores en la búsqueda del conocimiento.

También agradecer al personal del Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Ensenada. Especialmente al Dr. Jesús Siqueiros, Dr. Jesús Heiras y Dr. Oscar Raymond, por el gran apoyo brindado durante mi estancia de investigación en dicho centro y sobre todo por permitirme utilizar equipo especializado en caracterización eléctrica.

A mi familia por brindar ese soporte tan necesario en momentos de desaliento y flaqueza. A mis padres por haber dedicado todos sus esfuerzos en la preparación de sus hijos. A Jorge, mi hermano, quien de una manera sui géneris encontró la forma de alentarme a salir adelante.

A CONACYT por proporcionar los medios y sustento necesario para la realización de este posgrado.

Y un agradecimiento especial a Marina Curiel por su labor en el diseño editorial de este trabajo, por estar siempre, brindar su apoyo, paciencia y aliento. Gracias por todo.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS	6
3.1.1 <i>Películas dieléctricas delgadas</i>	6
3.1.2 <i>Equipos para caracterización eléctrica</i>	10
3.1.3 <i>Software Agilent EasyEXPERT</i>	15
3.1.4 <i>Protocolo de comunicación GPIB (IEEE 488)</i>	16
3.2 VARIABLES PARAMÉTRICAS DE MEDICIÓN	24
3.2.1 <i>Voltaje</i>	25
3.2.2 <i>Corriente</i>	25
3.2.3 <i>Capacitancia</i>	26
3.2.4 <i>Conductancia</i>	27
3.2.5 <i>Frecuencia</i>	28
4. EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
4.1 CONEXIÓN DE EQUIPOS DE INSTRUMENTACIÓN	30
4.2 PROGRAMACIÓN DE RUTINAS EN EASYEXPERT	32
4.2.1 <i>Definición de prueba</i>	33
4.2.2 <i>Edición de interfaz gráfica</i>	34
4.2.3 <i>Desarrollo de prueba (Developing)</i>	35
4.2.4 <i>Despliegue de información gráfica</i>	37
4.3 MÉTODO DE CAPACITANCIA/CONDUCTANCIA - NOLTAJE	37
4.3.1 <i>Programación de prueba eléctrica C/G-V</i>	40
4.3.2 <i>Diagrama de flujo</i>	49
4.3.3 <i>Resultados experimentales</i>	52
4.4 MÉTODO CAPACITANCIA/CONDUCTANCIA-FRECUENCIA	54
4.4.1 <i>Programación de prueba eléctrica C/G-f</i>	56
4.4.2 <i>Diagrama de flujo</i>	62
4.4.3 <i>Resultados experimentales</i>	65
5. CONCLUSIONES	67
6. REFERENCIAS	69
7. TABLAS	72

TABLA A	72
TABLA B	72
TABLA C	73
TABLA D	73

1. Introducción

La microelectrónica es uno de los sectores industriales más estables, con un desarrollo impresionante en las últimas décadas y con mayor futuro. La constante necesidad de incrementar las capacidades de almacenamiento, velocidad, reducción tanto de consumo de potencia como de costo en equipos electrónicos; han dejado como única opción la miniaturización de los productos llevando los dispositivos a escalas nanométricas. A esta escala, no solamente comienzan a presentarse problemas en la manufactura y diseño de los dispositivos, también las propiedades de los materiales y el comportamiento físico de los dispositivos en estas dimensiones son desconocidos. Por lo que la comprensión de esta tecnología se vuelve imprescindible para el avance tecnológico.

El trabajo destinado a la innovación en tecnología representa para la industria e instituciones educativas dedicadas a la investigación, un egreso financiero considerable. Por lo que estudios que presentan resultados en menor cantidad de tiempo se traduce en reducción de costos y mayor avance en el conocimiento. El tiempo invertido, se vuelve una variable importante en el avance de la investigación. Una opción en la reducción de tiempos y por ende costos, es la implementación de sistemas automatizados de control en el estudio de materiales utilizados en la industria microelectrónica.

El presente trabajo enfoca su estudio en el desarrollo de un sistema computarizado para caracterización eléctrica de películas dieléctricas delgadas. La caracterización eléctrica de películas delgadas requiere de una numerosa cantidad de pruebas y un extenso trabajo en el procesamiento de los datos para efectuar un análisis confiable de los resultados obtenidos en las mediciones. Un sistema computarizado que automatice las pruebas eléctricas, la recolección y procesamiento de los datos para un análisis efectuado en tiempo real; representa sin duda, una reducción de tiempo y costo en la investigación.

El trabajo que se realiza en este proyecto es parte fundamental para el conocimiento y entendimiento de los procesos físicos de las películas

dieléctricas delgadas. El proyecto se lleva acabo en el Laboratorio de Semiconductores Microelectrónica y Nanotecnología del Instituto de Ingeniería de la UABC. Se espera conocer a fondo los procesos antes mencionados para obtener la información necesaria para desarrollar dispositivos electrónicos basados en la tecnología de semiconductores, específicamente en las películas dieléctricas delgadas.

2. Objetivos

Las ventajas que los sistemas automatizados proporcionan en tareas como adquisición, control y procesamiento de datos; son el principal motivo de este proyecto. Debido a estos se deriva el siguiente objetivo general y primario:

Desarrollar un sistema computarizado para caracterización eléctrica completa de estructuras tipo Metal-Aislante-Semiconductor (MIS, por sus siglas en inglés) utilizando los siguientes equipos de alta precisión:

- Analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A; y
- Medidor de impedancias LCR Agilent E4980A.

El sistema antes mencionado se encuentra abierto a la implementación de nuevas técnicas de caracterización eléctrica y será capaz de resolver los siguientes problemas:

- Control total y óptimo del medidor de impedancias LCR Agilent E4980A a través del analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A. Los equipos de alta precisión podrán ser utilizados en conjunto, aprovechando la totalidad de sus recursos. En la actualidad existe implementado el control del dispositivo LCR E4980A a través de la aplicación EasyEXPERT de Agilent B1500A. La funcionalidad de este sistema presenta limitaciones en cuanto a la flexibilidad de los parámetros de prueba [Agilent, 2006], por ende también de la información obtenida. Por lo que se vuelve fundamental el trabajo en la optimización del control por parte del analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A para manejar adecuadamente los recursos del medidor de impedancias LCR Agilent E4980A.

- Limitación de las pruebas dentro de EasyEXPERT para la realización de mediciones específicas de ciertas estructuras. Este software presenta falta de flexibilidad en sus pruebas [Agilent, 2006] en cuanto a parámetros, además que ciertas pruebas requieren de implementación de nuevos recursos tales como SMUs (*Source Monitor Unit*) o CMUs (*Capacitance Monitor Unit*). Por lo que es necesaria la creación de programas de medición

eléctrica personalizados que vayan acorde a las caracterizaciones deseadas y los recursos con los que se cuenta.

- Expansión del sistema con otros equipos de Agilent. Una vez obtenido el control óptimo y total del medidor de impedancias LCR Agilent E4980A a través de EasyEXPERT del analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A, además del desarrollo de programas que efectúen de manera automática las mediciones eléctricas [Agilent, 2010], es posible proyectar la experiencia obtenida y los recursos manejados hacia otros equipos Agilent. Expandiendo de esta manera el sistema al aumentar la cantidad de recursos manejados mediante EasyEXPERT del SDA B1500A.

3. Marco teórico

Por su naturaleza, la ciencia y la ingeniería van evolucionando a través del tiempo a medida que se presentan nuevas contribuciones en cada uno de los campos. Intentar realizar trabajos de investigación en áreas desconocidas con certeza nos llevarán a un camino de incertidumbre donde habrá tiempo y esfuerzos desperdiciados. Por ello, es importante antes de comenzar con la tarea del desarrollo de la investigación conocer el estado actual de la rama en la que se pretende colaborar.

Podría imaginarse que conocer la totalidad de un tema específico es lo ideal, pero en la práctica esto es prácticamente imposible [Bright, 1990], tomando en cuenta el número de publicaciones que se presentan anualmente en cada una de las ramas de la ciencia e ingeniería.

Previo al comienzo del estudio en una rama de la ciencia e ingeniería es importante la creación del marco teórico o conceptual. Dicho marco proporciona las ideas y teorías, que fundamentan y ayudan a desarrollar los argumentos empleados durante el trabajo.

El marco teórico además de dar soporte a las ideas propuestas, cumple dos funciones elementales. La primera de ellas, es encontrar la información disponible sobre el objeto de estudio, de manera que se conozcan las propuestas teóricas, las herramientas y técnicas de medición para el estudio. Y en segunda instancia, el proporcionar un panorama general del campo de estudio [Bright, 1990].

Por ello, en el siguiente apartado se aborda de manera general los conceptos, equipos, herramientas y técnicas que proporcionaron el interés en el objeto de estudio del presente trabajo.

3.1 Conceptos básicos

Esta sección contiene una descripción general de los conceptos básicos que se emplean en el presente trabajo. Pasando por la definición de las películas dieléctricas delgadas, los equipos de instrumentación y los protocolos de comunicación. De esta manera se facilita la familiarización con los términos empleados, los materiales y las herramientas utilizadas en la caracterización eléctrica de películas dieléctricas delgadas.

3.1.1 Películas dieléctricas delgadas

Nanomateriales

La fabricación de películas delgadas es un proceso esencial en la realización de materiales nanométricos. Los nanomateriales son definidos de la siguiente manera: materiales o componentes encontrados en aleaciones, compuestos o composites teniendo una o mas dimensiones de tamaño nanométrico ($1\text{nm} = 10^{-7}\text{cm} = 10\text{\AA}$) [Wasa, 2004]. Los materiales pueden ser clasificados atendiendo a sus dimensiones. Los materiales n -dimensionales son aquellos que tienen n dimensiones mayores a 100 nanometros. Por lo que se clasifican de la siguiente manera [Menéndez, 2010]:

1. Cero-dimensionales (0-D). Por ejemplo, nanocristales, nanopartículas y puntos cuánticos.
2. Monodimensionales (1-D). Por ejemplo, nanofibras, nanohilos o nanotubos.
3. Bidimensionales (2-D). Por ejemplo, nanocapas o **películas delgadas**.

Se llegan a considerar también los materiales tridimensionales (3-D), los cuales propiamente no podrían ser considerados como nanomateriales salvo que su estructura interna sea nanoestructurada [Menéndez, 2010].

Películas delgadas

Una de las grandes controversias del estudio de las películas delgadas es la definición formal de película delgada; es decir, cuándo se considera como tal. Otra interrogativa presente es el estado de la materia de la película,

ya sea sólida, líquida o gaseosa. Para efectos del presente trabajo y estudio realizado, se considera solamente el estudio de películas sólidas. Ahora bien, adentrando en la definición de película delgada se retoma la definición propuesta por la *Gran Enciclopedia Rialp* [Brú, 1991] que define una película delgada de la siguiente manera: “Reciben el nombre de películas delgadas todas aquellas porciones de un material sólido, cuyo espesor no sobrepasa algunos millares de angstroms”. Cuatro años mas tarde, en 1995; Wagendristel define de la siguiente manera: “Una película delgada es un líquido o sólido en el cual una de sus dimensiones lineares es muy pequeña en comparación con las otras dos dimensiones” [Wagendristel, 1995]. Y usualmente clasificadas arbitrariamente en ése entonces como:

- Películas gruesas; aquéllas cuyo espesor sea mayor a un micrómetro ($D > 1 \mu\text{m}$).
- Películas delgadas; aquéllas cuyo espesor sea menor a un micrómetro ($D < 1 \mu\text{m}$).

De las dos definiciones anteriores es posible observar que la publicación de 1995 considera película delgada a una estructura que la publicación de 1991 rechazaría como película delgada. Por ello, es importante recalcar lo establecido por Goswami en el año 1996. Goswami menciona que las investigaciones realizadas en películas delgadas se encuentran confinadas en un amplio rango de espesores que van desde unos pocos Å hasta 500nm dependiendo las propiedades que se investiguen. Mientras que para aplicaciones tecnológicas donde la confiabilidad del funcionamiento es el criterio mas importante, el límite inferior del rango de espesor supera los 100nm y su grosor máximo puede alcanzar los 10 μm . Para cubrir el amplio rango de espesores de películas; tanto en investigación como en tecnología, se puede definir arbitrariamente una película delgada como una capa sólida con un espesor variando desde unos pocos Å hasta 10 μm [Goswami, 1996]. Dentro de las películas delgadas a su vez podemos clasificarlas en tres tipos:

1. Películas ultra delgadas (Å – 10nm).
2. Películas muy delgadas (10nm – 100nm).

3. Películas delgadas (100nm – más).

Dieléctricos

Los dieléctricos son aquellos materiales en los cuales no existen cargas libres que puedan transportarse a través de ellos para producir corrientes eléctricas. En dichos materiales, toda la carga se concentra en la formación de enlaces. Un campo eléctrico aplicado a estos materiales tiene el efecto de desplazar ligeramente las cargas lo que produce la formación de conjuntos de dipolos eléctricos [Hayt, 2006]. De manera común se confunde el término de materiales dieléctricos con materiales aislantes. Todos los materiales dieléctricos pueden ser aislantes, pero no todos los aislantes pueden ser dieléctricos [Gonzáles, 2003].

La característica común de todos los dieléctricos, tengan o no estructura cristalina; es su capacidad para almacenar energía. Este almacenamiento se presenta cuando cambian las posiciones de las cargas positivas y las cargas negativas ligadas en el interior en contra de las fuerzas moleculares o atómicas.

Normalmente los dipolos eléctricos están orientados en forma aleatoria en el interior del material y la acción del campo eléctrico externo sobre esas moléculas los alinea hasta cierto punto en la misma dirección.

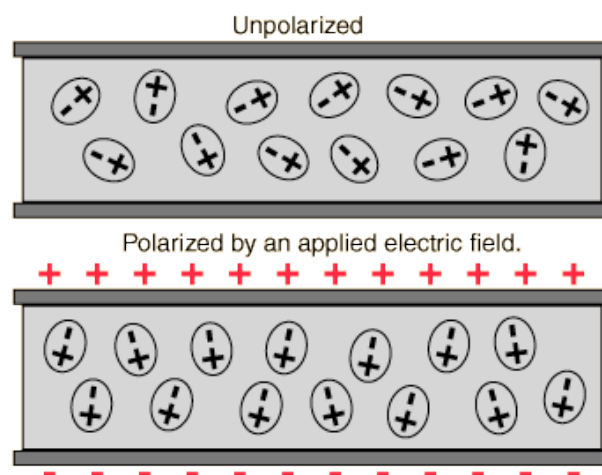


Fig. 1. Efecto de un campo eléctrico en los dipolos de un material dieléctrico.

Una de las principales aplicaciones de los materiales dieléctricos en la electrónica es la fabricación de condensadores. Los dieléctricos se utilizan para separar físicamente las placas del condensador y de esta manera incrementar su capacidad de disminuir el campo eléctrico; por lo tanto, la diferencia de potencial entre las mismas. También son utilizados en la optoelectrónica para la transmisión a grandes distancias de ondas electromagnéticas en la región óptica del espectro [Alonso, 1981].

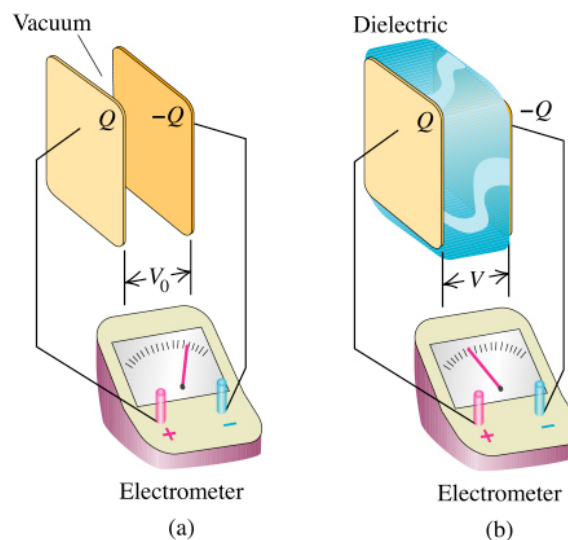


Fig. 2. Aplicación de un material dieléctrico en un condensador.

En el campo de la microelectrónica, el dieléctrico más empleado en la industria es el dióxido de silicio SiO_2 , como aislante o como compuerta en los dispositivos CMOS (por sus siglas en inglés, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [Castaño]. También otros dieléctricos muy importantes son el nitruro de silicio Si_3N_4 y en la actualidad materiales con alto coeficiente dieléctrico como el óxido de hafnio HfO_2 [Sarakinis, 2010], óxido de zirconio ZrO_2 [Dong, 2012] entre otros [Sánchez, 2009].

Una vez que se conoce lo que se considera película delgada y la definición de un material dieléctrico, es posible tener una idea clara de lo que es una película dieléctrica delgada, las cuales son el objeto de estudio del presente trabajo. Una película dieléctrica delgada es una capa sólida realizada de material dieléctrico cuyo espesor no exceda los 100 nm.

3.1.2 Equipos para caracterización eléctrica

La caracterización eléctrica consiste en extraer la información sobre el comportamiento eléctrico del material que se estudia. Los experimentos realizados sobre los materiales dependen de las características que se deseen obtener y los fenómenos que se estudien. Por ejemplo: mecanismos de conducción electrónica, propiedades dieléctricas, procesos de pérdida eléctrica, desplazamiento de carga, densidad de defectos, etc.. Es posible realizar una caracterización eléctrica completa de un material pero no siempre es necesario, ya que no todas las características ofrecen información relevante sobre el fenómeno que se estudia [Montero, 2008].

Para poder realizar una caracterización eléctrica óptima se utilizan equipos especializados y de alta precisión. En el presente apartado se describirá el funcionamiento de los equipos con los que se realiza la caracterización eléctrica de películas delgadas.

3.1.2.1 Analizador de dispositivos semiconductores Agilent

B1500A

El analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A (*Semiconductor Device Analyzer*, SDA por sus siglas en inglés) es utilizado para realizar mediciones paramétricas de dispositivos tanto en corriente alterna (AC) como en corriente directa (DC), así como una herramienta de análisis. La calidad y resolución de las mediciones depende de los instrumentos o tarjetas con las que se configure el equipo, así como el número de éstas. Por ejemplo, el SDA Agilent B1500A puede ser equipado con unidades fuente/medidor de alta potencia (*High Power Source/Monitor Unit*, HP SMU), mediana potencia (*Medium Power SMU*), o de alta resolución por citar algunas (*High Resolution SMU*) [Agilent, 2008].

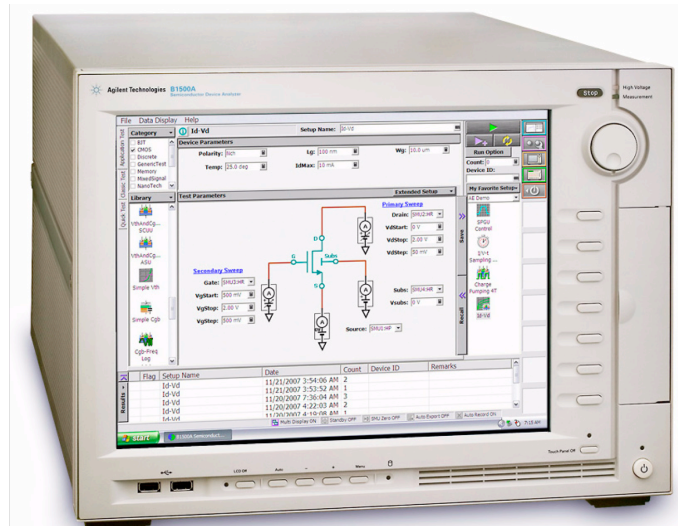


Fig. 3. Analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A [Agilent, 2008].

El analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A provee la capacidad de proporcionar señales de salida de Voltaje/Corriente DC, la capacidad de realizar mediciones de Voltaje/Corriente también en DC. Además cuenta con salida de señales AC y el poder de realizar mediciones de impedancia [Agilent, 2008].

La configuración del equipo Agilent B1500A cuenta con el siguiente elemento interno, el cual se utiliza en la realización de mediciones eléctricas:

Unidad de Fuente/Medidor (Source/Monitor Unit, SMU por sus siglas en inglés). Puede aplicar voltajes y corrientes de DC, así como también realizar mediciones de corriente y voltaje en DC [Agilent, 2008]. El SMU puede realizar las siguientes operaciones:

- Aplicación de voltaje y medición de corriente.
- Aplicación de corriente y medición de voltaje.
- Aplicación de voltaje y medición de voltaje.
- Aplicación de corriente y medición de corriente.

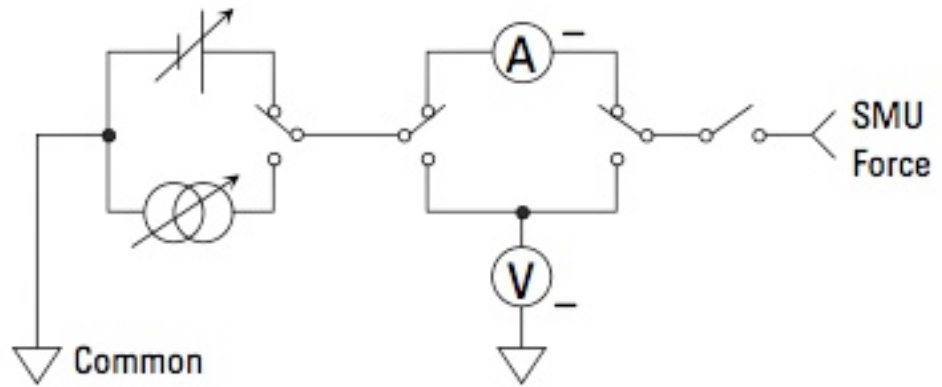


Fig. 4. Diagrama del circuito simplificado del SMU [Agilent, 2008]

El analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A cuenta con la unidad de **Fuente/Medidor de Mediana Potencia** (*Medium Power Source/Monitor Unit*, **MP SMU** por sus siglas en inglés), que cuenta con las siguientes características:

- Voltaje máximo: ± 100 V.
- Corriente máxima: ± 100 mA.
- Potencia de salida: 2 W.

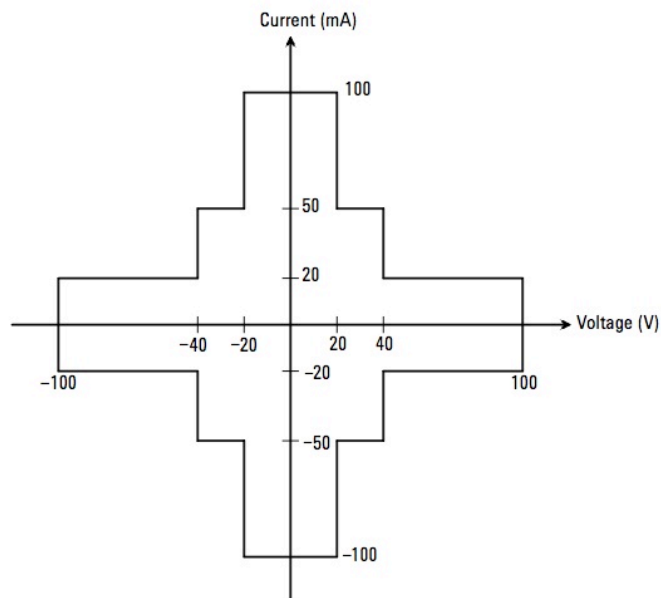


Fig. 5. Rango de trabajo del MP SMU limitado por la potencia de salida [Agilent, 2008].

Las características de la resolución en las mediciones y salidas de voltaje/corriente del MP SMU de acuerdo al rango de trabajo en el que se

encuentre pueden ser consultadas en los anexos A, B, C y D en la sección **7 Tablas** del presente documento.

3.1.2.2 Medidor de impedancia LCR Agilent E4980A

El medidor de impedancias LCR Agilent E4980A es un instrumento utilizado para evaluación de inductancia, capacitancia y resistencia; de componentes, materiales y dispositivos semiconductores en un amplio rango de frecuencia (20 Hz – 2 MHz) y niveles de señal de prueba (0.1 mVrms – 20 Vrms) en el caso que la señal de prueba sea voltaje; y (50 μ A – 200 mArms) cuando se trata de una señal de prueba de corriente. También es capaz de realizar mediciones con un voltaje de polarización de DC (DC Bias, en inglés) de hasta ± 40 Vrms [Agilent, 2007].



Fig. 6. Medidor de impedancia LCR Agilent E4980A [Agilent, 2007]

El E4980A ofrece mediciones de Capacitancia – Disipación (C-D) con una precisión básica de $\pm 0.05\%$ (C) y ± 0.0005 (D) a todas las frecuencias con una resolución de 7 dígitos en cualquier rango [Agilent, 2007].

Este equipo puede ser fácilmente combinado con una manejadora, un escáner o con un sistema de control para automatizar completamente la prueba, sorteo, control de calidad y procesamiento de información de los componentes analizados.

Cuenta con la capacidad de realizar barridos de frecuencia, de niveles de señal de prueba, o niveles de polarización (bias) para ser medidos

automáticamente. Además cuenta con interfaces estándar GPIB/LAN/USB que permiten la automatización de las pruebas eléctricas [Agilent, 2007].

Generalmente, cualquier inductancia, interferencia en las señales de prueba o factores residuales no deseados en los métodos de conexión tendrán un efecto significativo en las mediciones, especialmente a altas frecuencias. Para ello el Agilent E4980A emplea una medición con una configuración de 4 terminales que permite de manera sencilla, estable y precisa las mediciones al mismo tiempo que evita las influencias negativas inherentes de los factores antes mencionados [Agilent, 2007].

El conjunto de terminales consiste en cuatro conectores coaxiales:

- HCUR: Corriente alta (*High Current*)
- HPOT: Potencial alto (*High Potential*)
- LPOT: Potencial bajo (*Low Potential*)
- LCUR: Corriente baja (*Low Current*)

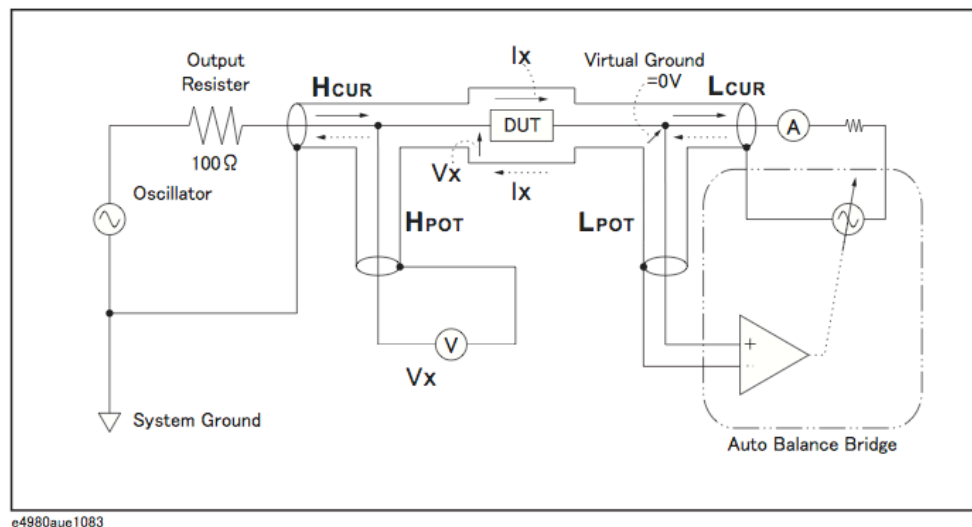


Fig. 7. Principio de la medición de 4 terminales [Agilent, 2007].

El método de medición de 4 terminales tiene buen desempeño para mediciones de baja y alta impedancia. Los escudos exteriores del conductor funcionan como retorno de la corriente aplicada en la señal de prueba. La misma corriente fluye a través de los conductores centrales que en los escudos exteriores sólo que en dirección opuesta. Otra ventaja importante de esta configuración es que no se genera ningún campo magnético alrededor

de los conductores ya que los campos magnéticos producidos por los conductores interiores y los escudos exteriores se cancelan entre sí. Debido a que las señales de prueba no generan ningún campo magnético por inducción, los conductores de prueba no contribuyen con errores adicionales a la medición [Agilent, 2007].

3.1.3 Software Agilent EasyEXPERT

El Software Agilent EasyEXPERT es una aplicación especialmente diseñada para Windows XP, programada para el control del analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A. El EasyEXPERT provee un entorno sencillo y efectivo para mediciones y análisis con una interfaz gráfica intuitiva para el usuario (*Graphical User Interface*, GUI por sus siglas en inglés) [Agilent, 2008]. Otras de las funciones que presenta el EasyEXPERT se enlistan a continuación:

- Mediciones sencillas, repetición de mediciones y conjuntar mediciones anteriormente realizadas.
- Control de matriz de interconexión.
- Manejo de mediciones y organización de datos mediante espacios de trabajo.
- Visualización de gráficas y análisis con marcadores, cursores y líneas; y auto análisis.
- Capacidad de importar y exportar datos, formatos de exportación de datos CSV/XML, y formato de exportación EMF/BMP/GIF/PNG para imágenes.
- Mantenimiento; auto prueba y auto calibración.

El EasyEXPERT contiene una librería de aplicaciones que comprende las mediciones típicas para dispositivos CMOS, transistores de película delgada (*Thin Film Transistors*, TFT por sus siglas en Ingles), transistores bipolares (*Bipolar Junction Transistors*, BJT por sus siglas en Ingles), memorias, dispositivos nanotecnológicos como transistores de efecto de campo basados en nanotubos de carbono (*Carbon Nanotube Field Effect Transistors*, CNT FET por sus siglas en Ingles), y otros más. La librería de aplicaciones incluye mas de doscientas pruebas definidas [Agilent, 2008].

Es posible realizar mediciones eligiendo de la librería de aplicaciones, la que se adecue mas al dispositivo bajo prueba, modificarla y ejecutarla. Las modificaciones se realizan de una manera muy simple, cambiando los valores de los parámetros, además se pueden salvar las configuraciones de prueba y ser llamadas en cualquier momento.

El EasyEXPERT cuenta con el modo de prueba de control directo, éste modo es utilizado para controlar los módulos de medición directamente utilizando los comandos de control GPIB para el B1500A y de esta manera realizar mediciones [Agilent, 2010].

3.1.4 Protocolo de comunicación GPIB (IEEE 488)

3.1.4.1 Historia del GPIB

El protocolo de comunicación GPIB fue desarrollado a finales de la década de 1960 por Hewlett-Packard, en donde fue llamado mediante el nombre de HP-IB. Fue creado para conectar y controlar instrumentos programables manufacturados por Hewlett-Packard. Tras la aparición de los controladores digitales y los equipos de prueba programables, la necesidad de un estándar se vio incrementada, así como interfaces de alta velocidad para comunicación entre instrumentos y controladores de diversos fabricantes. En el año de 1975, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) publicó el “*ANSI/IEEE 488-1975, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation*”, el cual contiene las especificaciones eléctricas, mecánicas y funcionales de un sistema de interconexión. El IEEE 488-1975 fue revisado en el año de 1978 para clarificación y adición. En la actualidad este protocolo es utilizado alrededor del mundo y es conocido por tres diferentes nombres [National Instruments, 2009]:

- General Purpose Interface Bus (GPIB).
- Hewlett-Packard Interface Bus (HP-IB).
- IEEE 488 Bus.

Debido a que el documento original IEEE 488 no contenía las directrices para una sintaxis ni las convenciones de formato, se continuó trabajando específicamente en incrementar la compatibilidad y diversidad de configuraciones entre sistemas de prueba. El resultado de este trabajo fue un estándar suplementario, el “*IEEE 488.2, Codes, Formats, Protocols, and Common Commands, for use with IEEE 488*”, publicado en el año de 1987. El estándar IEEE 488.2 no reemplaza al estándar IEEE 488.1, muchos dispositivos todavía se ajustan sólo al IEEE 488.1. El protocolo 488.2 se basa en el IEEE 488.1 mediante la definición de un conjunto mínimo de capacidades de la interfaz del dispositivo, un grupo común de códigos y formatos de datos, un protocolo de mensajes entre dispositivos, un conjunto genérico de comandos comúnmente utilizados y un nuevo modelo de reportes de estado [National Instruments, 2009].

En el año del 1990, la especificación IEEE 488.2 incluyó en su contenido el documento “*Standard Commands for Programmable Instrumentation (SCPI)*”. El SCPI define los comandos específicos que debe obedecer cada tipo de instrumento (los que generalmente incluyen los distintos fabricantes). Con la aparición de SCPI se garantizó la completa compatibilidad y capacidad de configuración del sistema entre estos instrumentos. De esta manera ya no fue necesario aprender un nuevo conjunto de códigos para cada instrumento en sistemas compatibles con SCPI, además se volvió sencillo sustituir instrumentos de un fabricante por instrumentos de otro fabricante [National Instruments, 2009].

Actualmente el protocolo se ha convertido muy popular tanto en el sector industrial como en la investigación, al grado que una gran diversidad de instrumentos son equipados con interfaces IEEE 488. De esta manera en la actualidad es posible conectar muchos instrumentos comunes y relativamente de bajo costo a través del puerto IEEE 488.

3.1.4.2 Especificaciones

El estándar IEEE 488 permite interconectar hasta 15 dispositivos en la misma línea de comunicación. La longitud total de los cables interconectados

no debe exceder los 20 metros, y la distancia máxima entre dos diferentes dispositivos no debe ser mayor a los 2 metros [James, 2000].

Cada equipo perteneciente a una línea de comunicación se le asigna una dirección única. La dirección consta de un número en el rango del 0 al 30. Esta dirección es conocida como “dirección primaria”. La finalidad de la dirección es poder identificar a cada uno de los equipos que conforman una línea de comunicación [James, 2000].

Cada dispositivo puede incorporar a su vez hasta 32 subunidades las cuales son capaces de operar independientemente una de la otra. Estas subunidades pueden ser asignadas individualmente con una dirección utilizando la “dirección secundaria” en el rango del 0 al 31. En algunos casos la dirección secundaria es utilizada para seleccionar funciones específicas o modos de procesamiento de información de un dispositivo [James, 2000].

En una línea de comunicación GPIB, 3 diferentes clases de dispositivos pueden existir por cada dirección primaria. Estas clases son conocidas como: receptores, transmisores y controladores.

Receptores (Listeners). Un receptor solamente puede recibir información o comandos de la línea de comunicación. Un ejemplo típico de un receptor es la impresora, la cual solamente puede recibir información. Puede haber hasta 14 receptores activos presentes en la misma línea de comunicación al mismo tiempo [James, 2000].

Transmisores (Talkers). Los transmisores son capaces de transmitir información a otros equipos de la línea de transmisión pero son incapaces de recibir datos o comandos. Solamente se permite un transmisor activo al mismo tiempo en la línea de comunicación [James, 2000]. Un ejemplo típico de un transmisor es un sensor, el cual solamente puede proporcionar información.

Controladores (Controllers). El controlador es el encargado de supervisar la transferencia de información a lo largo de la línea de comunicación. Este papel es usualmente llevado a cabo por una computadora equipada con puerto GPIB. El controlador puede asignar a los

equipos de la línea de transmisión actuar como transmisor o receptor, algunos equipos tienen la habilidad de funcionar como ambos. Puede haber mas de un controlador por línea de transmisión, pero solo un controlador puede estar activo en un tiempo dado [James, 2000].

3.1.4.3 Rendimiento

El estándar IEEE 488 especifica que la tasa máxima de transferencia en cualquier línea del bus no debe exceder 1 Mbit/s. En la práctica, el rendimiento depende del adaptador utilizado para la comunicación, el bus huésped del ordenador (ISA, EISA, PCI, paralelo, RS-23, etc.) y el *driver*. En la mayoría de los casos es posible obtener una tasa de transferencia no mayor a 250 KB/s utilizando un sistema estándar IEEE 488 [James, 2000].

La comunicación de GPIB se lleva a cabo mediante el protocolo “*handshaking*”, lo que garantiza que la velocidad de todo el sistema está determinada por el receptor activo mas lento presente en la línea de transmisión. De esta manera se prevé que no exista transferencia de datos tan rápida que el receptor no la pueda interpretar [James, 2000].

3.1.4.4 Estructura del bus IEEE 488

El bus de datos está formado por 16 líneas de señal junto a otro número de conexiones de tierra y blindaje. El cable utilizado para el protocolo IEEE 488 tiene usualmente como terminación un conector *Amphenol* de 24 pins.

8 líneas de información bidireccionales (DIO1-DIO8) son utilizadas para la transmisión de datos y mensajes de comando. Los mensajes son transferidos de acuerdo al protocolo de *handshaking* llevado a cabo entre 3 líneas del bus: DAV, NRFD y NDAC. Por otra parte, 5 líneas para el manejo de la interfaz (ATN, IFC, SRQ, REN y EOI) son utilizadas para llevar el control y la información del estado de la comunicación en el bus. Las líneas son consideradas activas cuando están en un nivel lógico bajo (<0.4 V). Todas las líneas de señal utilizan niveles lógicos TTL, aunque las señales DAV, NRFD y NDAC emplean salidas de colector abierto, de esta manera

cuando estas líneas son desactivadas tienden al nivel lógico alto de aproximadamente 3.3 V [James, 2000].

