**INTRODUCCION**

The uninterrupted and progressive miniaturization of microelectronic devices while resulting in more powerful computers, has also made these computers more susceptible to the effects of ionizing radiation.

La ininterrumpida y progresiva disminución en tamaño de los dispositivos micro-electrónicos, mientras genera como resultado computadores cada vez más potentes, también ocasiona que estos sean cada vez más susceptibles a efectos de ionización por radiación.

The constant evolution of technologies which are employed to manufacture integrated

circuits has lead to a drastic reduction of transistor dimensions. This

process converges to a limit at which an invulnerability to errors, caused by

external agents is very unlikely. These faults reduce the reliability of the considered

circuits.

Esta constante evolución de la tecnología impulsada por las grandes compañías manufacturadoras de circuitos integrados a llevado a la dramática reducción en el dimensionamiento de los transistores. Dicho proceso converge hasta un límite en el cual la invulnerabilidad a errores causados por agentes externos es muy poco deseada, reduciendo la fiabilidad de los circuitos considerados.

**Single Event Phenomena**

Microelectronic devices are susceptible to damage or interruption from exposure to radiation. Such devices contain structures made up of semiconductor materials that operate by regulating current flow or the amount of electrical charge held in a potential well. Interaction with radiation, including any energetic particle (electrons, protons, neutrons) or photon (gamma rays, X-rays), alters these precisely regulated conditions and produces SEP (see sidebar, [Types of Single Event Effects](http://www.aero.org/publications/crosslink/winter2000/03_sidebar1.html)).

Los dispositivos micro electrónicos son susceptibles a danos o interrupciones al ser expuestos a la radiación debido a su estructura y forma de funcionamiento. Dicha estructura está hecha de material semiconductor que opera por regulaciones de flujo de corriente o por la cantidad de carga eléctrica acumulada en un pozo de potencial (potential well). La interaccion con radiación, incluyendo cualquier particula energética (electronces, protones, neutrones) o fotones (rayos gamma, rayos X) altera estas condiciones precisas de regulación y se producen SEPs (Single Event Phenomena)

SEP are classified by the type of effect that occurs in the device, known as a single event effect (SEE). Types of SEE include single event upset (SEU), latchup, burnout, gate rupture, and total dose.

SEP son clasificados por el tipo de efecto que ocurre en el dispositivo, conocidos como Single Event Effect (SEE).

**HISTORIA**

**Several years after single event upset (SEU) was discovered in space in 1975, J. Ziegler [1] noted the potential for microelectronics on the ground to be susceptible to SEU from cosmic ray secondaries, primarily neutrons**. **Ziegler’s work was prompted by the work of T. May and M. Woods [2] in uncovering errors in RAM chips due to upsets caused by the alpha particles released by U and Th contaminants within the chip packaging material.** The alpha problem was regarded seriously and chip vendors took specific actions to reduce it to tolerable levels, mainly by reducing the alpha particle flux emitted by packaging and processing materials to generally <0.01 /cm²-hr [3].

Unfortunately, the potential for cosmic rays causing SEU on the ground received little attention, and has received almost no public recognition on the part of chip vendors. Very recently, IBM revealed that beginning in 1979, they undertook a very large proprietary effort to understand the phenomenon of upsets at ground level. This 15-year effort involved many different disciplines and activities: field testing of memories, accelerated testing using cyclotron beams, detailed model development on all levels, environmental monitoring and coordination with device designers [4].

In contrast to the lack of recognition of the key role played by cosmic radiation for ground level upsets, the importance of this mechanism was recognized by people dealing with avionics, i.e., electronics in aircraft, relatively early in the open literature. Avionics SEU by the atmospheric neutrons was first predicted in 1984 [5] and later rigorously demonstrated to occur in flight in 1992[6].

