

Estudio de la eficiencia cuántica de un detector de microbandas de silicio mediante la modelación matemática

Diana Leyva Pernía¹, Ana Esther Cabal Rodríguez², Ibrahim Piñera Hernández², Antonio Leyva Fabelo², Yamiel Abreu Alfonso², Carlos M. Cruz Inclán²

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC)

Carlos III y Luaces, Centro Habana, La Habana, Cuba

²Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN)

Calle 30, N° 502, entre 5ta y 7ma, Miramar, Playa. La Habana, Cuba

aleyva@ceaden.edu.cu

Resumen

Se presentan los resultados en la aplicación de la simulación matemática para el estudio de la eficiencia cuántica de un detector de silicio cristalino del tipo microbandas, destinado a imagenología médica y al desarrollo de otras aplicaciones como la autenticación y fechado de obras de arte. Se evaluó el efecto de la geometría fuente–detector, de la energía de los rayos X y del grosor de la zona muerta del detector en la eficiencia cuántica de este dispositivo. Los resultados de la simulación se compararon con el pronóstico teórico y con los datos experimentales disponibles, verificándose una adecuada correspondencia. Se concluyó que la configuración frontal es más eficiente para energías incidentes menores a los 17 keV, y que la configuración de borde es la recomendada para aplicaciones que requieran la detección de energías superiores a este valor. También se determinó que la disminución de la zona muerta del detector conduce a un considerable aumento de la eficiencia para cualquier valor de energía en el intervalo de 5 a 100 keV.

Study of silicon microstrips detector quantum efficiency using mathematical simulation

Abstract

The paper shows the results from the application of mathematical simulation to study the quantum efficiency of a microstrips crystalline silicon detector, intended for medical imaging and the development of other applications such as authentication and dating of cultural heritage. The effects on the quantum efficiency of some parameters of the system, such as the detector-source geometry, X rays energy and detector dead zone thickness, were evaluated. The simulation results were compared with the theoretical prediction and experimental available data, resulting in a proper correspondence. It was concluded that the use of frontal configuration for incident energies lower than 17 keV is more efficient, however the use of the edge-on configuration for applications requiring the detection of energy above this value is recommended. It was also found that the reduction of the detector dead zone led to a considerable increase in quantum efficiency for any energy value in the interval from 5 to 100 keV.

Key Words: *Si microstrip detectors, quantum efficiency, mathematical models, geometry, comparative evaluations, experimental data, theoretical data, X-ray spectroscopy*

Introducción

Los detectores semiconductores de radiaciones aventajan a otros tipos de detectores por su alta resolución energética y temporal, rápida respuesta, elevada estabilidad de la señal, pequeño tamaño, etc. Estos sensores en la actualidad son ampliamente utilizados en aplicaciones que van desde

las investigaciones básicas de la física de las altas energías, pasando por la imagenología médica, hasta el estudio no destructivo de las obras del patrimonio cultural.

El progreso actual de la microtecnología ha permitido la producción confiable y a gran escala de detectores semiconductores de diseños sofisticados, con un costo aceptable y excelentes propie-

dades (por ej. tiempos de respuesta menores de 5 ns, exactitud de localización de un evento de $5 \mu\text{m}$ en una coordenada, separación entre dos eventos inferior a $10 \mu\text{m}$, voltajes de polarización de menos de 100 V, e instalación relativamente simple).

Entre los detectores semiconductores de avanzada más extendidos hoy en día están los basados en silicio cristalino (c-Si) del tipo matricial y de microbandas [1-5].

Son precisamente estos detectores de microbandas los que se han tomado como objeto de investigación en este trabajo, donde, utilizando la modelación matemática de los procesos físicos de transporte de la radiación en el dispositivo se evalúa su eficiencia cuántica de detección y el impacto sobre esta propiedad de la disminución de la zona muerta de silicio con vistas a la futura optimización del propio detector.

