**CAPITULO 1: Evento transitorio único en estructuras analógicas**

Varios años después de que las alteraciones por eventos únicos fueran descubiertas en el espacio en 1975, 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, plantearon 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 [NOTAS AL PIE] A. Taber and E. Normand, "Investigation and Characterization of SEU Effects and Hardening Strategies in Avionics", IBM Report 92-L75-020-2, August, 1992, republished as DNA-Report DNA-TR-94-123, DNA, Feb, 1995 [/NOTAS AL PIE] [NOTAS AL PIE] Single Event Upset at Ground Level Eugene Normand, *Member, IEEE Boeing Defense & Space Group, Seattle, WA 98124-2499* [/NOTAS AL PIE]

En este capítulo se pretende brindar un marco de referencia sobre los efectos producidos por eventos únicos. Comenzando por una definición formal, luego continuaremos mencionando las principales causas para posteriormente pasar a una clasificación de los efectos. Por último, realizaremos una breve mención de los modelos empíricos más utilizados y los utilizados en este trabajo.

**Concepto**

**Definición**

Debido a la multiplicidad de definiciones, antes de comenzar con el análisis de los eventos transitorios, se presentara 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 ingles):

*“Un Evento de Efecto 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), latch-up de evento único (SEL), hard error de evento único (SHE), transitorio de evento único (SET), burnout de evento único (SEB), y ruptura de compuerta de evento único (SEGR).”*

[NOTAS AL PIE]

***JEDEC Standard JESD 89A, “Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices”, 2006.***

[/NOTAS AL PIE]

**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. Dicha radiación se ve afectada por el campo magnético de la tierra. El *campo geomagnético* influye en el movimiento de las partículas que intentan ingresar en la órbita de la Tierra, desviándolas de su trayectoria original.

Pensando a la tierra como un gran imán, se tendería a creer que la forma del campo seria 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 “cinturón de radiación de Van Allen”, el cual es el encargado 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 la tierra provocando los SEEs.



Figura 6) [Source: [Space Environments & Effects Program](http://see.msfc.nasa.gov/pf/pf.htm), NASA Marshall Space Flight Center].

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 efectos 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. [NOTA AL PIE] Buscar referencia del paper de Intel y los encapsulados de las memorias [/NOTA AL PIE].

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

**Efectos y clasificación**

**Efectos en semiconductor**

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 reversa 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 la señal de una carga almacenada está siendo reducida 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 4) 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 el choque 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 nano segundos seguida de una segunda fase de recolección dada en una difusión que es significativamente más lenta (cientos de nanosegundos) y menos intensa (C).



Figura 5) Corriente generada por el choque de un ion.[[1]](#endnote-1)

La curva de corriente resultante generada por el choque de un ion, puede ser dividida en dos secciones, como lo muestra la . El primer pico 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.

**Ionización directa e indirecta**

Hay dos métodos por los cuales la radiación libera cargas en un dispositivo semiconductor:

1. ***Ionización Directa***: Cuando una partícula cargada atraviesa el material semiconductor liberando pares electrón-hueco a lo largo de de su trayectoria mientras va perdiendo energía. Cuando toda la energía es liberada, la partícula descansa en el semiconductor, habiendo viajado una longitud determina conocida como el *rango de la partícula*. El termino *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 porque 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. Ej. en el silicio, un LET de 97 MeV-cm2/mg corresponde a depositar una carga de 1pC/um. La muestra una curva de un ion de cloro de 210 MeV viajando a través del silicio.

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 ions).



Figura 1) Curva de un ion de cloro de 210 MeV viajando a través del silicio.

1. ***Ionización Indirecta:*** *(La ionización directa con partículas ligeras generalmente no generan suficiente energía en su paso como para producir una perturbación, sin embargo Protones y Neutrones ambos pueden generar niveles significantes de perturbación a través de la mecánica indirecta).* Cuando un protón o un neutrón de alta energía entra a una red semiconductora pueden sufrir coaliciones inelásticas con un núcleo blando. Esto puede desencadenar cualquiera de las siguientes reacciones nucleares posibles:
   1. *Que la colisione inelástica que produzcan un retroceso de Si,*
   2. *La emisión de partículas alfa y gamma y el retroceso del núcleo hijo (ejemplo, Si emite partículas alfa y retroceso de un núcleo Mg),*
   3. *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, porque estas partículas son más pesadas que los protones y neutrones originales, pudiendo causar perturbaciones en su trayectoria.

