

Implementation of an ionizing radiation detector based on a FPGA-controlled COTS CMOS image sensor

Martín Pérez, Fabricio Alcalde, Miguel Sofo Haro, Iván Sidelnik, Juan Jerónimo Blostein, Mariano Gómez Berisso, y José Lipovetzky*

Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche, CONICET

*CNEA, Member IEEE

Email: martin.perez@ib.edu.ar

Resumen—This work presents the development and implementation of an ionizing radiation detector based on a commercial off the shelf CMOS image sensor and a FPGA. The response of the system was tested in irradiations with gamma photons, beta and alpha particles using different configurations of the image sensor. Finally, we analyze the possible uses of such configurations in the discrimination of events produced by alpha particles in mixed radiation fields.

Index Terms—Radiation detectors; FPGA; COTS CMOS sensors

I. INTRODUCCIÓN

La detección de radiación ionizante tiene importantes aplicaciones en radioprotección, medicina, estudio de la materia condensada, industria, seguridad en fronteras, vigilancia ambiental, etc. Los sistemas tradicionales para la detección de radiación ionizante están constituidos por tubos Geiger, cámaras de ionización, detectores de superficie, sistemas centelladores, fotomultiplicadores, etc. En general, estos sistemas ocupan grandes volúmenes, poseen costos elevados, y presentan consumos de potencia muy altos, estas desventajas reducen su campo de aplicación [1] [2].

En trabajos anteriores nuestro grupo de investigación presentó el desarrollo de una técnica de detección de radiación ionizante basada en sensores de imagen comerciales con tecnología CMOS [3] [4]. Este tipo de sensores de imagen, que utilizan matrices de píxeles APS (*Active Pixel Sensor*) son ampliamente empleados en la industria electrónica de consumo masivo en cámaras de fotografía, teléfonos celulares, computadoras, etc. Los resultados presentados en dichos trabajos mostraron muchas de las capacidades de los sensores, y permitieron desarrollar una técnica de medición. En este artículo se presenta el diseño y la implementación de un detector de radiación ionizante basado en un sensor de imagen comercial CMOS y una placa FPGA. La ventaja de utilizar una FPGA, es que mediante máquinas de estado es posible controlar de manera predecible los tiempos de integración, y la ganancia de los amplificadores de los píxeles.

Este trabajo fue financiado con los PICT 2014-1966, PICT 2015-1644 y el PIP CONICET 2011-0552.

Diferentes trabajos han abordado la detección de radiación ionizante empleando dispositivos semiconductores. En los trabajos [5], [6], y [7] se presenta el diseño y el uso de una matriz de píxeles APS diseñada especialmente para el experimento ALICE del CERN. El trabajo [8] muestra el chip “Medipix2”, que es un detector híbrido especialmente diseñado para la detección de partículas cargadas.

La referencia [9] describe un conjunto de detectores construido en un proceso CMOS de alta tensión. Dicho proceso permite aplicar muy alto voltaje para crear zonas de vaciamiento profundas en el chip. De esta forma, se puede coleccionar mayor cantidad de carga que en los sensores convencionales. Los trabajos [10], [11], y [12] presentan el diseño y la fabricación de un detector llamado “MIMOSA” (*Minimum Ionising particle MOS Active pixel Sensor*) que utiliza una delgada capa epitaxial para mejorar la colección de carga. En un reciente trabajo se muestra que se pueden detectar neutrones térmicos y epitérmicos con alta resolución espacial mediante el recubrimiento de un sensor de imagen CCD con una capa de conversión de boro [13]. En todos los trabajos mencionados anteriormente se muestra la fabricación de circuitos integrados especialmente diseñados para la detección de radiación ionizante.

Por otra parte, sólo unos pocos trabajos han abordado el uso de sensores comerciales como detectores de partículas cargadas. En el trabajo [14] se estudia la respuesta de sensores de imagen comerciales CMOS para su utilización como detectores de rayos X. El mismo grupo presentó un estudio de la respuesta de los chips para el uso en dosimetría y para la detección de protones [15] [16]. En [17], se propone el uso de cámaras de teléfonos celulares para detectar rayos cósmicos y se estudia la respuesta de los sensores con diferentes tipos de radiación.

