

SISTEMA DE CONTROL Y MEDIDA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS SOMETIDOS A RADIACIÓN DE NEUTRONES

J. Lozano Rogado, F.J. Franco Peláez, A. Paz López, J.P. Santos Blanco, J.A. Agapito Serrano
(e-mail: jesloz, monti, josepe, agapito@eucmos.sim.ucm.es)

Departamento de Física Aplicada III (electricidad y electrónica) Facultad de Ciencias Físicas.
Universidad Complutense de Madrid. Ciudad Universitaria s/n.
28040 MADRID. SPAIN. Tel. +34 91 394 4441. Fax.+34 91 3945196

Resumen

Se presenta en este trabajo un sistema de instrumentación y medida de parámetros característicos de componentes electrónicos sometidos a radiación de neutrones. El propósito principal de este sistema es obtener sus características de éstos al mismo tiempo que son irradiados por un haz de neutrones, y determinar los componentes del mercado más resistentes a dicha radiación. Posteriormente, serán utilizados para el desarrollo de la instrumentación de control del Large Hadron Collider en el CERN.

Palabras Clave: Instrumentación, control de parámetros, componentes electrónicos.

1 INTRODUCCION

El sistema que se describe en este trabajo tiene como objetivo controlar y medir todos los parámetros característicos de los componentes que se desean examinar bajo radiación. Para ello se disponen los circuitos en unas cajas que se sitúan correlativamente en un carril DIN. Éstas se introducen en una cavidad dentro de un reactor nuclear de investigación. En el reactor se provoca una reacción en cadena que genera un haz de neutrones que inciden sobre las cajas de los circuitos. Se puede observar en la figura 1 el núcleo del reactor en pleno funcionamiento. La luz azul que se observa se produce por el efecto Cherenkov [1].

Las irradiaciones se llevaron a cabo en el Reactor de Investigación del Instituto Tecnológico y Nuclear de Lisboa (Portugal). El reactor funcionaba a una potencia nominal de 1 MW. El flujo total alcanzaba un valor de $5 \cdot 10^{13}$ n/cm² en la placa central en cinco sesiones de 12 horas tras las que seguían otras 12 horas de descanso.

Se eliminaron del haz los neutrones térmicos por medio de una plancha de 0.7 cm de boro. La radiación gamma se redujo con una barrera de plomo de 4 cm de espesor. Las placas eran alejadas del

núcleo del reactor durante las horas de inactividad para reducir al máximo la radiación gamma residual. La dosis gamma total no superó gracias a esta precaución el valor de 1.2 kGy.

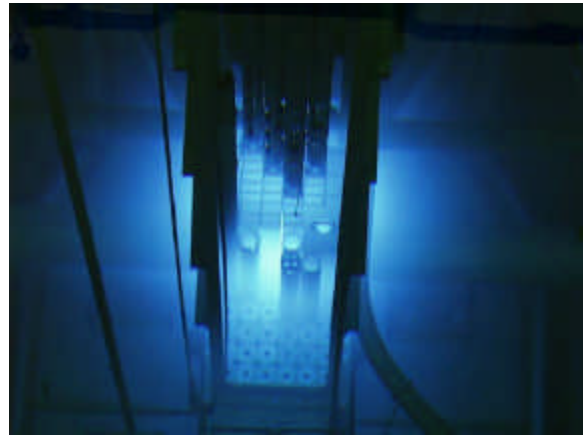


Figura 1: núcleo del reactor nuclear del ITN.

2 DAÑOS PROVOCADOS POR LA RADIACIÓN NEUTRONES

Cualquier componente electrónico que se encuentre expuesto a algún tipo de radiación sufre una fuerte degradación [2]. Este problema es importante cuando se requiere una alta fiabilidad en su funcionamiento.

Debido a que es muy costoso el desarrollo de componentes cuyo comportamiento bajo radiación esté garantizado, es recomendable el empleo de componentes comerciales, mucho más baratos, en los que se conozca con precisión la evolución de las características del componente mientras se degrada [3, 4].

