# CAPÍTULO 1: Evento transitorio único en estructuras analógicas.

Las alteraciones por eventos únicos fueran descubiertas en el espacio en 1975, pero el potencial de los rayos cósmicos en producir alteraciones a nivel del mar recibió poca atención. Años más tarde, el trabajo de J. Ziegler, motivado por la labor de T. May y M. Woods, planteó una nueva preocupación para los fabricantes de memorias de computadoras. Pero no fue hasta 1992 que estos efectos comenzaron a cobrar mayor importancia debido a sus consecuencias en la aviación demostradas en .

En este capítulo se brinda un marco de referencia sobre los efectos producidos por eventos únicos. Comenzando por una definición formal, se continuará con las principales causas que lo producen para posteriormente pasar a una clasificación de los efectos. Por último, se realizará una breve mención de los modelos empíricos más frecuentes, y los utilizados en este trabajo.

## 1.1) CONCEPTO

### 1.1.1) Definición

Debido a la multiplicidad de definiciones, antes de comenzar con el análisis de los eventos transitorios, se presentará la definición adoptada en el trabajo. La siguiente, es tomada de la especificación JESD 89A publicada por Consejo de Ingeniería Electrónica Común (JEDEC por sus siglas en inglés):

“Un Efecto de Evento Único (SEE) es cualquier cambio medible u observable, en el estado o rendimiento, de un dispositivo, componente, subsistema o sistema (analógico o digital) micro-electrónico, resultado del impacto de una única partícula de alta energía.

Los SEE incluyen, alteraciones de evento único (SEU), alteraciones de múltiples bits (MBU), alteraciones de múltiples celdas (MCU), interrupciones funcionales de evento único (SEFI), enclavamiento de evento único (SEL), errores físicos de evento único (SHE), transitorio de evento único (SET), destrucción de evento único (SEB), y ruptura de compuerta de evento único (SEGR).” (3).

### 1.1.2) Causas

La radiación es la principal fuente de partículas de alta energía que tiene por consecuencia los SEEs. El sol es, por defecto, la fuente de radiación en nuestro sistema solar y se ve afectada por el campo magnético de la tierra. Éste influye en el movimiento de las partículas que intentan ingresar en la órbita terrestre, desviándolas de su trayectoria original.

Pensando a la tierra como un gran imán, se tendería a creer que la forma del campo sería como la de un gran dipolo, pero esto no es así debido a la influencia del viento solar que distorsiona el campo magnético en forma parabólica. Esto crea una cavidad en la que se conforman dos cinturones conocidos como “cinturones de radiación de Van Allen” (Figura 1), los cuales se encargan de atrapar las partículas cargadas, como los electrones y protones. Estas partículas están altamente cargadas con energía desde los 10MeV hasta los 100MeV, y se desplazan entre los polos del campo magnético con movimientos helicoidales. Cuando un rayo cósmico impacta con estas partículas de alta energía se produce lo que conocemos como proceso de espalación, liberando gran cantidad de partículas que penetran en la tierra provocando los SEEs.



Figura 1) Representación de la magnetosfera Terrestre.

Los primeros SEEs, observados en el trabajo de Ziegler, no tuvieron tanta relevancia ya que para la tecnología de la época, la energía con la que impactaban las partículas no era comparable con las cargas intervinientes en los circuitos integrados. Mucho más importante eran los SEEs producidos por los encapsulados de circuitos que contenían entre sus materiales pequeñas cantidades de elementos radioactivos. Estos emitían partículas cargadas que impactaban en los circuitos de las memorias ocasionando una tasa de errores muy alta .

Con el avance de los procesos litográficos y la disminución constante de las dimensiones de los transistores, las tensiones de alimentación han disminuido al igual que las corrientes que circulan en los circuitos. Debido a esto, los impactos de las partículas producen SEEs que tienen desde hace una década efectos importantes en los circuitos integrados, que serán analizados en la siguiente sección.