El uso de sensores comerciales tiene importantes ventajas con respecto a los circuitos integrados diseñados *ad hoc* para una aplicación específica. La principal ventaja es el bajo costo de cada chip, que en el caso de los sensores utilizados en este trabajo, ronda las decenas de dólares estadounidenses. La utilización de este tipo de dispositivos, junto con un adecuado pro-

cesamiento de los datos adquiridos, permitiría la fabricación de dosímetros personales económicos para la protección de los trabajadores en instalaciones nucleares, centros de imágenes médicas, y centros de radioterapia. Por otro lado, el bajo costo de este tipo de sensores vuelve accesible la construcción de arreglos de detectores que posean grandes superficies. Estos arreglos podrían servir para la caracterización de haces de radioterapia, para realizar neutrografías, como así también para realizar controles aduaneros.

Los circuitos diseñados para aplicaciones especiales (ASIC), son difíciles de conseguir, y frecuentemente su acceso se encuentra restringido por regulaciones contra el tráfico internacional de armas, que pueden considerar a estas tecnologías relevantes desde un punto de vista de la seguridad y defensa. A diferencia de los ASIC, los sensores de imagen comerciales están disponibles en el mercado y pueden ser fácilmente adquiridos. Por otra parte, el proceso de diseño de dispositivos basados en sensores comerciales es más simple, debido a que los mismos están bien documentados, y existe soporte de los fabricantes. En la siguiente Sección, se describirá la interacción entre un *Active Pixel Sensor* y la radiación ionizante, mientras que en la Sección III se presentará la técnica de detección utilizada. En la Sección IV, se describirá el detector desarrollado. Por último, se mostrará la respuesta del sistema a la radiación, los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo.

II. INTERACCIÓN DE LOS *Active Pixel Sensor* Y LA RADIACIÓN IONIZANTE

La interacción entre un APS y la radiación comienza cuando una partícula ionizante (por ejemplo una partícula cargada) penetra en la superficie del semiconductor. A lo largo de la trayectoria de la partícula, se produce una distribución radial de pares electrón-hueco. Si la trayectoria de la partícula atraviesa la zona de vaciamiento del fotodiodo, los portadores son rápidamente colectados (alrededor de unos picosegundos) por el campo eléctrico presente en la juntura compensando a la carga almacenada en la misma. Como resultado, se produce una disminución en la tensión existente entre los terminales del fotodiodo, que es permanente si el mismo se encuentra desconectado de la alimentación y es temporaria cuando está siendo alimentado.

Fuera de la zona de vaciamiento, el desequilibrio de carga induce una distorsión temporaria del potencial en forma cónica a lo largo de la trayectoria de la partícula. Esto se traduce en una corriente de arrastre que lleva los portadores libres dentro de la zona de vaciamiento, y produce aun más colección de carga en la juntura. El efecto ocurre en un periodo muy corto de tiempo (decenas de picosegundos), y se completa cuando la distorsión en el potencial se suaviza [18] [19] [20] [21]. Por último, las cargas que se generan en el interior del sustrato se difunden y se produce más colección de carga en el píxel en donde se originó el evento y también en los píxeles aledaños.

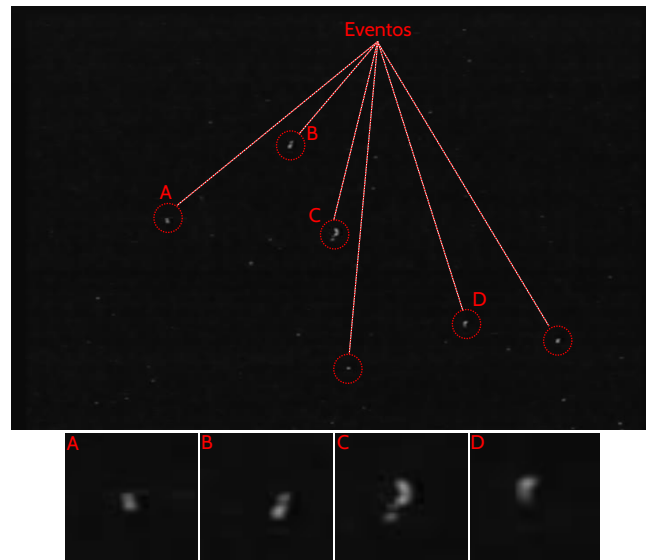


Figura 1. Eventos producidos por una fuente de ^{137}Cs . En la parte inferior de la figura se muestran ampliaciones de las imágenes de los eventos registrados.

