

# ESTUDIO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES EXPUESTOS A LA RADIACIÓN ESPACIAL

G. Domingo Yagüez<sup>1</sup>, D. N. Villarraza<sup>1</sup>, M. A. Cappelletti<sup>1</sup>, A. Cédola<sup>1</sup> y E. L. Peltzer y Blancá<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Estudio de Materiales y Dispositivos Electrónicos (GEMyDE)  
Departamento de Electrotecnia – Fac. Ing. UNLP

<sup>2</sup> Instituto de Física de Líquidos y Sistemas Biológicos (IFLYSIB)  
CONICET – UNLP – CIC  
e-mail: eitelpyb@ing.unlp.edu.ar

El presente trabajo apuntó a estudiar procesos físicos que ocurren en dispositivos electrónicos sometidos a radiaciones espaciales. Por medio de algoritmos numéricos se realizó el modelado y la simulación de los dispositivos electrónicos. La descripción del comportamiento de estos dispositivos se logra mediante la resolución, en forma numérica, de las ecuaciones de Poisson y de continuidad en forma acoplada. Los efectos de la radiación tenidos en cuenta en este trabajo son los daños por desplazamiento de los átomos, lo que produce una disminución de la vida media de los portadores. Algunos de los resultados obtenidos pudieron ser comparados con mediciones experimentales, encontrándose una muy buena concordancia entre ambos, y corroborando la validez del modelo utilizado.

The present work aims at the study of physical processes that take place in electronic devices subjected to spatial radiation. The modelling and simulation of electronic devices is done by means of numerical algorithms. By using the coupled Poisson and Continuity equation we have obtained the description of the behaviour of electronics devices numerically. The effects of the radiation accounted in the present work are the damages for atomic displacements which produce a decrease in the lifetime of the carriers. Some of the results obtained were compared with experimental measures, therefore obtaining a nearly exact agreement between both of them, and corroborating the validity of the model used.

## I. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se muestra el análisis sobre el comportamiento de dispositivos semiconductores cuando están expuestos a la radiación espacial. Es de nuestro interés poder determinar cómo son afectadas sus propiedades de funcionamiento.

Es posible describir los procesos físicos que ocurren en los dispositivos semiconductores, a través de su modelado y simulación por medio de algoritmos numéricos.

Cuando un dispositivo electrónico se halla emplazado en algún sistema en órbita, su confiabilidad se ve constantemente amenazada por los efectos de la radiación propia del medio ambiente espacial en que se mueve. Las principales fuentes de radiación en cuestión son partículas que provienen del Sol, rayos cósmicos y partículas atrapadas en los cinturones de Van Allen, como neutrones (n), electrones (e<sup>-</sup>), protones (p<sup>+</sup>) e iones más pesados.

Principalmente, existen dos tipos de daños en el comportamiento de dispositivos electrónicos de estado sólido cuando son sometidos a radiación: los daños por ionización y los daños por desplazamiento. Los primeros, generan pares electrón-hueco a lo largo del camino recorrido por la partícula cargada incidente. Son daños transitorios, pues desaparecen con la desaparición de la radiación. Contrariamente, los daños por desplazamiento (dislocamientos de átomos de su posición normal en la red cristalina) ocasionan alteraciones en la periodicidad de la red, dando origen a niveles discretos de energía que se ubican en la banda prohibida del semiconductor. A consecuencia de esto se modifica su comportamiento eléctrico al provocar una disminución de los tiempos de

vida medio de los portadores. Son daños considerados permanentes ya que se mantienen durante largos periodos de tiempo, pudiendo superar el año.

Es muy importante la caracterización de los efectos de la radiación espacial para el diseño de adecuados métodos de protección del dispositivo. En consecuencia, dada la imposibilidad de un resguardo total contra el impacto de las partículas radiadas, con el aporte de este trabajo creemos que en un futuro se podrá apuntar, si bien no a una reducción total, a minimizar sus efectos por debajo de un cierto límite tolerable. En este sentido, el análisis de los efectos de la radiación en dispositivos semiconductores mediante simulaciones juega un papel primordial.