Varios anos después de que los Single Event Upset (SEU) fueran descubiertos en el espacio en 1975, J. Ziegler noto el potencial de la microelectrónica de ser susceptible a SEU a nivel del mar causado por rayos cósmicos y neutrones, principalmente. El trabajo de Ziegler estuvo motivado por el labor de T. May and M. Woods, quienes descubrieron que los errores causando en chips de memoria RAM fueron por partículas alfa liberadas por los materiales contaminante U y Th del embalaje del chip. Este problema fue tomado muy seriamente y los fabricantes de chips tomaron acción específica en reducir los niveles de tolerancia a SEU, principalmente reduciendo del flujo de partículas alfa emitidas por el embasado y el procesamiento de materiales a un nivel general

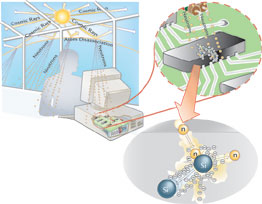
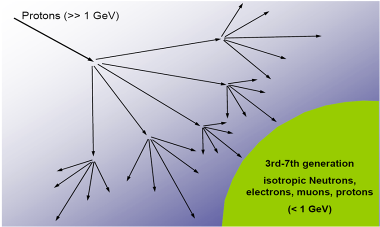
Desafortunadamente, el potencial de los rayos cósmicos en producir SEU a nivel del mar recibió poca atención, y prácticamente no recibió ningún reconocimiento público por parte de los vendedores. Muy recientemente, IBM revelo a principios de 1979, que le llevo un un esfuerzo muy grande al cabo de un tiempo para poder entender el fenómeno de los trastornos causados a nivel del mar. Esos 15 años de esfuerzos involucraron gran cantidad de disciplinas y actividades: prueba de campo en memorias, ensayos mediante aceleración de partículas, desarrollo de modelos detallados en todos los niveles, testeo y monitoreo ambiental y coordinación con los diseñadores de los dispositivos.

En contraste con la falta de reconocimiento del papel clave desempañado por la radiación cósmica en la generación de trastornos SEU a nivel del mar, las empresas relacionadas a la aviación le dieron el merecido reconocimiento y preocupación en literatura abierta no mucho tiempo después. Los trastornos SEU en el rubro de la aviación causado por neutrones atmosféricos fueron predichos en 1984, y más tarde, en 1992, fue demostrado con mayor rigor durante un vuelo.

**DEFINICION**

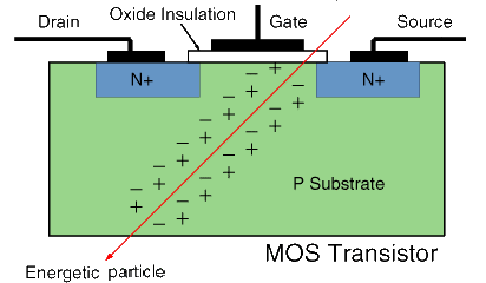
Single Event Effects (SEE) are caused by one single incoming particle. As an example, in space outside the atmosphere there is a flux of cosmic rays, i.e., protons, ( particles and atomic nuclei at high energies. If just one such charged particle happens to hit the active volume in a bit of a computer memory, it deposits free charge in it. Since charge is what represents the information (0 = no charge, 1 = more than a minimum amount of charge), this can flip a bit from 0 to 1 (or vice versa). Thus, nature is randomly re-programming computer memories due to the action of cosmic rays.

Single Event Effects (SEE) son causados por una sola particular entrante. Como ejemplo, en el espacio, fuera de nuestra atmosfera, existe un flujo de rayos cósmicos y protones (partículas y núcleos de átomos de alta energía). Si solo una partícula cargada llega a chocar al volumen activo del bit de una memoria de computadora, este depositaria una carga adicional en esta. Como la carga de energía depositada es la que representa la información de esta memoria (0=ninguna carga , 1=un nivel de carga mayor al mínimo), esto cambiaria la información de la memoria de un 0 a un 1, o viceversa, dándonos como resultado una reprogramación natural de la memoria de la computadora causada por la acción de rayos cósmicos.