III. LA TÉCNICA DE DETECCIÓN BASADA EN SENSORES DE IMAGEN CMOS

En los artículos [3] [4], se presentó una técnica que se basa en la utilización de sensores de imagen comerciales CMOS para detectar eventos originados por radiación ionizante. En dichos trabajos, se mostraron los resultados de diversos experimentos en los que se irradió a dos modelos de sensores CMOS con diferentes tipos de partículas. En las mediciones se evitó que la luz visible incida sobre la superficie de los sensores, y se pudo observar que cuando una partícula interactúa con el sensor un conjunto de píxeles se descarga, y se observa un punto o una línea de color gris claro en la imagen capturada (Figura 1). Se puede observar que en la zona en la que se produce un evento, los valores de los píxeles se elevan por encima de la media. Por lo tanto, para saber si se detectó un evento se realiza un procesamiento de las imágenes registradas para buscar si existe un conjunto de píxeles que poseen un valor mayor a un umbral U_{ev} . En estos trabajos, se pudo demostrar que el número de eventos detectados es proporcional a la dosis de radiación recibida, y que se pueden discriminar eventos producidos por partículas alfa en campos mixtos de radiación $\alpha + \gamma$. Dicha discriminación se realiza evaluando diferentes parámetros de los eventos registrados (carga, radio y valor máximo) mediante un algoritmo computacional.

IV. EL SISTEMA DE DETECCIÓN DESARROLLADO

En los trabajos anteriores se pudo verificar que el control de parámetros del sensor como, ganancia de los píxeles, tiempo de integración y balance de blancos es de suma importancia para la aplicación de la técnica de detección. Por esta razón, se comenzó el desarrollo de un detector basado en un sensor de imagen comercial CMOS y una placa de desarrollo Nexys3 que contiene una FPGA Spartan 3. En la Figura 2 se muestra

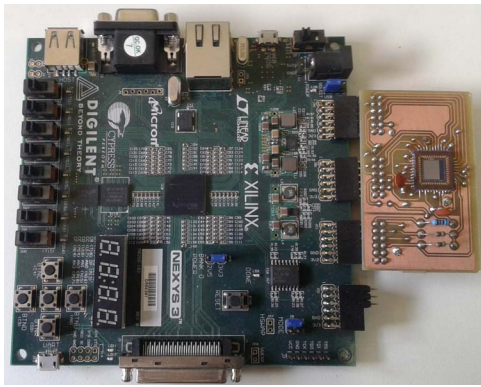


Figura 2. Circuito impreso que contiene al sensor conectado a la placa de desarrollo.

una imagen del circuito impreso que contiene al sensor conectado a la placa de desarrollo. El sensor es alimentado con las salidas de 3.3 V disponibles en los puertos “Pmod”, y se utilizan 34 pines para la interconexión de ambos circuitos.

Luego de realizar un relevamiento de los sensores de imagen CMOS disponibles en el mercado se optó por la utilización del modelo MT9M001C12STM de la marca APTINA [22]. Se decidió emplear este modelo debido a que posee las siguientes ventajas:

- Posee un área activa de 6.66 mm x 5.32 mm, que es mucho mayor a la de otros sensores de su tipo.
- Posee una interfaz I2C con la cual se pueden configurar parámetros como tiempo de integración, ganancia de tensión de los amplificadores de los píxeles, balance de blancos, etc.
- El chip no realiza ningún tipo de procesamiento de la imagen adquirida. Por lo que se pueden leer los valores de los píxeles luego de que son digitalizados.
- Se trata de un sensor monocromático, por lo que no cuenta con microlentes ni filtros de Bayer. Esto representa una ventaja si se desea detectar partículas alfa cuyos rangos de penetración en los materiales que conforman los sensores son cortos.