Materiales y Métodos

Los detectores de silicio de microbandas, como el empleado en esta investigación, están conformados por un arreglo de bandas de Si tipo p+ insertadas en un cristal n, en cuyo contacto posterior se encuentra una fina capa n+ para crear el contacto óhmico. Cada una de las bandas del detector está conectada a la electrónica de lectura y la alimentación se aplica a través de una línea común. La Fig. 1 muestra una fotografía del sistema detector, donde se aprecia el dispositivo sensor en la parte superior de la imagen, así como su electrónica de lectura.

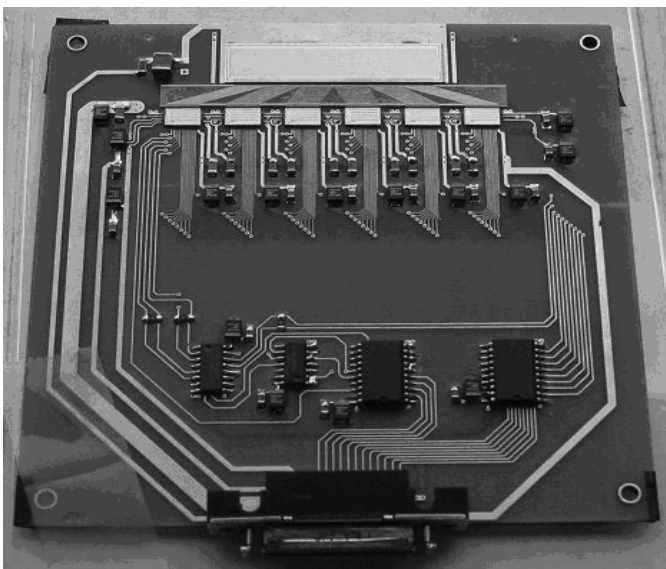


Figura 1. Fotografía del sistema de detección de 384 canales.

El detector estudiado posee $300 \mu\text{m}$ de espesor y 10 mm de largo. Presenta 384 microbandas de $70 \mu\text{m}$ de ancho, con una separación entre los ejes de dos bandas continuas (pitch) de $100 \mu\text{m}$ y grosor del electrodo de aluminio de $7 \mu\text{m}$. El espesor del Si correspondiente a la zona muerta (ZM) es $765 \mu\text{m}$. Este detector fue fabricado en el Instituto ITC-IRST en Trento, Italia, y se utiliza en experimentos de la física de las altas energías y aplicaciones de la física médica.

Existen dos tipos de configuraciones geométricas fuente-detector factibles de emplear para este tipo de dispositivo, la configuración frontal y la de borde, como se representa en la Fig. 2. Nótese que en la configuración frontal el detector se representa como una celda; esto se debe a que la radiación incidente es colimada, de modo que solo una pequeña área de la banda es irradiada como si fuera un píxel. En este caso la radiación incide de forma directa y perpendicular sobre las microbandas, mientras que en la configuración de borde la radiación incide sobre un borde del dispositivo de forma longitudinal con respecto a las bandas. Aunque no aparece dibujada en la Fig. 2, sí se tuvo en cuenta en la simulación la presencia de una lámina de aluminio de $70 \mu\text{m}$ de espesor que recubre la zona del detector expuesta a las radiaciones con el fin de protegerlo de la luz. También se consideraron en la simulación todas las regiones y medios adyacentes a cada píxel o banda estudiada.