El modelado y la simulación de los dispositivos electrónicos se logran con el desarrollo de rutinas, las cuales involucran ecuaciones que representan su comportamiento físico. La resolución de éstas en forma numérica, permite obtener una predicción de las características eléctricas del dispositivo irradiado bajo diferentes condiciones de operación, haciendo posible investigar las consecuencias de los daños transitorios y permanentes ocasionados.

El desarrollo y crecimiento de la electrónica y microelectrónica están basados en dos pilares fundamentales. Por un lado, el estudio de los materiales y sus propiedades microscópicas, siendo posible, hoy en día, realizar análisis de materiales desde el punto de vista teórico con una increíble precisión en las predicciones de sus propiedades. Y por otro lado, el estudio de los dispositivos por medio de su modelado y simulación, obteniéndose resultados de igual precisión.

Sin duda, los programas de simulación por computadora se han convertido en herramientas indispensables prácticamente en todos los ámbitos de la ciencia. De hecho, los simuladores de dispositivos y los de circuitos analógicos y digitales ya lo son desde hace tiempo en el campo del diseño electrónico. Su importancia ha ido creciendo continuamente y es al día de hoy que son aplicados en todo diseño de circuitos integrados y de dispositivos semiconductores. Cabe también destacar la utilidad de estos programas como herramientas educativas.

La siguiente lista enumera algunas aplicaciones que dejan en evidencia la vital importancia de los programas de simulación de dispositivos para investigadores y diseñadores:

- Comprensión de los principios físicos de funcionamiento a través del cálculo y visualización de magnitudes tales como potencial, campo eléctrico, densidad de corriente, concentración de portadores, entre otras;
- Refinamiento del diseño de dispositivos para la optimización de su desempeño en aplicaciones específicas;
- Análisis de mecanismos de falla y ruptura;
- Cuantificación de características físicas difíciles de medir;
- Obtención de modelos analíticos de dispositivos ya sea en equilibrio o bajo distintos regímenes de operación: DC, AC o transitorio;
- Investigación de estructuras aun no desarrolladas evitando ciclos de prueba y error en fabricación de prototipos, con las ventajas en cuanto a economía de tiempo y recursos que esto significa.

El primer análisis de un dispositivo electrónico en nuestro trabajo, se llevó a cabo con un fotodiodo PIN cuando es sometido a una irradiación de neutrones. En la figura 1 se puede apreciar un esquema simplificado del PIN y de la radiación incidente. El análisis se realizó en forma unidimensional. El estudio en una dimensión (justificado en función de las características constructivas del dispositivo) permite ahorrar recursos computacionales en relación con sistemas bi o tridimensionales, sin perder demasiada precisión.

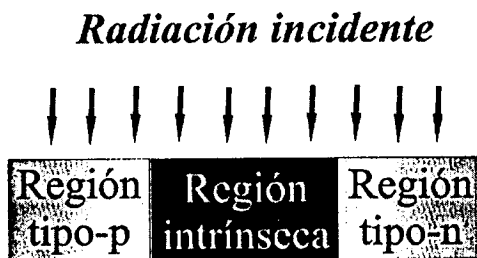


Figura 1. Esquema simplificado de un diodo PIN

## II. DESARROLLO

El modelo básico que gobierna el comportamiento eléctrico de los semiconductores consta de tres ecuaciones diferenciales parciales acopladas no lineales: la ecuación de Poisson (ec. (1)), que relaciona las variaciones del potencial eléctrico con la densidad de carga espacial, y las ecuaciones de Continuidad para cada uno de los portadores (ec. (2) y (3)), que describen la evolución temporal de las concentraciones de electrones y huecos debido a los procesos de transporte y de recombinación-generación:

$$\nabla(\epsilon \cdot \nabla V) = q \cdot (p - n + N_d^+ - N_a^-) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (1/q) \cdot \nabla J_n - R \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -(1/q) \cdot \nabla J_p - R \quad (3)$$

donde V es el potencial electrostático,  $\epsilon$  la permitividad dieléctrica del material, q es la carga del electrón, p y n son las concentraciones de huecos y electrones respectivamente,  $N_d^+$  y  $N_a^-$  son las concentraciones de impurezas donoras y aceptoras ionizadas respectivamente,  $J_n$  y  $J_p$  representan las densidades de corriente de electrones y huecos respectivamente y R es la tasa neta de recombinación-generación.