## 1.2) EFECTOS Y CLASIFICACIÓN

### 1.2.1) Efectos en semiconductores

Cuando una partícula choca contra un dispositivo micro-electrónico, la región más vulnerable a los efectos de la radiación es usualmente la juntura p/n en polarización inversa. El poderoso campo presente en la región de depleción de la juntura polarizada en inversa, puede ser muy efectivo recolectando las cargas inducidas por las partículas durante el proceso de frenado de la misma, dando como resultado una corriente transitoria en el contacto de la juntura. En el peor de los casos, la juntura se encuentra en un estado no definido (flotando) y el nivel de la carga almacenada está siendo reducido por alguna carga inyectada a través de la radiación. Como los electrones tienen mayor movilidad en comparación a los huecos, la juntura n+/p es más sensible a los eventos de radiación. La muestra el efecto de un ion chocando la juntura polarizada en inversa n+/p con un voltaje positivo conectado al nodo n+.



**Figura 2) Generación de pares electrón-hueco y recolección durante una perturbación en una juntura**.

En la .a se observa el ion atravesando la juntura, y dejando en su recorrido pares electrón-hueco. Los pares generados en la interacción son rápidamente recolectados por el campo eléctrico y generan un gran transitorio (corriente/voltaje) en el nodo (.b). Esta fase de recolección usualmente es completada en nanosegundos, seguida de una segunda fase dada por una difusión que es significativamente más lenta (cientos de nanosegundos) y menos intensa (.c).



Figura ) Corriente generada por la interacción de un ion.

La curva de corriente resultante generada por la interacción de un ion puede ser dividida en dos secciones, como lo muestra la . El pico de la grafica indica la primera fase de frenado (generación de pares electrón-hueco) y recolección, mientras que el gradiente de la segunda parte resulta de la difusión de recolección de las cargas .

### 1.2.2) Ionización directa e indirecta

La ionización es el método por el cual la radiación libera cargas en un dispositivo semiconductor, ésta puede ser directa o indirecta.

***Ionización Directa***: Cuando una partícula cargada atraviesa el material semiconductor, libera pares electrón-hueco perdiendo energía a lo largo de de su trayectoria. Una vez que toda la energía es liberada, la partícula descansa en el semiconductor luego de haber viajado una longitud determinada conocida como el *rango de la partícula*. El término *transferencia de energía lineal (Linear Energy Transfer - LET)* es frecuentemente usado para describir la energía perdida de la partícula por unidad de longitud, mientras recorre el material. Las unidades del LET están dadas por MeV/cm2/mg, ya que la energía perdida por unidad de longitud (en MeV/cm) es normalizada por la densidad del material atravesado (en mg/cm3), por lo tanto, las unidades del LET pueden ser expresadas independientemente del semiconductor. Por ejemplo en el silicio, un LET de 97 MeV-cm2/mg corresponde a depositar una carga de 1pC/um. La muestra una curva de variación LET de un ion de cloro según la profundidad de penetración del mismo en un semiconductor.

La ionización directa es el mecanismo principal de deposición de cargas causadas por iones pesados que generan perturbaciones, donde definimos a los iones pesados como cualquier ion con un número atómico mayor o igual a dos (partículas diferentes a protones, electrones, neutrones o iones).



**Figura 4) Curva de LET de un ion de cloro de 210MeV viajando a través del silicio.**

***Ionización Indirecta:*** Cuando un protón o un neutrón de alta energía entra a una red semiconductora pueden sufrir colisiones inelásticas con un núcleo blando.La ionización directa con partículas ligeras generalmente no genera suficiente energía en su paso como para producir una perturbación, sin embargo protones y neutrones pueden generar niveles significativos de perturbación a través de la mecánica indirecta*.* Esto puede desencadenar cualquiera de las siguientes reacciones nucleares posibles:

* Que la colisión inelástica produzca un retroceso de Si (silicio),
* La emisión de partículas alfa y gamma y el retroceso del núcleo hijo (ejemplo, Si emite partículas alfa y retroceso de un núcleo Mg),
* Reacciones de espalación (spallation reactions), donde el núcleo afectado se divide en dos fragmentos, cada uno de los cuales puede retroceder.