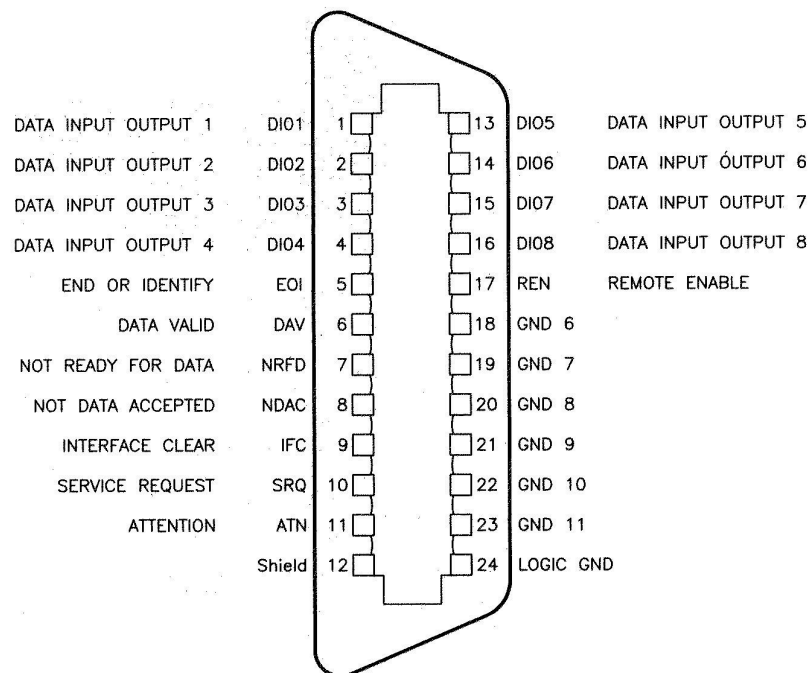


Fig. 8. Conector Amphenol de 24 pins para comunicación GPIB-IEEE 488

3.1.4.5 Comandos SCPI

Los comandos SCPI son el conjunto de comandos estándar para instrumentos programables (*Standard Commands for Programmable Instruments*, SCPI por sus siglas en inglés). Se introdujeron como un nuevo lenguaje de comandos para controlar instrumentos, no solamente mediante IEEE 488. De esta manera se abordó una amplia gama de funciones de los instrumentos en una forma estandarizada. Los comandos SCPI ofrecen coherencia en la programación remota entre instrumentos de la misma clase y entre instrumentos con la misma capacidad funcional. Por ejemplo, para una misma medición de un parámetro en particular, los comandos SCPI definen de manera específica el comando que ejecuta dicha función. Entonces, no importará de que fabricante provenga el instrumento, la medición se realizará de la misma manera. Incluso, es posible que sean de diferente fabricante y además diferentes instrumentos, mientras los dos

instrumentos tengan la capacidad de realizar la misma función, obedecerán al mismo comando [SCPI Consortium, 1999].

Sintaxis

Todos los instrumentos SCPI deberán incluir los comandos comunes declarados obligatorios en el estándar IEEE 488.2. Estos comandos son fácilmente identificables porque son precedidos por un asterisco “*”.

3.1.4.6 Comandos GPIB para Agilent E4980A

Los comandos GPIB para el medidor de impedancias LCR Agilent E4980A se enlistan en tablas de comando, dónde se pueden consultar las características de cada uno de los comandos en particular. Estas tablas están divididas en 3 secciones: *Palabra Clave*, *Forma de Parámetro* y *Notas* [Agilent, 2007].

Palabra Clave (Keyword). Es propiamente el nombre del comando. Los comandos GPIB son precedidos por el signo de dos puntos “:”, específicamente para el caso del Agilent E4980A. Otros instrumentos utilizan diferentes signos o simplemente la omisión de éstos.

Debido a que los comandos en el protocolo de comunicación GPIB están estructurados de manera jerárquica o también conocida como estructura de árbol, el nombre del comando puede constar de una o más palabras claves como se puede observar en la **figura 9**, dónde el comando consta de tres palabras clave. Los comandos afines, son agrupados en nodos o ramas, de modo que las funciones que sean similares entre sí se encuentren en mismo nivel jerárquico [Agilent, 2007].

Para poder modificar o ejecutar una función que se encuentre en el nivel jerárquico más bajo, es necesario escribir todo el listado de palabras clave de mayor jerarquía con respecto al nivel donde se encuentre el comando. Por ejemplo, en la **figura 9** se encuentra el comando para elegir el tipo de impedancia que se desea medir. No es posible elegir el tipo de impedancia utilizando solamente el comando “:TYPE”, únicamente colocando

las tres palabras clave del comando será posible acceder a dicha función [Agilent, 2007].

:FUNction:IMPedance[:TYPE]

Fig. 9. Ejemplo de sintaxis de comando GPIB para Agilent E4980A [Agilent, 2007]

Para distinguir las palabras clave con mayor jerarquía se posicionan en el lado izquierdo del comando, y a la derecha el nodo o función de menor jerarquía a la que se quiere acceder y así sucesivamente hasta llegar al nivel deseado. Nuevamente en la **figura 9** es posible observar la jerarquía de comandos, siendo el comando “:FUNction” el de mayor jerarquía y el comando “:TYPE” el de menor.

Las palabras encerradas en corchetes “[]” (ver **figura 9**) pueden ser omitidas por el usuario al momento de enviar el código. Esta palabra es conocida como nodo predeterminado (*default node*), y representa el comando que se ejecuta automáticamente al escribir la palabra anterior.

Otra característica que es importante recalcar sobre los comandos GPIB, es que son insensibles a la escritura [Agilent, 2007]. Dicho de otra manera, no importa si el comando es escrito con mayúsculas, minúsculas o combinación de ambas. En la **figura 9** es posible observar que hay letras escritas en mayúsculas y otras escritas en minúsculas. Las letras escritas en minúscula no son necesarias al ejecutar el comando, pero son colocadas para brindar información al usuario de la operación que se va a realizar. Por ejemplo, si se escribe el comando “:FUNction:IMPedance:TYPE”, tendrá el mismo efecto que si se hubiese escrito “:FUNC:IMP:TYPE”.

Estructura de Parámetro (Parameter Form). Esta sección brinda la información sobre el orden, número y valores válidos para los parámetros que se desean modificar. Los parámetros se separan del comando mediante un espacio “ “. Los valores aceptables pueden ser de diferentes tipos: numéricos, boléanos, textuales y arreglos. Los valores rodeados por los

signos de menor que y mayor que “< >” son valores necesarios y obligatorios para ejecutar el comando. Los valores encerrados entre corchetes “[]” son valores opcionales que pueden ser omitidos sin afectar el funcionamiento del comando. Cuando los valores están encerrados entre llaves “{ }” representan las diversas opciones que es posible elegir para dicho comando y las opciones son separadas por el operador “|”, que puede ser leído como “O” [Agilent, 2007]. Cuando se debe ingresar mas de un valor al parámetro ejecutado por el comando, serán separados por comas “,”, en el orden en que se especifique en la lista de comandos.

Volviendo al ejemplo del comando “:FUNCTION:IMPedance:TYPE”, en la **figura 10** se observan los valores que puede obtener el parámetro de dicho comando, es decir el tipo de impedancia que se medirá. Entre corchetes se aprecian los diferentes valores y el tipo de variable, en este caso textual.

```

:FUNCTION
  :DCResistance
    :RANGe
      :AUTO {ON|OFF|1|0}
      [:VALue] < numeric>
    :DEV[1-2]
      :MODE {ABSolute|PERCent|OFF}
      :REFerence
        :FILL
          [:VALue] < numeric>
      :IMPedance
        :RANGe
          :AUTO {ON|OFF|1|0}
          [:VALue] < numeric>
        [:TYPE] {CPD|CPQ|CPG|CPRP|CSD|CSQ|C
SRS|LPD|LPQ|LPG|LPRP|LPRD|L
SD|LSQ|LSRS|LSRD|RX|ZTD|ZTR
|GB|YTD|YTR|VDID}

```

Fig. 10. Lista de comandos GPIB y su estructura para parámetro (Form Parameter) [Agilent, 2007]

Notas (Notes). La tercer sección especifica el tipo de modo que el comando realiza cuando se ejecuta. Existen algunos comandos que tienen el modo interrogante (*Query*). No todos los comandos tienen el modo de pregunta o interrogante, algunos solo existen en modo interrogante (*Only Query*) y otros que no tienen modo de pregunta (*No Query*). Al ejecutar un comando del tipo interrogante, el instrumento proporciona la información solicitada por el comando. Como se puede observar en la **figura 11**, el comando “*RST” (*Reset*, reinicio en español), no presenta modo interrogante ya que es un comando de acción, sin recibir respuesta. En cambio, el comando “*IDN” (*Identification number*, número de identificación en español), presenta el modo de solo interrogante, ya que este comando solicita al instrumento proporcione información del fabricante [Agilent, 2007].

Command	Parameter	Note
*CLS		[No Query]
*ESE	< numeric>	
*ESR	< numeric>	[Query only]
*IDN	< string>	[Query only]
*LRN	< string>	[Query only]
*OPC		[No Query]
*OPT	< string>	[Query only]
*RST		[No Query]

Fig. 11. Lista de comandos SPCl, con sección de notas [Agilent, 2007].

3.2 Variables paramétricas de medición

La importancia de poder cuantificar y conocer la magnitud de las cosas ha sido una tarea fundamental en la ciencia desde sus principios hasta la actualidad. La mayoría de las propiedades físicas de los materiales requieren de unidades o relaciones de éstas para informar sobre su tipo de comportamiento ante ciertas condiciones. Pero estas unidades que conocemos se obtienen de manera experimental, a raíz de colocar los materiales ante ciertas condiciones experimentales y de esta manera conocer su comportamiento ante dichas condiciones. Este trabajo se centra en las propiedades eléctricas de las películas dieléctricas delgadas por lo que las

variables paramétricas utilizadas para desarrollar las mediciones se enfocan solamente en variables eléctricas tales como corriente, voltaje, capacitancia, conductancia y frecuencia las cuales se describen a continuación.

3.2.1 Voltaje

El voltaje es la magnitud que expresa la diferencia de potencial entre dos puntos, en consecuencia el voltaje entre dos puntos cualesquiera A y B es igual al trabajo por unidad de carga positiva que realizan las fuerzas eléctricas al mover una carga de prueba desde un punto A hasta el punto B, por lo que se define:

$$V_{AB} = \frac{T_{AB}}{q} \quad \text{[EC.1]}$$

donde:

V_{AB} = diferencia de potencial (voltaje) entre los puntos A y B.

T_{AB} = trabajo ejercido por una carga de prueba q la cual se desplaza del punto A al B (expresado en J=Joules).

q = carga de prueba desplazada del punto A al punto B (expresada en C=Coulombs).

En términos generales el voltaje se puede definir como trabajo por unidad de carga positiva que hace que los electrones libres se muevan de un punto a otro. La unidad de medida del voltaje es el volt (V). [Ocampo, 2006]

3.2.2 Corriente

La corriente eléctrica, también conocida como intensidad de corriente, es una carga en movimiento. La corriente eléctrica es la cantidad de carga que pasa por un punto fijo por unidad de tiempo. Y se representa de la siguiente manera:

$$I = \frac{q}{t} \quad [\text{EC.2}]$$

donde:

I = la intensidad de corriente o corriente eléctrica.

q = la cantidad de carga que pasa por un punto fijo.

t = la cantidad de tiempo en la que pasa la carga.

La intensidad de corriente se expresa en coulombs por segundo (C/s) o en Amperes (A). Una corriente de 1 A equivale a 6.24×10^{18} cargas electrónicas elementales por segundo. [Purceli, 1988]

3.2.3 Capacitancia

Para definir la capacitancia es importante conocer el concepto de capacitor. Un capacitor está formado por dos conductores cargados con la misma magnitud pero con signo contrario, tal como se observa en la **figura 12**. Si los conductores llevan carga de igual magnitud y signo opuesto existe entre ellos una diferencia de potencial ΔV [Serway, 2009].

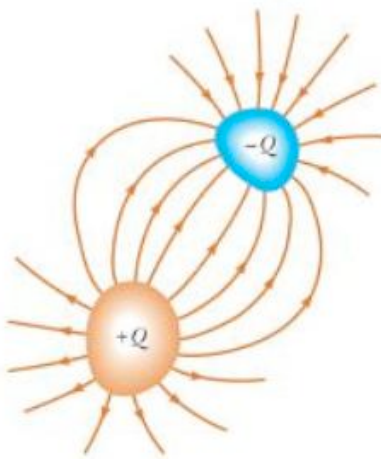


Fig. 12. Definición gráfica de capacitor. Dos conductores con una carga de igual magnitud y sentido opuesto [Serway, 2009].

Los experimentos han demostrado que la cantidad de carga Q en un capacitor es linealmente proporcional a la diferencia de potencial entre los dos conductores. Por lo que se puede definir la capacitancia diferencial C de un capacitor como la relación de la magnitud del cambio de la carga en cualquiera de los conductores, en relación al cambio en magnitud de la diferencia de potencial entre dichos conductores, expresándose de la siguiente manera [Serway, 2009]:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \text{ [EC.3]}$$

donde:

C = la capacitancia del capacitor.

ΔQ = la variación de la carga en uno de los conductores.

ΔV = la variación de voltaje debido al cambio ΔQ .

La capacitancia siempre es una cantidad positiva y se representan por el SI como coulombs por volt (C/V). La unidad del SI para la capacitancia es el farad (F). $1 \text{ F} = \text{C/V}$ [Serway, 2009]. Como conclusión se puede decir que la capacitancia de un capacitor es la carga que éste almacena por unidad de diferencia de potencial.

3.2.4 Conductancia

Comúnmente se estudia la oposición al paso de la corriente eléctrica por un fenómeno conocido como resistencia eléctrica. Debido a que ninguna resistencia detiene por completo a la corriente eléctrica, es posible considerar la facilidad de un elemento o dispositivo para conducir la corriente eléctrica [Fowler, 1994]. En lugar de tomar en cuenta la resistencia eléctrica se podría considerar la conductancia de un elemento.

La conductancia se refiere a la facilidad de un elemento o material de conducir corriente eléctrica. La conductancia se simboliza con la letra G y su

unidad básica es el siemen (S) [Fowler, 1994]. La conductancia es lo opuesto a la resistencia y se definen de manera recíproca una a otra:

$$G = \frac{1}{R} \text{ [EC.4]}$$

donde:

G = la conductancia de un material.

R= la resistencia eléctrica del material

Una resistencia de 100 Ω tendrá una conductancia de 1/100 o 0.01 S. Es posible encontrar en literatura antigua el término *mho*, como unidad de la conductancia (*mho*, resulta de invertir la palabra ohm, la cual es la unidad de la resistencia). Un mho y un siemens son unidades equivalentes, salvo que mho se encuentra en desuso y se considera incorrecto en la actualidad [Fowler, 1994].

3.2.5 Frecuencia

La frecuencia es el parámetro que mide el número de ocurrencias por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. Su cálculo se realiza de manera sencilla contabilizando el número de sucesos en un intervalo de tiempo, posteriormente la cantidad de sucesos se dividen por el tiempo transcurrido. La unidad de la frecuencia es el Hertz (Hz). Un Hertz equivale a un suceso repetido una vez por segundo. Y se presenta de la siguiente forma:

$$f = \frac{n}{t(s)} \text{ [EC.5]}$$

donde:

n = la cantidad de repeticiones del suceso

s = el intervalo de tiempo expresado en un segundos.

Otra manera de calcular la frecuencia es medir el tiempo entre dos repeticiones del suceso (período) y posteriormente calcular la frecuencia obteniendo el recíproco del período:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [EC.6]}$$

donde:

f = la frecuencia del suceso

T = el período o duración del suceso.

La frecuencia es una magnitud utilizada en una gran variedad de ramas. Por lo que concierne al objeto de estudio del presente trabajo, la frecuencia se utiliza para medir la oscilación de una señal sinusoidal de prueba que se suministra a la película dieléctrica. Es decir la cantidad de ciclos positivos y negativos que se presentan por segundo en dicha señal.

4. Experimentación y análisis de resultados

En el trabajo experimental se presenta la parte más importante de este proyecto, es en él donde se ven reflejadas las ideas que surgen durante la planeación del proyecto y es en el análisis de resultados donde se ven consumados todos los esfuerzos y se aprecian los frutos de la dedicación del presente proyecto. En este apartado se presenta el trabajo realizado para la obtención de los objetivos propuestos. Dichas actividades fueron desarrolladas en el Laboratorio de Semiconductores Microelectrónica y Nanotecnología del Instituto de Ingeniería, en la ciudad de Mexicali, Baja California.

4.1 Conexión de equipos de instrumentación

En las comunicaciones, principalmente en las redes computacionales; es utilizado el termino “*Maestro – Esclavo*”, refiriéndose a la jerarquía existente en la comunicación entre dispositivos electrónicos. Uno de los equipos es conocido como *Maestro* que controla a uno o mas equipos conocidos a su vez como *Esclavos*.

La comunicación dentro del protocolo GPIB se realiza a manera “*Maestro – Esclavo*”. En el caso del protocolo GPIB, el *Maestro* estaría representado por el *Controlador*, y los *Esclavos* serían los *Receptores* y *Transmisores*. Una vez que la relación de jerarquías en el sistema “*Maestro – Esclavo*” es establecida, la comunicación siempre será en la misma dirección, de *Maestro* a *Esclavo*. El *Esclavo* no podrá dar instrucciones al *Maestro*. Para que la comunicación se presente en dirección contraria, de *Esclavo* a *Maestro*; es necesario que el *Maestro* le solicite información al *Esclavo*.

El sistema computarizado que se propone logra realizar la conexión de uno o mas equipos de instrumentación y controlarlos desde una unidad de mando. Los equipos interconectados en este proyecto son el medidor de impedancias LCR Agilent E4980A y el analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A [Arias, 2010].

Antes de abordar el tema de la conexión del sistema computarizado es importante hablar sobre la arquitectura del analizador de dispositivos Agilent B1500A. En la actualidad, este instrumento de precisión, es de los pocos que cuentan con una computadora exclusivamente para el control del equipo debido a que es manejado a través del software EasyEXPERT.

Por esta razón, se puede visualizar al analizador de dispositivos semiconductores como una computadora con acceso a numerosa cantidad de instrumentos de medición y puertos de comunicación. Debido a que los instrumentos de medición son módulos conectados mediante tarjetas internas del instrumento, también puede observarse que el módulo SMU, utilizado para la realización de mediciones I-V; es un instrumento aparte del analizador de dispositivos semiconductores. Internamente el SMU es controlado mediante el software EasyEXPERT como si se tratara de cualquier otro instrumento de medición conectado mediante algún puerto y controlado por los protocolos conocidos Ethernet, GPIB o USB.

En este sistema, la computadora principal del analizador de dispositivos semiconductores funge como el controlador del sistema, quien da las ordenes y recibe el resultado de éstas. El SMU del analizador de dispositivos semiconductores y el medidor de impedancias LCR Agilent E4980A se desempeñan como *Transmisores* y *Receptores* dentro del protocolo de comunicación.

Para llevar a cabo la conexión entre el analizador de dispositivos semiconductores con el medidor de impedancia LCR, se utilizó el puerto GPIB. Tal como se especifica en el estándar IEEE 488.2, dicha conexión se realiza mediante un cable tipo *Amphenol* de 24 pins. Además el bus no debe tener una extensión mayor a 2 metros entre instrumentos.



Fig. 13. Conexión entre SDA B1500A y LCR E4980A mediante bus GPIB.

Una vez realizada la conexión, mediante el bus GPIB es posible establecer comunicación entre los dos instrumentos. Se comienzan a realizar las pruebas para el control del medidor de impedancias LCR Agilent E4980A a través del puerto GPIB utilizando el software EasyEXPERT, instalado en el analizador de dispositivos semiconductores.

Para el presente proyecto, se utilizó el módulo SMU para efectuar mediciones Corriente-Voltaje (I-V). La prueba utilizada para caracterización eléctrica mediante (I-V) no fue desarrollada durante este trabajo. Dicha prueba es una rutina programada por el fabricante e instalada por *default* en el equipo.

4.2 Programación de rutinas en EasyEXPERT

EasyEXPERT es el software utilizado para el control de los instrumentos internos del analizador de dispositivos semiconductores así como instrumentos externos. Los instrumentos externos son entrelazados mediante los puertos del analizador de dispositivos semiconductores (USB, GPIB, Ethernet). Además cuenta con una plataforma para el desarrollo de programas o rutinas, dichas rutinas se utilizan para realizar pruebas acordes a las necesidades de los usuarios finales.

