UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

NUCLEO DISCIPLINARIO/COMITÉ ACADEMICO/OTROS TEMAS: **MICROELECTRONICA** TITULO DEL TRABAJO: **ANALISIS DE LA RESPUESTA ESPECTRAL Y DE LA CORRIENTE OSCURA DE FOTODIODOS SOMETIDOS A RADIACION ESPACIAL** AUTOR(ES): **Marcelo A. CAPPELLETTI y Ariel P. CEDOLA** CORREOS ELECTRÓNICOS DE LOS AUTORES: **marcelo.cappelletti@ing.unlp.edu.ar arielcedola@yahoo.com.ar** DIRECTOR: **Eitel L. PELTZER Y BLANCÁ** PALABRAS CLAVES: **Simulación – Fotodiodo – Radiación espacial**

Simulação - Fotodiodo - Radiação espacial

"Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado."

Albert Szent-Györgyi (Premio Nobel de Fisiología y Medicina - 1937)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA (ARGENTINA)

NUCLEO DISCIPLINARIO/COMITÉ ACADEMICO/OTROS TEMAS: **MICROELECTRONICA** CORREOS ELECTRÓNICOS DE LOS AUTORES: marcelo.cappelletti@ing.unlp.edu.ar arielcedola@yahoo.com.ar PALABRAS CLAVES: **Simulación – Fotodiodo – Radiación espacia**l

Simulação - Fotodiodo - Radiação espacial

1- Introducción:

El estudio de dispositivos electrónicos en general y en particular aquellos destinados a aplicaciones espaciales, ha alcanzado un interés significativo, con lo cual el presente trabajo se propone contribuir para el desarrollo en esta línea de investigación.

1.1- Importancia de la Simulación.

El progreso de la electrónica en los últimos años ha abierto posibilidades de realización de nuevos desarrollos nunca antes imaginados. Uno de los pilares básicos para esta evolución ha sido el estudio de los materiales y sus propiedades microscópicas, con lo cual se ha alcanzado la miniaturización, la integración de millones de dispositivos en un único componente electrónico. El otro pilar esencial para el progreso de la electrónica, ha sido el estudio de los dispositivos por medio de su simulación y modelado. Los simuladores de dispositivos electrónicos se han convertido en herramientas indispensables y es al día de hoy que son aplicados en todo diseño de circuitos integrados y de dispositivos semiconductores, con resultados muy precisos. Este tipo de esquema de cálculo basado en desarrollos teóricos se convierte en una herramienta fundamental para el diseño y la generación de dispositivos electrónicos, acortando tiempos y esfuerzos económicos en la concepción y confección de nuevos dispositivos.

1.2- Radiación espacial.

Las características de la radiación que podrán afectar a una misión espacial son altamente dependientes de la fecha de lanzamiento de la misión, de la duración de la misma y de la órbita en la cual permanecerá. Por lo tanto, el conocimiento de las fuentes de radiación específicas es esencial para predecir si un dispositivo o un sistema entero será capaz de trabajar correctamente el tiempo de vida esperado de la misión. Es por ello, que se hace muy importante la caracterización de los efectos de la radiación espacial para el diseño de adecuados métodos de protección del dispositivo. En este sentido, la simulación numérica juega un papel primordial.

El ambiente en el que se encuentran los satélites que orbitan la Tierra está compuesto mayoritariamente de protones, electrones y, en menor medida, neutrones e

iones más pesados. Las concentraciones de estas partículas varían significativamente con la altitud, ángulo de inclinación y nivel de actividad solar, siendo imposible hacer una descripción de un ambiente espacial "típico". Las principales fuentes de radiación en el ambiente espacial son los rayos cósmicos, las partículas solares y los cinturones de radiación de Van Allen [1].

Principalmente, dos tipos de daños pueden afectar a los dispositivos semiconductores cuando están sometidos a radiación: daños por ionización y daños por desplazamiento [2-3]. Los primeros, daños transitorios, generan pares electrón-hueco a lo largo del camino recorrido por la partícula cargada incidente dentro del semiconductor y desaparecen poco tiempo después que la partícula impacta. Por el contrario, los daños por desplazamiento (apartamiento de átomos de sus posiciones de equilibrio), daños permanentes, causan alteraciones en la periodicidad de la red, generando niveles de energía ubicados en la banda prohibida y afectando el comportamiento del semiconductor. Sus efectos pueden estar presentes por más de un año. Además, los daños por desplazamiento son acumulativos, es decir, cuanto más tiempo pasa el dispositivo expuesto a la radiación más se daña. Se debe considerar que la vida media típica de un dispositivo en el espacio oscila entre los cinco y diez años aproximadamente.