La expresión utilizada para describir la densidad de corriente es:

$$J_x = q \cdot x \cdot \mu_x \cdot E + q \cdot D_x \cdot \nabla x \quad (4)$$

donde x indica el tipo de portador (n para electrones y p para huecos),  $\mu_x$  son las movilidades,  $D_x$  son los coeficientes de difusión y E es el campo eléctrico. En la ecuación (4), el primer término del miembro derecho se refiere a las corrientes de arrastre (movimiento de portadores por acción del campo eléctrico) y el segundo término a las corrientes de difusión (movimiento de portadores como consecuencia de un gradiente en sus concentraciones). En nuestro análisis se considera que la temperatura es constante en todo el dispositivo, por lo cual no se tienen en cuenta las corrientes originadas por gradientes de temperatura.

La movilidad de los portadores  $\mu_x$  será descrita por el siguiente término:

$$\mu_x^{LIE} = \frac{LI}{\mu_x} \cdot \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{LI}{v_x^{sat}} \cdot |E|\right) \beta_x\right) \beta_x} \quad (5)$$

donde,  $\mu_x^{LIE}$  representa la movilidad debido a tres mecanismos de dispersión diferentes: vibraciones térmicas de los átomos del cristal, impurezas ionizadas y saturación de la velocidad de deriva de los portadores para campos eléctricos altos;  $\mu_x^{LI}$  es la movilidad debido únicamente a la dispersión de la red y a las impurezas ionizadas;  $v_x^{sat}$  es la velocidad de saturación de los portadores en el material y  $\beta_x$  es una constante que vale 2 para los electrones y 1 para los huecos.

Existen varios mecanismos de recombinación y generación de portadores en los semiconductores y cada uno tiene un modelo adecuado que describe su comportamiento físico.

El proceso de recombinación-generación térmica vía trampas es representado por la ecuación de Shockley-Read-Hall:

$$R^{SRH} = \frac{n \cdot p - n_{int}^2}{\tau_p \cdot (n + n_1) + \tau_n \cdot (p + p_1)} \quad (6)$$

donde  $n_{int}$  es la concentración intrínseca de portadores,  $n_1$  y  $p_1$  dependen del nivel de energía de las trampas y  $\tau_n$  y  $\tau_p$  son los tiempos de vida medio de electrones y huecos, cuyos modelos se describen más adelante.

Las transiciones Auger, en las cuales intervienen tres partículas, es otro de los procesos importantes en la recombinación y generación de portadores. El modelo que lo describe es:

$$R^{AU} = (C_{cn}^{AU} n + C_{cp}^{AU} p) \cdot (n \cdot p - n_{int}^2) \quad (7)$$

donde  $C_{cn}^{AU}$  y  $C_{cp}^{AU}$  son los coeficientes de captura Auger.

El último proceso considerado es la ionización por impacto, el cual es netamente un mecanismo de generación de portadores, y está representado por:

$$G^II = \alpha_n \cdot \frac{|J_n|}{q} + \alpha_p \cdot \frac{|J_p|}{q} \quad (8)$$

donde  $\alpha_n$  y  $\alpha_p$  son las tasas de ionización de electrones y huecos, que tienen una dependencia exponencial con la componente del campo eléctrico  $E$  en la dirección del flujo de corriente.