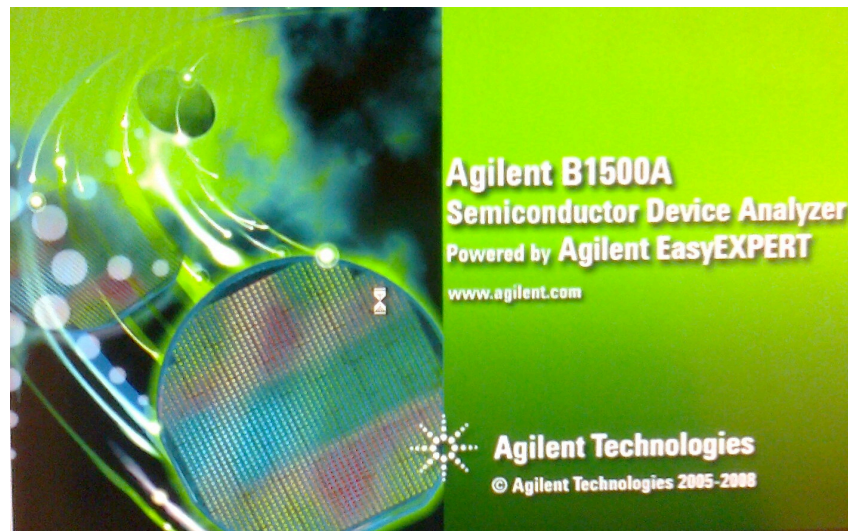


Fig. 14. Pantalla de inicio de Software Agilent EasyEXPERT [Agilent, 2010].

4.2.1 Definición de prueba

El primer paso para desarrollar las pruebas eléctricas es iniciar el programa de EasyEXPERT. Posteriormente acceder a la sección de *New Test Definition* (Nueva definición de prueba) [Agilent, 2010], esta sección como su nombre lo indica, tiene la finalidad de definir los parámetros que se utilizarán al realizar la prueba eléctrica. Es importante observar que el software presenta secciones para realizar observaciones propias de la prueba y agregar una descripción de la misma. En esta sección es posible especificar el funcionamiento de la prueba, las condiciones en las que trabaja y los límites de operación. Al igual que otros datos no menos importantes como autores y agradecimientos.

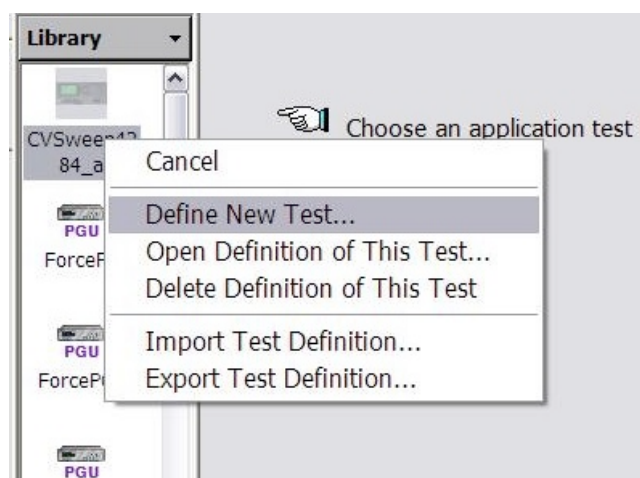


Fig. 15 Menú para definición de una nueva prueba [Agilent, 2010]

4.2.2 Edición de interfaz gráfica

Para llevar a cabo una interfaz *Usuario – Computadora* más amigable es posible elegir una imagen de fondo para la prueba eléctrica. La imagen utilizada para las pruebas eléctricas fue desarrollada como parte de la personalización de dichas pruebas. La imagen de *background* de las pruebas eléctricas muestra los logotipos de la Universidad Autónoma de Baja California y del Instituto de Ingeniería, los cuales, son los organismos encargados de apoyar de manera incesante la realización de este proyecto. También es posible observar el logotipo del Laboratorio de Semiconductores, Microelectrónica y Nanomateriales; perteneciente al Instituto de Ingeniería. De manera extraordinaria y por motivación propia se trabajo en la realización de una imagen de identidad para el laboratorio, dando por resultado el logotipo utilizado en la imagen de *background*. En este logotipo se intenta reflejar los campos de acción y las labores realizadas en este laboratorio.



Fig. 16. Imagen de *background* utilizada en la interfaz gráfica de las pruebas eléctricas.

El editor de GUI es de gran utilidad ya que proporciona grandes ventajas en la edición de la interfaz de una manera sencilla y rápida. Auxiliándose de botones es posible agregar o eliminar controles, o variables de entrada. Estas variables de entrada o controles serán utilizadas por el usuario para establecer las condiciones de la prueba eléctrica programada.

Además cuenta con la facilidad del ordenamiento de los botones y controles mediante coordenadas o desplazamiento a través del uso del *mouse*.

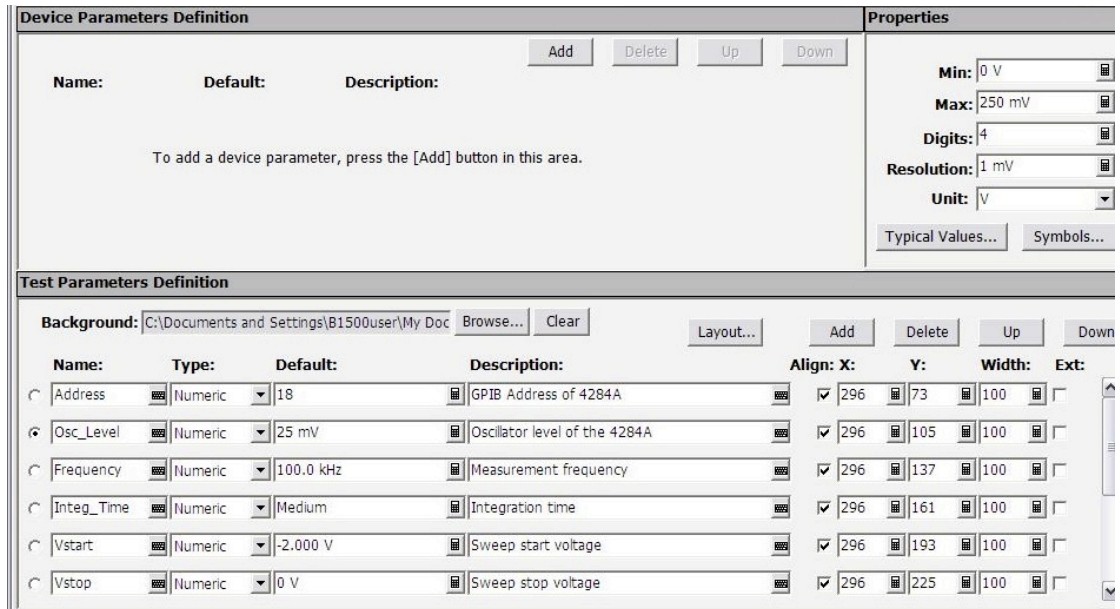


Fig. 17 Pantalla de edición de interfaz gráfica [Agilent, 2010]

4.2.3 Desarrollo de prueba (*Developing*)

La parte mas importante de la programación de una prueba eléctrica utilizando EasyEXPERT se encuentra en la sección de *developing*, donde se localizan la mayoría de las herramientas necesarias para desarrollar el programa de una prueba. Se presentan estas herramientas de manera sencilla y ordenada tales como la declaración de bloques de código, bucles de programación como *IF*, *FOR* y *WHILE*, mensajes de advertencia, barra de decisiones, mensajes, alarmas, etc. Todo eso para agilizar la programación de las rutinas mediante programación asistida.

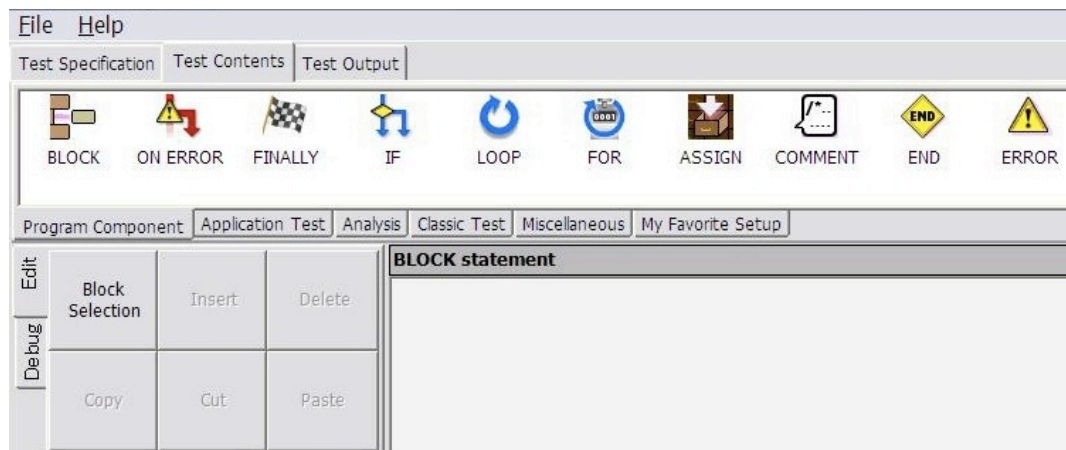


Fig. 18. Herramientas de programación proporcionadas por EasyEXPERT [Agilent, 2010].

En todo el lenguaje de programación es tarea primordial la definición de variables. Las variables son los grupos o paquetes de información donde se almacenan los datos durante la ejecución del programa. El software EasyEXPERT presenta la facilidad de declarar el tipo de variable con la que se pretende trabajar, ya sea numérica, vector o cadena de caracteres; con tan solo seleccionarla. Además de declarar el rango de operación de las variables así como su resolución, por lo que el control de ciclos e iteraciones se facilita ampliamente.

Local Variables Definition statement			
Add Numeric Variable	Add Vector Variable	Add String Variable	Add Module Variable
Numeric Variable			
Name: I	Value: 0	Description: Dummy vrbl for FOR/NEXT Loops	
Numeric Variable			
Name: Interval	Value: 0	Description: Interval between measurement points	
Numeric Variable			
Name: Vbias	Value: 0	Description:	
Vector Variable			
Name: Cdata	Count: 1	Description: C Measurement Data	
Assign Linear Values FROM		0	TO 0
Assign Linear Values FROM		0	STEP 0
Vector Variable			
Name: Vsweep	Count: 1	Description: V Bias Values	
Assign Linear Values FROM		0	TO 0
Assign Linear Values FROM		0	STEP 0

Fig. 19. Pantalla para declaración de variables locales del programa de prueba a desarrollar [Agilent, 2010].

4.2.4 Despliegue de información gráfica

Para la presentación de la información de manera gráfica el software cuenta con una herramienta visual llamada *Display Setup*, donde se elige el tipo de gráficas que se emplearán y los valores de los rangos que se aplicarán por *default*. Otra característica que puede ser modificada de las gráficas es la escala de las unidades, así como la asignación de orientación y el nombre de la etiqueta que presentarán los datos de los parámetros medidos que son desplegados en la gráfica.

Fig. 20. Herramienta para el despliegue de información gráfica “*Display Setup*” [Agilent, 2010].

Una vez abordado la mayoría de los atributos necesarios para la elaboración de una prueba eléctrica es posible comenzar a programar las pruebas que se utilizarán en la caracterización eléctrica de películas dieléctricas delgadas.

4.3 Método de Capacitancia/Conductancia - Voltaje

El método de Capacitancia/Conductancia - Voltaje (C/G-V) se utiliza para caracterización eléctrica de la calidad de las estructuras MOS. El valor

de la carga fija en el oxido se determina por la posición de la curva C-V medida a altas frecuencias.

En una estructura ideal MOS, la diferencia entre la función de trabajo del metal (ϕ_m) y la función de trabajo del semiconductor (ϕ_s), es cero. Además, la carga en el óxido, ya sea fija o debido a iones móviles es también cero, ver **Fig. 21**. [Sze, 2007]

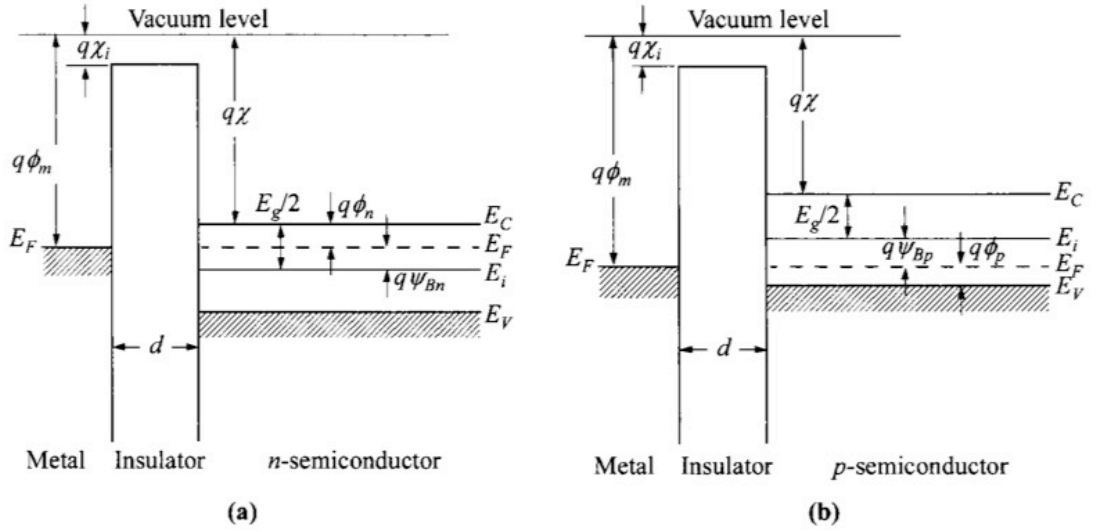


Fig. 21. Diagrama de bandas de energía para estructuras MOS ideales [Sze, 2007].

En las siguientes ecuaciones se representa la diferencia entre las funciones de trabajo (ϕ_{ms}) de un metal y un semiconductor, ya sea tipo p o n [Sze, 2007]:

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0, \text{ para material tipo-}n.$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0, \text{ para material}$$

tipo- p .

[EC. 7-8]

En una estructura real la diferencia entre funciones de trabajo no es cero. Su valor depende del metal que se utiliza y el dopaje del sustrato. Además en el óxido siempre está presente una carga fija cerca de la interfaz

SiO₂/c-Si, usualmente de signo positivo. Estos dos hechos tienen como consecuencia un desplazamiento en la curva de C-V a altas frecuencias [Sze, 2007].

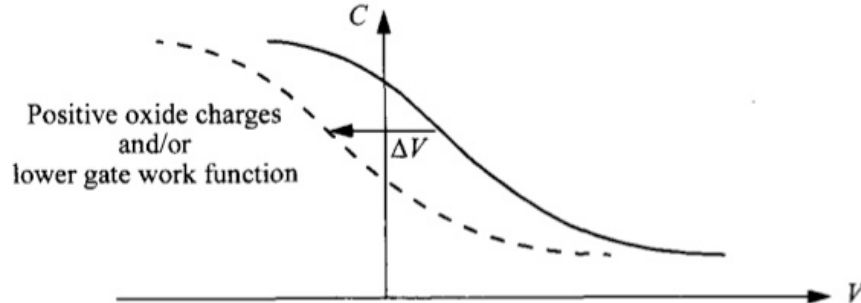


Fig. 22. Diagrama del desplazamiento de la curva C-V debido a la carga en el óxido [Sze, 2007].

El desplazamiento se mide con el cambio del voltaje de bandas planas (ΔV_{FB}), para el cual se tiene la siguiente ecuación [Sze, 2007]:

$$\Delta V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_i} \quad [\text{EC.9}]$$

donde:

Q_f = la carga fija en el óxido.

Q_m = la carga de red efectiva debida a los iones móviles por unidad de área en la interfaz Si-SiO₂.

Q_{ot} = la carga atrapada en el óxido, asociada principalmente a defectos en el óxido, por ejemplo debido a trampas.

C_i = la capacitancia medida en el aislante, para este caso en el SiO₂.

Al conocer el tipo de metal en la compuerta y el dopaje del material, es posible determinar ϕ_{ms} y por la posición de la curva C-V se puede determinar el valor de la carga fija en el óxido.

Además, de la pendiente de la curva C-V es posible obtener estimaciones sobre la densidad de defectos en la interfaz [Niccolian, 1982].

La curva G-V de alta frecuencia proporciona información cualitativa sobre la densidad de los defectos en la interfaz c-Si/SiO₂.

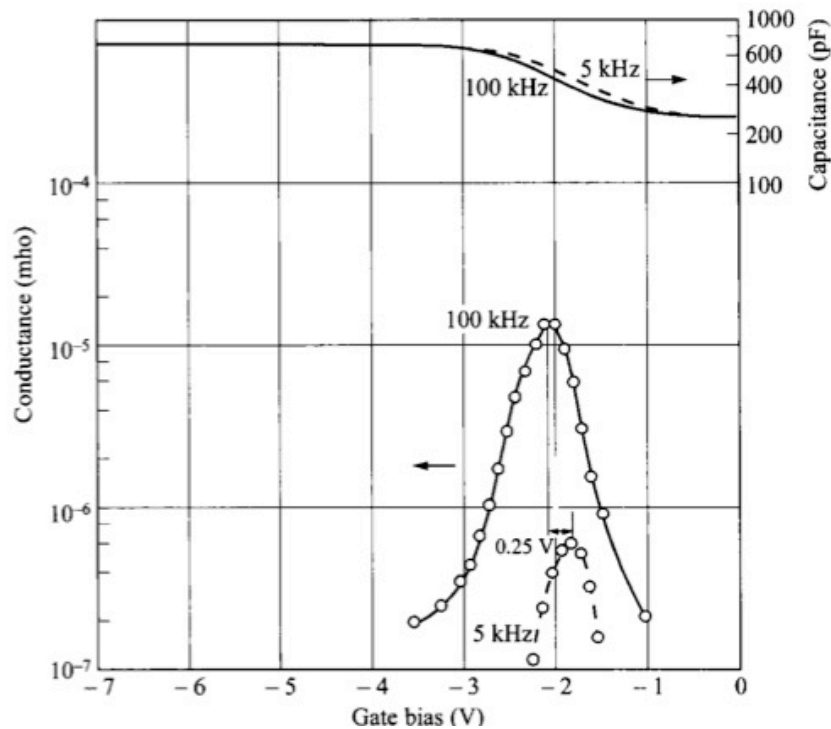


Fig. 23 Comparación de capacitancia y conductancia de estructuras MOS medida a dos frecuencias distintas (5 y 100 kHz) [Niccolian, 1982].

La conductancia y la capacitancia como funciones del voltaje y de la frecuencia contienen la misma información sobre los defectos en la interfaz c-Si/SiO₂. Las inexactitudes incrementan al utilizar el método de capacitancia para extraer información sobre la densidad de defectos en la interfaz (D_{it}), debido a que se debe calcular la diferencia entre capacitancias. El método de conductancia no presenta esta dificultad ya que la conductancia medida está directamente relacionada a las trampas en la interfaz. En consecuencia las mediciones de conductancia proporcionan resultados mas confiables y precisos, particularmente cuando la D_{it} es tan baja como en un sistema SiO₂-Si oxidado térmicamente [Sze, 2007].

