

Desarrollo de un espectrómetro de partículas alfa de bajo costo

Oscar Baltuano*, Yuri Hernández, Pablo Mendoza, Eduardo Montoya

Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear,
Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Resumen

Se describe el diseño, fabricación y evaluación de un espectrómetro alfa de alta resolución y bajo costo que emplea como detector un diodo PIN con ventana desnuda y gran área. La electrónica analógica asociada está formada por módulos pequeños y posee prestaciones adecuadas para muestras con baja actividad. Se ha construido una cámara de vacío de pequeño volumen y el porta muestras correspondiente para mejorar la resolución del espectrómetro. El equipo ha sido utilizado para la determinación de la composición isotópica de muestras de uranio natural a muy bajas concentraciones, obteniéndose una resolución menor a 50 KeV para energías de 4,20 MeV (^{238}U) y 4,78 MeV (^{234}U). El diseño del espectrómetro permite conectarlo a cualquier módulo MCA comercial.

Development of a low cost alpha particle spectrometer

Abstract

The design, manufacturing and evaluation of a high resolution and low cost alpha particle spectrometer, is described. It uses a big size windowless PIN diode as a detector. The associated analogical electronics is comprised by small size modules and the instrument presents a very good performance for samples with low activity. A small vacuum chamber with its corresponding sample holder, have been built in order to improve the resolution of the spectrometer. The instrument has been used for the determination of the isotopic composition of natural uranium in low content geological samples and a resolution better than 50 keV, has been obtained for the energies of 4.20 MeV (^{238}U) and 4.78 MeV (^{234}U). The design of the instrument allows to connect it to any commercial multi-channel analyzer module.

1. Introducción

La medición precisa de la energía cinética de las partículas alfa, especialmente de aquellas emitidas por ciertos radioisótopos es de vital importancia en el campo de las mediciones nucleares y la instrumentación. La determinación de la composición isotópica de una muestra puede realizarse por diversas técnicas; sin embargo, el análisis mediante espectrometría alfa resulta ser, en muchos casos, más sensible y económico.

El elemento más importante de una cadena de espectrometría alfa es el detector. Usualmente se han utilizado detectores de silicio de barrera de superficie y detectores de silicio de iones implantados [1]. Detectores de este tipo se encuentran comercialmente disponibles en diferentes tamaños, pero son componentes bastante caros.

Por otro lado, en los últimos años se han realizado avances significativos en el desarrollo de dispositivos semiconductores de bajo costo para la detección de partículas

cargadas, como son los fotodiodos tipo PIN [1].

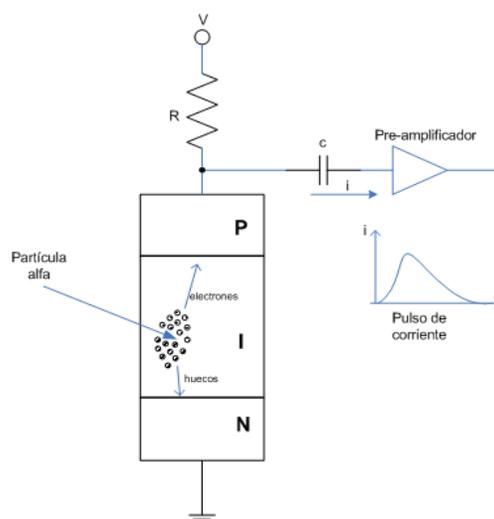


Figura 1. Representación esquemática de la operación de un diodo PIN.

* Correspondencia autor: obaltuano@ipen.gob.pe

Un dispositivo de este tipo posee una delgada capa de semiconductor extrínseco tipo p+ en la parte frontal y una delgada capa tipo n- en la parte posterior del sustrato. Entre ambas capas extrínsecas existe una capa de material intrínseco o capa-I (Figura 1). La región de depleción, que es la zona sensible del detector, se forma en la capa intrínseca del mismo y su espesor depende de la resistividad del sustrato y del voltaje de polarización inverso aplicado al diodo. En aquellos componentes cuyo sustrato posee una alta resistividad ($> 4\text{K}\Omega\text{-cm}$) la región de depleción se extiende desde la capa p+ hasta aproximadamente la mitad del espesor de la capa intrínseca cuando no se aplica voltaje de polarización. En estas condiciones, la aplicación de un voltaje de polarización inverso tan bajo como +5V puede extender la región de depleción a todo el espesor de la capa intrínseca [1].