Finalmente, respecto del tiempo de vida medio de los portadores, la expresión utilizada en el modelo proviene de un ajuste de datos experimentales:

$$\tau_x = \frac{\tau_x^0}{1 + \frac{N_d^+ + N_a^-}{N_x^{ref}}} \quad (9)$$

donde se puede observar la dependencia de la vida media de los portadores con las concentraciones de impurezas.

La tasa a la cual las propiedades eléctricas de los materiales se degradan en un dado ambiente de radiación es usualmente formulada en términos del coeficiente de daños. De nuestro interés es la degradación del tiempo de vida de los portadores minoritarios, el cual puede ser expresado como sigue:

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{1}{\tau_{r0}} + \frac{\phi}{K_r} \quad (10)$$

En esta ecuación  $\tau_{r0}$  y  $\tau_r$  son los valores de los tiempos de vida antes y después de la irradiación,  $\phi$  es la fluencia de partículas y  $K_r$  es el coeficiente de daño para los tiempos de vida. En general, los coeficientes de daño en silicio dependen de los siguientes parámetros: tipo y energía de la partícula incidente, tipo de material, resistividad, especies y concentración de impurezas, nivel de inyección, temperatura y tiempo posterior a la irradiación.

Es usual referir los coeficientes de daños al correspondiente a neutrones de 1MeV. Luego, conociendo la relación entre los daños que producen tales partículas y las de interés, se obtiene el  $K_r$  que se necesita utilizar en la ecuación (10). En la figura 2 se muestra dicha relación para neutrones, protones y electrones de varias energías.

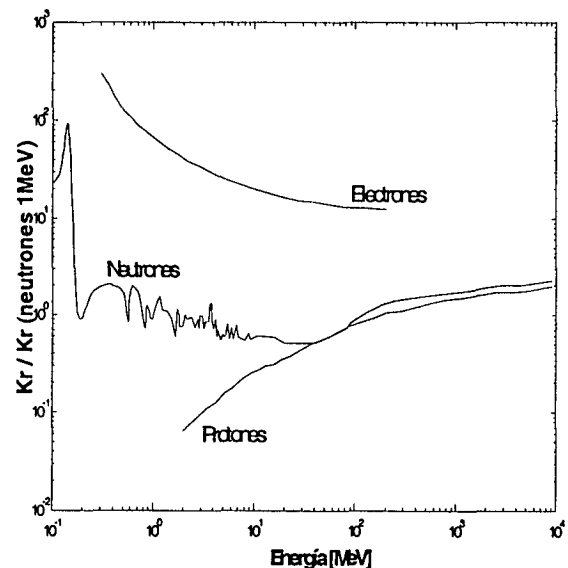


Figura 2. Coeficiente de daño referido al coeficiente de neutrones de 1MeV. (1)

Con las ecuaciones presentadas anteriormente, es imposible encontrar una solución analítica exacta a un sistema de esta naturaleza. El problema se resuelve mediante la aplicación de técnicas numéricas especiales, siendo la más apropiada en este caso la de diferencias finitas.

Las rutinas de simulación desarrolladas resuelven las ecuaciones básicas de los semiconductores en una dimensión 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. En cada punto 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.

El Método de Gummel resuelve en cada iteración las ecuaciones (1), (2) y (3) por separado, introduciendo en

cada ecuación los nuevos valores calculados de las demás incógnitas.

Debemos mencionar finalmente que no se han considerado los efectos que se producen en las uniones metal-semiconductor del dispositivo.

### III. RESULTADOS

Se estudió un fotodiodo PIN de silicio bajo diferentes condiciones de polarización con diferentes tipos de dopados, y con procesos de generación y recombinación de portadores que responden al fenómeno de radiación estudiado. En particular, se analizó el aumento de la tasa de generación térmica de portadores a consecuencia de los daños por desplazamientos introducidos cuando partículas sub-atómicas chocan con el dispositivo.