En la Figura 3 se muestra un diagrama de los bloques que componen el detector. El sistema implementado dentro de la FPGA cuenta con cuatro módulos sintetizados en lenguaje VHDL: el módulo de control, el controlador I2C, el controlador de la memoria RAM y el controlador de la UART. El módulo de control es el encargado de la lectura del sensor y de enviar órdenes para comandar a los tres controladores. Cuando el sistema es inicializado el módulo de control activa el controlador I2C y se envían los bytes de configuración al sensor. Luego de que la configuración es realizada, el sistema se encuentra listo para recibir imágenes. Cuando el usuario desea realizar la captura de una imagen se presiona un pulsador y se comienza a leer el sensor. Debido a que la lectura de los píxeles se realiza a una frecuencia de 10 Mhz, (que es mucho mayor a la frecuencia en la que se transmiten los datos por la UART) se deben almacenar los valores de los

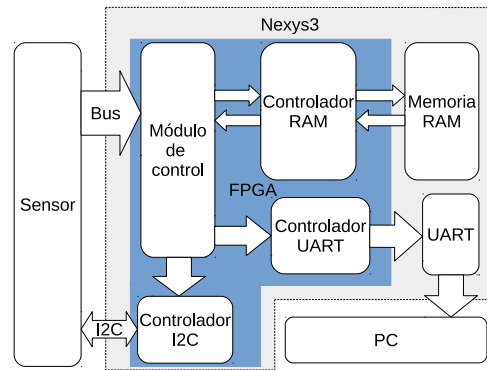


Figura 3. Diagrama en bloques del sistema.

píxeles en la memoria RAM de la placa de desarrollo antes de transmitirlos a la computadora. Cuando toda la imagen se encuentra almacenada en la memoria RAM, se comienza la transmisión de los datos a la computadora. Luego de que los datos son recibidos por la PC un software en lenguaje Python se encarga de construir una matriz con los valores de los píxeles. El mismo software es el encargado de procesar los datos recibidos y comprobar si se detectó algún evento, esto se realiza buscando conjuntos de píxeles que posean valores mayores a un umbral U_{ev} .

V. RESPUESTA DE LOS SENSORES A LA RADIACIÓN

El objetivo de estas experiencias fue estudiar la respuesta del sensor con diferentes valores de ganancia de tensión (G_p) en los amplificadores de los píxeles. El sensor fue colocado en una caja estanca a la luz y se le retiró el vidrio que recubría la superficie del mismo. Con el fin de verificar que la configuración del chip se estaba efectuando de manera correcta, se comenzó tomando imágenes sin ninguna fuente radioactiva y con diferentes valores de G_p (0.125, 1, 4, y 8), luego se calculó el valor medio de todos los píxeles de cada imagen y se pudo comprobar que la relación entre ambas variables era lineal. De esta forma, se comprobó que el valor medio aumentaba con la ganancia como se esperaba y que el sensor respondía correctamente a las configuraciones efectuadas.

Luego de verificar que el valor de G_p podía ser configurado correctamente, se realizaron irradiaciones con una fuente de calibración gamma de ^{137}Cs y con una fuente de calibración de ^{235}U . En primer lugar, se colocó la fuente de ^{137}Cs a unos milímetros de la superficie del sensor y se capturaron varias imágenes con cada uno de los valores de ganancia (0.125, 1, 4, y 8), luego se hizo lo mismo con la fuente de ^{235}U .

Con el fin de reducir los efectos producidos por la corriente de oscuridad, se restó el valor medio del cuadro a la imagen a procesar. Además, analizando las fotografías tomadas sin las fuentes radioactivas se pudo notar que sólo existían píxeles individuales con *Fixed pattern Noise*, por lo tanto, durante el procesamiento sólo se tuvieron en cuenta los eventos que poseían más de tres píxeles por encima del umbral U_{ev} .

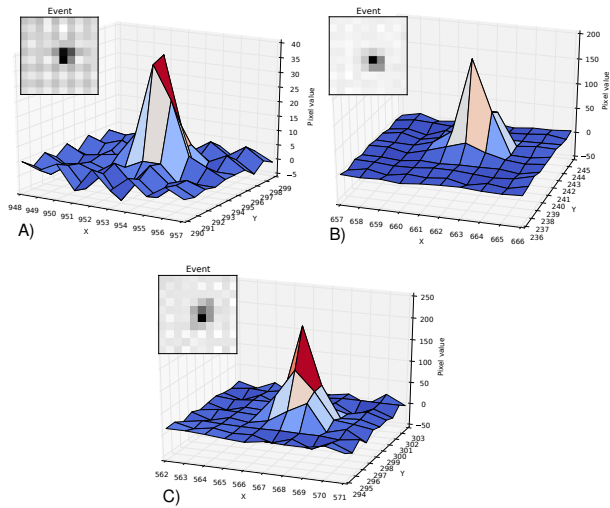


Figura 4. Gráficos de malla de eventos originados por una fuente de ^{137}Cs . **A)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 1$. **B)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 4$. **C)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 8$.