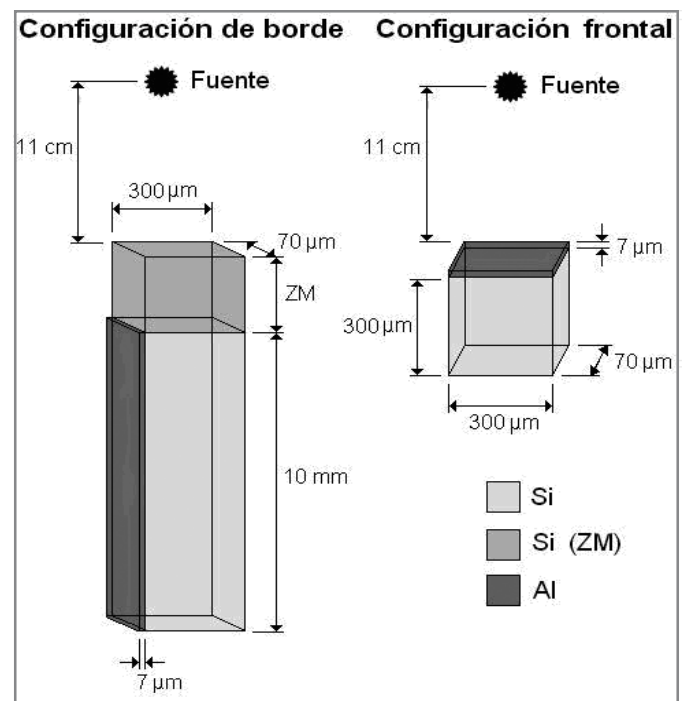


Figura 2. Representación esquemática de una banda en configuración de borde y un fragmento de ella en configuración frontal.

La eficiencia cuántica η caracteriza la capacidad del dispositivo para interactuar con los fotones que llegan a él [6]. En el caso del detector en estudio a las bajas energías utilizadas, donde el efecto de interacción predominante es el fotoefecto, y según la configuración geométrica empleada, esta se puede determinar teóricamente mediante las ecuaciones:

$$\eta_{frontal} = e^{-\mu_{Al}(E) \rho_{Al} x_{Al}} (1 - e^{-\mu_{Si}(E) \rho_{Si} x_g}) \quad (1)$$

$$\eta_{borde} = e^{-\mu_{Al}(E) \rho_{Al} x_{Al}} e^{-\mu_{Si}(E) \rho_{Si} x_{ZM}} (1 - e^{-\mu_{Si}(E) \rho_{Si} x_l}) \quad (2)$$

donde μ_{Al} , μ_{Si} , ρ_{Al} y ρ_{Si} son los coeficientes másicos de atenuación, y las densidades del Al y del Si respectivamente; x_{Ap} , x_{ZM} , x_g son los espesores del electrodo de Al más la capa protectora del mismo material, la ZM y la zona activa respectivamente; y x_l es la longitud de la banda. Los datos de estos coeficientes se tomaron de [7].

El sistema de códigos MCNPX 2.6b utilizado, consiste en un grupo de subrutinas para la simulación secuencial por Monte Carlo de los eventos probabilísticos individuales que componen los procesos de transporte de diferentes partículas, fundamentalmente neutrones, electrones y fotones en una configuración geométrica tridimensional dada y con una composición determinada de materiales [8].

En el experimento de simulación se utiliza la salida F1 que calcula el número de fotones que atraviesan una superficie predeterminada. Los datos así obtenidos permiten determinar la eficiencia cuántica bajo las mismas premisas que se expusieron al presentar las ecuaciones (1) y (2), solo que ahora:

$$\eta_{frontal} = \frac{N_{int}}{N_0} = \frac{N_{Al} - N_{ZA}}{N_0} \quad (3)$$

$$\eta_{borde} = \frac{N_{int}}{N_0} = \frac{N_{ZM} - N_{ZA}}{N_0} \quad (4)$$

donde N_{int} es el número de fotones que interactúa en la zona activa del detector, N_0 el número de fotones incidentes en el detector, N_{Ap} , N_{ZM} y N_{ZA} son el número de fotones que atraviesan las capas de Al, la zona muerta y la zona activa del detector respectivamente; y todas son magnitudes calculadas directamente por el MCNPX.

Para la simulación la fuente se situó a 11 cm del detector en ambas configuraciones y en cada experimento esta emitió 106 fotones monoenergéticos seleccionados en el intervalo de interés de entre

5 keV y 100 keV. Este número de fotones garantizó que los errores relativos de los resultados fueran menores del 1%.

En la configuración de borde, además de utilizar los valores originales de las dimensiones del detector, se realizaron las simulaciones para varios espesores de la zona muerta con el fin de evaluar la influencia de este parámetro en la eficiencia.

Los resultados para el caso de la configuración frontal se compararon con datos experimentales obtenidos en estudios efectuados con este detector en el marco de la colaboración existente entre el CEADEN, la Universidad de Turín y el InSTEC.