2.1 DAÑOS EN SEMICONDUCTORES

Los daños provocados por la radiación en los semiconductores dependen del carácter ionizante o no ionizante de aquella.

La radiación ionizante más importante es la radiación gamma y los rayos X. La radiación ionizante crea un exceso de pares electrón-hueco en el semiconductor y las propiedades eléctricas del material se ven afectadas. Este tipo de alteración desaparece instantáneamente al cesar la exposición a la radiación ionizante y no deja ningún daño permanente. La creación de pares en los materiales dieléctricos es mucho más perjudicial. En estos materiales, como el SiO₂, los electrones tienen una alta movilidad en tanto que la de los huecos es extremadamente baja. Cualquier campo eléctrico puede arrastrar los electrones quedando una carga neta positiva en el aislante. Esta carga atrapada modifica la tensión umbral de transistores MOSFET o atrae electrones hacia la superficie creando canales que aumentan las corrientes de fuga en el componente. Tras un largo intervalo de tiempo, las cargas pueden acceder a la interfaz que separa el aislante del semiconductor creando nuevos estados superficiales que modifican las propiedades del semiconductor.

La radiación no ionizante, como es el caso de los neutrones, destruye la red cristalina del semiconductor. La interacción entre los núcleos y los neutrones crea vacantes, átomos intersticiales, centros de color, etc. El efecto de este daño es el siguiente:

- A) Creación de niveles permitidos dentro de la banda prohibida.
- B) Disminución de la vida media de portadores minoritarios
- C) Disminución de la movilidad de los portadores.
- D) Disminución de la concentración de electrones en beneficio de la de huecos.

Los transistores MOSFET y JFET son muy robustos frente a este tipo de radiación y son los elementos bipolares los más afectados. Se ha observado una disminución del coeficiente β de los transistores BJT, aumento de la corriente de fuga en las uniones PN, disminución de la emisión óptica, etc.

Ambos tipos de daños pueden combinarse. Por ejemplo, la radiación α o, en general, cualquier ión pesado puede destruir la red por impacto y, además, ionizar el semiconductor.

2.2 DAÑOS EN COMPONENTES COMPLEJOS Y EVOLUCIÓN DE PARÁMETROS

Un elemento complejo, como puede ser un amplificador operacional, un convertor, etc., sufrirá la degradación de sus componentes más sencillos. Este cambio se reflejará en la modificación de sus

parámetros. Se va a describir un sistema de control que almacene datos de forma detallada e ininterrumpida durante la irradiación. La determinación de cada parámetro requiere un circuito especial. Por este motivo, se han diseñado placas en las que se puede modificar de forma automática el circuito para la determinación de los parámetros de interés. Estas modificaciones se llevan a cabo con relés de inducción ya que los de estado sólido son muy sensibles a la radiación gamma. Un ejemplo es la placa diseñada para el estudio de los amplificadores operacionales:

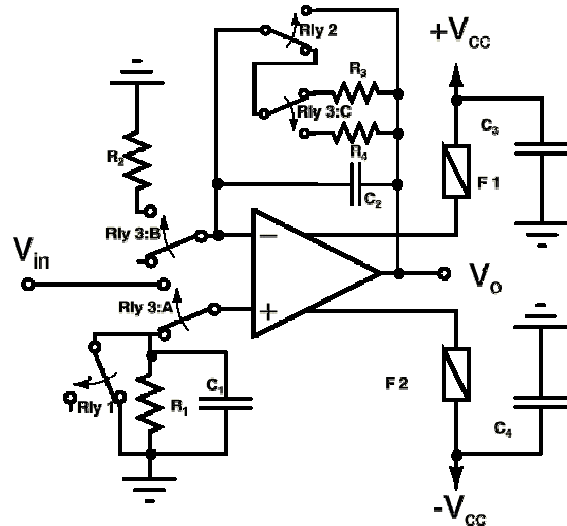


Figura 2: sistema de medida de Amplificadores Operacionales.