The atmosphere provides very efficient shielding from these cosmic rays, but still there are problems also at ground level. The primary cosmic rays (mostly protons) induce nuclear reactions in the upper atmosphere, so called spallation reactions. This essentially means that a high-energy proton hits a nitrogen or oxygen atomic nucleus and smashes it into pieces. The result of this is a whole spectrum of various particles with a wide range of energies. Most of these particles are stopped by the atmosphere, but some of them penetrate it and reach altitudes occupied by man (0-10 km). The most important particles for SEE are neutrons, which are uncharged and therefore penetrate the atmosphere rather efficiently, and they interact strongly with nuclei, which makes them efficient in causing SEEs.

La atmosfera terrestre prove un muy eficiente escudo para los rayos cósmicos, pero igualmente existen algunos problemas a nivel del mar. El rayo cósmico principal (generalmente protones) general reacciones nucleares in la zona más externa de la atmosfera, llamada también “espalacion”. Escencialemente esto quiere decir que un proton de alta energía choca contra un atomo de nitrógeno u oxigeno y lo rompe en pequenos pedazos, y como resultado, tenemos un gran espectro de varias partículas cargadas con grandes niveles de energía. La mayoría de estas aprticulas son detenidas y obsorvidas por la atmosfera terrestre, pero algunas logran penetrarla i alcanzan altitudes ocupadas por el humano.

Las partículas mas importante en los SEE son los neutrones, los caules al estar descargados, penetran la atmosfera de una manera mucho mas eficiente, y al interactrar con nucleos pesados se vuelven eficientes para causar SEEs.  


Another source of SEEs are impurities in the device material. For instance, in lead used for soldering, there might be traces of uranium or thorium, which both are naturally radioactive elements, decaying by α emission. The α particle can then release charge and cause a SEE.

Otra fuente de SEEs son las impurezas en el material del dispositivo. Por ejemplo, el plomo utilizados para la soldadura puede tener restos de uranio o torio, ambos son naturalmente elementos radiactivos, la cual decae con la emisión α. La partícula α puede luego liberar cargas y causar un SEE.

**There is a formal technical definition of SEE:**

“SEE is any measurable or observable change in state or performance of a microelectronic device, component, subsystem, or system (digital or analog) resulting from a single energetic particle strike. SEE include single-event upset (SEU), multiple-bit upset (MBU), multiple-cell upset (MCU), single-event functional interrupt (SEFI), single-event latch-up (SEL), single-event hard error (SHE),single-event transient (SET), single-event burnout (SEB), and single-event gate rupture (SEGR).”

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

-------------------------------------------------------------------------------------------------

Single event phenomena can be classified into three effects (in order of permanency):

Single Event Phenomena (SEP) 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**

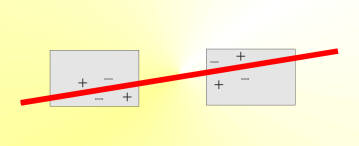
*Single event upset* (SEU) is defined by NASA as "radiation-induced errors in microelectronic circuits caused when charged particles (usually from the radiation belts or from cosmic rays) lose energy by ionizing the medium through which they pass, leaving behind a wake of electron-hole pairs." [Ref: NASA Thesaurus] SEUs are transient soft errors, and are non-destructive. A reset or rewriting of the device results in normal device behavior thereafter. An SEU may occur in analog, digital, or optical components, or may have effects in surrounding interface circuitry. SEUs typically appear as transient pluses in logic or support circuitry, or as bit flips in memory cells or registers. Also possible is a *multiple-bit SEU* in which a single ion hits two or more bits causing simultaneous errors. Multiple-bit SEU is a problem for single-bit *error detection and correction* (EDAC) where it is impossible to assign bits within a word to different chips (*e.g.*, a problem for DRAMs and certain SRAMs). A severe SEU is the single-event functional interrupt (SEFI) in which an SEU in the device's control circuitry places the device into a test mode, halt, or undefined state. The SEFI halts normal operations, and requires a power reset to recover.