Resultados

Las curvas de la dependencia de la eficiencia cuántica con la energía para las configuraciones frontal y de borde calculadas a partir de los resultados de las simulaciones se muestran en la Fig. 3.

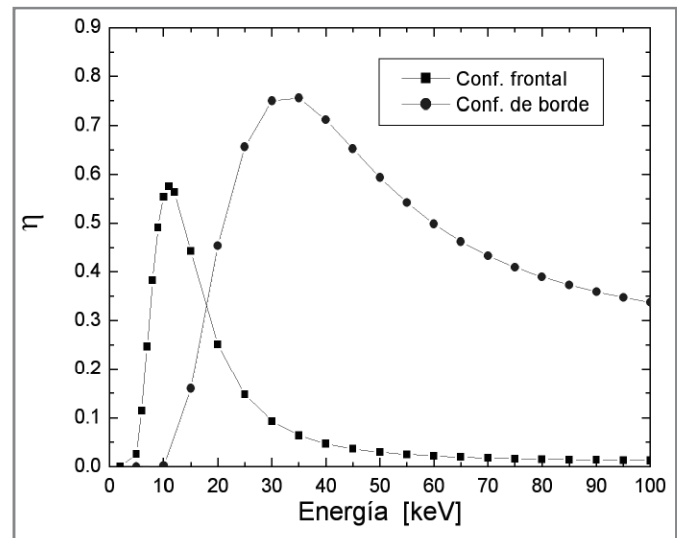


Figura 3. Dependencias de la eficiencia cuántica con la energía para las configuraciones frontal y de borde obtenidas de la simulación con el MCNPX.

En la configuración frontal se observa el rápido incremento de la eficiencia con la energía a partir de los 5 keV cuando los fotones logran alcanzar la zona activa, obteniéndose un máximo de aproximadamente 0,6 a los 11 keV. A partir de este valor de energía la eficiencia comienza a decaer rápidamente, llegando a ser prácticamente cero para energías superiores a 60 keV. Esto se debe a que en la configuración la zona activa posee un espesor de solo 300 μm , por lo que con el aumento de la energía, aumenta también la probabilidad de que los fotones incidentes atraviesen totalmente el dispositivo sin interactuar.

Para la configuración de borde, el aumento de la eficiencia se inicia solo a los 10 keV cuando ya la energía es suficiente para que los fotones comiencen a sobrepasar la zona muerta de silicio de 765 μm y puedan llegar al volumen activo del detector. El máximo de eficiencia se alcanza a 35 keV y este es en 25% superior al máximo alcanzado para la configuración frontal. El decrecimiento que se aprecia es lento y aún, al máximo valor de energía estudiado, la eficiencia se mantiene por encima de 0,32.

La Fig. 4 muestra la comparación entre las curvas de la eficiencia cuántica en función de la energía de los fotones incidentes calculada mediante la simulación con el MCNPX, la determinada teóricamente según [2] y la medida experimentalmente. Como se observa, las curvas simulada y teórica muestran una excelente coincidencia en todo el intervalo de energías, resultando el factor de la correlación de Pearson igual a 0,99996. Al comparar la curva experimental con las simulada y teórica se obtiene una buena correspondencia, especialmente para las bajas energías, que se verifica por un factor de la correlación de Pearson en ambos casos igual a 0,99876.

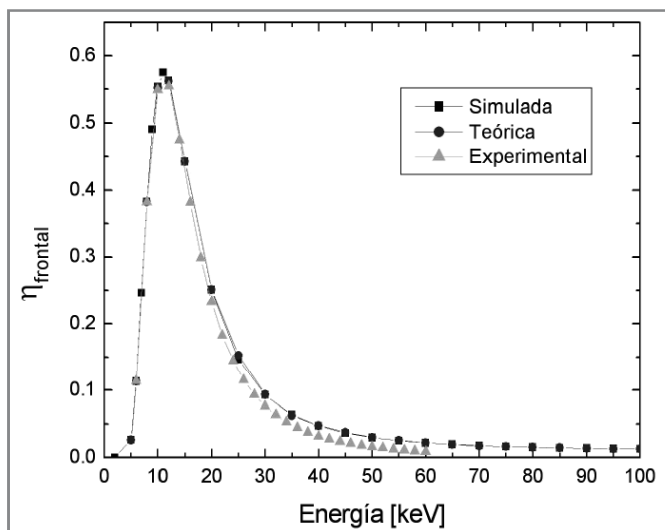


Figura 4. Comparación de los resultados simulados, teóricos y experimentales de la determinación de la eficiencia cuántica para la configuración frontal.