Con esta placa se puede determinar la ganancia en lazo cerrado, la tensión de *offset* en la entrada y las corrientes de polarización. Para ello, sólo hay que activar determinados relés y adoptar la red apropiada.

En los amplificadores de instrumentación, se midió la ganancia diferencial, la CMRR, la tensión de *offset* y las corrientes de polarización de la entrada. Asimismo, se ha medido la salida y el consumo de distintas referencias de tensión, la resistencia interna de *switches* analógico-digitales y el error de *offset*, de ganancia, DNL, INL y número de bits significativos de convertidores digitales-analógicos construidos en diversas tecnologías.

3 REQUISITOS DEL SISTEMA

El sistema desarrollado tiene que cumplir determinados requisitos que permitan al sistema controlar las conmutaciones necesarias para polarizar y, a su vez, caracterizar los distintos circuitos integrados mientras van recibiendo una dosis determinada de radiación (aproximadamente $3-9 \cdot 10^{13}$ neutrones/cm²)

Existen algunos problemas con la disposición de los circuitos dentro del reactor ya que, en las primeras exposiciones, los circuitos se colocaban en el fondo de la piscina de protección del reactor y las mangueras de los cables debían recorrer una larga distancia (más de 25m) hasta los instrumentos de control y medida, con lo que el ruido y el retardo introducido por los cables era importante pues las tensiones que había que medir eran, en algunos casos, del orden de mV. En siguientes exposiciones, se han dispuesto las cajas de componentes en una salida lateral del reactor de forma que se reduce bastante la longitud del cableado (4-5 m).

Otra característica a tener en cuenta es que el sistema debe permanecer estable a los cambios de la red de alimentación y a los posibles cortes que pudieran ocurrir en el suministro eléctrico.

Otras características que debe tener un sistema de control y medida como el que se describe son:

- Control de las tensiones y corrientes aplicadas a los circuitos.
- Control del punto de cada circuito en el que hay que aplicar las tensiones y medir las salidas.
- Incorpora sensores para medir la temperatura, fotodiodos para medir la radiación recibida y una cámara de ionización para medir la radiación gamma.
- Registro histórico de los parámetros medidos y de control.
- Interfaz gráfica y amigable.

4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

En el año 1998 se inició el proyecto de colaboración entre el CERN y la Universidad Complutense de Madrid para realizar pruebas a distintos dispositivos electrónicos bajo radiación de neutrones. La estructura del sistema encargado de esta tarea ha ido mejorando sensiblemente hasta llegar a la estructura actual que es la que se ha venido utilizando en las últimas irradiaciones.

En la figura 3 puede verse una fotografía de la instalación actual existente en el laboratorio. La instalación existente en el reactor es básicamente la misma ya que basta con llevar las cajas de componentes con los cables de conexión lo que permite una flexibilidad añadida.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.

Se ha diseñado y ejecutado una instalación flexible con el fin de ir incorporando las medidas de nuevos

dispositivos y en la que haya que realizar los menores cambios posibles en el sistema. En caso de añadir componentes nuevos para su análisis, lo más usual es que únicamente haya que modificar el programa de control e incluir alguna subrutina para medir el nuevo componente o en otros casos, como por ejemplo la última ampliación que consistió en la caracterización de Conversores Digital-Analógico simplemente hubo que añadir al ordenador una tarjeta digital que envía al DAC los datos que debe convertir.



Figura 3: sistema de control y medida en el laboratorio.

La instalación está constituida por los siguientes elementos que posteriormente se describen:

- Sistema de conmutación KEITHLEY 7002.
- Multímetro KEITHLEY 2002.
- Fuente de corriente programable KEITHLEY 236.
- Fuente de alimentación estabilizada.
- Ordenador personal con tarjetas de control.
- Mangueras de cables.
- Cajas con los circuitos y componentes que se van a analizar.

En la Figura 4 se muestra la estructura del sistema con las distintas conexiones entre los elementos del sistema, en el que las conexiones dibujadas en rojo corresponden a conexiones eléctricas entre los dispositivos, como alimentaciones, señales de control de relés, tensiones medidas, etc. y las líneas en color negro corresponden a los buses de control de los distintos elementos que conforman el sistema.