Cualquiera de estas reacciones puede depositar suficiente energía en su trayectoria de ionización directa, siendo partículas más pesadas que los protones y neutrones originales, pudiendo causar perturbaciones en su trayectoria.

El producto de estas colisiones inelásticas típicamente tienen poca energía y no viajan más allá del sitio de impacto de la partícula, tienden a dispersarse hacia adelante en la dirección de la partícula original. Como consecuencia, la sensibilidad del SEE pasaría a ser función del ángulo de incidencia de la partícula .



Figura ) Rayo cósmico depositando energía en un dispositivo micro-electrónico (4)*.*

### 1.2.3) Duración del evento

Los SEEs pueden ser clasificados en 3 categorías:

* *Single Event Upset* (error temporal de funcionamiento)
* *Single Event Latchup* (error temporal o permanente de funcionamiento)
* *Single Event Burnout* (error a nivel hardware, destrucción)

#### Single Event Upset

Single Event Upset (SEU) es definido por la NASA como “Errores inducidos por radiación en circuitos micro-electrónicos causados por una partícula cargada (usualmente proveniente del cinturón de radiación o de rayos cósmicos) que pierde energía mientras ioniza el medio que atraviesa, dejado en su recorrido un sendero de pares electrón-hueco” (9).

SEUs son errores transitorios de software y no destructivos para el circuito, tan solo afectan a su funcionamiento temporalmente, por lo cual, un reinicio o una sobre-escritura en el dispositivo es necesaria para llevarlo a su funcionamiento normal.

Los SEUs pueden ocurrir en circuitos analógicos, digitales o en componentes ópticos, también pueden generar un efecto no deseado en las zonas que lo rodean. Típicamente aparecen en el circuito como un pulso transitorio o un cambio de estado lógico de algún bit en celdas de memoria o registros. En algunas ocasiones, un ion puede afectar dos o múltiples bits ocasionando varios cambios, a lo que llamamos *Perturbación de Múltiples Bits* o MBU (Multiple Bit Upset), implicando un gran problema para el sistema de detección y corrección de errores EDAC (Error Detection And Correction).

Un SEU de severa gravedad es un *Evento Único de Interrupción Funcional* (Single Event Functional Interrupt - SEFI) el cual afecta al sistema de control del circuito, pudiendo configurarlo en un modo de testeo, de cambio de estado de trabajo, o simplemente a uno no definido en el sistema. El SEFI saca al dispositivo de su correcto funcionamiento, por lo que requiere de un reinicio (power-reset) para normalizarse.

#### Single Event Latchup

Single Event Latchup (SEL – Evento Único de Enclavamiento) es una condición que causa pérdida de funcionalidad del dispositivo debido a un SEU, llevándolo a un estado estacionario. Los SELs se clasifican como errores físicos y son potencialmente destructivos, pudiendo causar daños permanentes como consecuencia de un estado de alta corriente de funcionamiento, por arriba de las especificaciones. Esta condición de enclavamiento puede destruir los dispositivos, llevar la tensión del bus a cero, o dañar la fuente de alimentación. Originalmente, el concepto de enclavamiento era causado por un ion pesado, pero en dispositivos muy sensibles, puede ser originado por protones.

Un SEL puede ser eliminado del circuito a través de un encendido-apagado (power off-on) del mismo. Si dicho proceso no es realizado en la brevedad, el calentamiento del dispositivo por condiciones no favorables de funcionamiento podría concluir en una falla permanente. Los SELs son fuertemente dependientes de la temperatura, el umbral para el enclavamiento disminuye con el aumento de la temperatura, así como con el aumento de la sección transversal (10).