4.3.1 Programación de prueba eléctrica C/G-V

Debido a la flexibilidad que presenta el medidor de Impedancias LCR Agilent E4980A para realizar mediciones de mas de un parámetro a la vez, es posible realizar mediciones de capacitancia y de conductancia al mismo

tiempo. Tomando ventaja de esta cualidad del equipo se realiza la programación de una prueba eléctrica que proporcione información tanto de capacitancia como de conductancia. Para realizar el programa primero se trabajó en las variables necesarias para la ejecución de la prueba eléctrica. Posteriormente en la programación del ciclo de iteración de la medición. Para finalizar, se realizó el despliegue de información gráfica en tiempo real. De esta manera, el usuario tiene un control óptimo de la prueba eléctrica y del manejo de la información obtenida.

4.3.1.1 Definición de parámetros de prueba

Para desarrollar la prueba de Capacitancia/Conductancia – Voltaje se realiza una interfaz gráfica Usuario – Computadora (ver **figura 23**) en la cual el usuario pueda seleccionar e indicar los parámetros deseados para la prueba. Los parámetros utilizados en esta prueba eléctrica se describen a continuación:

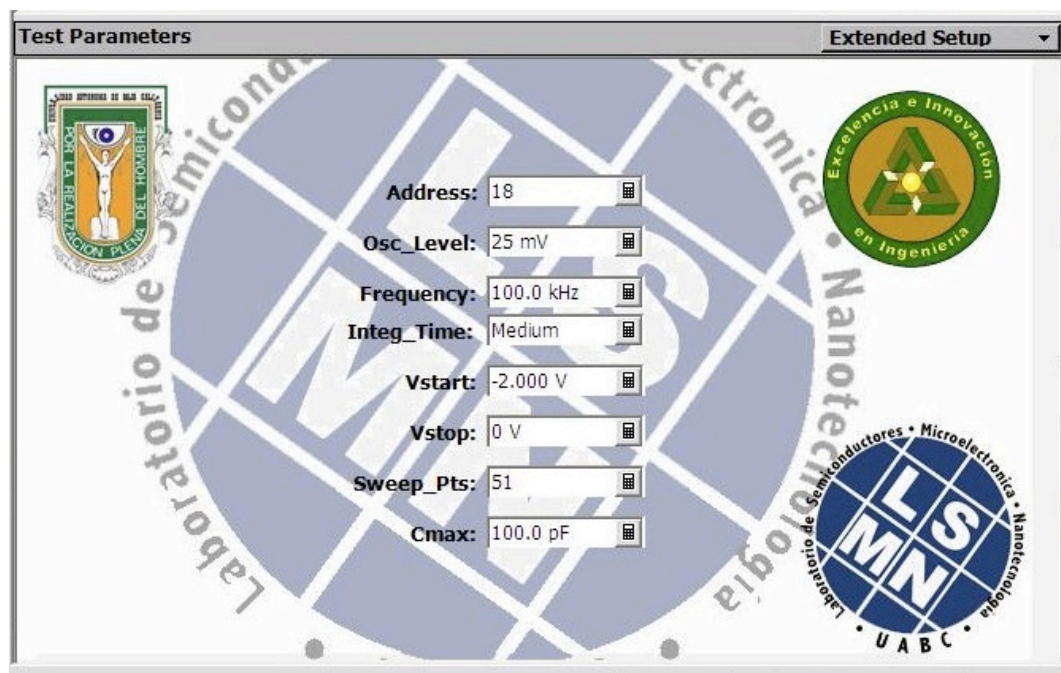


Fig. 24. Imagen de la Interfaz para la prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia – Voltaje [Agilent ,2010].

- **Address** (Dirección): Esta variable se utiliza para indicar la dirección GPIB por la cual se establece la comunicación entre el analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A y el equipo interfazado; en este

caso el medidor de impedancias LCR E4980A. Los instrumentos tienen consigo una dirección GPIB por *default*, comúnmente puede utilizarse esta dirección como una asignación predeterminada, pero en este caso se considera importante tener el acceso a cambiar la dirección en caso de que se integren varios instrumentos en una posible medición y se repitan las direcciones asignadas por *default*.

- **Osc_Level** (*Oscillation level*, Nivel de oscilación de la señal): Este parámetro define la amplitud de la señal con la que se probará la película dieléctrica delgada. Es posible definir esta señal en valores de voltaje o de corriente. Sólo dependerá de las unidades que se elijan en el selector de escala. La señal de prueba es AC por lo que la película dieléctrica se prueba con una señal sinusoidal, por ello el nivel de oscilación elegido será la amplitud de un semiciclo de la señal.

- **Frequency** (Frecuencia): Este elemento fija la frecuencia con la que oscilará la señal de prueba. Los rangos de frecuencia en los cuales opera esta señal va desde los 20 Hz hasta los 2 MHz con una resolución

- **Integ_Time** (*Integration time*, Tiempo de integración): La función de esta variable es seleccionar uno de los tres diferentes tiempos de integración con los que cuenta el equipo (SHORT MED y LONG). El medidor de impedancias LCR Agilent E4980A cuenta con un algoritmo para obtener mayor precisión en la medición. Se realiza una integración antes de definir el resultado de la medición, toma cierta cantidad de mediciones y calcula un valor promedio de las mediciones para proporcionar un resultado mas acertado. Es importante recalcar que una medición rápida tiende a ser menos precisa en comparación de una medición que se lleve mas tiempo. Es por ello que es significativo priorizar el tipo de medición que se realiza. Para poder elegir entre una medición rápida, una medición precisa o un balance entre ambas opciones.

- **Vstart** (*Voltage start*, Voltaje de inicio): Este parámetro se utiliza para seleccionar el valor del Voltaje en el que comenzará a realizarse la medición con barrido de Voltaje.

- **Vstop** (*Voltage stop*, Voltaje de paro): Al igual que el parámetro **Vstart**, el parámetro **Vstop** tiene la función de seleccionar el voltaje en el que la medición con barrido de voltaje finaliza.

- **Sweep_Pts** (*Sweep points*, Puntos de barrido) En este parámetro se especifica la cantidad de puntos en los que consistirá la medición. Es de suma importancia señalar que el equipo LCR Agilent E4980A cuenta con una capacidad máxima de memoria para realizar mediciones de hasta 201 puntos. Al enlazarse con la computadora del analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A puede realizar mediciones de tantos puntos así como lo permita la capacidad de almacenamiento del disco duro de la computadora del analizador de dispositivos semiconductores.

- **Cmax** (*Maximum capacitance*, Capacitancia máxima): Este parámetro define el nivel máximo de capacitancia que se desplegará en la gráfica. Cualquier valor de capacitancia que supere al ingresado como capacitancia máxima será ignorado y se graficará con el valor de **Cmax**.

Además de los parámetros que define el usuario antes de realizar la medición, existen otros parámetros internos, de los cuales el usuario no tiene acceso mediante la interfaz pero si mediante definición de prueba. A continuación se muestra una breve descripción de dichos parámetros:

- **Delay_Time** (Tiempo de retraso): Este tiempo es el que el instrumento LCR toma entre cada una de las mediciones desarrolladas, es decir, entre cada uno de los pasos de la medición.

- **Hold_Time**: (Tiempo de retención o espera): Este parámetro define el tiempo que espera el instrumento antes de realizar la primer medición del barrido de voltaje. Se debe recordar que la precisión de una medición también depende de la estabilidad de la señal de prueba. Dependiendo que tan crítica sea la medición es recomendable esperar cierto tiempo a la estabilidad de la señal de prueba.

- **Real_Time_Display** (Pantalla en tiempo real): Esta variable es para activar o desactivar el despliegue de información gráfica en tiempo real. Una de las ventajas principales de realizar la programación de esta prueba eléctrica es la de obtener información de manera gráfica sobre el comportamiento eléctrico de la muestra, todo esto en tiempo real. Es por ello que esta opción fue removida del menú y declarada activa por *default*.

4.3.1.2 Declaración de variables locales

Las variables locales son los espacios de memoria internos declarados en el programa y registrados en la computadora que se utilizan para almacenar los datos o para realizar operaciones internas. Existen diferentes tipos de variables tales como contadores, vectores y variables numéricas. Las variables locales que fueron declarados para el desarrollo del presente programa son las siguientes:

- **RESP** (*Response*, Respuesta del instrumento): Esta variable es utilizada para evaluar la respuesta del equipo. Al revisar esta variable es posible dictaminar si el instrumento tiene o no una falla.
- **TERM** (*Termination*, Finalización): Es una variable de tipo *Dummy* utilizada solamente para conocer cuando el equipo finaliza la realización del proceso en curso.
- **I** (Iterador, o contador): Esta variable es utilizada como contador de la cantidad de ciclos que se llevan a cabo durante la medición. El número de pasos sugeridos en la medición es igual al número de veces que se realiza el ciclo de medición. Cuando la variable **I** tiene un valor igual al número de puntos deja de medir. De la misma manera la variable es utilizada para definir el espacio de memoria que se utiliza en los vectores que son graficados y almacenados en el *List Sweep* (Lista de barrido) de la prueba.
- **Interval** (Intervalo): Esta variable almacena el valor que se utiliza como intervalo de magnitud que hay entre cada uno de los puntos de la medición. Es decir el valor en magnitud del paso entre las mediciones, ya sea incremento o decremento de voltaje.
- **Vbias** (Voltaje de polarización): Esta variable controla la magnitud del estado presente del voltaje de polarización (Bias). A medida que se cumplen los ciclos de medición, el valor de esta variable cambia hasta realizar todos los pasos definidos en el barrido de voltaje.
- **Cdata** (*Capacitance data*, Datos de capacitancia): Este vector guarda la información de la capacitancia medida, en cada uno de los pasos. A cada paso realizado (lo que representa un aumento en **I**) almacena un valor correspondiente de capacitancia en el lugar establecido por el valor del índice **I** dentro del vector **Cdata**.

- **Conductance** (Conductancia): Este vector almacena los datos de la conductancia medida en cada uno de los pasos. De igual manera que el vector **Cdata**, a cada iteración de la variable **I**, almacena un valor distinto de conductancia dependiendo del voltaje de polarización (Bias) que se le haya suministrado.
- **Vsweep** (*Voltage sweep*, Barrido de voltaje): Este vector almacena los distintos valores con los que se polariza la muestra durante el barrido de voltaje. El valor inicial de éste vector está dado por el voltaje inicial (**Vstart**). A cada iteración del ciclo de medición se le suma aritméticamente el valor de **interval** al valor del voltaje inicial (**Vstart**), lo que proporciona los valores subsecuentes del vector **Vsweep**. El proceso se itera hasta llegar al valor del voltaje final del barrido (**Vstop**).
- **All_Data** (Toda la información): Este vector es el que guarda la información obtenida del medidor de impedancias LCR. El almacenamiento de esta información se da de manera temporal y se actualiza en cada ciclo de medición. De este vector se extrae la información con la que se llena el vector **Cdata** y el vector **Conductance**, que son los vectores que almacenan la información de capacitancia y conductancia, respectivamente.
- **Time** (Tiempo): Este vector almacena el tiempo que tarda el instrumento en efectuar la medición en cada uno de los pasos realizados durante el barrido de voltaje.

4.3.1.3 Bloque de instrucciones

En esta sección se definen las instrucciones que siguen los instrumentos al realizar una medición. Las instrucciones están formadas por comandos, especificaciones y asignaciones que obedecen los instrumentos al realizar la prueba eléctrica. Como ejemplo de las asignaciones realizadas en esta sección están las fórmulas utilizadas para la obtención de parámetros internos de la prueba eléctrica, tal como la determinación del valor del incremento realizado en los pasos de la prueba. De la misma manera se puede mencionar la asignación de límites en las gráficas dependiendo de los valores inicial o final del voltaje. En la siguiente lista se define de manera general las instrucciones que recibe el equipo para realizar la prueba eléctrica de Capacitancia/Conductancia – Voltaje utilizando el medidor de impedancias

LCR Agilent E4980A controlado mediante el analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A.

Lista de Instrucciones

1. Reinicio del instrumento de medición Agilent E4980A.
2. Ejecución del comando **Sleep.exe**. Este comando es propio de Agilent EasyEXPERT, sirve para preparar el instrumento antes de realizar la medición. Es similar al comando SPCl ***WAI**, salvo que el comando **sleep.exe** se ejecuta directamente desde Agilent EasyEXPERT.
3. Determinación del valor del parámetro **Interval**, mediante la ecuación:

$$Interval = \frac{(Vstop - Vstart)}{(Sweep_Pts - 1)} \quad \text{[EC.10]}$$

4. Limpieza del estado del registro de eventos del instrumento (Status Byte), quien es el encargado de notificar eventos o errores ocurridos en la operación del documento o durante la comunicación con él.
5. Selección del modo de control del instrumento que realiza la prueba. Para realizar la prueba se elige el modo de control vía BUS. De esta es posible accionar la prueba de manera remota mediante el analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A.
6. Selección del tipo de medición. Debido al tipo de estructuras que se estudian y el método de caracterización eléctrica propuesto en el presente proyecto, la opción a elegir para la medición es: **Cp-G** (Capacitancia en paralelo y Conductancia).
7. Elección del formato de salida de los datos obtenidos de las mediciones. El formato de salida utilizado en esta prueba es el formato ASCII.
8. Activación del modo de alta potencia para poder utilizar el instrumento como fuente de voltaje y polarizar la muestra.
9. Activación de la fuente de polarización DC BIAS.
10. Establecimiento del nivel de la señal de prueba, ya sea en volts o en amperes.
11. Establecimiento del tiempo de integración utilizado en la medición.
12. Establecimiento de la frecuencia de la señal de prueba.

13. Comienzo del ciclo de barrido de voltaje de polarización (V_{bias}).
Utilizando como condición de salida el cumplimiento de igualdad entre la variable I y la variable **Sweep_Pts**.

14. Cálculo del valor del voltaje de polarización (V_{bias}), mediante la ecuación:

$$V_{bias} = V_{start} + (Interval \cdot (I - 1)) \quad \text{[EC.11]}$$

15. Establecimiento del valor de voltaje de polarización (V_{bias}).

16. Envío de comando ***OPC?** al medidor de impedancia LCR para conocer si el equipo ha terminado de realizar sus operaciones correspondientes y se encuentra listo para efectuar mediciones.

17. Espera de respuesta del medidor de impedancias LCR para la continuación de la prueba eléctrica.

18. Cálculo y establecimiento del valor actual de la variable **Time**.

19. Ejecución del comando **Sleep.exe**, para dar un tiempo de espera, para que el equipo se estabilice.

20. Envío del comando **:INIT**, para inicializar el equipo en modo de medición y realizar la prueba eléctrica.

21. Accionamiento del Disparo (*Trigger*) para la ejecución de la medición, el envío del disparo se realiza mediante el bus GPIB desde Agilent EasyEXPERT.

22. Lectura de los valores obtenidos en la medición y almacenamiento de los datos en la variable **All_Data**.

23. Actualización del vector variable **Cdata**, mediante la extracción de cierto grupo de datos del vector **All_Data**.

24. Actualización del vector variable **Vsweep**. Esta operación se realiza mediante el almacenamiento del valor actual de la variable **Vbias** en el vector **Vsweep**.

25. Actualización del vector variable **Conductance**, mediante la extracción de cierto grupo de datos del vector **All_Data**.

26. Evaluación de la variable **Real_Time_Display**, esta variable toma la decisión de mostrar o no los resultados de los vectores en tiempo real, esto mediante el despliegue de gráficas.

27. Evaluación de las variables **Vstart** y **Vstop** para determinar los límites que se utilizan en el despliegue de las gráficas.
28. Incrementar una unidad al valor de la variable **I**, y regresar al paso número 12 hasta que la condición de salida sea satisfecha.
29. Desactivación de la fuente de polarización DC Bias.
30. Despliegue de gráficas en pantalla, independientemente si se ha activado o no la opción de gráficos en tiempo real.

Los treinta pasos puntualizados en la sección anterior describen de manera general las operaciones necesarias para efectuar una prueba eléctrica que proporcione la información adecuada para realizar una caracterización eléctrica, utilizando el método de Capacitancia/Conductancia – Voltaje.

4.3.2 Diagrama de flujo

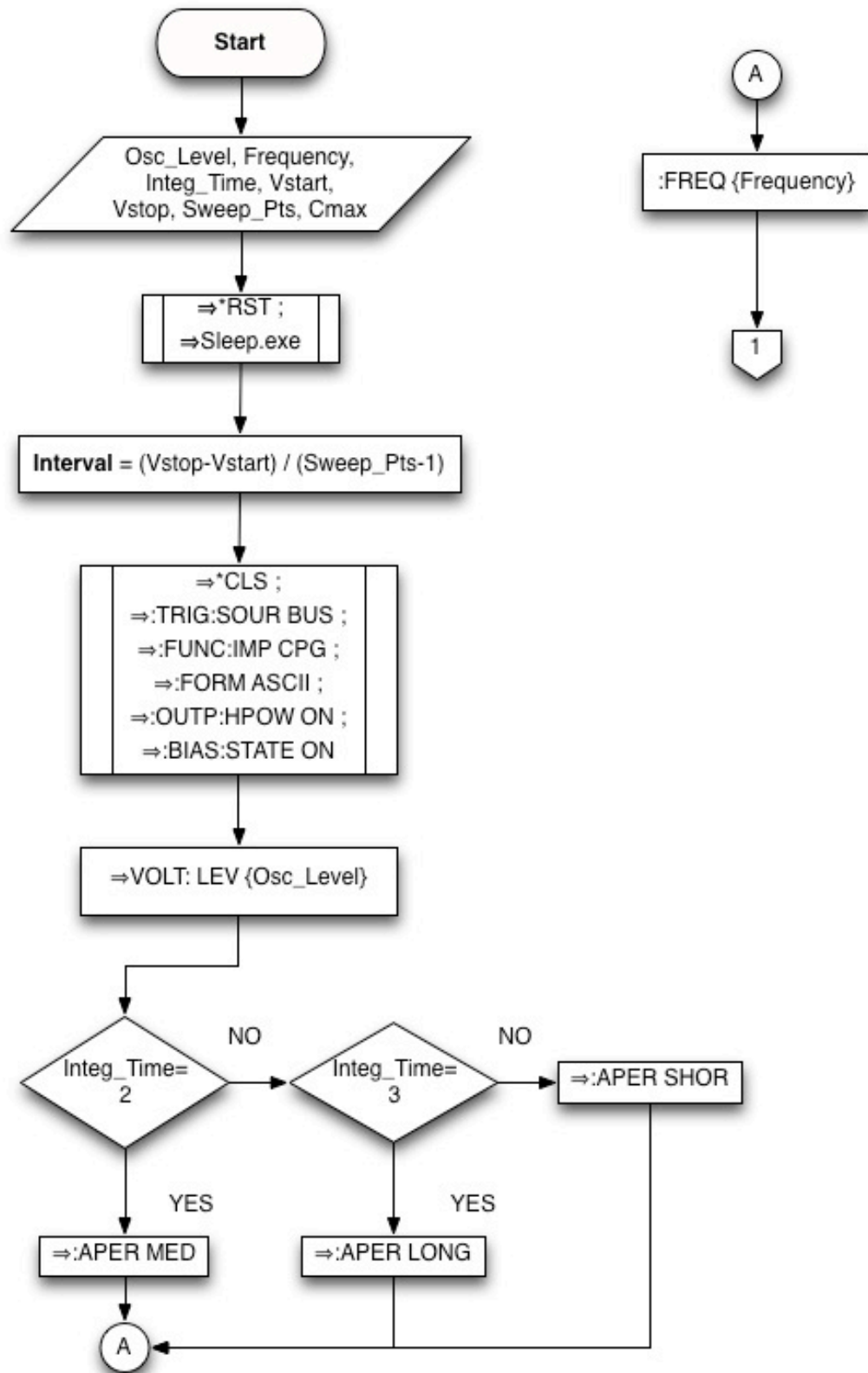


Fig. 25a. Diagrama de flujo de prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia - Voltaje