Como se aprecia en la Fig. 3, la influencia de la ZM en la eficiencia cuántica del detector empleado en configuración de borde es muy significativa, pues de manera directa influye en el desplazamiento del máximo hacia las altas energías. La ZM no se puede obviar en la construcción del detector, pues sobre ella es que se construye el anillo de guarda, cuya función es la colección de las corrientes de fuga que constituyen una de las principales fuentes

de ruido del dispositivo. Sin embargo, se puede estudiar la posibilidad de disminuir el tamaño de esta ZM y su efecto en la eficiencia cuántica. Para contribuir con ese estudio se procedió a evaluar la η mediante la simulación para diferentes valores de espesor de la ZM seleccionados según las posibilidades reales constructivas (60 μm y 20 μm). La Fig. 5 presenta las curvas de η_{borde} simulada en función de la energía para tres valores de la ZM.

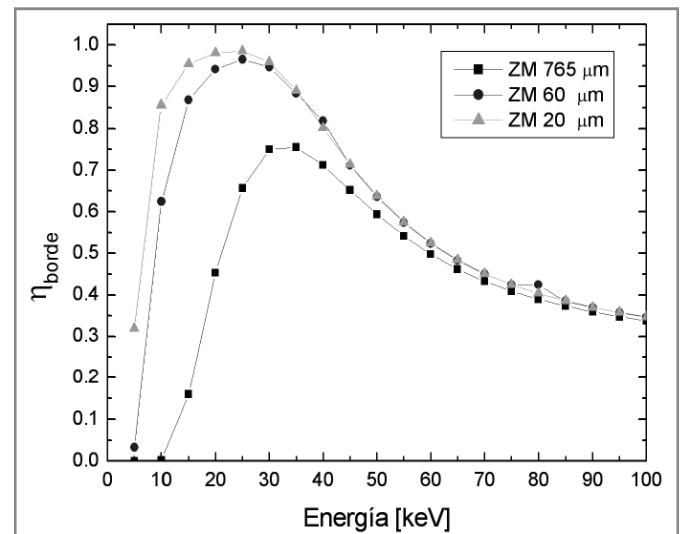


Figura 5. Dependencia con la energía de la eficiencia cuántica en configuración de borde para los distintos espesores de zona muerta.

Se observa que para los espesores de ZM de 60 μm y 20 μm hay un apreciable aumento de la eficiencia en el intervalo de energías entre 5 keV y 40 keV, especialmente para energías menores a 30 keV, llegando a alcanzar eficiencias cercanas a 0,99 para 20-25 keV. Este resultado indica que trabajar en la disminución de la ZM es importante si se quiere alcanzar una alta eficiencia de la configuración de borde a energías de los rayos X como las del Cu (8,04 keV), el ^{109}Cd (22,16 keV) y sobre todo el más extendido en la radiografía médica, el Mo (~19,6 keV).

En la Fig. 6 se muestra el cálculo de la eficiencia cuántica del detector en configuración de borde para diferentes valores de ZM, a una energía fija que se tomó igual a 35,5 keV y que se corresponde con el máximo de la eficiencia alcanzado en el detector cuando la zona muerta es 765 μm .

Además se aprecia una dependencia lineal entre la eficiencia cuántica y el grosor de la ZM, aumentando de manera monótona la primera con la disminución de la segunda. La eficiencia cuántica de detector alcanza 23% de incremento para

20 μm de ZM con respecto al grosor real de esta. Teniendo en cuenta que es precisamente la ZM donde está ubicado el anillo de guarda, la demostración de la conveniencia definitiva de una disminución substancial de la zona muerta pasa por determinar el efecto que tendría este proceder sobre el ruido del sistema asociado a las corrientes de fuga.