El diodo simulado tiene los siguientes parámetros:

- Longitudes de las regiones tipo p, intrínseca y tipo n:

$$l_p = 25\mu\text{m}, l_i = 100\mu\text{m} \text{ y } l_n = 25\mu\text{m}.$$

- Concentraciones de impurezas aceptoras y donoras:

$$N_a^- = 1 \times 10^{15} \text{ 1/cm}^3 \text{ y } N_d^+ = 1 \times 10^{15} \text{ 1/cm}^3$$

- Tiempo de vida media de los portadores minoritarios:

$$\tau_n^o = 3.95 \times 10^{-4} \text{ seg y } \tau_p^o = 3.52 \times 10^{-4} \text{ seg}$$

Algunos de los resultados obtenidos mediante la simulación son mostrados a continuación, para una tensión de polarización de  $-5\text{V}$ , cuando el diodo es irradiado con neutrones de  $1\text{MeV}$  con cuatro fluencias diferentes. En la figura 3, se muestra un gráfico de la concentración de electrones en función de la longitud del diodo PIN, para las distintas fluencias y para cuando el diodo no es irradiado.

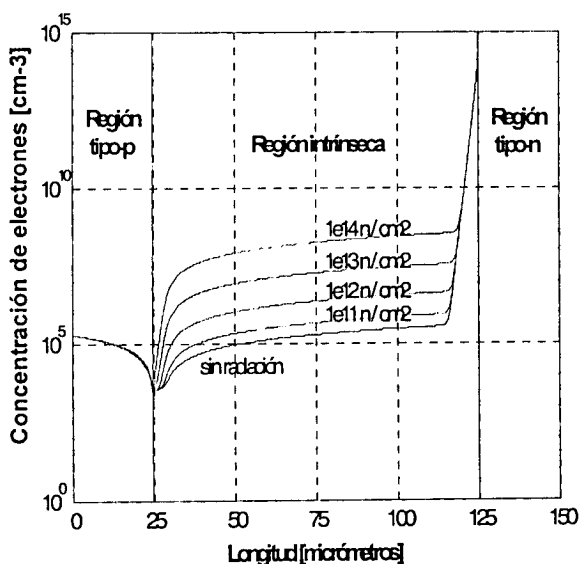


Figura 3. Gráfico de la densidad de electrones en función de la longitud del diodo para distintas fluencias.

En la figura 4, se muestra la variación de la corriente por unidad de volumen en función de la fluencia de neutrones.

En este caso, es posible comparar valores experimentales (círculos)<sup>(2)</sup> con los valores calculados mediante el presente modelo (línea recta).

El resultado que se muestra en la figura 3 se fundamenta en que en las regiones tipo-p y tipo-n, las concentraciones de electrones y huecos son cercanas a las existentes en equilibrio térmico, y prácticamente no hay ni recombinación ni generación neta de portadores. Esto queda reflejado en la ecuación (6) donde  $n.p$  es aproximadamente igual a  $n_{int}^2$ , con lo cual el numerador tiende a cero independientemente de la fluencia. En cambio, en la región intrínseca (región de vaciamiento),  $n_{int}^2$  es apreciablemente mayor al producto de  $n$  por  $p$ , entonces  $R^{SRH}$  toma un valor muy elevado negativo, indicando un aumento neto de la tasa de generación. Al irradiar al diodo PIN se produce una disminución de los tiempos de vida medio de los portadores  $\tau_n$  y  $\tau_p$ . Lo que incrementa aún más dicha tasa de generación con el aumento de la fluencia.

El aumento en la tasa de generación de portadores a medida que el diodo es irradiado con mayores fluencias provoca un incremento en la corriente de fuga del diodo. Este resultado se ilustra en la figura 4.