#### Single Event Burnout

Single Event Burnout (SEB – Evento Destructivo Único) es una condición que puede causar la destrucción del dispositivo por un estado de alta corriente en un transistor de potencia. Un SEB causa que el dispositivo falle permanentemente, incluyendo destrucción de MOSFET de potencia, ruptura de compuertas (Gates), congelamiento de bits o ruido en CCDs (charge-couple devices – dispositivos acopladores de cargas). Pueden desencadenar un cambio del punto de trabajo de un MOSFET de potencia que haya estado en OFF-State (estado inactivo), cuando un ion pesado deposite suficiente carga como para encender dicho dispositivo cuando lo atraviese. Fue demostrado que la susceptibilidad de los dispositivos a los SEB disminuye con el aumento de la temperatura .

Un SEB puede producir en un MOSFET de potencia un *Single Event Gate Rupture* (SEGR – Evento Único de Ruptura de Compuerta), que es la formación de un camino conductor (ruptura dieléctrica localizada) en la compuerta, originando la destrucción del dispositivo .

## 1.3) MODELADO DE LA FALLA

### 1.3.1) Modelo típico

Los SETs son difíciles de simular debido a que dependen, no solo de las características del pulso generado, sino también a la respuesta dinámica del circuito en sí. El transitorio puede ser modelado como una inyección de tipo doble exponencial de corriente, según .

representa la constante de tiempo de recolección de la juntura, y la constante de tiempo inicialmente establecida por la dirección del ion. Estas dos constantes dependen de varios factores relacionados con el proceso, y por lo tanto, con la tecnología.

### 1.3.2) Modelo a utilizar

Como el modelo del transitorio de doble exponencial exige mucho tiempo y procesamiento computacional complejo, se optó por reemplazar dicho modelo por aproximaciones más simples.

#### Modelo Exponencial

Un modelo de menor complejidad que la doble exponencial es la exponencial simple (), que representa con gran semejanza el proceso de *recolección de cargas*. El proceso de *difusión de cargas* no se asemeja a la referencia (ver modelo de la doble exponencial en la Figura 3), ya que el tiempo y amplitud que se puede generar con la exponencial simple para este proceso imposibilita hacerlo.

La expresión matemática del modelo de la falla exponencial es:

La representación en SPICE del modelo de la falla exponencial es:

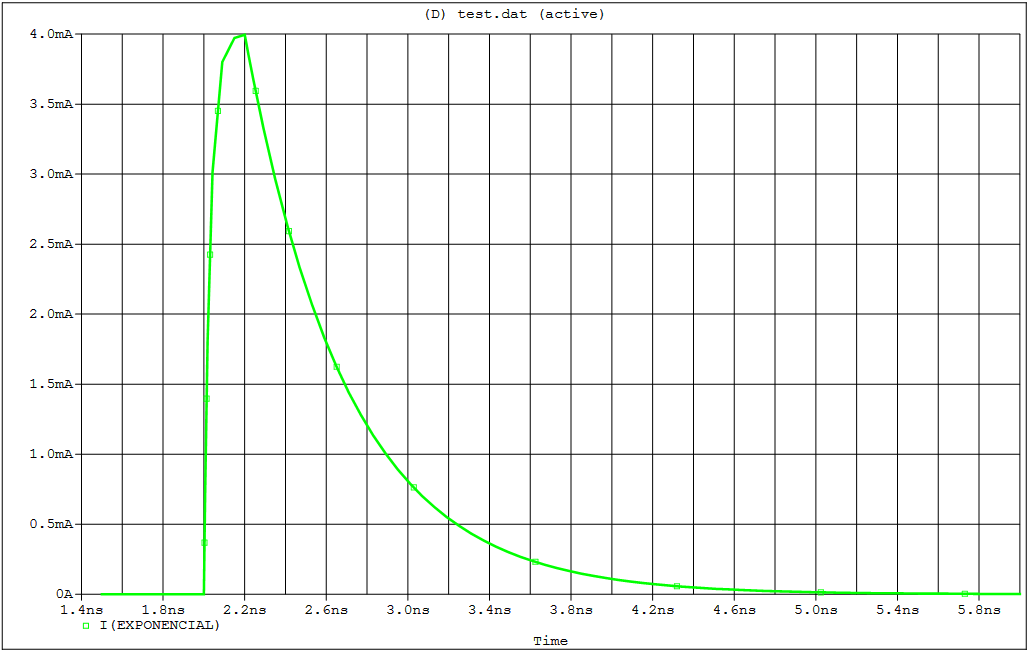


Figura ) Gráfica del modelo de inyección exponencial.