A continuación se describen brevemente los elementos del sistema:

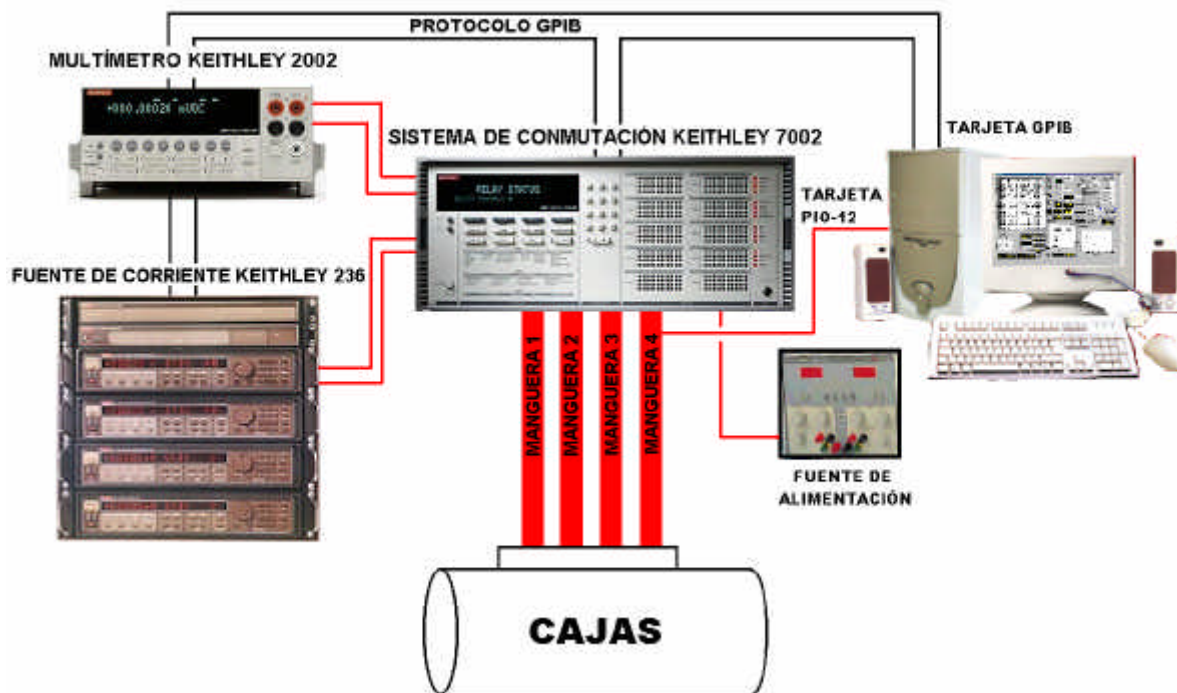


Figura 4: arquitectura del sistema

- **Sistema de conmutación KEITHLEY 7002:** es un conmutador matricial, consta de 10 bancos de 40 posiciones cada uno. En la actualidad sólo se utilizan 4 de los 10 posibles y su función es conectar cualquiera de estos canales entre sí, ya sea para proporcionar alimentación a los circuitos, polarizarlos, poner valores de tensión o corriente en las entradas o medir tensiones en puntos de interés. Estas conexiones las realiza automáticamente el programa de control.

- **Multímetro KEITHLEY 2002:** es un instrumento de precisión que se encarga de medir las magnitudes correspondientes en los puntos conectados con el 7002. El 2002 está preparado para medir tensiones, corrientes, frecuencias, etc. con una precisión de 8 1/2 dígitos y resistencias mediante el método de 4 puntas [5].

- **Fuente de corriente KEITHLEY 236:** es una fuente que proporciona la tensión o corriente especificada.

- **Fuente de alimentación estabilizada:** proporciona las tensiones necesarias para la alimentación.