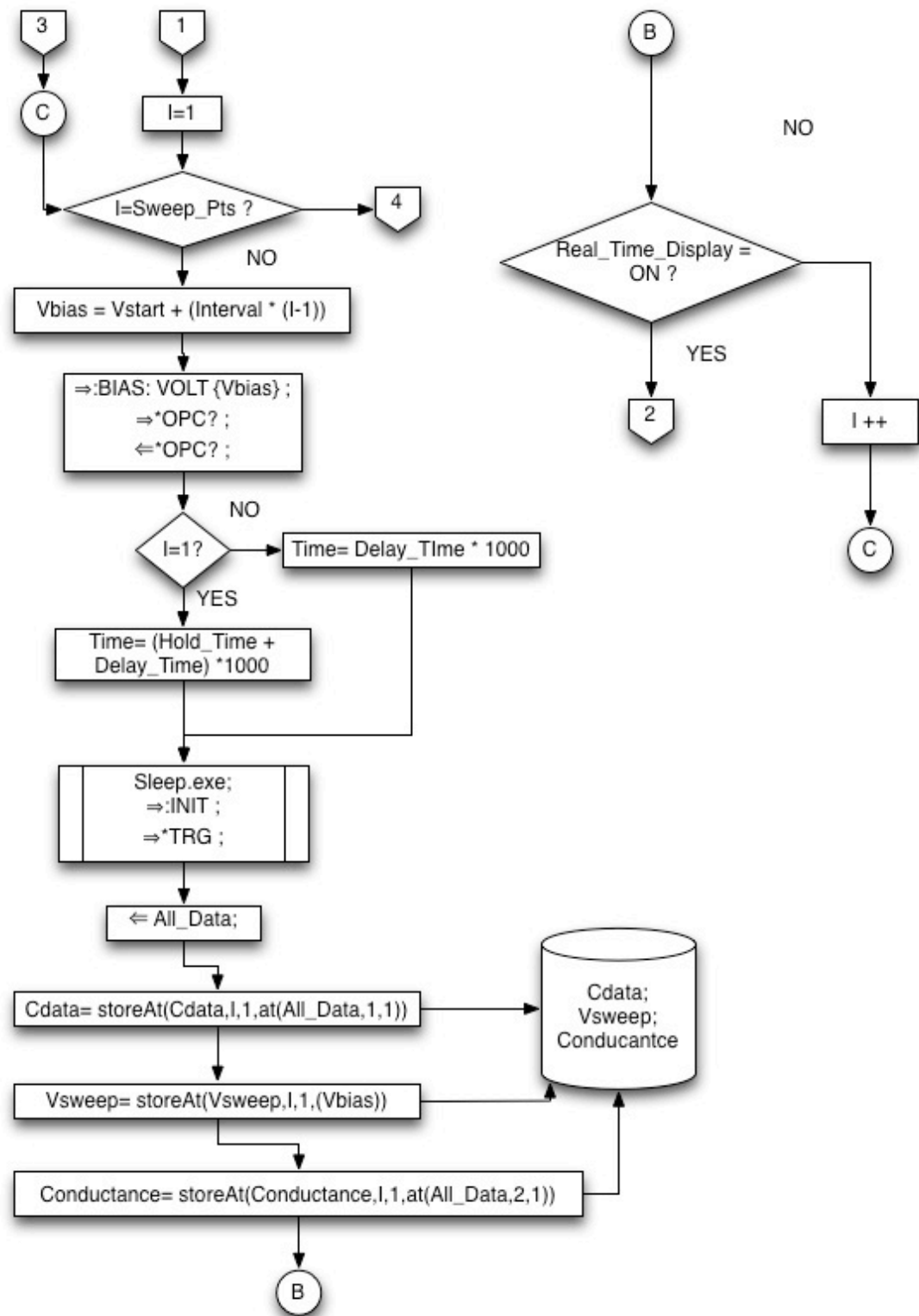


Fig. 25b. Diagrama de flujo de prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia - Voltaje

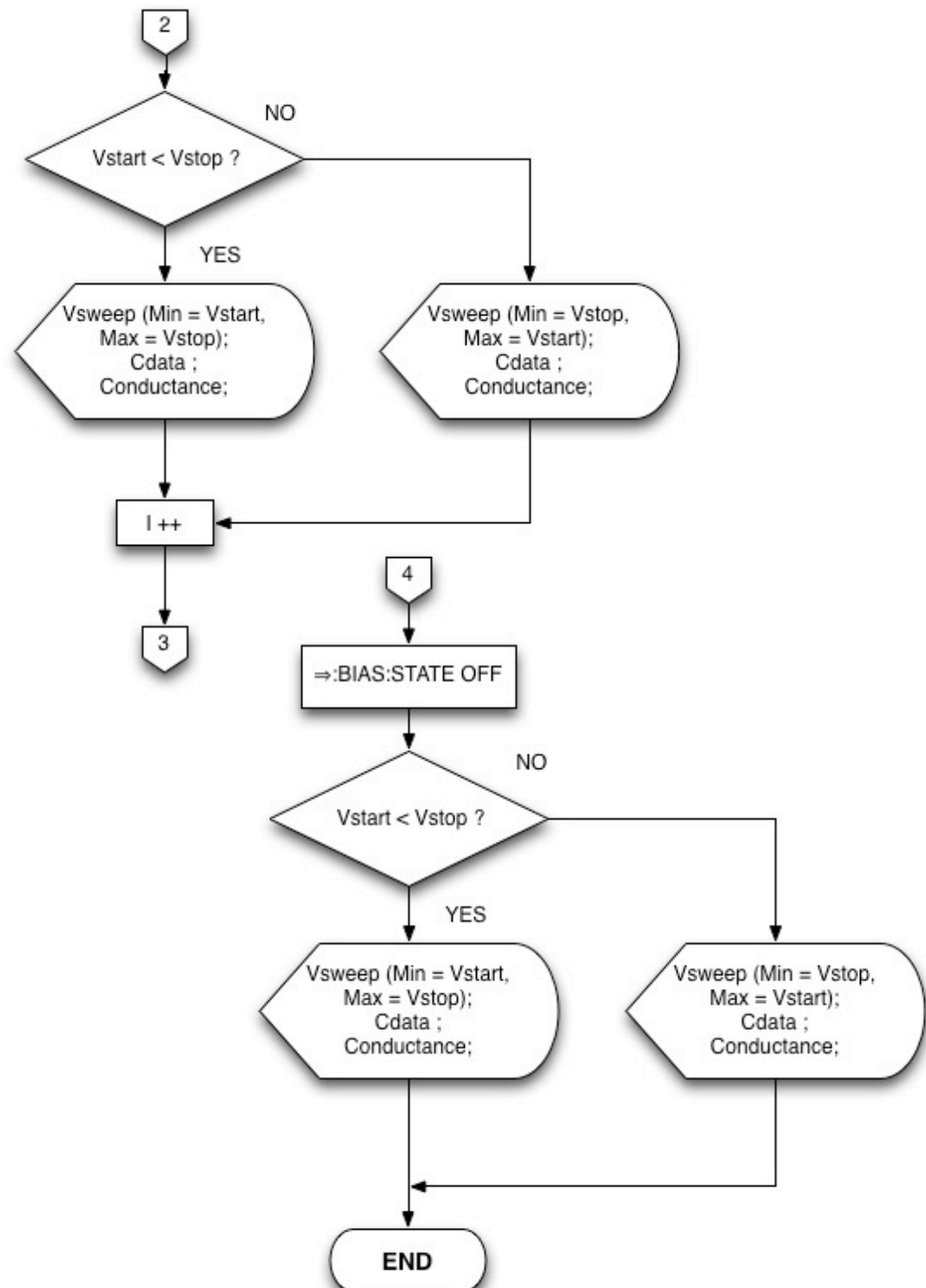


Fig. 25c. Diagrama de flujo de prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia - Voltaje

4.3.3 Resultados experimentales

La **figura 26** muestra un ejemplo típico de la dependencia de la capacitancia en función del voltaje de la compuerta en una estructura MOS con nanocristales en la compuerta dieléctrica. Las mediciones se realizan a 4 diferentes frecuencias, en el rango de 50 kHz – 1 MHz. Es conocido que [Yang, 1999] la capacitancia en acumulación en capacitores MOS con corriente de fuga a través de la compuerta del dieléctrico es dependiente de la frecuencia. En la **figura 26** puede observarse como las curvas medidas coinciden en un amplio rango de frecuencia, lo que indica que la capa dieléctrica de las muestras fabricadas tienen excelentes propiedades aislantes. De la posición de las curvas C-V se calculó la carga fija en el óxido, obteniendo valores de $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$.

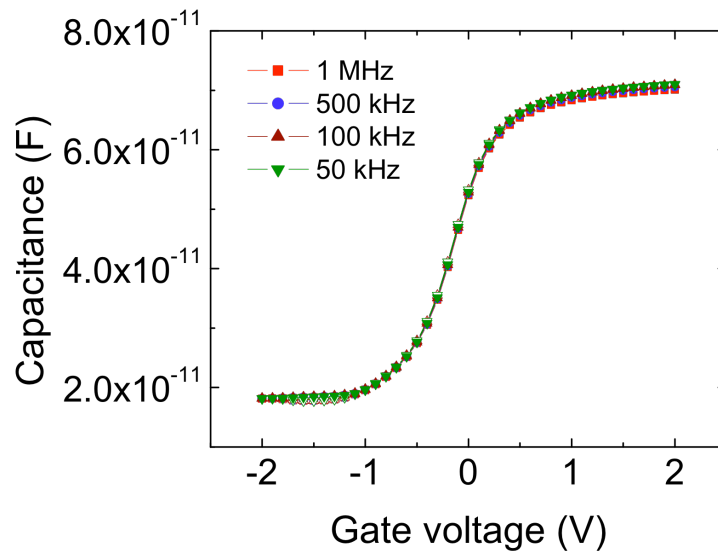


Fig. 26. Dependencia C-V de una estructura MOS con un dieléctrico recocido por 30 min, medido a 1MHz, 500, 100 y 50 kHz.

En la **figura 27** se muestra la dependencia de la conductancia en paralelo, G , en la compuerta dieléctrica. Valor muy pequeños de G , menos a 50 μS , fueron medidos en acumulación a una frecuencia de 1MHz en todos los capacitores. La capacitancia se vuelve aún mas pequeña en el intervalo de transición entre el estado de acumulación y el de inversión, lo que indica una muy baja densidad de defectos en la interfaz c-Si/dieléctrico. La ausencia de pico en la curva G -V significa que la resistencia en serie produce una

perdida dominante, enmascarando completamente la pérdida producida por trampas en la interfaz [Niccolian, 1982].

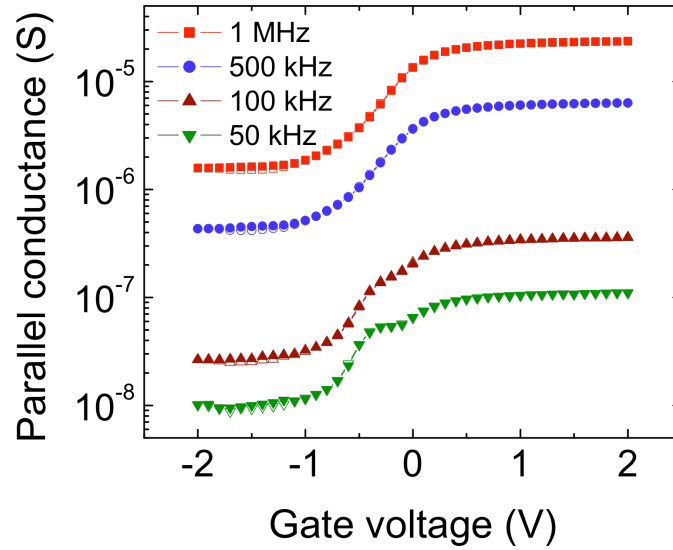


Fig. 27. Dependencia G-V medida simultáneamente con las curvas C-V mostradas en la figura. 26.

Después de una corrección de la resistencia en serie, utilizando las fórmulas propuestas en [Niccolian, 1982] y presentadas a continuación:

$$G_p = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad [\text{EC.12}]$$

donde:

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s, \quad [\text{EC.13}]$$

y,

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad [\text{EC.14}]$$

se observa que los valores de los picos de la curva de conductancia se encuentran en el rango de 10^{-8} - 10^{-6} S, dependiendo de la frecuencia con que se mide, observar la **figura 28**.

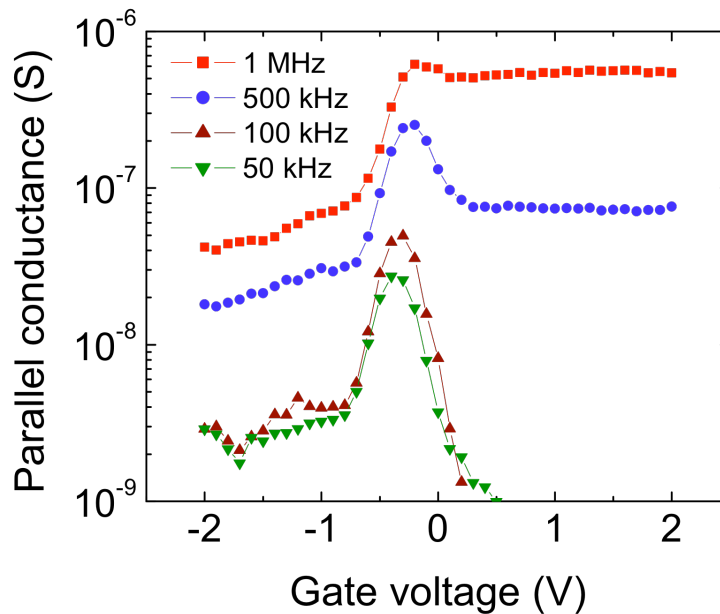


Fig. 28. Curva G-V corregidas para resistencia en serie.

4.4 Método Capacitancia/Conductancia-Frecuencia

El método de caracterización eléctrica mediante curvas Capacitancia/Conductancia en respuesta a la variación de Frecuencia proporciona información importante sobre el comportamiento de los materiales. Información sobre la respuesta de los defectos en la interfaz c-Si/SiO₂, es un ejemplo de información obtenida mediante esta prueba.

Para medir el nivel de la densidad de trampas en la interfaz y la probabilidad de captura, la admitancia debe ser medida como función de la frecuencia con parámetro voltaje de polarización (Bias). La inclusión de la frecuencia como variable incrementa la cantidad y complejidad tanto de la información requerida como del análisis a realizar. Este aumento de complejidad se ve recompensando al obtener información mas detallada de las propiedades en la interfaz [Niccolian, 1982].

La densidad de defectos en la interfaz y las constantes de tiempo de los estados cercanos al punto medio del *bandgap* del silicio pueden ser determinados tomando en cuenta que G_p/ω tiene un máximo en $\omega \cdot \tau = 1$ [Sze, 2007]

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{it} \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad [\text{EC.15}]$$

y que el máximo es igual a $\frac{1}{2} C_{it}$. En **[EC.15]**, G_p es la conductancia en paralelo a la capacitancia de la región de agotamiento del Silicio más la capacitancia de los defectos en la interfaz (Ver **figura 29**).

Para determinar la capacitancia debida a las trampas en la interfaz, C_{it} , y las constantes de tiempo τ , es necesario obtener la componente conductiva G_p , que existe a través de las terminales x-x; la cual puede ser extraída de la capacitancia C_m y conductancia G_m medidas a través de las terminales A-A, mostradas en la **figura 29**. El termino G_p/ω es utilizado para obtener C_{it} [Niccolian, 1982].

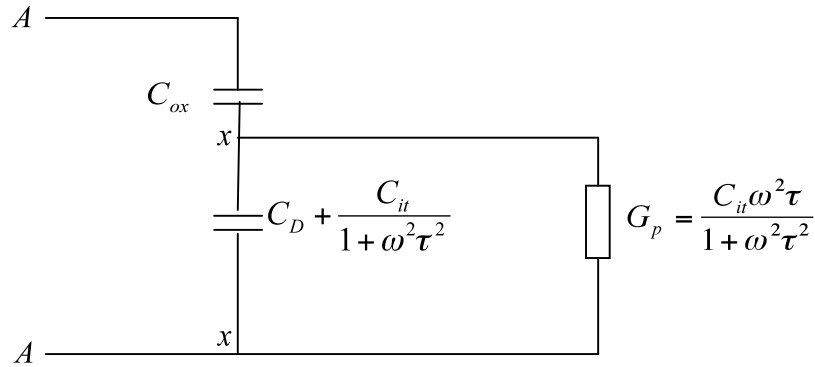


Fig. 29. Circuito simplificado de un capacitor MOS correspondiente a la admitancia mediado tomando en cuenta el efecto de los estados en la interfaz [Niccolian, 1982].

La admitancia del capacitor MOS medida a través de las terminales A-A de la **figura 29** es $G_m + j\omega C_m$, donde G_m es la conductancia paralela medida y C_m es la capacitancia medida. Al convertir esta admitancia a impedancia, es posible sustraer la reactancia de la capacitancia del óxido, y posteriormente convertir de nuevo a admitancia para obtener la parte real dada por:

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_{ox}^2 G_m}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad [\text{EC.16}]$$

dónde C_{ox} es la capacitancia medida en acumulación [Niccolian, 1982].

4.4.1 Programación de prueba eléctrica C/G-f

Al igual que la prueba de Capacitancia/Conductancia-Voltaje, programar la prueba de la respuesta de la Capacitancia/Conductancia respecto a la Frecuencia es posible debido a la flexibilidad que presenta el medidor de impedancias LCR Agilent E4980 y el software de desarrollo EasyEXPERT. Al tener la capacidad para realizar tal prueba, se vuelve imperativo el aprovechar estos recursos para obtener la mayor cantidad de información posible sobre los materiales que se estudian en este laboratorio.