El producto de estas coaliciones inelásticas típicamente tiene poca energía y no viajan más allá del sitio de impacto de la partícula. También 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.[[2]](#endnote-2)



Figura 2) Esquemático mostrando como un rayo cósmico deposita energía en un dispositivo electrónico. (Source: *Spacecraft Anomalies due to Radiation Environment in Space* by Lauriente and Vampola[[3]](#endnote-3)).

**Duración del evento**

Single Event Efect (SEE) pueden ser calificados en 3 tipos de efecto dependiendo del orden de permanencia de cada uno:

1. *Single Event Upset* (soft error / erros temporarios de funcionamiento)
2. *Single Event Latchup* (soft or hard error / temporaries o permanents de funcionamiento)
3. *Single Event Burnout* (hard failure / error a nivel hardware, sin solucion)

***Single Event Upset***

Single Event Upset (SEU) es definido por la NASA como “radiation-induced errors in microelectronic circuits caused when charged particles (usually from the radiation belts or from cosmic rays) lose energy by ionizing the medium through which they pass, leaving behind a wake of electron-hole pairs”. [Ref: NASA Thesaurus] (errores inducidos por radiación en circuitos microelectrónicos causados por partículas perdidas cargadas de energía que ioniza el medio a medida que lo atraviesa, dejando en su recorrido un sendero de pares electrón-hueco).

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

Los SEUs pueden ocurrir en circuitos analógicos, digitales o en componentes ópticos, también generar un efecto no deseado en las zonas que rodean al circuito. Típicamente aparecen en el circuito como un pulso transitorio en la lógica 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 de registro o de memoria, a lo cual llamamos Multiple Bit SEU o MBU (Multiple Bit Upset), lo cual es un gran problema para el sistema de detección y corrección de errores EDAC (error detection and correction).

Un SEU de severa gravedad es un Single Event Functional interrupt (SEFI) en el cual el SEU afecta el sistema de control del circuito pudiendo configurarlo en un modo de testo, de cambio de estado de trabajo, o simplemente a uno no definido en el sistema. El SEFI saca al dispositivo de su funcionamiento normal, por lo requiere de un power reset para recuperar su funcionamiento normal.

***Single Event Latchup***

Single Event Latchup (SEL) es una condición que causa la perdida de funcionalidad del dispositivo debido a un SEU llevándolo a un estado estacionario. Los SELs se clasifican como Hard Errors y son potencialmente destructivos, pudiendo causar daños permanentes como consecuencia de provocar un estado de alta corriente de funcionamiento, por arriba de las especificaciones. Esta condición de Latched puede destruir los dispositivos, arrastrar la tensión del bus a cero, o dañar la fuente de alimentación. Originalmente, el concepto de latched 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 power off-on (reset) del mismo. Si dicho reset no es realizado en 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 latchup disminuye con el aumento de la temperatura, así como con el aumento de la sección transversal [[4]](#endnote-4).

***Single Event Burnout***

Single Event Burnout (SEB) es una condición que puede causar la destrucción del dispositivos por un estado de alta corriente en un transistor de potencia. SEB causa que el dispositivo falle permanentemente, incluyendo destrucción de MOSFET de potencia, ruptura de compuertas (Gates), congelamiento de bits, ruido en CCDs (charge-couple devices). Un SEB puede desencadenar un estado de bias de un MOSFET de potencia que haya estado en OFF state (estado inactivo) cuando un ion pesado que lo atraviese deposite suficiente carga como para encender dicho dispositivo. Fue demostrado que la susceptibilidad de los dispositivos a los SEB disminuye con el aumente a la temperatura [[5]](#endnote-5).

Un MOSFET de potencia puede sufrir un Single Event Gate Rupture (SEGR) que es la formación de un camino conductor (ruptura dieléctrica localizada) en la Gate Oxide originando la destrucción del dispositivo [[6]](#endnote-6).

**Carga critica**

Los efectos de los SEUs empeoraron a causa de la reducción de la “carga critica” de los dispositivos, por la reducción de su tamaño, el aumento de transistores por chip y su alta complejidad.