2. Experimental

2.1 Sistema de detección

Para esta aplicación se ha utilizado como detector un fotodiodo PIN de silicio S3590-19 (Hamamatsu Photonics K.K.) el cual tiene un área sensible de 10 mm x 10 mm y un espesor máximo de la región de depleción de 0.3 mm. Este dispositivo posee una ventana sin recubrimiento (windowless) que permite el ingreso de las partículas alfa dentro del volumen sensible del mismo. Un voltaje de polarización inverso de +12V se aplica entre los terminales para incrementar el espesor de la región de depleción.

Este dispositivo se ha montado sobre la tapa de una cámara de vacío cilíndrica, que ha sido construida con doble finalidad: realizar las mediciones en un ambiente libre de aire y evitar que la luz incida directamente sobre el diodo PIN, debido a su alta sensibilidad a la radiación en el rango visible. La resolución de todo el sistema se ve fuertemente incrementada al extraer el aire circundante entre la fuente emisora alfa y el detector, evitando la dispersión y pérdida de energía de las partículas alfa al chocar contra las moléculas de aire.

Una bomba de vacío reduce la presión dentro de la cámara de medición hasta una presión absoluta de 10 mmHg. La cámara de vacío construida en aluminio posee dos aberturas,

una para la conexión de la manguera para extraer el aire interior y otra que permite montar un vacuómetro para la medición del nivel de vacío (Figura 2).

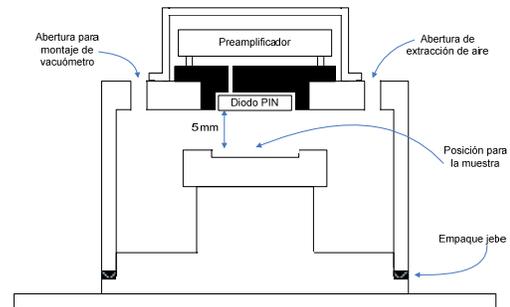


Figura 2. Cámara de vacío con montaje de diodo PIN y preamplificador.

El diodo PIN se encuentra montado sobre la tapa de la cámara de medición mediante un soporte de polietileno. Las uniones han sido selladas con silicona para evitar el ingreso de aire durante la operación. La construcción interior de la base de la cámara de medición incluye un soporte que permite colocar la muestra a medir a una distancia de 5 mm del detector. Diversos soportes pueden ser usados para aumentar o disminuir la distancia fuente-detector en caso fuera necesario.

2.2 Cadena de medición

La cadena de medición está formada por los módulos analógicos tradicionales de un sistema de espectrometría de energías, que incluye el preamplificador sensible a carga, el amplificador y conformador semi-gaussiano y el analizador multicanal (MCA) operando en modo PHA. Con la finalidad de obtener la mejor resolución posible, estos componentes fueron construidos con componentes de bajo ruido y montados de tal forma, que la contribución de ruido total se mantenga lo más baja posible.

El preamplificador sensible a carga está formado por un módulo híbrido de bajo costo Cremat CR-111 (<http://www.cremat.com>), que posee una ganancia de 0.15 V/pC y una carga máxima detectable por evento 1.3×10^8 electrones (21 pC) que garantiza la no saturación del preamplificador. Considerando que la energía media para producir un par electrón-hueco en el silicio es de 3.62 eV [2], tendremos que la carga producida por una

partícula alfa de 10 MeV que deposita toda su energía en el volumen sensible del detector es:

$$Q_D(10 \text{ MeV}) = 10e6 \times 1.6e-19 / 3.62 = 0.44 \text{ pC}$$

El módulo CR-111 se ha instalado sobre una tarjeta de evaluación Cremat CR-150, en la cual se encuentran montados los reguladores de voltaje para la operación del módulo CR-111, los componentes para la polarización del detector y el condensador para acoplamiento en AC entre el detector y el amplificador. Algunas resistencias con valores genéricos, que pueden ser puenteadas con diferentes valores han sido montadas por el fabricante en el circuito de polarización del detector. La elección de los valores adecuados es una solución de compromiso entre la corriente proporcionada por el detector y la contribución de ruido de las resistencias. En la Figura 3 se muestra la configuración utilizada para la polarización y acoplamiento entre el diodo PIN y el módulo preamplificador.

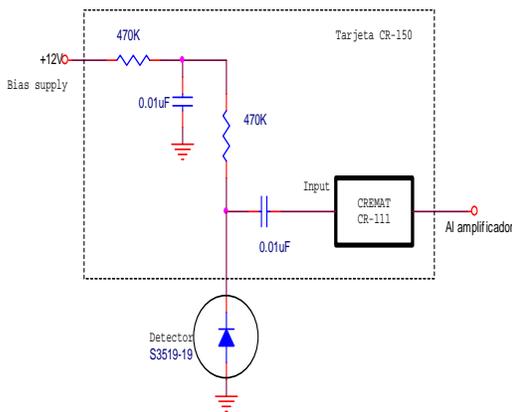


Figura 3. Configuración de voltaje de alimentación de diodo PIN y acople en AC con el preamplificador.

La tarjeta CR-111 permite el montaje de conectores BNC para las señales de entrada-salida y alta tensión, además de conectores tipo banana para los voltajes de alimentación. Estos conectores son voluminosos e incrementan innecesariamente el tamaño de la tarjeta. Con la finalidad de reducir al mínimo la contribución de ruido y problemas asociados con la alta impedancia de salida del diodo PIN, la tarjeta y el módulo preamplificador han sido montados en la parte superior de la tapa de la cámara de

vacío, muy cerca del diodo PIN. Para ello ha sido necesario cortar la tarjeta CR-111 eliminando la zona destinada a los conectores de señal y alimentación, realizando estas conexiones directamente sobre la tarjeta. Con estos ajustes, el tamaño de la misma ha sido reducido hasta 6.7 cm x 5.1 cm. Finalmente, una tapa de aluminio que incluye los conectores para la fuente de alimentación y la señal de salida ha sido instalada sobre el preamplificador para reducir las interferencias electromagnéticas (EMI).

La salida del preamplificador proporciona pulsos exponenciales que son entregados al amplificador constituido por un filtro pasabajo o conformador gaussiano incluido en un módulo híbrido Cremat CR-200-2us, el cual tiene una ganancia de 10 y una constante de conformación de 2us. Este módulo híbrido ha sido instalado sobre una tarjeta de evaluación Cremat CR-160 que contiene un cancelador de polos y ceros (P/Z), una etapa de ganancia gruesa y otra de ganancia fina además de los reguladores de voltaje para la polarización del módulo CR-200-2us. La tarjeta de evaluación y el conformador gaussiano son dispositivos de bajo costo y no incluyen las etapas de procesamiento analógico, usuales en equipos comerciales para reducir errores producidos por altas tasas de conteo: restaurador de línea de base (BLR) y rechazador de pulsos apilados (PUR).

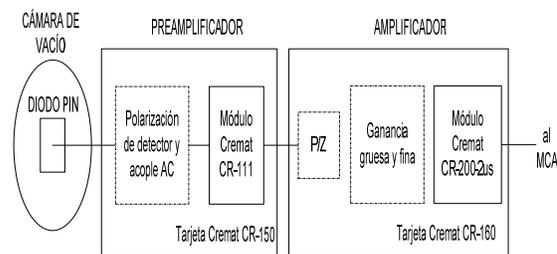


Figura 4. Cadena de medición.