4.4.1.1 Definición de parámetros de prueba

Para la realización de la prueba de capacitancia/conductancia en respuesta de un barrido de frecuencia se realiza una interfaz gráfica Usuario-Computadora en la cual el usuario pueda indicar y seleccionar los parámetros deseados para la efectuación de la prueba eléctrica. La prueba Capacitancia/Conductancia-Frecuencia está basada en la prueba Capacitancia/Conductancia-Voltaje, por esta razón se abordará la descripción de las variables y parámetros en los que difieren éstas pruebas. Los parámetros explicados en la sección anterior solamente serán mencionados. Los parámetros incluidos en la interfaz gráfica son los siguientes:

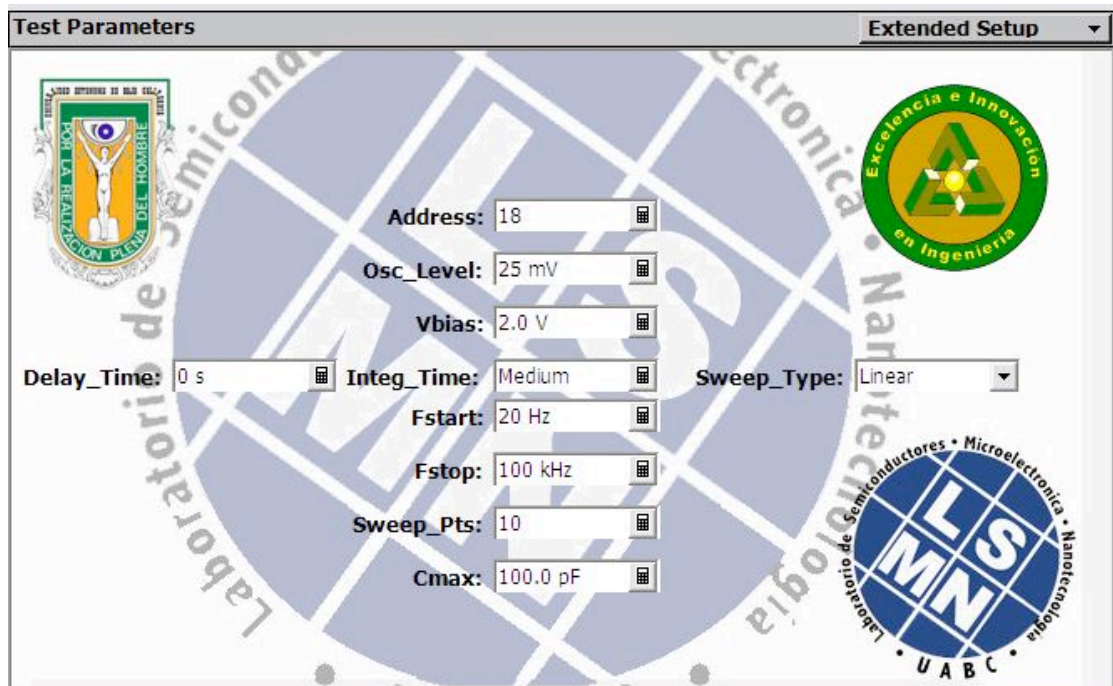


Fig. 30. Imagen de la prueba Capacitancia/Conductancia – Frecuencia [Agilent, 2010].

- **Addres**
- **Osc_Level**
- **Vbias**: A diferencia de la prueba Conductancia/Capacitancia-Voltaje, en esta prueba el parámetro **Vbias**, permanece fijo.
- **Integ_Time**
- **Fstart** (*Frequency start*, Frecuencia de inicio): Este parámetro selecciona la frecuencia en la que comienza a realizarse la medición con barrido de frecuencia
 - **Fstop** (*Frequency stop*, Frecuencia de paro): Este parámetro selecciona la frecuencia en la la medición con barrido de frecuencia finaliza.
- **Sweep_Pts**
- **Cmax**
- **Delay_Time** (Tiempo de retraso): Este tiempo es el que el instrumento LCR toma entre cada una de las mediciones desarrolladas, es decir, entre cada uno de los pasos de la medición. En la prueba Conductancia/Capacitancia-Voltaje este parámetro se encontraba deshabilitado de la interfaz gráfica.

Al igual que la prueba de la sección anterior existen otras variables internas, de las cuales el usuario final no tiene acceso mediante la interfaz gráfica tales como:

- Hold_Time:
- Real_Time_Display .

4.4.1.2 Declaración de variables locales

Como se explica en la sección 4.3.1.2 las variables locales son los espacios de memoria que se utilizan para almacenar los datos o para realizar operaciones requeridas por el programa. Al igual que en la sección anterior solamente se agrega una descripción breve de las variables que difieren respecto a la prueba con barrido de Voltaje. Las variables locales declaradas en el programa son las siguientes:

- **RESP**
- **TERM**
- **I**
- **Interval**
- **Frequency** (Frecuencia): Esta variable almacena el valor actual de I frecuencia. A medida que se realizan ciclos de medición el valor de ésta variable cambia hasta cumplir los pasos definidos en el barrido de frecuencia.
- **Cdata**
- **Conductance**
- **Vsweep** (*Voltage sweep*, Barrido de voltaje): Este vector almacena los distintos valores con los que se polariza la muestra durante el barrido de voltaje. El valor inicial de éste vector está dado por el voltaje inicial (**Vstart**). A cada iteración del ciclo de medición se le suma aritméticamente el valor de **interval** al valor del voltaje inicial (**Vstart**), lo que proporciona los valores subsecuentes del vector **Vsweep**. El proceso se itera hasta llegar al valor del voltaje final del barrido (**Vstop**).
- **Fsweep** (*Frequency sweep*, Barrido de frecuencia): Este vector almacena los valores de frecuencia de la señal con la que se prueba la muestra durante la medición con barrido de frecuencia. Cada valor de este

vector esta dado por la frecuencia inicial (**Fstart**). A cada iteración del ciclo de medición se le suma aritméticamente el valor **Interval** al valor de la frecuencia inicial (**Fstart**), lo que proporciona los valores subsecuentes del vector **Fsweep**. El proceso itera hasta llegar al valor de la frecuencia final (**Fstop**).

- **All_Data**
- **Time**

4.4.1.3 Bloque de instrucciones

Como ya se ha explicado en esta sección se definen las instrucciones que siguen los instrumentos al realizar una medición. En la siguiente lista se establece de manera puntual las instrucciones enviadas al equipo para realizar la prueba eléctrica de Capacitancia/Conductancia – Frecuencia.

1. Reinicio del instrumento de medición Agilent E4980A.
2. Ejecución del comando **Sleep.exe**.
3. Limpieza del estado del registro de eventos del instrumento (Status Byte), quien es el encargado de notificar eventos o errores ocurridos en la operación del documento o durante la comunicación con él.
4. Selección del modo de control del instrumento que realiza la prueba. Para realizar la prueba se elige el modo de control vía BUS.
5. Selección del tipo de medición. La opción a elegir para la medición es: **Cp-G** (Capacitancia paralela y Conductancia).
6. Elección del formato de salida de los datos obtenidos de las mediciones. El formato de salida utilizado en esta prueba es el formato ASCII.
7. Activación del modo de alta potencia para poder utilizar el instrumento como fuente de voltaje y polarizar la muestra.
8. Activación de la fuente de polarización DC BIAS.
9. Establecimiento del nivel de la señal de prueba, ya sea en volts o en amperes.
10. Establecimiento del tiempo de integración utilizado en la medición.
11. Establecimiento del voltaje de polarización (V_{bias}) con el que se energizará la muestra durante la medición.

12. Comienzo del ciclo de barrido con frecuencia. Utilizando como condición de salida el cumplimiento de igualdad entre la variable **I** y la variable **Sweep_Pts**.
13. Evaluación de la variable **Sweep_Type**, para establecer si el barrido de frecuencia será de manera “Lineal” o “Logarítmica”.
14. Cálculo de las variables **Interval** (Intervalo) y **Frecuencia**, si se trata de un barrido lineal; mediante las ecuaciones:

$$Interval = \frac{(Fstop - Fstart)}{Sweep_Pts} \quad [EC.17]$$

$$Frequency = Fstart + (Interval \cdot (I - 1)) \quad [EC.18]$$

15. Cálculo de las variable **Interval** (Intervalo) y **Frecuencia**, si se trata de un barrido logarítmico; mediante las ecuaciones:

$$Interval = \frac{\log(Fstop) - \log(Fstart)}{Sweep_Pts - 1} \quad [EC.19]$$

$$Frequency = e^{\log(Fstart) + (Interval \cdot (I - 1))} \quad [EC.20]$$

16. Establecimiento del valor de Frecuencia.
17. Envío de comando ***OPC?** al medidor de impedancia LCR .
18. Espera de respuesta del medidor de impedancias LCR para la continuación de la prueba eléctrica.
19. Cálculo y establecimiento del valor actual de la variable **Time**.
20. Ejecución del comando **Sleep.exe**, para dar un tiempo de espera, para que el equipo se estabilice.
21. Envío del comando **:INIT**, para inicializar el equipo en modo de medición y realizar la prueba eléctrica.
22. Accionamiento del Disparo (*Trigger*) para la ejecución de la medición.
23. Lectura de los valores obtenidos en la medición y almacenamiento de los datos en la variable **All_Data**.

24. Actualización del vector variable **Cdata**, mediante la extracción de cierto grupo de datos del vector **All_Data**.
25. Actualización del vector variable **Fsweep**. Esta operación se realiza mediante el almacenamiento del valor actual de la variable **Frequency** en el vector **Fsweep**.
26. Actualización del vector variable **Conductance**, mediante la extracción de cierto grupo de datos del vector **All_Data**.
27. Evaluación de la variable **Real_Time_Display**, esta variable toma la decisión de mostrar o no los resultados de los vectores en tiempo real, esto mediante el despliegue de gráficas.
28. Evaluación de las variables **Fstart** y **Fstop** para determinar los límites que se utilizan en el despliegue de las gráficas.
29. Incrementar una unidad al valor de la variable **I**, y regresar al paso número 12 hasta que la condición de salida sea satisfecha.
30. Desactivación de la fuente de polarización DC Bias.
31. Despliegue de gráficas en pantalla, independientemente si se ha activado o no la opción de gráficos en tiempo real.

4.4.2 Diagrama de flujo

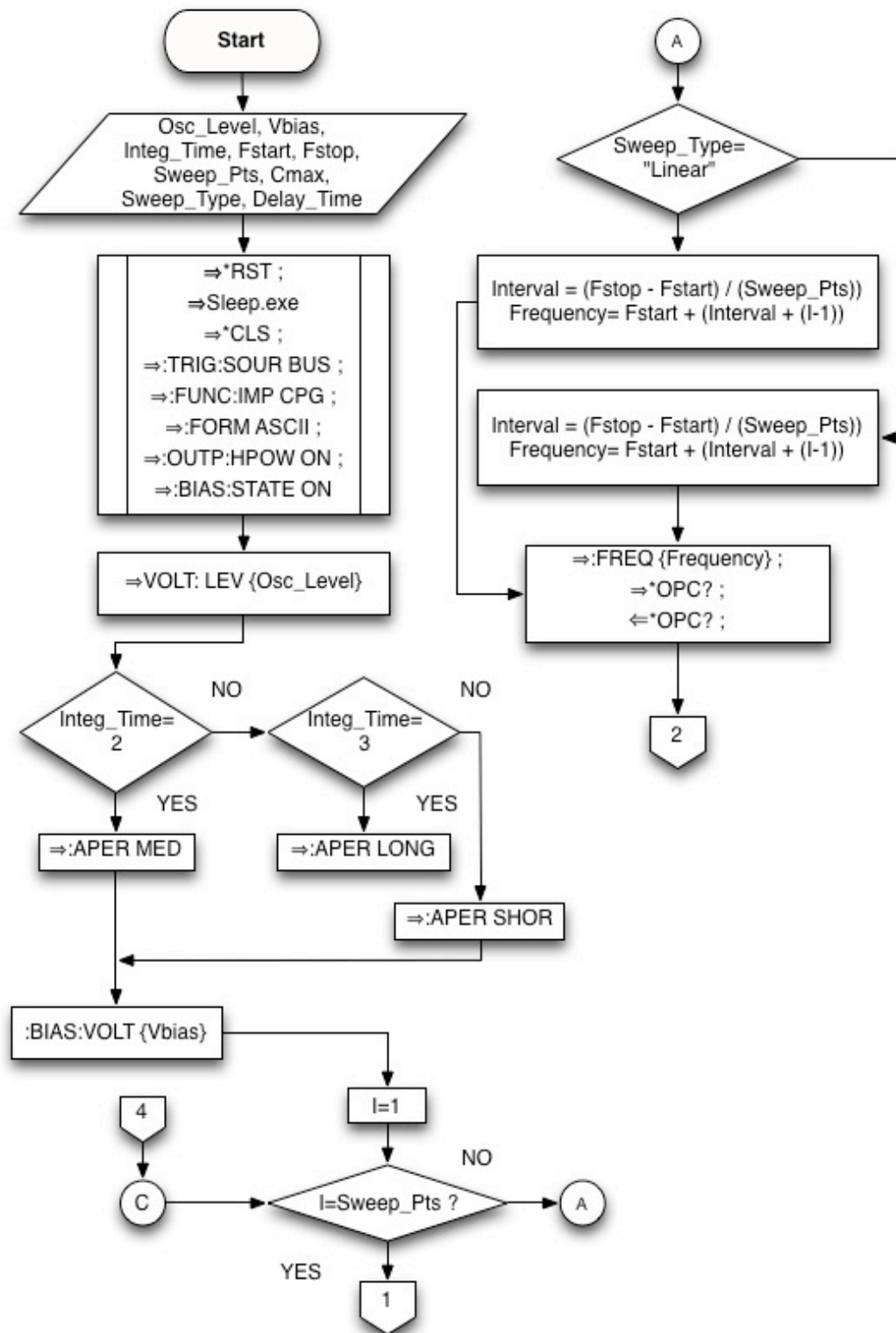


Fig. 31a. Diagrama de flujo de prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia – Frecuencia.

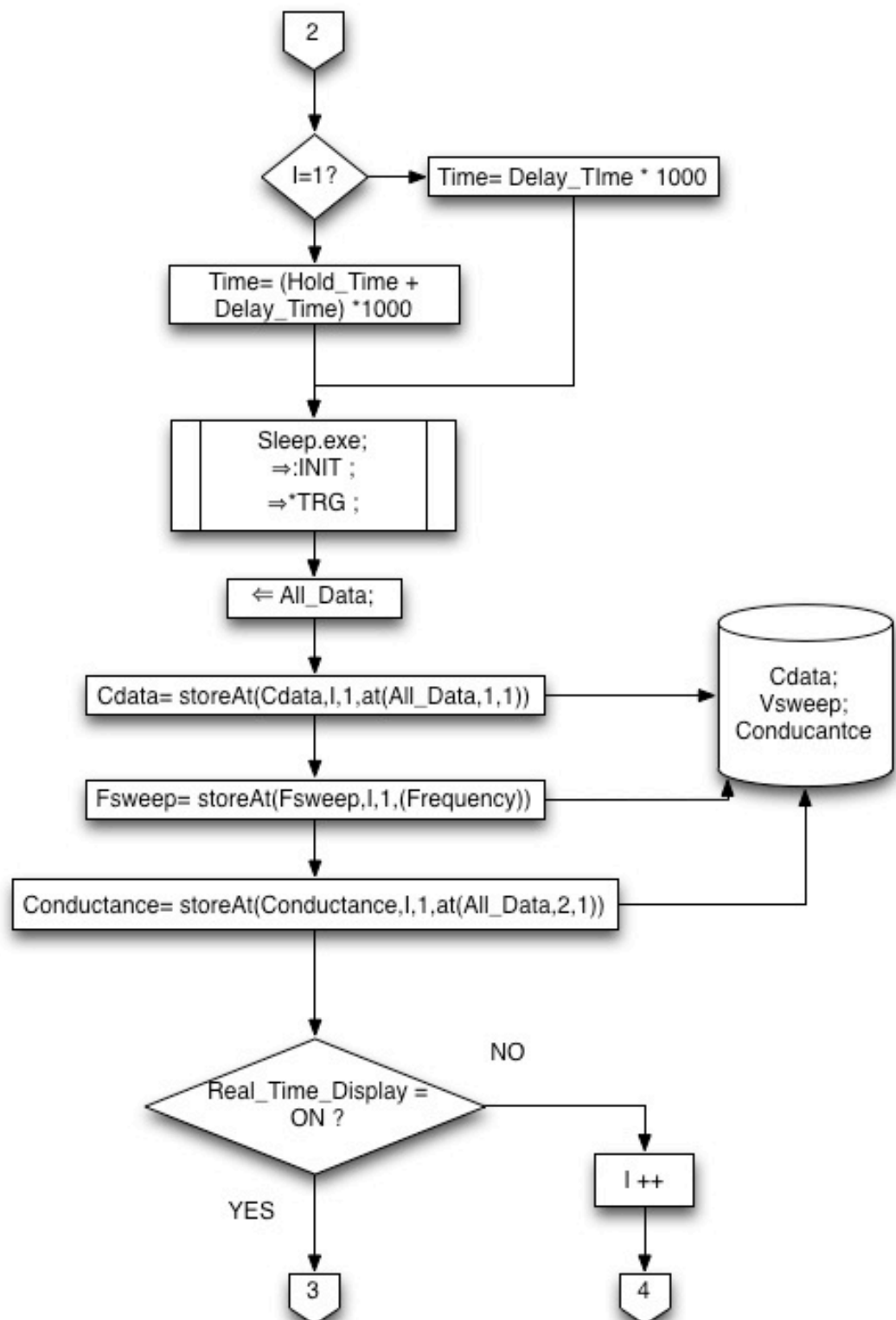


Fig. 31b. Diagrama de flujo de prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia – Frecuencia.

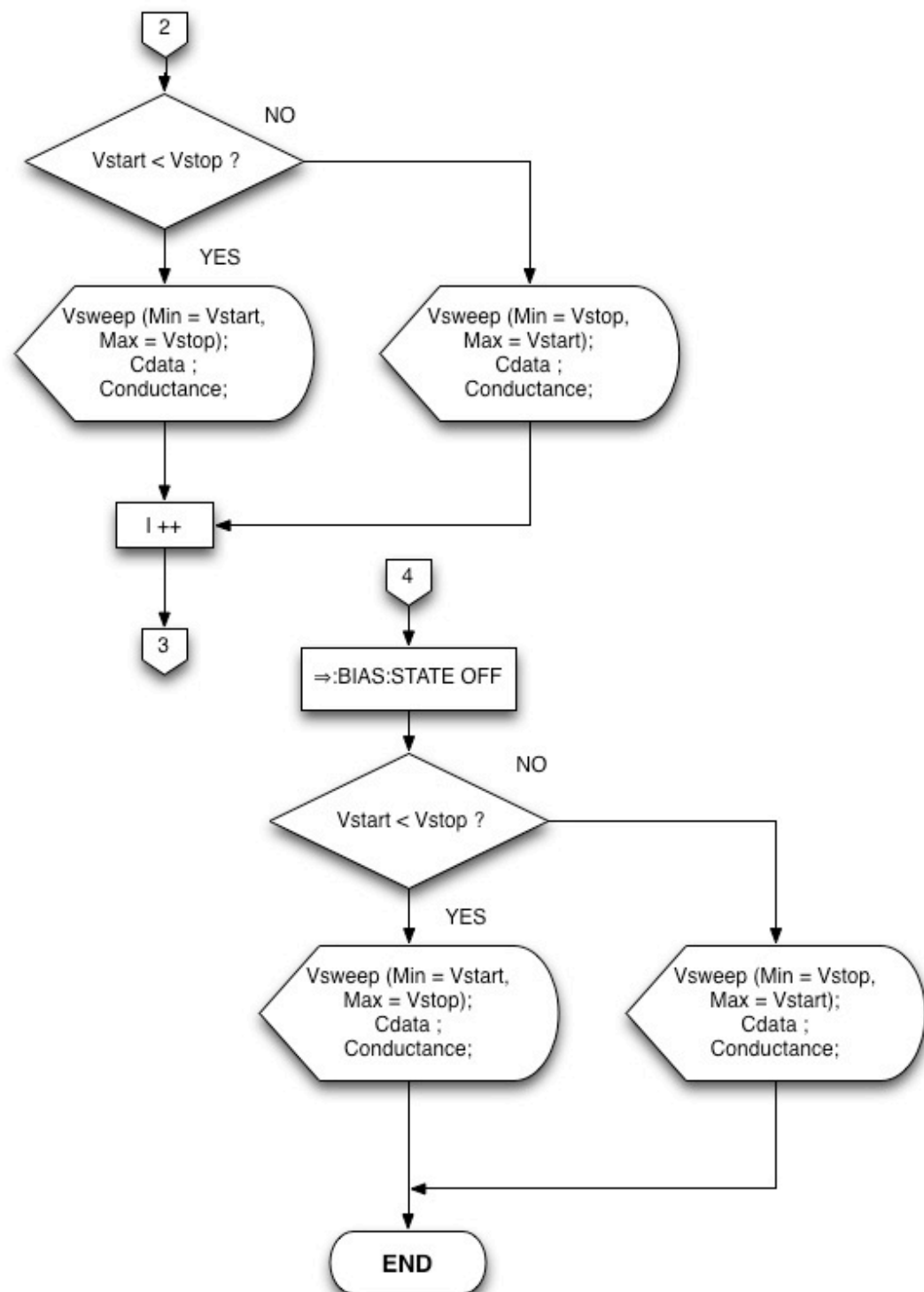


Fig. 31c. Diagrama de flujo de prueba eléctrica Capacitancia/Conductancia – Frecuencia.