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 (errors inducidos por radicion en circuitos microelectronicos causados por particulas perdidas cargadas de energia que ioniza el medio a medida que lo atraviesa, dejando en su recorrido un sender de pares electron-hueco)." [Ref: NASA Thesaurus].

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

Los SEUs pueden ocurrir en circuitos analógicos, digitales o en componentes ópticos, o también generar un efecto no deseado en las zonas que rodean al circuito. Tipicamente aprarecen en el circuito como un pulso transitorio en la lógica o como un cambio de estado lógico de un bit en las celdas de memoria o registros. Tambien en algunas ocaciones, un ion puede afectar dos o multiples bits generando varios cambios de registro o de memoria, a lo cual llamamos Multiple Bit SEU o MBU (Multiple Bit Upset). MBU es un gran problema para el sistema de detección y corrección de errores EDAC (error detection and correction).

Un SEU de severa gravedad is te Single Event Functional interrupt (SEFI) en el cual un SEU que afecta el sistema de control del circuito podría configurardo a un modo de testo, de cambio de estado de trabajo, o a un modo indefinido. El SEFI saca al dispositivo de su funcionamiento narmal, por lo requiere de un power reset para recuperar el funcionamiento normal.

   
[Source: [Space Radiation Associates](http://www.spacerad.com/)]

**Single Event Latchup**

*Single event latchup* (SEL) is a condition that causes loss of device functionality due to a single-event induced current state. Kolasinski *et al.* first observed SEL in 1979 during ground testing.[4] SELs are hard errors, and are potentially destructive (*i.e.*, may cause permanent damage). The SEL results in a high operating current, above device specifications. The latched condition can destroy the device, drag down the bus voltage, or damage the power supply. Originally, the concern was latchup caused by heavy ions, however, latchup can be caused by protons in very sensitive devices.[5,6] An SEL is cleared by a power off-on reset or power strobing of the device. If power is not removed quickly, catastrophic failure may occur due to excessive heating, or metallization or bond wire failure. SEL is strongly temperature dependent: the threshold for latchup decreases at high temperature, and the cross section increases as well.[7,8]

Single Event Latchup (SEL) es una condición que causa la perdida de funcionalidad del dispositivo debido a un SEU que lleva a un estado estacionario. Los SELs se clasifican como Hard Errors y son potencialmente destructivo, pudiendo causar daños permanente 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, como una corriente por arriba de las especificaciones, podría concluir en una falla permanente. Los SELs son fuertemente dependientes de la temperatura, el umbral para el latchup disminuye con el aumneto de la temperatura, así como el aumento de la sección transversal produce lo mismo.

**Single Event Burnout**

*Single event burnout* (SEB) is a condition that can cause device destruction due to a high current state in a power transistor. SEB causes the device to fail permanently. SEBs include burnout of power MOSFETs, gate rupture, frozen bits, and noise in CCDs (charge-coupled devices). SEB of power MOSFETs was first reported by Waskiewicz *et al.* in 1986.[9] Only SEB of n-channel power MOSFETs has been reported.[10] An SEB can be triggered in a power MOSFET biased in the OFF state (*i.e.*, blocking a high drain-source voltage) when a heavy ion passing through deposits enough charge to turn the device on. SEB susceptibility has been shown to decrease with increasing temperature.[11]

A power MOSFET may undergo *single-event gate rupture* (SEGR), which is the formation of a conducting path (*i.e.*, localized dielectric breakdown) in the gate oxide resulting in a destructive burnout. Fischer was the first to report on SEGR of power MOSFETs in 1987.[12] SEB can also occur in bipolar junction transistors (BJTs) as was first reported by Titus *et al.* in 1991.[13] Swift *et al.* have described a new hard error, that of single-event dielectric rupture (SEDR).[14] SEDR (also referred to as micro-damage) occurs in CMOS and is similar to SEGR observed in power MOSFETs.

Single Event Burnout (SEB) es una condicion que puede causar la destruccion del dispositivos por una estado de alta corriente en un transistor de potencia. SEB causa que el dispositivo falle permanentemente, incluyendo destrucción de MOSFET de potencia, ruptura de 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 cuando un ion pesado que lo atraviese deposite suficiente carga como para prender al dispositivo. La suseptibilidad de los dispositivos a los SEB fue demostrada disminuir con el aumente a la temperatura.