El espectrómetro que ha sido desarrollado está destinado fundamentalmente para realizar el análisis de muestras alfa de baja o mediana actividad, por lo cual un circuito BLR y un circuito PUR no son necesarios y su utilización no acarrearía ninguna ventaja comparativa, sino incrementaría su costo significativamente. La Figura 4 muestra la cadena de medición utilizada asociada al detector.

La construcción modular del espectrómetro permite que la salida de pulsos gaussianos, entregada por el amplificador pueda ser conectada a cualquier analizador multicanal (MCA) comercial, para realizar la medición del espectro de energías de la fuente alfa.

3. Resultados y Discusión

El funcionamiento del espectrómetro ha sido verificado mediante dos fuentes de radiación diferentes. En una primera etapa se utilizó como fuente de radiación alfa una muestra de uranio natural depositada en forma de una película muy delgada sobre un disco de acero inoxidable previamente pulido y para lo cual se ha utilizado una nueva técnica de electrodeposición química [3]. El uranio natural posee tres isótopos: ^{234}U , ^{235}U y ^{238}U , cada uno de ellos emite radiación alfa con energías características de 4.20, 4.40 y 4.78 MeV, respectivamente. El espectro obtenido con esta muestra se observa en la Figura 5. El tiempo de medición fue de 80,000 segundos y se utilizó un MCA marca Canberra modelo Mutiport II configurado con 1024 canales. La distancia fuente-detector ha sido mantenida en 5 mm y se ha generado una presión absoluta de 10 mm Hg en la cámara de vacío. La resolución obtenida bajo estas condiciones es de 50 KeV medida a la FWHM del pico de 4.78 MeV de ^{234}U .

En una segunda etapa, se utilizó una muestra patrón estándar (MRC2001-053) de Am-241, bajo la mismas condiciones anteriores, pero con un tiempo de medición de 100,000 segundos, se obtuvo una resolución de 33 KeV en el pico principal de 5.485 MeV del Am-241.

La diferencia en la resolución medida en ambas pruebas se debe a las limitaciones en la adecuada preparación de la muestra de uranio natural, motivo por el cual se aprecia una degradación de la resolución en energía.

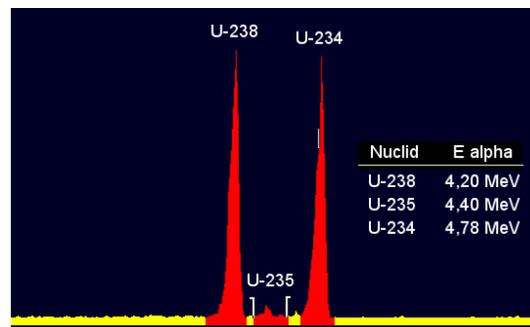


Figura 5. Espectro de energías alfa de una fuente de uranio natural obtenida con el espectrómetro alfa (tiempo de medición: 80,000 s).

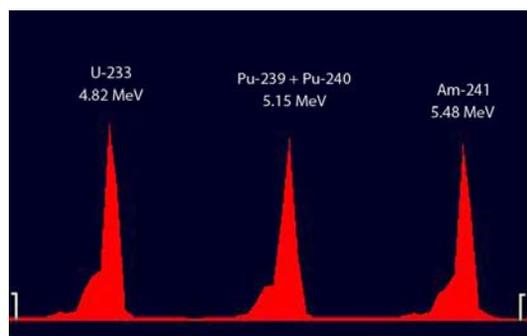


Figura 6. Espectro de energías alfa de la fuente patrón de Am-241 que además contiene cantidades significativas de ^{239}Pu , ^{240}Pu y ^{233}U (tiempo de medición: 100,000 s).

4. Referencias

- [1] Drndarevic V. A very low-cost alpha spectrometer. *Measurement Science and Technology*. 2008; 19 057001.
- [2] Knoll GF. *Radiation detection and measurement*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1989.
- [3] Lee MH, Kim CJ, Boo BH. Electrodeposition of alpha-emitting nuclides from ammonium oxalate-ammonium sulfate electrolyte. *Bull. Korean Chem. Soc.* 2000; 21(2):175-179.