Con el objetivo de tener en cuenta la variación de G_p en la identificación de los eventos, se utilizaron diferentes valores de U_{ev} para procesar las imágenes. Los valores del umbral se fueron variando en la misma proporción que la ganancia, para las imágenes tomadas con $G_p = 8$ se utilizó un $U_{ev} = 64$, para las tomadas con $G_p = 4$ se utilizó un $U_{ev} = 32$ y cuando se configuró el sensor con un valor de $G_p = 1$ las imágenes fueron procesadas con $U_{ev} = 8$.

Siguiendo con la misma lógica se debería haber tomado un $U_{ev} = 1$ para $G_p = 0.125$, en la práctica no fue posible debido a que con ese valor de umbral se detectaron muchos falsos positivos originados por el ruido de oscuridad. Para realizar el procesamiento con ese valor de ganancia, el mínimo valor del umbral U_{ev} posible fue de 6.

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos en las mediciones realizadas con fuentes radioactivas. Cabe destacar que fue posible implementar y utilizar satisfactoriamente un detector de radiación ionizante basado en sensores de imagen comerciales empleando para su lectura y control una FPGA. En la Figura 4 se muestran gráficos de malla pertenecientes a eventos generados por la fuente de ^{137}Cs para diferentes valores de ganancia, cabe destacar que para el caso de $G_p = 0.125$ y un umbral $U_{ev} = 6$ no se detectaron eventos. Por otra parte, se pudo comprobar que (como se esperaba) el valor máximo de los eventos aumenta cuando la ganancia del sensor es mayor. Para el caso de este tipo de eventos no se observa saturación en los píxeles para $G_p = 8$.

En la Figura 5, se muestran los gráficos de malla de los eventos producidos por la fuente de ^{235}U para diferentes valores de ganancia. En esta oportunidad, se registró una importante cantidad de eventos para todos los valores de G_p . Al igual que en el caso anterior, el valor máximo de los eventos aumenta cuando la ganancia del sensor es mayor. También se

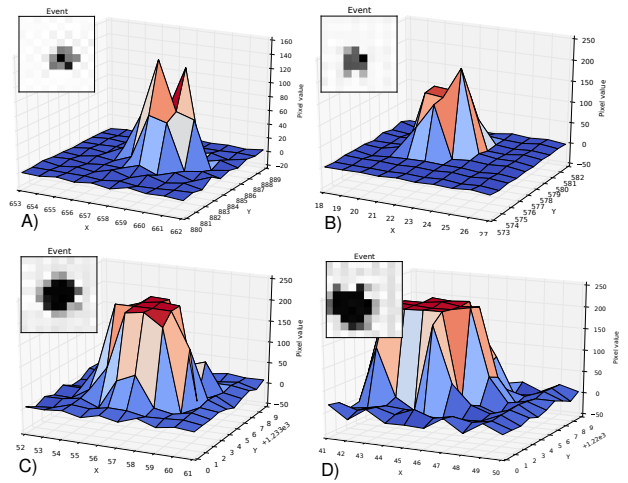


Figura 5. Gráficos de malla de eventos originados por una fuente de ^{235}U . **A)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 0.125$. **B)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 1$. **C)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 4$. **D)** Evento registrado con una ganancia $G_p = 8$.

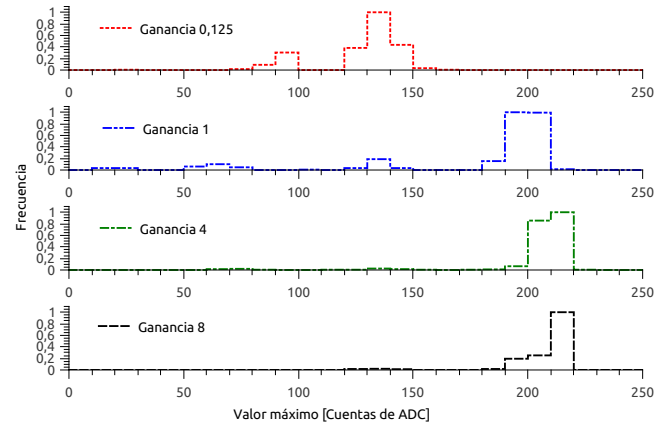


Figura 6. Histogramas normalizados de los valores máximos de los eventos producidos por una fuente de ^{235}U para diferentes valores de ganancia.

observa que los píxeles se saturan para $G_p = 4$ y $G_p = 8$, y que tanto la cantidad de píxeles con valores elevados, como el radio de los eventos registrados aumenta con la ganancia.