- **Ordenador:** es un ordenador personal en el que se han instalado dos tarjetas de control: una tarjeta para el control de la GPIB y una tarjeta digital PIO-12 de KEITHLEY que proporciona los valores digitales para el análisis de los conversores digital-analógico.

- **Mangueras de cables:** se utilizan 4 mangueras de 37 cables de baja resistencia (0.075 ohm/m) y con una malla de apantallamiento de ruido. Conectan las

cajas de los circuitos con la fuente de alimentación, el sistema de conmutación y la PIO-12 del ordenador.

- **Cajas con los circuitos:** contienen los componentes que se van a analizar y elementos auxiliares que ayuden a la medida de los parámetros.

Todo el sistema está alimentado mediante un sistema de alimentación ininterrumpida para evitar que los cortes o variaciones en la magnitud de la alimentación afecten a las medidas tomadas.

4.2. CONEXIONES ENTRE LOS ELEMENTOS DE CONTROL.

La conexión entre los distintos dispositivos que forman el sistema se comunican entre ellos mediante la interfaz GPIB. La tarjeta GPIB del ordenador se encarga de enviar las ordenes necesarias dictadas por el programa de control a cada dispositivo para que desempeñe su función.

El megabús IEEE-488 fue desarrollado en 1978 para conectar y para controlar los instrumentos programables, y para proporcionar un interfaz estándar para la comunicación entre los instrumentos de diversas fuentes.

Durante la década de los 80, el estándar fue modificado, dando origen al IEEE-488.2. El original fue rebautizado como IEEE-488.1. El nuevo estándar proporcionó información más específica sobre el contenido y la estructura de los mensajes, así como de los protocolos de comunicación.

IEEE-488.2 es totalmente compatible con IEEE-488.1; el uso de un controlador que cumpla el estándar "488.2" asegura que será capaz de entender los protocolos de los nuevos instrumentos así como los de aquellos que siguen el 488.1.

En la actualidad, IEEE-488 es el método de comunicación entre instrumentos, ya sea en el campo de la ingeniería como en cualquier otro campo científico. La gran mayoría de los fabricantes dedicados a la instrumentación electrónica incluyen interfaces IEEE-488.

5 PROGRAMA DE CONTROL

El programa de control se realiza utilizando el programa Testpoint, que es un lenguaje orientado a objetos dedicado al control de instrumentación.

El programa se compone de una serie de objetos. Normalmente un objeto tiene asociado un valor o estado y una 'lista de acción'. La 'lista de acción' consiste en una rutina que se ejecuta cada vez que el valor o estado del objeto cambia. El evento o alteración del valor o estado del objeto, y por lo tanto la ejecución de su 'lista de acción', se puede producir de dos maneras posibles:

- Desde su correspondiente panel o ventana (evento "on line"), en cualquier momento de la ejecución del programa.
- Desde la propia ejecución del programa (evento programado), asociado a otros eventos.

El programa consta de varias subrutinas principales que gestionan la medida de cada parámetro o dispositivo y se ejecutan de forma secuencial. Un ciclo completo de medida se efectúa cada 10 minutos.

El panel del programa de control se muestra en la Figura 5, en el que se pueden observar varios elementos con distintas funciones: tablas donde se almacenan las últimas medidas tomadas, varios *displays* en los que se ven otras variables utilizadas recientemente. También se muestra la fecha y la hora en que ha comenzado el experimento y la actual. En la parte inferior derecha hay situado una gráfica que muestra la evolución temporal del parámetro que mide actualmente.

En la parte superior derecha tiene unos cuadros de texto en el que se pueden modificar algunos parámetros del programa de control como los tiempos de retardo de conexión de los relés, del ciclo de medida, el tiempo en que cambia los nombres de

los ficheros, el número de amplificadores, los rangos de las corrientes de entrada, etc.