Podemos clasificar la susceptibilidad a los SEUs según la tecnología de los dispositivos:

- CMOS/SOS (menos susceptibilidad)

- CMOS

- ESTÁNDAR BIPOLAR

- BIPOLARES SCHOTTKY DE BAJAS TENSIONES

- NMOS DRAMs (más susceptibles)

Latchup y destrucción de circuitos no suelen ocurrir cuando los dispositivos están fabricados con GaAs, pero su susceptibilidad a los SEUs aumenta en una pequeña proporción[[7]](#endnote-7).

La inmunidad del dispositivo está determinado por su *Linear Energy Transfer Threshold* (). El está definido como el minino LET capaz de causar un SEE en un flujo de de partículas de 107 ions/cm2. Aquellos dispositivos inmunes a los SEE están definidos por tener un [[8]](#endnote-8). Un bajo implica sensibilidad a protones.

Si un dispositivo no es inmune a SEU, se analiza el promedio y efectos causados por SEU en este de la siguiente manera:

|  |  |
| --- | --- |
| Device LETth | Environment to be Assessed |
| < 10 MeV·cm²/mg | Cosmic ray ions, trapped protons, solar flare protons |
| 10 - 100 MeV·cm²/mg | Cosmic ray ions |
| > 100 MeV·cm²/mg | No analysis required |

Las tendencias actuales (por ejemplo, la reducción de tamaño y energía del dispositivo, aumento de resolución, de memoria y velocidad) sólo aumentan la susceptibilidad a SEUs. Esto se ve fácilmente cuando se considera el dispositivo como un simple condensador (C) sobre el cual las partículas ionizadas depositan suficientes cargas (Q) para dar lugar a una tensión (es decir, un estado lógico). El SEU se produce cuando LET> Qcrit.

Como el tamaño de las zonas activas de los dispositivos disminuye, la capacidad también lo hace y por lo tanto la carga necesaria para inducir el SEU disminuye con estos. La profundidad de los dispositivos no a sido prácticamente afectada, sino su longitud y anchura son los que fueron reducidos. Si consideramos un dispositivo cuadrado de tamaño característico L x L, la carga crítica para el cambio de estado del mismo es proporcional su tamaño cuadrado ().

Esta carga crítica es la necesaria para generar un cambio de estado binario "1" a "0" o viceversa en una memoria, pero es menor que la carga total almacenada. En concreto, Qcrit es entonces la diferencia entre la carga de nodo almacenada y la carga mínima requerida para que el amplificador de censado pueda leer correctamente el dato. En los circuitos de SRAM, Qcrit depende no sólo de los niveles de cargas acumulados, sino también de la forma temporal de los impulsos de corriente[[9]](#endnote-9).

**Modelado de la falla**

**Modelos utilizados**

El impacto en el circuito depende de la sensibilidad a generar cargas. El efecto es difícil de simular debido a que el impacto del circuito depende del pulso tanto como de la respuesta dinámica del circuito en si. El transitorio puede ser modelado como una inyección de tipo doble exponencial de corriente, según [NOTA AL PIE][[10]](#endnote-10)[/NOTA AL PIE]

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

**Modelo a utilizar**

Como el modelo del transitorio de doble exponencial llevara mucho tiempo y procesamiento computacional complejo, optamos por reemplazar dicho modelo por una aproximación lineal más simple.

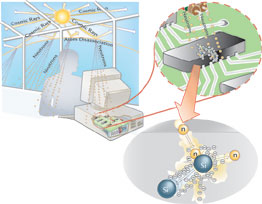
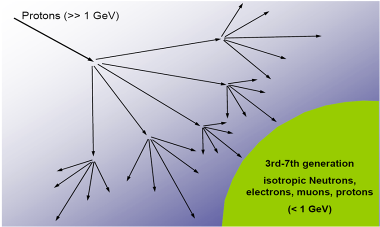
FUERA DEL TEXTO

Los Hard Errors son permanentemente evitados, lo que puede darse a través de la selección de partes y blindaje. Desafortunadamente, el blindaje es de poco valor para la prevención de SEEs. Para la mitigación de los Soft Errors, otros métodos pueden ser la detección y corrección de errores (EDAC) y su redundancia.