En el presente trabajo, los efectos de la radiación estudiados son los daños por desplazamiento de átomos.

2- Objetivos:

Uno de los principales objetivos del presente trabajo es el estudio de los efectos que se producen en los componentes y dispositivos electrónicos cuando son sometidos a la radiación espacial, en particular a la solar, donde intervienen partículas tales como protones mayoritariamente. Se pretende determinar por medio del modelado y la simulación de los procesos físicos que ocurren en los dispositivos, a través de algoritmos numéricos, las propiedades de funcionamiento y sus comportamientos antes y después de ser expuestos a la radiación solar, en un medioambiente semejante al real, como por ejemplo el que resulta del empleo de equipamiento electrónico en vehículos aeroespaciales, destinado para operar en satélites en Orbita Terrestre Baja (LEO), aproximadamente a 400 km. de altitud.

La simulación y el modelado están dirigidos a reproducir el comportamiento del dispositivo en todos los detalles, basados en la tecnología del silicio como semiconductor base de los dispositivos estudiados. El silicio (segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno), es un material que se utiliza en aleaciones y que tiene un interés especial en la industria electrónica y microelectrónica como material básico para la creación de obleas o chips sobre los que se pueden fabricar transistores, celdas solares, diodos y una gran variedad de dispositivos electrónicos.

En este trabajo se analizará mediante simulación, la respuesta espectral y las corrientes inversas (oscura y con luz) de fotodiodos PIN de silicio, antes y después de ser expuestos a radiación espacial. Estas características ópticas y eléctricas son las que comúnmente se utilizan para caracterizar el daño por la radiación.

De esta manera, es posible obtener una caracterización de los dispositivos afectados por la radiación espacial para poder predecir en cuanto se degradan y para determinar adecuados métodos de protección de los mismos, de manera que sigan cumpliendo su función durante el tiempo fijado para la misión.

3- Materiales y métodos:

3.1- Fotodiodos PIN.

El fotodiodo PIN (p-intrínseco-n) es un dispositivo semiconductor básico de la familia de los diodos, los cuales son el fundamento del desarrollo de la electrónica moderna. El fotodiodo PIN absorbe fotones o partículas cargadas y genera un flujo de corriente eléctrica en un circuito externo, proporcional a la energía absorbida. Está compuesto básicamente de dos zonas p y n altamente dopadas y muy conductoras, junto a una zona intrínseca poco conductiva. Cuando se ilumina al dispositivo, los fotones que alcanzan la región intrínseca, excitan electrones creando pares electrón-hueco. Para asegurar un mayor vaciamiento de portadores en la región intrínseca, el fotodiodo es polarizado inversamente, de manera que las cargas que se encuentran en tal región son aceleradas por el campo eléctrico allí presente, hacia las regiones masivas (los electrones hacia la región n y los huecos hacia la región p). Los portadores que logren alcanzar los contactos antes de recombinarse aparecerán como fotocorriente [4-5]. El proceso es rápido y eficiente.



Fig. 1. Esquema simplificado de un fotodiodo PIN.

En la Fig. 1 podemos apreciar un esquema simplificado de un fotodiodo PIN y del flujo de radiación incidente, donde L_P , L_I y L_N son las longitudes de las regiones tipo p, intrínseca y tipo n, respectivamente.

La característica óptica más importante y que mejor describe el comportamiento de un fotodiodo PIN es su "respuesta espectral", definida como la relación entre la responsividad y la longitud de onda. La responsividad de un fotodiodo es una medida de la sensibilidad a la luz del dispositivo, en otras palabras, es una medida de la eficiencia del dispositivo en convertir potencia lumínica incidente en corriente eléctrica, y está definida para una dada longitud de onda como:

$$R_{\lambda} = \frac{IP}{P} \tag{1}$$

donde I_P es la fotocorriente, definida como la diferencia de corrientes del fotodiodo PIN iluminado y en la oscuridad, y P es la potencia lumínica incidente.

El fotodiodo PIN puede ser usado para detectar la presencia o ausencia de cantidades mínimas de luz, lo cual lo convierte en el detector más utilizado en los sistemas de comunicaciones e instrumentación espacial. Es sin lugar a dudas por este motivo que es necesario su estudio bajo estas condiciones para conocer su respuesta y la forma de resguardarlos de eventos que puedan reducir su confiabilidad.