Un MOSFET de potencia puede sufrir un Single Event Gate Rupture (SEGR), el cual es la formación de un camino conductor (ruptura dieléctrica localizada) en la Gate Oxide originando la destrucción del dispositivo.**Environmental and Design Factors**

To estimate the upset rate, one must consider the mechanism by which radiation particles cause the anomaly. The SEUs are caused by two different space radiation sources:

1. high energy protons, and
2. cosmic rays, specifically, the heavy ion component of either solar or galactic origins.

Para estimar los niveles de perturbaciones, uno debe considerer el mecanismo por el cual las particulas de radiacion causan las anamolias. Los SEUs son causados por dos tipos de radiación espacial:

1. Protones de alta energía
2. Rayos cósmicos (especialmente iones pesados de origen solar o galactico)

The latter heavy ions cause direct ionization within a device. Protons can make a large contribution to the overall upset rate (particularly for LEO). When the feature size is <0.3 µm, then protons will create SEU by direct ionization. Protons typically do not cause an upset through direct ionization, but rather through complex nuclear reactions (spallation) in the vicinity of the sensitive node (see figure below).

Los ions pesados causan ionizacion directa en el dispositivo, los protons pueden hacer una gran contribucion a la tasa general de perturbaciones. Cuando el tamaño característico del dispositivo es <0.3um, los protones crean SEU por ionización directa a través de reacciones nucleares complejas (spallaion) en las vencindades de los nodos sensibles.

*Spallation* is a nuclear reaction in which two or more fragments or particles are ejected from the target nucleus; it is the heavy recoil nuclei ions, such as 25Mg, which can then cause SEU. Example spallation reactions from neutrons and protons include Si(*n*,a)Mg, Si(*n*,*p*)Al [15], Si(*p*,2*p*)Al, and Si(*p*,*p*a)Mg.[16,17,18]

Spallation es una reaccion nuclear en donde dos o mas fragmentos o particulas son ejectadas del nucleo de algún ion pesado, como el del Mg, el cual puede causar un SEU.

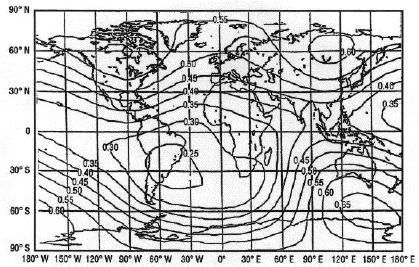
  
Schematic showing how galactic cosmic rays deposit energy in an electronic device.

Esquematico mostrando como un rayo cosmic deposita energia en un dispositivo electronic.  
(Source *Spacecraft Anomalies due to Radiation Environment in Space* by Lauriente and Vampola [19])

Solar flare particle events pose the most extreme SEU producing environment, especially for spacecraft in interplanetary space.[20] Experiments aboard the Combined Release and Radiation Effects Satellite (CRRES) showed a dramatic increase during a solar flare.[21] However, 90% of all SEUs on CRRES were produced by protons contrary to the pre-launch prediction that most upsets would be caused by cosmic rays.[22] Gussenhoven *et al.* state that based on CRRES data that most single-event upsets come from high energy protons via nuclear interactions and not through direct deposition from either protons or cosmic rays.[23] For LEO satellites, trapped protons, especially in the South Atlantic Anomaly (SAA), are the greatest SEE threat. The SAA, located at 30° S. latitude, 34.5° E. longitude, is shown in the geomagnetic field of Figure 2. Solar cycle activity affects the presence of trapped electrons and protons as shown below:

Las llamaradas Solares son el efecto mas extreme en la produccion de eventos SEU, principalmente para las naves espaciales durante su estadia en el espacio. Los experimentos que fueron llevados a cabo en el CRRES (Combined Release and Radiation Effects Satellite) mostraron un dramático incremento de SEUs durante estos eventos solares. A pesar de todo, el 90% de los SEUs analizados en el CRRES fueron originados por protones y sus desencadencaiones de reacciones nucleares, contrariamente con lo predicho anteriormente, en donde se pensaba que iban a ser consecuencia de los rayos cósmicos principalmente y de ionización directa.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Solar Min | Solar Max |
| Electron Intensities | lower | higher |
| Proton Intensities | higher | lower |

  
Geomagnetic field at sea level. Note the South Atlantic Anomaly (SAA) which is centered off the southeastern coast of South America

Campos Geomagneticos a nivel del mar. Note el South Atlantic Anomaly (SAA) ubicado en el centro de la costa sudeste de América del Sur (allí ocurren los mayores SEE).   
(from the [Space Environments & Effects Program](http://see.msfc.nasa.gov/) at NASA's Marshall Space Flight Center).

Given the division of SEEs into soft and hard errors, it is obvious that permanent hard errors are to be completely avoided. Avoidance may be realized through parts selection and shielding. Unfortunately, shielding is of little value for preventing SEUs. For mitigating soft SEEs, other methods, such as error detection and correction (EDAC), and redundancy, may be employed.

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

Shielding typically has little effect. Shielding high-energy protons while observing weight restrictions is a difficult task. Adams found that under some conditions that shielding can worsen the problem, since as ions slow down in the shielding their LET increases.[24] Shielding produces significant reductions in soft components like solar flare particles, and moderate reductions in the trapped proton flux. Shielding is ineffective against galactic cosmic rays due to their high energies.

Los blindajes típicamente otorgan una reducción significativa para Soft Errors ocasionados por llamaradas solares y reducen moderadamente el flujo de protones, pero tienen 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 mayo tiempo de interacción con el dispositivo aumentando el LET durante un SEU.

#### Critical Charge

SEU was first observed in bipolar flip-flops in 1979. Original work in this area was treated with skepticism. SEU has emerged as one of the major issues for application of microelectronics in space. SEU effects have become worse as devices have evolved because of lower “critical charge” due to small device dimensions, and large numbers of transistors per chip and overall complexity. Nichols ranks the susceptibility of current technologies to SEUs:[25]

* CMOS/SOS (least susceptible)
* CMOS
* Standard bipolar
* Low power Schottky bipolar
* NMOS DRAMs (most susceptible)

For GaAs circuits, latchup and burnout do not occur.[26] However, SEU susceptibility is slightly higher in GaAs devices than in Si devices.[27]

Los SEUs emergieron como uno de los principales y peores problemas en la aplicación de la microelectrónica en el espacio. Sus efectos empeorarocn a causa de la reducción de la “carga critica” de los dispositivos, por la reducción de su tamaño, por el gran aumento de transistores por chip y su alta complejidad.

Podemos clasificar la suceptibilidad a los SEUs según la tecnología:

- CMOS/SOS (menos suceptibilidad)

- CMOS

- ESTÁNDAR BIPOLAR

- BIPOLARES SCHOTTKY DE BAJAS TENSIONES

- NMOS DRAMs (mas suceptibles)

Latchup y destrucción de circuitos no suelen ocurrir cuando los dispositivos estan fabricados con GaAs, pero su suceptibilidad a los SEUs aumenta en una pequeña proporción.

Device immunity is determined by its *linear energy transfer threshold* (LETth). The LETth is defined as the minimum LET to cause a single-event effect at a particle fluence of 107 ions/cm2. SEE-immune is defined as a device having an LETth > 100 MeV·cm²/mg [28] (~iron threshold, Z>26). Low LETth implies proton sensitivity. If a device is not SEU immune, the device is analyzed for SEU rates and effects as follows:

La inmunidad del dispositivo esta determinado por su Linear Energy Transfer Threshold (). El esta definido como el mininmo LET capaz de causar un SEE en un flujo de de partículas de 107 ions/cm2. Aquellos dispositivos inmunes a los SEE estan definidos por tenes un . 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 |

The LETth usually reduces as a device accumulates large TID.[29]

The present trends (*e.g.*, device size and power reduction, line resolution increase, increased memory and speed) will only heighten the SEU susceptibility. This is easily seen when one considers the device as a simple capacitor (*C*) upon which the ionized particle deposits sufficient charge (*Q*) to result in a voltage (*i.e.*, logic state) change. SEU occurs when LET > *Qcrit*.