En la Figura 6, se muestran los histogramas normalizados de los valores máximos de los eventos producidos por la fuente de ^{235}U , para los cuatro valores de ganancia. Mediante estos gráficos, se puede comprobar la dependencia que existe entre los valores máximos de los eventos y la ganancia G_p . Se puede observar que los picos para las tres mayores ganancias tienen valores muy similares, debido a que los píxeles se saturan cuando interactúan con este tipo de partículas.

Uno de los parámetros calculados durante el procesamiento de las imágenes, es el valor de la suma de todos los píxeles de cada evento (V_{suma}). El valor de V_{suma} es proporcional a toda la carga colectada en el volumen activo del detector después de cada evento, es decir, una medida en unidades arbitrarias (cuentas del conversor ADC) de toda la carga recogida. En la

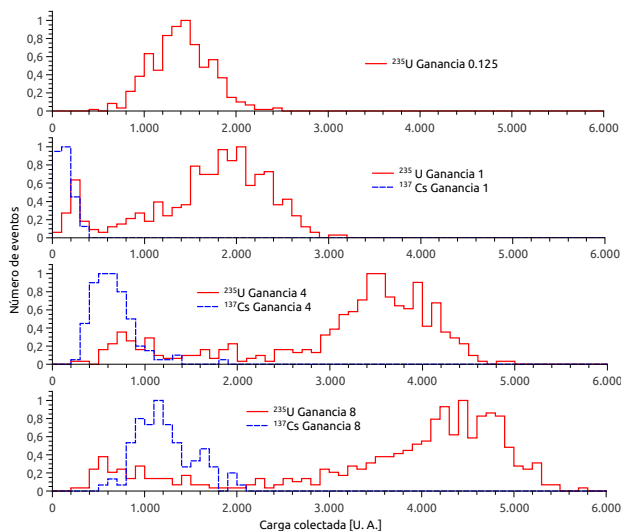


Figura 7. Histogramas normalizados de carga colectada por los eventos producidos por una fuente de ^{235}U , y una fuente de ^{137}Cs para diferentes valores de ganancia.

Figura 7 se muestran los histogramas de la cantidad de eventos detectados en función de los valores de carga colectada, con cada uno de los valores de G_p , para ambas fuentes radiactivas. Se puede observar que la carga depositada por las partículas alfa emitidas por el uranio, es mayor a la depositada por las partículas beta y los rayos gamma del ^{137}Cs . Debido a que con $G_p = 0.125$ no se detectaron eventos con la fuente de ^{137}Cs , y que para los demás valores de G_p los eventos producidos por la fuente de ^{235}U saturan los píxeles, no se puede conocer la relación existente entre la carga generada por los eventos producidos por ambas fuentes radioactivas. En base a estos resultados se puede observar que podrían existir dos posibles estrategias para la discriminación de eventos producidos por partículas alfa en campos mixtos. En primer lugar se podría utilizar la ganancia más baja disponible (en este caso $G_p = 0.125$) debido a que no se detectaron eventos con la fuente de ^{137}Cs . Como segunda estrategia, se podría utilizar la ganancia más elevada y de esta forma lograr una mayor separación entre los picos de carga generados por partículas alfa y los picos generados por partículas beta y rayos gamma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todo el *staff* del Reactor de Investigación RA6 del Centro Atómico Bariloche.

REFERENCIAS

- [1] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [2] C. Grupen and I. Buvat, *Handbook of particle detection and imaging*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [3] M. Perez, M. S. Haro, I. Sidelnik, L. Tozzi, D. R. Brito, C. Mora, J. J. Blostein, M. G. Berisso, and J. Lipovetzky, "Commercial CMOS pixel array for beta and gamma radiation particle counting," in *Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA), 2015 Argentine School of*, July 2015, pp. 11–16.