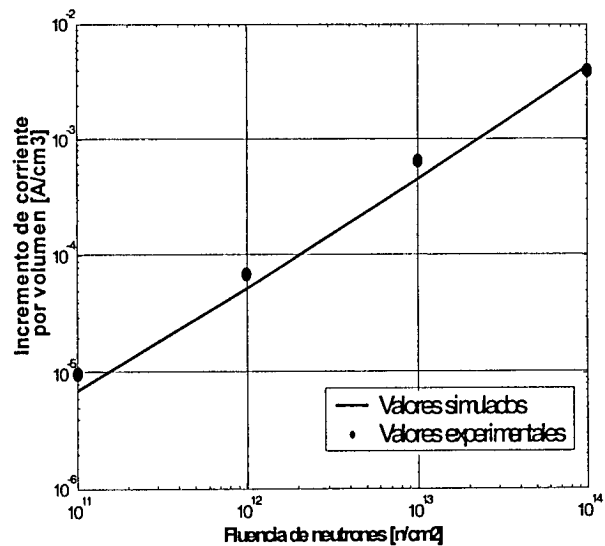


Figura 4. Gráfico de la variación de la corriente por volumen en función de la fluencia de neutrones (comparación entre valores experimentales y valores obtenidos mediante simulación)

### IV. CONCLUSIONES

A lo largo de todo el trabajo se han desarrollado e implementado con todo éxito, un conjunto de rutinas de cálculo para la simulación de dispositivos semiconductores. Las rutinas resuelven numéricamente las ecuaciones de Poisson y de Continuidad en una dimensión, conjuntamente con los modelos de las densidades de corriente, las movilidades, los procesos de recombinación-generación y el tiempo de vida media de los portadores.

Esta herramienta de cálculo permite predecir el comportamiento de distintas clases de dispositivos bajo diferentes condiciones de operación, ya sea en régimen

estacionario o transitorio, y es de suma utilidad tanto en el análisis, diseño y optimización de dispositivos así como en el ámbito educativo.

Se ha demostrado la utilidad y buen funcionamiento de las rutinas implementadas a través de la simulación de un fotodiodo PIN de silicio.

Los resultados obtenidos fueron plenamente satisfactorios, demostrando que las rutinas desarrolladas se pueden tomar como base para la implementación de una herramienta más sofisticada, capaz de simular en dos o hasta tres dimensiones dispositivos electrónicos de homo o heterojunturas.

## V. REFERENCIAS

1- A. Vasilescu. "Notes on the Fluence Normalisation Based on the NIEL Scaling Hypothesis". ROSE/TN/2000-02. June, 2000.

2- A. H. Kalma and W.H.Hardwick, IEEE Trans.Nucl.Sci. 25,1483(1978).

## VI. BIBLIOGRAFIA

\* J. Mazur. "The Radiation Environment Outside and Inside a Spacecraft". IEEE NSREC. July, 2002.

\* T. Weatherford. "From Carriers to Contacts, a Review of SEE Charge Collections Processes in Devices". IEEE NSREC. July 2002.

\* F. B. McLean. "Interactions of Hazardous Environment with Electronic Devices". IEEE NSREC. July, 1987.

\* J.R. Srouf. "Displacement Damage Effects in Electronic Materials, Devices and Integrated Circuits". IEEE NSREC. July, 1988.

\* R. Ecoffet, D. Falguere, R. Colomb. "Observations of the Dynamics of the Radiative Environment in Polar Orbits in the Period 11/2000-11/2001".

\* B. F. James, O.W. Norton, M.B. Alexander. "The Natural Space Environment: Effects on Spacecraft". NASA Reference Publication 1350. Nov. 1994.

\* S. Selberherr. "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices". Springer-Verlag Wien New York. 1984.

\* K. M. Kramer, W. N. G. Hitchon. "Semiconductor Devices. A Simulation Approach". Prentice Hall. 1997.

\* C. M. Snowden. "Introduction to Semiconductor Device Modelling". World Scientific. 1986.

\* S. Sze. "Physics of Semiconductor Devices". John Wiley & Sons. 1981.

**AGRADECIMIENTO:** Al Dr. Andrés J. Kreiner. Director del Grupo de Espectroscopía Nuclear. Departamento de Física. CNEA. Por su colaboración en la fase experimental de este trabajo.