4.4.3 Resultados experimentales

El método implementado de C/G - f para caracterización eléctrica, fue utilizado para estudiar la densidad de defectos en la interfaz de estructuras MOS que contienen nanocristales de silicio en la compuerta del dieléctrico. La **figura 32** muestra las mediciones de capacitancia y conductancia paralela equivalente medidas en un rango de frecuencias de 1-100 kHz, con tres voltajes de polarización (Bias) en la compuerta; $V_b = -0.3$, -0.35 y -0.4 V.

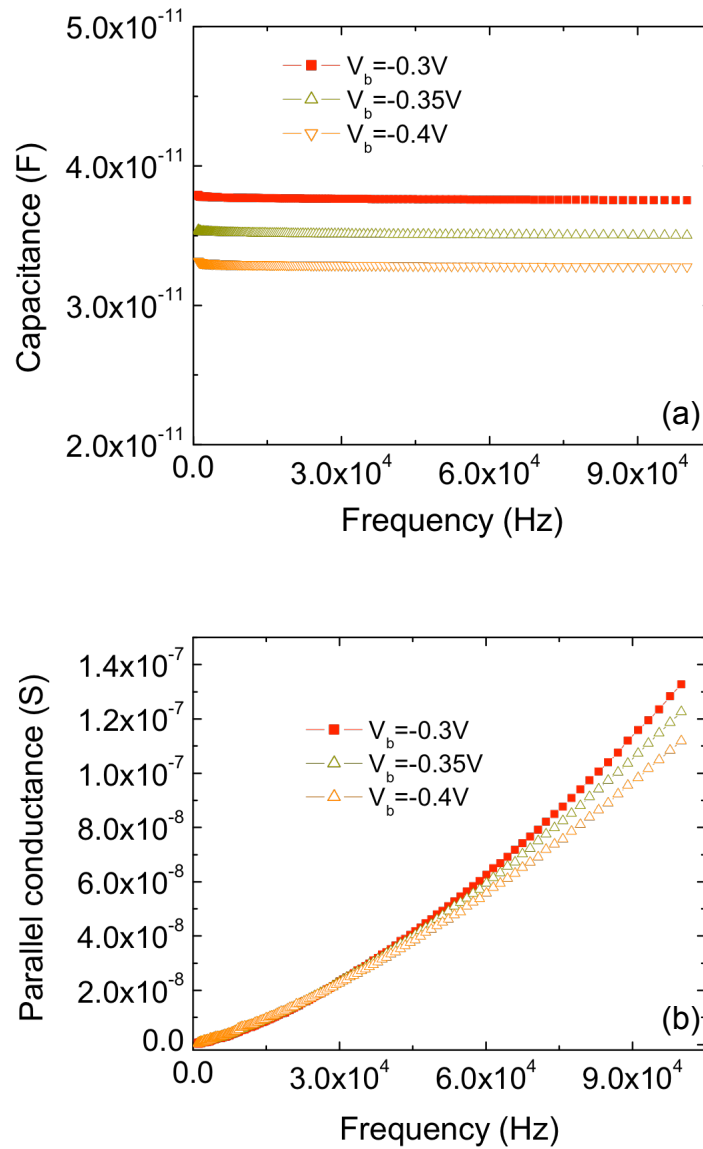


Fig. 32. Capacitancia, C (a) y Conductancia, G (b) de estructuras MOS que contienen nanocristales de Silicio. Medidas en un rango de frecuencia de 1-100 kHz a tres diferentes valores de polarización en la compuerta, $V_b = -0.3$, -0.35 y -0.4 V.

La **figura 33** muestra la dependencia G_p/ω en respuesta a la frecuencia, obtenida de la capacitancia y conductancia paralela medidas, aplicando el método descrito en la sección 4.4; para eliminar la reactancia del óxido. Antes de hacer este procedimiento de las curvas medidas se eliminó se hizo corrección para resistencia en serie del silicio. Las mediciones fueron efectuadas en un rango de frecuencia de 1-100 kHz con cuatro diferentes voltajes de polarización (bias) en la compuerta: $V_b = -0.25, -0.3, -0.35$ y -0.4 V. Utilizando las curvas obtenidas se calcula la densidad de estados en la interfaz. Para los defectos con energías cercanas al punto medio del *bandgap* del Silicio, correspondientes a $V_b = -0.25, -0.3, -0.35$ y -0.4 V, valores de D_{it} menores de $10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ fueron obtenidos. Las constantes de tiempo τ correspondientes tiene valores típicos en el rango de $2.5 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-5} \text{ s}$.

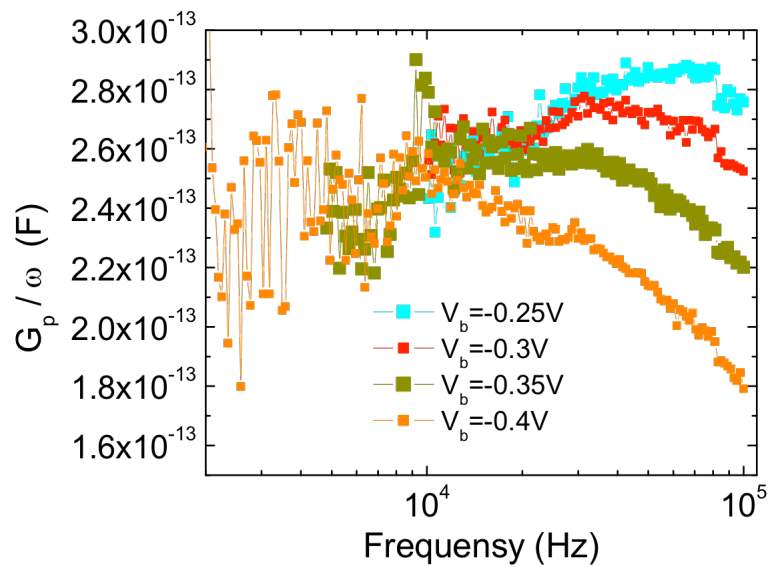


Fig. 33. Curvas G_p/ω vs Frecuencia obtenidas después de la sustracción de la reactancia del óxido de la capacitancia del óxido.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema computarizado para caracterización eléctrica de estructuras MOS. El sistema se encuentra basado en el analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A el cual permite un control óptimo y total del medidor de impedancias LCR Agilent E4980A.

Se han implementado códigos de programación y *layouts* para dos casos particulares. Estos casos cuentan con una amplia gama de aplicaciones en la caracterización eléctrica de estructuras MOS y se presentan a continuación:

1. Mediciones Capacitancia/Conductancia – Voltaje con parámetros de medición tales como: frecuencia, amplitud de señal de prueba, tiempo de integración, etc.
2. Mediciones Capacitancia/Conductancia – Frecuencia con parámetros de medición, como: voltaje de polarización aplicado (Bias), amplitud de la señal de prueba, tiempo de integración entre otros.

El sistema desarrollado proporciona las siguientes ventajas cuando es comparado con mediciones llevadas a cabo con el medidor de impedancias LCR Agilent E4980 de manera autónoma:

- Reducción de tiempo en *Setup*, y realización de las mediciones debido a la integración de una interfaz gráfica para el control y selección de parámetros de prueba.
- Procesamiento y análisis de resultados obtenidos en tiempo real ya que el sistema cuenta con despliegue de información gráfica de las pruebas realizadas.

Es posible señalar otras ventajas como:

- Experiencia en el manejo del analizador de dispositivos semiconductores Agilent B1500A. Este equipo puede ser utilizado en la creación de nuevos códigos y procedimientos para caracterización eléctrica de muestras específicas bajo las condiciones apropiadas.

- El conocimiento adquirido puede ser aplicado para el mejoramiento del sistema computarizado. Esto mediante la incorporación de otros instrumentos, incrementando la calidad y capacidad de la información medida.

- Los métodos desarrollados se integraron a la librería de pruebas eléctricas contenidas en el software EasyEXPERT, enriqueciendo de esta manera la diversidad de pruebas disponibles para la caracterización completa de estructuras MOS.

Los procedimientos desarrollados para caracterización eléctrica se han aplicado exitosamente en la caracterización de estructuras MOS que contienen nanocristales de silicio en el dieléctrico. Información de la calidad del dieléctrico relacionada con corriente de fuga, carga fija del óxido y defectos en la interfaz c-Si/SiO₂; ha sido obtenida mediante estos métodos. Se obtuvieron valores de $\sim 10^{10} \text{ cm}^2$ para carga fija en el óxido y para la densidad de defectos en la interfaz se obtuvieron valores de $\leq 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Estos resultados comprueban que los procedimientos usados para formar dieléctricos multicapas con nanocristales así como el proceso de recocido para crecer nanocristales no deteriora las excelentes propiedades de la interfaz c-Si/SiO₂ térmico.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se propone el desarrollo de pruebas personalizadas utilizando el módulo SMU para implementar mediciones de I-V en modos específicos. El desarrollo de este tipo de procedimientos son apropiados para aplicación del método de capacitancia cuasiestática en el caso de dieléctricos con corrientes de fuga, de alto coeficiente dieléctrico y de dieléctricos con alta densidad de defectos en el bulto.

Además de la expansión del sistema computarizado, integrando nuevos equipos de medición eléctrica, y de esta manera abarcar una amplia gama de información para la caracterización eléctrica óptima de películas dieléctricas delgadas.

6. Referencias

Agilent Technologies. *Agilent B1500 Device Analyzer Series Programming Guide*. June de 2010.

Agilent Technologies. *Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer User's Guide*. 7ma Edición. Octubre de 2008.

Agilent Technologies. *Agilent E4980A Precision LCR Meter User's Guide*. 6ta Edición. Octubre de 2007.

Agilent Technologies. «Customizing Agilent B1500A EasyEXPERT Application Tests.» *Application Note B1500-4*. September de 2006.

Alonso, M., and Edward J. Finn. *Física: Fundamentos Cuánticos y Estadísticos*. Fondo Educativo Interamericano, 1981.

Arias, Abraham, and Nicola Nedev. «Desarrollo de un sistema computarizado para caracterización eléctrica de estructuras semiconductoras.» *Memorias de 2do Congreso Nacional de Estudiantes de Posgrado del Instituto de Ingeniería*. Mexicali: Editorial UABC, 2010.

Brú, L. «Películas Delgadas.» In *Gran Enciclopedia RIALP*, by S. A. Ediciones RIALP. Madrid: Ediciones RIALP, S.A., 1991.

Bright, E. *An Introduction to Scientific Research*. 1st Edition. Dover Publitation, Inc., 1990.

Castaño, Enrique. «Propiedades Físicas de la Materia Condensada.» *Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra*. http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog/Dielecv2.pdf (accessed 9 de April de 2012).

Curiel, M.A. «Microstructural Characterization of Thin SiO_x Films Obtained by Physical Vapor Deposition.» *Materials Science and Engineering B* 174 (2010a): 132-136.

Curiel, M.A. *Propiedades de Estructuras Metal-Aislante-Semiconductor que Contienen Nanopartículas de Silicio*. Thesis, Mexicali: UABC, 2010b.

Dong, Ming, et al. «Dielectric property and electrical conduction mechanism of ZrO₂-TiO₂ composite films.» *J Mater Sci: Mater Electron* (Springer Science+Business Media), Abril 2012: 174-179.

Fowler, Richard J. *Electricidad: Principios y Aplicaciones*. Barcelona: Editorial Reverté, 1994.

González, Wenceslao, and Héctor L. Mancini. *Ciencia De Los Materiales*. Barcelona: Editorial Ariel, 2003.

Goswami, A. *Thin Film Fundamentals*. New Delhi: New Age International Publishers, 1996.

Hayt, William H., and John H. Buck. *Teoría Electromagnética*. 7th Edition. México: Mc Graw Hill Interamericana, 2006.

James, Kevin. *PC Interfacing and Data Acquisition: Techniques for Measurment, Instrumentation and Control*. 1st Edition. Newnes, 2000.

Menéndez, Amador. *Una Revolución en Miniatura: Nanotecnología al Servicio de la Humanidad*. Valencia: Publicacions de la Universitat de Valencia, 2010.

Montero, I. *Caracterización Eléctrica*. 29 de October de 2008. <http://www.icmm.csic.es/fis/espa/electrica.html> (accessed 9 de April de 2012).

National Instruments. «History of GPIB.» *Developer Zone*. 15 de Junio de 2009. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3419> (accessed 9 de Enero de 2012).

Nedev, N. «MOS Structures Containing Silicon Nanoparticles for Memory Device Applications.» *Journal of Physics: Conference Series* 112 (2008).

Niccolian, E.H., and J.R. Brews. *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*. New Jersey: Wiley, 1982.

Ocampo, Oscar. *Física general*. México: Thomson Editores, 2006.

Purceli, Edward M. *Electricidad y Magnetismo*. Barcelona: Editorial Reverté, 1988.

Sánchez, L.A. «Análisis Corriente-Voltaje y Capacitancia-Voltaje de Películas Delgadas de Ta₂O₅ Depositadas Mediante Espurreo por Radiofrecuencia.» *Congreso Nacional de Estudiantes de Posgrado del Instituto de Ingeniería*. Mexicali: Editorial UABC, 2009.

Sarakinos, K., et al. «On the pashe formation of sputtered hafnium oxide and oxynitride films.» *Journal of Applied Physics* (American Institute of Physics) 108, no. 014904 (Julio 2010): 8.

SCPI Constortium. *Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI), Volume 1: Syntax and Style*. Mayo de 1999.

Serway, Raymond A., and John W. Jewett. *Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna*. México City: Cengage Learning Editores, 2009.

Sze, S. M., and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd Edition. New York: Wiley, 2007.

Torrego, L. Gomez. *Nuevo Manual De Español Correcto*. Vol. I. Madrid: Arcos/Libros, 2002.

Wagendristel, Alfred, and Youming Wang. *An Introduction To Physics And Technology Of Thin Films*. World Scientific, 1995.

Wasa, Kiyotka, Makoto Kitabatake, and Hideaki Adachi. *Thin Film Materials Technology: Sputtering of Compound Materials*. William Andrew, Inc., 2004.

Yang, K. J., and C. Hu. *IEEE Trans. Electron Dev.* 46 (1999): 1500.

7. Tablas

Tabla A

MPSMU Output Voltage Ranges and Resolutions

Range	Output Value	Setting Resolution	Maximum Current
0.5 V	$0 \leq V \leq 0.5 \text{ V}$	25 μV	$\pm 100 \text{ mA}$
2 V	$0 \leq V \leq 2 \text{ V}$	100 μV	$\pm 100 \text{ mA}$
5 V	$0 \leq V \leq 5 \text{ V}$	250 μV	$\pm 100 \text{ mA}$
20 V	$0 \leq V \leq 20 \text{ V}$	1 mV	$\pm 100 \text{ mA}$
40 V	$0 \leq V \leq 20 \text{ V}$	2 mV	$\pm 100 \text{ mA}$
	$20 \text{ V} < V \leq 40 \text{ V}$	2 mV	$\pm 50 \text{ mA}$
100 V	$0 \leq V \leq 20 \text{ V}$	5 mV	$\pm 100 \text{ mA}$
	$20 \text{ V} < V \leq 40 \text{ V}$	5 mV	$\pm 50 \text{ mA}$
	$40 \text{ V} < V \leq 100 \text{ V}$	5 mV	$\pm 20 \text{ mA}$

Tabla B

MPSMU Output Current Ranges and Resolutions

Range	Output Value	Setting Resolution	Maximum Voltage
1 nA	$0 \leq I \leq 1.15 \text{ nA}$	50 fA	$\pm 100 \text{ V}$
10 nA	$0 \leq I \leq 11.5 \text{ nA}$	500 fA	$\pm 100 \text{ V}$
100 nA	$0 \leq I \leq 115 \text{ nA}$	5 pA	$\pm 100 \text{ V}$
1 μA	$0 \leq I \leq 1.15 \mu\text{A}$	50 pA	$\pm 100 \text{ V}$
10 μA	$0 \leq I \leq 11.5 \mu\text{A}$	500 pA	$\pm 100 \text{ V}$
100 μA	$0 \leq I \leq 115 \mu\text{A}$	5 nA	$\pm 100 \text{ V}$
1 mA	$0 \leq I \leq 1.15 \text{ mA}$	50 nA	$\pm 100 \text{ V}$
10 mA	$0 \leq I \leq 11.5 \text{ mA}$	500 nA	$\pm 100 \text{ V}$
100 mA	$0 \leq I \leq 20 \text{ mA}$	5 μA	$\pm 100 \text{ V}$
	$20 \text{ mA} < I \leq 50 \text{ mA}$	5 μA	$\pm 40 \text{ V}$
	$50 \text{ mA} < I \leq 100 \text{ mA}$	5 μA	$\pm 20 \text{ V}$

Tabla C**MPSMU Measurement Voltage Values and Resolutions**

Range	Measurement Value ^a	Measurement Resolutions	
		High Speed ADC	High Resolution ADC
0.5 V	$0 \leq V \leq 0.55 \text{ V}$	25 μV	0.5 μV
2 V	$0 \leq V \leq 2.2 \text{ V}$	100 μV	2 μV
5 V	$0 \leq V \leq 5.5 \text{ V}$	250 μV	5 μV
20 V	$0 \leq V \leq 22 \text{ V}$	1 mV	20 μV
40 V	$0 \leq V \leq 44 \text{ V}$	2 mV	40 μV
100 V	$0 \leq V \leq 100 \text{ V}$	5 mV	100 μV

Tabla D**MPSMU Measurement Current Values and Resolutions**

Range	Measurement Value ^a	Measurement Resolutions	
		High Speed ADC	High Resolution ADC
1 nA	$0 \leq I \leq 1.15 \text{ nA}$	50 fA	10 fA
10 nA	$0 \leq I \leq 11.5 \text{ nA}$	500 fA	10 fA
100 nA	$0 \leq I \leq 115 \text{ nA}$	5 pA	100 fA
1 μA	$0 \leq I \leq 1.15 \mu\text{A}$	50 pA	1 pA
10 μA	$0 \leq I \leq 11.5 \mu\text{A}$	500 pA	10 pA
100 μA	$0 \leq I \leq 115 \mu\text{A}$	5 nA	100 pA
1 mA	$0 \leq I \leq 1.15 \text{ mA}$	50 nA	1 nA
10 mA	$0 \leq I \leq 11.5 \text{ mA}$	500 nA	10 nA
100 mA	$0 \leq I \leq 100 \text{ mA}$	5 μA	100 nA