3.2- Modelo matemático y simulación.

Para caracterizar un dispositivo semiconductor, es necesario un modelo adecuado de los procesos físicos involucrados. Tal representación queda expresada en las ecuaciones básicas del semiconductor, Poisson y continuidad para electrones y huecos, en combinación con adecuadas condiciones de borde [6-7]. Estas ecuaciones incluyen a su vez aquellas que modelizan el proceso de recombinación y generación de portadores (R-G), también las que modelan parámetros físicos tales como movilidades, tiempos de vida y daños producidos por la radiación. El proceso de R-G es modelado por medio de un nivel de trampa simple ubicado en la mitad de la banda prohibida, de acuerdo al modelo de Shockley-Read-Hall, conjuntamente con el modelo para la generación de pares electrón-hueco debido al hecho de considerar los efectos de la luz (fotones), cuando el dispositivo es expuesto a una fuente de iluminación.

En general, no es posible encontrar una solución analítica exacta a un sistema de ecuaciones de esta naturaleza. El problema se resuelve mediante la aplicación de técnicas numéricas especiales por medio de una computadora. Para ello se ha desarrollado un programa de simulación con código propio en lenguaje Visual C++, con la ventaja de poseer total grado de libertad para modificarlo e implementar nuevas funcionalidades y nuevos algoritmos. Las rutinas de simulación desarrolladas resuelven las ecuaciones básicas de los semiconductores en dos dimensiones sujetas a las condiciones de contorno apropiadas. Comienzan definiendo una malla uniforme sobre el dominio de la simulación, normalizan y discretizan el sistema de ecuaciones, mediante el método de diferencias finitas, el cual presenta un buen comportamiento para dispositivos de geometría simple (dispositivos planares). En cada punto de la malla, las rutinas generadas calculan el potencial electrostático V y las concentraciones de portadores n y p, mediante un método numérico iterativo (Método de Gummel) que va mejorando las estimaciones realizadas en forma sucesiva hasta llegar a la solución final.

La solución de estas ecuaciones brinda la información necesaria para comprender los procesos microscópicos que tienen lugar dentro de los dispositivos bajo diferentes condiciones de trabajo y que generan la respuesta macroscópica medible.

Los defectos producidos por la irradiación en el semiconductor, la cual degrada las propiedades eléctricas del material, son formulados en términos del coeficiente de daño. En el rango de fluencias analizado (hasta $2.5 \times 10^{14} \text{ p}^+/\text{cm}^2$), el efecto principal que ocasiona la radiación, es la disminución de los tiempos de vida media de los portadores minoritarios. La degradación del tiempo de vida medio de los portadores minoritarios se expresa por [8-9]:

$$\frac{1}{\tau_{\rm r}} = \frac{1}{\tau_{\rm r_0}} + \frac{\phi}{K_{\rm r}} \tag{2}$$

donde τ_{ro} y τ_r son los tiempos de vida media de los portadores minoritarios antes y después de la irradiación respectivamente, ϕ es la fluencia de partículas y K_r es el coeficiente de daño para la recombinación.

3.3- Radiación de protones:

Se ha elegido simular principalmente la irradiación de protones dado que son las partículas que mayoritariamente intervienen en la Orbita Baja Terrestre (LEO), entre 300 y 1200 km de altitud. Estas partículas provienen de eventos solares o están atrapadas en los cinturones de Van Allen. Dado que el flujo de protones a 400 km de altitud alcanza los 1×10^6 p⁺/cm²/seg, la fluencia máxima utilizada en las simulaciones fue de 2.5×10^{14} p⁺/cm², correspondiente a un dispositivo con una permanencia de ocho años en la órbita LEO.

4- Resultados y discusión:

Fueron analizados fotodiodos PIN con longitudes totales (L_T) de 30, 35, 40, 45 y 50 μ m, y para cada L_T fueron consideradas ocho configuraciones, como se detalla en la Tabla I.

LT <u>[μm]</u>	= 30 - 3	35 – 40	<u> </u>	
	L _P [%]	L _I [%]	L _N [%]	
PIN_	1 45	50	5	
PIN_2	2 20	75	5	
PIN_3	3 17.5	77.5	5	
PIN_4	4 15	80	5	
PIN_	5 12.5	82.5	5	
PIN_6	5 10	85	5	
PIN_7	7 7.5	87.5	5	
PIN 8	35	90	5	

Tabla 1. Longitudes características de los cuarenta fotodiodos PIN simulados.