- [4] M. Pérez, J. Lipovetzky, M. S. Haro, I. Sidelnik, J. J. Blostein, F. A. Bessia, and M. G. Berisso, "Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 827, pp. 171–180, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216302844>
- [5] Y. Degerli, F. Guilloux, and F. Orsini, "A novel CMOS sensor with in-pixel auto-zeroed discrimination for charged particle tracking," *Journal of Instrumentation*, vol. 9, no. 05, p. C05018, 2014.
- [6] F. Morel, C. Hu-Guo, G. Bertolone, G. Claus, C. Colledani, A. Dorokhov, G. Dozière, W. Dulinski, X. Fang, M. Goffe *et al.*, "Mistral & astral: two cmos pixel sensor architectures suited to the inner tracking system of the alice experiment," *Journal of Instrumentation*, vol. 9, no. 01, p. C01026, 2014.
- [7] M. Mager, A. Collaboration *et al.*, "Alpide, the monolithic active pixel sensor for the alice its upgrade," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015.
- [8] X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo, and E. Pernigotti, "Medipix2: a 64-k pixel readout chip with 55- μm square elements working in single photon counting mode," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 5, pp. 2279–2283, 2002.
- [9] I. Perić, C. Kreidl, and P. Fischer, "Particle pixel detectors in high-voltage CMOS technology—new achievements," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 650, no. 1, pp. 158–162, 2011.
- [10] R. Turchetta, J. Berst, B. Casadei, G. Claus, C. Colledani, W. Dulinski, Y. Hu, D. Husson, J. Le Normand, J. Riester *et al.*, "A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSI CMOS technology," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 458, no. 3, pp. 677–689, 2001.
- [11] Y. Zhang, C. Hu-Guo, D. Husson, S. Higuieret, T.-D. Lê, and Y. Hu, "Design of a monolithic CMOS sensor for high efficiency neutron counting," *Microelectronics Journal*, vol. 43, no. 11, pp. 730–736, 2012.
- [12] M. Vanstalle, D. Husson, S. Higuieret, M. Trocmé, T. Lê, and A. Noureddine, "Demonstrating the γ -transparency of a CMOS pixel detector for a future neutron dosimeter," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 662, no. 1, pp. 45–48, 2012.
- [13] J. Jeronimo Blostein, J. Estrada, A. Tartaglione, M. Sofo Haro, G. Fernandez Moroni, and G. Cancelo, "Development of a novel neutron detection technique by using a boron layer coating a Charge Coupled Device," *Journal of Instrumentation* 10 P01006, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/10/01/P01006>
- [14] L. Servoli, D. Biagetti, D. Passeri, and E. S. Gattuso, "Characterization of standard CMOS pixel imagers as ionizing radiation detectors," *Journal of Instrumentation*, vol. 5, no. 07, p. P07003, 2010.
- [15] E. Conti, P. Placidi, M. Biasini, L. Bissi, A. Calandra, B. Checcucci, S. Chiochini, R. Cicioni, R. Di Lorenzo, A. C. Dipilato *et al.*, "Use of a CMOS image sensor for an active personal dosimeter in interventional radiology," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 5, pp. 1065–1072, 2013.
- [16] S. Meroli, D. Biagetti, D. Passeri, P. Placidi, L. Servoli, and P. Tucceri, "A grazing angle technique to measure the charge collection efficiency for CMOS active pixel sensors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 650, no. 1, pp. 230–234, 2011.
- [17] D. Whiteson, M. Mulhearn, C. Shimmin, K. Brodie, and D. Burns, "Observing ultra-high energy cosmic rays with smartphones," *arXiv preprint arXiv:1410.2895*, 2014.
- [18] R. Baumann, "Soft errors in commercial integrated circuits," *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 14, no. 02, pp. 299–309, 2004.
- [19] R. D. Schrimpf and D. M. Fleetwood, *Radiation effects and soft errors in integrated circuits and electronic devices*. World Scientific, 2004, vol. 34.
- [20] V. Ferlet-Cavrois, L. W. Massengill, and P. Gouker, "Single event transients in digital cmos—a review," *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 3, pp. 1767–1790, 2013.
- [21] T. Karnik and P. Hazucha, "Characterization of soft errors caused

by single event upsets in cmos processes,” *Dependable and Secure Computing, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 2, pp. 128–143, 2004.

- [22] *1/2-Inch Megapixel CMOS Digital Image Sensor MT9M001C12STM (Monochrome)*, Aptina Imaging Corporation, 5 2004, pDF: 0185865399/Source: 7657919000 - Rev.K Pub. 5/11 EN.