Los blindajes típicamente otorgan una reducción significativa para Soft Errors ocasionados por llamaradas solares reduciendo moderadamente el flujo de protones. Este tiene poco efecto de protección ante protones de alta energía, y más aun con restricciones de peso en el mismo, como por ejemplo para uso aeroespacial. Para algunos casos, el blindaje tan solo empeora el problema, ya que reduce la velocidad de las partículas que lo atraviesan, permitiendo un mayor tiempo de interacción con el dispositivo, aumentando la energía transmitida durante un SEE .

Los dispositivos micro-electrónicos son susceptibles a daños o fallas al ser expuestos a la radiación debido a su estructura y forma de funcionamiento. Dicha estructura está constituida por material semiconductor (silicio) que opera por regulaciones de flujo de corriente o de cantidad de carga eléctrica acumulada en un pozo de potencial (potential well). La radiación electromagnética, incluyendo cualquier partícula energética (electrones, protones, neutrones) o fotones (rayos gamma, rayos X), altera estas precisas condiciones de regulación y carga eléctrica, produciendo fenómenos de evento único conocidos como SEP (Single Event Phenomena). En el presente trabajo se analizaran los efectos producidos por los SEPs, conocidos como Single Event Effects (SEEs).

Los Single Event Effects (SEEs) son causados por una sola particula entrante, como por ejemplo, flujos de rayos cósmicos y protones (partículas y núcleos de átomos de alta energía) presentes en el universo, fuera de nuestra atmosfera. Si tan solo una partícula cargada llegara a impactar en un transistor de una celda de memoria de una computadora, este depositaria una carga adicional en esta dando como resultado una reprogramación natural de la memoria.

Si bien la atmosfera terrestre provee un muy eficiente escudo para los rayos cósmicos (generlamente protones), algunas partículas logran ingresar e impactar en átomos de nitrógeno u oxigeno en la parte más externa de la atmosfera produciendo un extenso espectro de diversas partículas cargadas con grandes niveles de energía (proceso conocido como espalación). La mayoría de estas partículas son detenidas y absorbidas por la atmosfera terrestre, pero algunas logran penetrarla y alcanzan altitudes ocupadas por el humano.

Otra fuente importante de SEEs son las impurezas en el material del dispositivo. Por ejemplo, el Plomo utilizado para la soldadura, puede tener restos de Uranio(U) o Torio(Th), ambos son naturalmente elementos radioactivos que generan emisiones α, pudiendo luego liberar cargas y causar SEEs.

1. Robert Baumann. *Handbook of semiconductor manufacturing tecnology*, chapter chapter 31, pages 31–1 to 31–23. Taylor & Francis Group, LCC, second edition, 2007. [↑](#endnote-ref-1)
2. L. W. Massengill P. E. Dodd. Basic mechanisms and modeling of singleevent upset in digital microelectronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50(no. 3), June 2003. [↑](#endnote-ref-2)
3. M. Lauriente, A. L. Vampola, "Spacecraft anomalies due to radiation environment in space," NASDA/JAERI 2nd International Workshop on Radiation Effects of Semiconductor Devices for Space Applications, Tokyo, Japan, March 1996. [↑](#endnote-ref-3)
4. I. Mouret, M. Allenspach, R.D. Schrimpf, J.R. Brews, K.F. Galloway, P. Calvel, "Temperature and angular dependence of substrate response in SEGR," IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 41, no. 6, pp. 2216-2221, 1994. [↑](#endnote-ref-4)
5. G.H. Johnson, R.D. Schrimpf, K.F. Galloway, R. Koga, "Temperature dependence of single-event burnout in n-channel power MOSFETs," IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. 39, pp. 1605-1612, 1992. [↑](#endnote-ref-5)
6. <http://holbert.faculty.asu.edu/eee560/see.html> [↑](#endnote-ref-6)
7. G.C. Messenger, M.S. Ash, The Effects of Radiation on Electronic Systems, 2nd edition, Van Nostrand Reinhold, NY, 1992. [↑](#endnote-ref-7)
8. K. LaBel, "Single event effects specification," [radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/seespec.htm](http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/seespec.htm), 1993. [↑](#endnote-ref-8)
9. <http://holbert.faculty.asu.edu/eee560/see.html> [↑](#endnote-ref-9)
10. G. C. Messenger. Collection of charge on junction nodes from ion tracks. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, pages pp. 20024–2031, 1982. [↑](#endnote-ref-10)