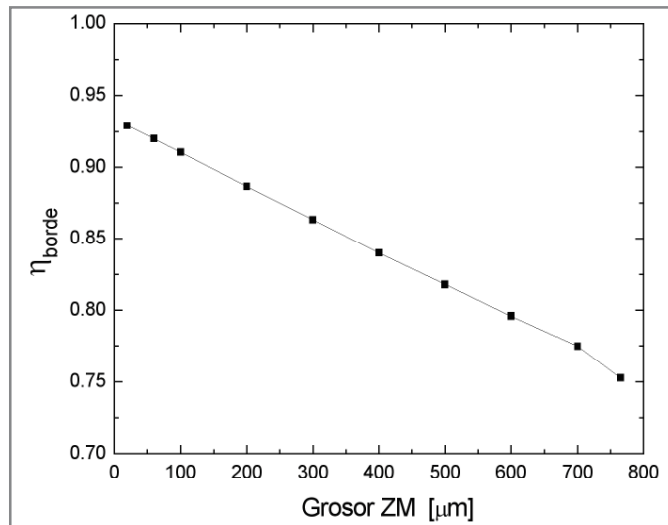


Figura 6. Eficiencia cuántica de la configuración de borde en función del grosor de la zona muerta para una energía de 35,5 keV.

Conclusiones

Teniendo como objetivo inicial de esta investigación el estudio de la influencia de algunos parámetros característicos sobre la eficiencia cuántica de detectores de Si cristalino de microbandas, y utilizando para ello la simulación matemática del transporte de la radiación en la materia, se arribaron a las siguientes conclusiones:

Los resultados de la simulación para la configuración fuente-detector del tipo frontal se compararon con el pronóstico teórico y con los datos experimentales disponibles, verificándose una buena correspondencia. Al utilizar detectores con espe-

sores de zona muerta convencionales es más eficiente utilizar la configuración frontal para energías incidentes menores a los 17 keV, mientras que para aplicaciones que requieran la detección de energías superiores a este valor resulta más recomendable el empleo de la configuración de borde. La disminución de la zona muerta del detector se acompaña de un aumento de la eficiencia en la configuración de borde. Para grosores de zona muerta de 20 μm y energía de los fotones de 35,5 keV, la eficiencia cuántica llega a ser hasta 23% superior que la que caracteriza al mismo detector pero con la zona muerta de 765 μm .

Referencias Bibliográficas

- [1] ALEKSEEV AG, BELOV AM, ZABRODSKII VV. A 16 \times 16 hybrid matrix array detector for visualizing XUV plasma radiation. *Instruments and Experimental Techniques*. 2010; 53(2): 209-212.
- [2] BERGAMASCHI A, CERVELLINO A, DINAPOLI R, et al. Photon counting microstrip detector for time resolved powder diffraction experiments. *Nucl. Instrum. and Methods in Phys Res Section A*. 2009; 604(1-2): 136-139.
- [3] FERNÁNDEZ M, DUARTE J, GONZÁLEZ J, et al. Infrared-transparent microstrip detectors". *Nucl Instr and Meth in Phys Res Section A*. 2009; 598(1): 84-85.
- [4] PARZEFALL U, DALLA G, ECKERT S, et al. Silicon microstrip detectors in 3D technology for the sLHC. *Nucl Instr and Meth in Phys Res Section A*. 2009; 607(1): 17-20.
- [5] LEYVA A, MONTAÑO LM, DÍAZ CC, et al. Empleo de detector semiconductor de c-Si del tipo microbandas en la obtención de imágenes radiográficas digitales de maniqués y muestras biológicas de mamas. *Revista Mexicana de Física*. 2009; 55(4): 327-331.
- [6] KNOLL GF. *Radiation detection and measurement*. 3rd edition. John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [7] Base de datos XCOM de NIST [en línea]. <<http://physics.nist.gov/PhysRefData>> [consultado: 12-07-2010].
- [8] BRIESMEISTER JF. *MCNPXTM User's Manual*. Los Alamos National Laboratory, 2008.

Recibido: 14 de septiembre de 2010

Aceptado: 28 de abril de 2011