Todos los fotodiodos simulados tienen un dopado uniforme de concentraciones, con densidades tanto donor como aceptor de 5×10^{17} cm⁻³, para las regiones tipo N y tipo P respectivamente, y una densidad donor de 4×10^{12} cm⁻³ para la región intrínseca (o región central tipo N⁻).

En todas las simulaciones, los fotodiodos fueron polarizados en inversa con 10 V, para asegurar un vaciamiento completo de portadores de la región intrínseca. Además, se ha incluido en la simulación los efectos producidos por la iluminación sobre los fotodiodos, a partir de una fuente de luz con una intensidad de 2 mW/cm².

4.1- Respuesta espectral sin radiación:

En primer lugar, se ha analizado la respuesta espectral en la región infrarroja cercana (700 – 1100 nm) de todos los dispositivos considerados, antes de exponerlos a radiación de protones. Todos los fotodiodos presentan una curva similar a la mostrada en la Fig. 2. Esta curva, correspondiente al fotodiodo PIN_2 con L_T = 50 µm, muestra una respuesta espectral pico (λ_{MAX}) de 885 nm y una responsividad pico (R_{MAX}) de 0.32 A/W.



Fig. 2. Respuesta espectral para el fotodiodo PIN_2 con $L_T = 50 \mu m$.

Luego, se han determinado los valores de λ_{MAX} y de R_{MAX} para los cuarenta dispositivos considerados, a partir de cada curva de respuesta espectral correspondiente.



Fig. 3. Pico de la respuesta espectral vs. Ancho de la región intrínseca.

Las Figs. 3 y 4 muestran las variaciones de λ_{MAX} y de R_{MAX} como una función del ancho de la región intrínseca L_I. En la Fig. 3 puede apreciarse que el rango de valores calculados de λ_{MAX} abarca desde 820 nm hasta los 900 nm. Mientras que en la Fig. 4 se puede ver que un cambio de L_I desde el 50 al 90% de L_T, produce un incremento de aproximadamente 60% en R_{MAX} . A partir de un ajuste de segundo orden de los valores graficados en la Fig. 3, fue encontrado un modelo analítico para λ_{MAX} :

$$\lambda_{MAX} = \lambda_0 + 0.6 \cdot L_I - 11.4 \times 10^{-3} \cdot L_I^2 \qquad (3)$$

$$\lambda_0 = 716.45 + 6.1 \cdot L_T - 47.7 \times 10^{-3} \cdot L_T^2 \qquad (4)$$

donde L_I es expresado como porcentaje de L_T y L_T es expresado en micrones en las ecuaciones (3) y (4), respectivamente. Estas expresiones son válidas para fotodiodos PIN cuyas longitudes totales están comprendidas entre 30 y 50 µm, y con longitudes intrínsecas que cubren entre el 50 y el 90% de la longitud total del dispositivo.



Fig. 4. Responsividad máxima vs. Ancho de la región intrínseca.

Este modelo analítico es muy útil para optimizar las dimensiones que un dispositivo debería tener para ofrecer su máxima eficiencia para una dada longitud de onda.

4.2- Efectos de radiación con protones de 10 MeV:

Las simulaciones presentadas en la sección precedente fueron repetidas incluyendo la irradiación con protones de 10 MeV para tres fluencias diferentes: 1×10^{13} , 1×10^{14} y 2.5 x 10^{14} p⁺/cm². En todos los casos, los valores de λ_{MAX} no sufrieron variaciones apreciables. Por el contrario, los valores de R_{MAX} disminuyeron hasta en un 40% por efecto de los protones incidentes (Fig. 5), con lo cual se puede afirmar que el fotodiodo con menor ancho de la región intrínseca presenta un mayor daño en su eficiencia para convertir potencia lumínica incidente en corriente eléctrica.



Fig. 5. Responsividad máxima vs. Fluencia de protones.

4.3 – Corriente oscura:

Finalmente, se analizó la corriente oscura (sin iluminación) de todos los fotodiodos irradiados con protones de 10 MeV. En la Fig. 6 puede verse que la corriente oscura aumenta con el incremento del ancho de la región intrínseca L_I y con la fluencia de protones. La superposición de curvas para diferentes L_T para una dada fluencia de protones, muestra una fuerte dependencia de la corriente oscura con L_I . Esto es debido a la mayor longitud de penetración de los protones incidentes en comparación con L_T .