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.

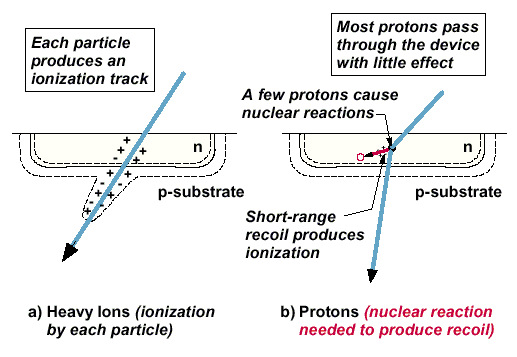
Since the LETth is equivalent to the LET required to produce a voltage change (D*V*) sufficient for an SEU, then mathematically:

LETth es equivalente a la LET necesaria para producir un cambio de voltaje (V) suficiente para generar un SEU, matemáticamente:

As the size of these active devices decreases, the capacitance will decrease and so the charge necessary to induce the SEU. The depth of the devices has been generally unchanged; it is the length and width of these devices that have been reduced. If we consider a square device of feature size, *L x L*, the critical charge for state change is proportional to the feature size squared (*Qcrit* a *L*2). Robinson *et al.* present the measured critical charge for a number of IC technologies (including NMOS, CMOS/bulk CMOS/SOS, i2L, GaAs, ECL, CMOS/SOI, and VHSIC bipolar) as being:[30]

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 afectada prácticamente, 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 ().

This *critical charge* is that charge necessary to flip a binary "1" to a "0" or vice-versa, but is less than the total stored charge. Specifically, *Qcrit* is then the difference between the storage node charge and the minimum charge required for the sensing amplifier to read correctly.[31] In SRAM circuits, *Qcrit* depends not just on the charge collected but also the temporal shape of the current pulse.

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. [31] En los circuitos de SRAM, Qcrit depende no sólo de los nivles de cargas acumulados, sino también de la forma temporal de los impulsos de corriente.  
[Source: "[Space Radiation Effects on Microelectronics](http://parts.jpl.nasa.gov/docs/Radcrs_Final.pdf)," NASA Jet Propulsion Laboratory]

**Elementary Model for Heavy Ions**

A very elementary model of SEU behavior can be formed using the concept of LET through some depth of a parallelepiped-shaped device. Start by calculating the energy deposited, *Edep*, as the particle traverses a chord of length *s* through the sensitive volume of the device (see diagram below).

Un modelo muy elemental de la conducta SEU se pueden formar usando el concepto de LET a través de un dispositivo con forma de paralelepípedo de cierta profundidad. Comience por calcular la energía depositada, Edep, a medida que la partícula recorre una camino de longitud s en la zona sensible del dispositivo (véase el diagrama).

*Edep* = *LET* p *s*

The deposited charge depends on the energy required to generate an electron-hole pair, *wehp*,

Las cargas depositadas dependen de la energia requerida para generar un par electron-hueco, Wehp,

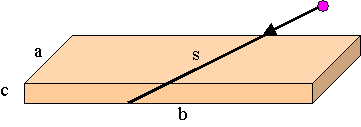
*Qdep* = *Edep q* / *wehp*

where *q*=1.6022x10-19 Coulombs/*e* and *wehp* for a few materials are given in the table below:

donde y Wehp para algunos materiels esta dado en la siguiente tabla:

Properties of intrinsic germanium, silicon, gallium arsenide, silicon dioxide, silicon nitride, and aluminum oxide at 27°C unless otherwise noted.[27]