#### Modelo Trapezoidal

Otra opción de modelado de la falla es a través de una función trapezoidal (), con la cual el costo computacional decrece por la simplicidad de la función, en comparación a la exponencial. Con este modelo agrupamos las dos etapas del proceso que se da ante un SEU (proceso de recolección y difusión de cargas) generando una perturbación con intensidad constante por un tiempo determinado. La influencia sobre el circuito es mayor con este modelo, ya que la corriente inyectada mantiene su amplitud máxima por un periodo prolongado, en comparación al modelo típico (doble exponencial).

La representación en SPICE del modelo de la falla trapezoidal es:

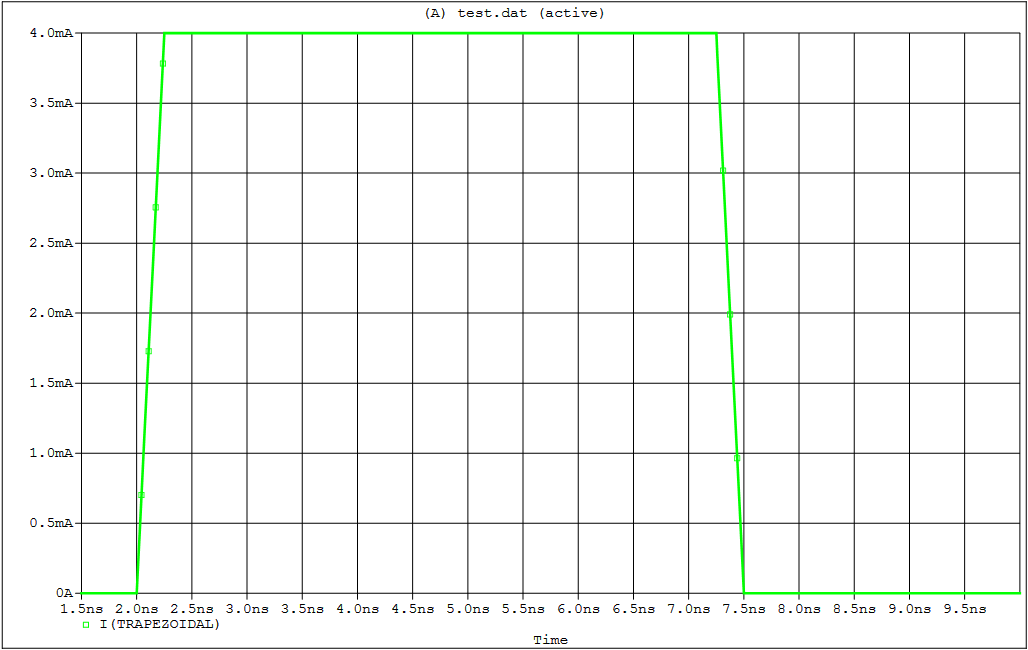


Figura ) Gráfica del modelo de inyección trapezoidal.

En ambos casos, las características de corriente máxima y tiempos de perturbación fueron elegidas en base a las bibliografías . En los procesos de inyección, existe un tiempo de reposo del circuito (sin perturbaciones) durante 2nS, en los cuales el sistema se estabiliza. A diferencia del modelado exponencial, en el modelo de falla tipo trapezoidal esta definido el momento de finalización de la perturbación, permitiendo asegurar que el circuito se encuentra libre de alteraciones externas, y por lo tanto, debería de volver a su estado inicial. Para el modelo exponencial, es difícil definir dicho momento.