Fig. 6. Corriente inversa oscura vs. Ancho de la región intrínseca.

A partir de un ajuste lineal de los valores graficados en la Fig. 6, fue encontrado un modelo analítico para la corriente oscura:

$$I_{OSCURA} = I_{OSCURA_{S/R}} + \alpha \cdot L_{I} \cdot \phi \tag{5}$$

donde I_{OSCURA S/R} es la corriente oscura del dispositivo sin radiación [μ A], L_I es la longitud de la región intrínseca [cm], ϕ es la fluencia de protones [p⁺/cm²] y α es una constante de proporcionalidad (α = 1.3344 x 10⁻¹² μ A.cm).



Fig. 7. Corriente inversa oscura vs. Fluencia de protones.

El beneficio de la ecuación (5) es que posibilita el uso de fotodiodos PIN como detectores de radiación, permitiendo determinar la fluencia de protones a la cual un dispositivo ha sido expuesto. Para ello, es necesario previamente realizar las mediciones de las dimensiones y de las corrientes oscuras del mismo. La Fig. 7 muestra la relación lineal

entre la corriente oscura y la fluencia de protones para el fotodiodo de $L_T = 50 \ \mu m \ y \ L_1$ desde 50% hasta 90% de L_T . Los fotodiodos con mayores L_1 son más afectados por la radiación. Centros profundos de recombinación creados por los protones incrementan la tasa de generación térmica de portadores, los cuales son separados por el fuerte campo eléctrico presente en la región intrínseca, contribuyendo a la corriente oscura de los dispositivos.

5- Conclusiones:

Con los códigos de simulación desarrollados, es posible comprender y predecir el comportamiento de fotodiodos PIN bajo diferentes condiciones de operación.

En cuanto a los resultados obtenidos, se puede mencionar que cuando los dispositivos son irradiados con protones, existe una relación de compromiso para la longitud de la región intrínseca de los fotodiodos PIN, respecto de su eficiencia y de su corriente oscura. Se ha visto, que cuanto mayor es la región intrínseca, más inmune a la radiación es su respuesta espectral, pero a su vez la corriente oscura tiene el peor comportamiento.

Por otro lado, se han obtenido modelos analíticos que permiten describir el comportamiento de las características esenciales de los dispositivos analizados de manera simple y en función de escasos parámetros. Es la primera vez que se proponen expresiones de estas características, no existen en la literatura expresiones como las mencionadas. Estas expresiones podrían ser incluidas, por ejemplo, en los modelos de dispositivos utilizados en programas de simulación de circuitos electrónicos.

Se ha pretendido con esto alcanzar la optimización de parámetros para aplicaciones reales, dado que con la simulación es factible modificar los parámetros relevantes (dimensiones del dispositivo, perfiles de dopado, centros de recombinación-generación de portadores, etc), es posible obtener el dispositivo apropiado que mejor aproxime a la respuesta deseada dirigida a una aplicación específica.

6- Referencias:

[1] F.B. McLean: Interactions of Hazardous Environment with Electronic Devices; IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC), Section I (1987).

^[2] G.Messenger and M.Ash: "The Effects of Radiation on Electronic Systems"; New York: Van Nostrand Reinhold, 2nd edn (1992).

^[3] J.R. Srour, C.J. Marshall and P.W. Marshall: *Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices*; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, NO. 3, pp 653-670 (2003).

^[4] S.M.Sze: "Physics of Semiconductor Devices"; New York: Wiley & Sons, 2nd edn (1981).

^[5] UDT Sensosr Inc. Photodiode Characteristics and Applications. (www.udt.com)

^[6] S. Selberherr: "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices", Springer-Verlag (1984).

^[7] M.A. Cappelletti, U. Urcola and E.L. Peltzer y Blancá: *Radiation-Damaged Simulation PIN Photodiodes,* Semiconductor Science and Technology, ISSN 0268-1242, Vol. 21, pp 346-351 (2006).

^[8] J.R. Srour: *Displacement Damage Effects in Electronic Materials, Devices and Integrated Circuits*; IEEE NSREC, Section IV (1988).

^[9] G.C.Messenger: A Summary Review of Displacement Damage from High Energy Radiation in Silicon Semiconductors and Semiconductor Devices, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, No.3, pp 468-473 (1992).