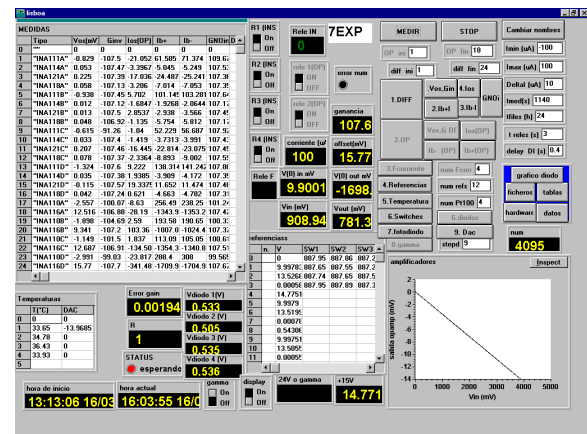


Figura 5: panel del programa de control

Los botones del panel de control tienen varias funciones: hay dos generales que son "medir" y "stop" que inician o paran el proceso de medida continua, los que están situados por debajo de ellos se utilizan para ejecutar sólo algunas subrutinas del programa y sólo una vez, no de manera continua como el anterior. También se disponen de unos interruptores para conmutar manualmente los relés y para activar algunas opciones del programa.

El programa también guarda en varios archivos los datos que ha tomado, y cambia la extensión de los mismos cada cierto tiempo y guarda en otros archivos la totalidad de los datos. El archivo escrito es en modo texto con separaciones en columnas para hacer más sencillo su posterior procesamiento.

6 RESULTADOS Y DISCUSION

Se ha encontrado que uno de los parámetros más afectados en los amplificadores operacionales es la tensión de *offset* de entrada. La ganancia en lazo cerrado no se modifica y sólo se observa incremento de las intensidades de polarización en los amplificadores de entrada bipolar y en algunos de entrada JFET. La familia más interesante es la bipolar de entrada DiFET y, dentro de esta familia, el modelo es más resistente cuanto mejor sea la respuesta en frecuencia.

Los amplificadores de instrumentación experimentan un progresivo descenso de la ganancia así como de la razón de rechazo del modo común. Por otra parte, la tensión de *offset* cambia aunque la evolución detallada depende de la tecnología del amplificador.

Se observa una disminución de la tensión de salida de todo tipo de referencia así como de la corriente de alimentación. Por otra parte, aumenta el coeficiente de regulación de la entrada y disminuye la corriente máxima.

La evolución de los DACs depende de la tecnología. Los componentes de tecnología CMOS son rápidamente destruidos por la radiación gamma residual. Los que emplean tecnología TTL rápida sufren una degradación más lenta mientras disminuye el número efectivo de bits. No se ha observado la completa destrucción de ninguna muestra.

6 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema flexible para la caracterización de dispositivos electrónicos bajo radiación. Este sistema permite monitorizar en tiempo real la degradación de los parámetros más importantes de dispositivos electrónicos comerciales sometidos a radiación de neutrones. Los resultados obtenidos permiten la selección de los dispositivos y tecnologías más adecuados para el desarrollo de instrumentación para ambientes hostiles.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el acuerdo de cooperación entre el CERN y la Universidad Complutense de Madrid por la CICYT (TIC98-0737) y parcialmente apoyada por el ITN.

Referencias

- [1] Jelley, J. V “Cherenkov Radiation and its applications”, Pergamon Press, 1958
- [2] G. Messenger, M. Ash “*The Effects of Radiation on Electronic Systems*”. New York, Van Nostrand Reinhold, Second Edition, 1992
- [3] William J. Perry, “*Specifications & Standards – A New Way of Doing Business*”. Secretary of Defence Memorandum to Secretaries of the Military Departments, Chairman of the Joint Chiefs of Staff and Under Secretaries of Defence, dated 29 June 1994
- [4] P.S. Winokur, G.K. Lum, M. Shaneyfelt, F. Sexton, G. Hash and L. Scott “*Use of COTS Microelectronic in Radiation Environments*” IEEE Trans. Nuc. Sci. December 1999, Vol 46, Page 1494-1503.

[5]L.J. Van der Paw, (1958) A method of measuring specific resistivity an Hall effect of discs of arbitrary shape, Philips Research Reports Vol.13, N°1, 1958.