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Material** | **Ge** | **Si** | **GaAs** | **SiO2** | **Si3N4** | **Al2O3** |
| Type | Semiconductor | Semiconductor | Semiconductor | Insulator | Insulator | Insulator |
| Atomic/Molecular Weight | 72.6 | 28.09 | 144.63 | 60.08 | 140.27 | 101.96 |
| Density (g/cm3) | 5.33 | 2.33 | 5.32 | 2.27 | 3.44 | 3.97 |
| Electron-hole pair generation energy (eV) | 2.8 | 3.6 | 4.8 | 17. | 10.8 | 19.1 |



Using such a simple approach, a first-order estimate of the minimum LET required for causing an SEU can be computed. Consider a parallelepiped of dimensions *a*, *b*, *c* where *c* is the device depth. The minimum LET corresponds to the maximum chord length possible, *smax*, which is the diagonal of the parallelepiped.

Utilizando un enfoque simple,se puede calcular en una primera estimación el orden de LET mínimo necesario para causar un SEU. Considere la posibilidad de un paralelepípedo de dimensiones a, b, c, donde c es la profundidad del dispositivo. El LET mínimo corresponde a la longitud de recorrido posible, Smax, que es la diagonal del paralelepípedo.

*s2max*=*a*2+*b*2+*c*2

The minimum LET necessary to cause an upset can then be calculated from

El mínimo LET necesario para causar una perturbación puede ser calculado como:

LETth=*Qcrit\*wehp* /(*q\**p*\*smax*)

Likewise, there is a minimum distance, *smin*, that a particle of given LET must travel before being able to deposit sufficient energy to cause an SEU.

Asimismo, existe una distancia mínima, smin, que una partícula de LET debe de recorrer antes de poder depositar la energía suficiente para causar un SEU.

*smin*=*Qcrit\* wehp*/(*q\**p\*LET)

Hence, the particle *angle of incidence* upon the device is also important. As the incidence angle deviates from normal, the path length traversed by the radiation increases. The angle from incident at which upsets occur for a given particle LET is known as the *critical angle*, Oc

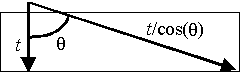
Por lo tanto, el ángulo de incidencia de las partículas sobre el dispositivo también es importante. A medida que el ángulo de incidencia se desvía de lo normal, la longitud del camino recorrido por la radiación aumenta. El angulo de incidencia para el cual se genera una perturbación para una determinada particula LET se conoce como angulo critico .

cos() = LET / LETC

The particles that produce upset are between an angle of Oc and pi/2. Therefore, there are two potential cases (note LETC < LETth)

La partícula que produce alteraciones se encuentra entre un ángulo de y . Por lo tanto, hay dos casos posibles (nota LETC <LETth):

1. Si LET > LETC, entonces todos los ángulos incidentes generan alteraciones.
2. Si LET < LETC, entonces hay un ángulo critico,, donde las alteraciones se producen para ángulos mayores a este.



For a parallelepiped particles incident at an angle O have a path that is 1/cos(O) longer than the path at normal incidence, thus producing more ionization charge. [Note: This "cosine law" fails in some cases, and must be checked for each device technology.] Unlike SEU behavior, SEB and SEGR susceptibility has been shown to decrease with increasing angles of incidence. [7,8,32,33]

Para una particula incidente en un paralelepípedo con un angulo tienen un camino que es 1/cos() más largo que el camino a una incidencia normal, produciendo así más cargas ionizantes.[Nota: Esta "ley del coseno" falla en algunos casos, y se analizará para cada tecnología de dispositivo.] A diferencia de comportamiento SEU, la susceptibilidad del SEB y SEGR disminuyen con el aumento de los ángulos de incidencia.

The energy deposited per unit path length as an energetic particle travels through a material is the *linear energy transfer* (LET). Note that the LET is normally defined by *dE*/*dx*; however, the LET used in SEU studies is actually the *mass stopping power* defined by (*dE*/*dx*)/p where p is the material density. This results in an LET unit of MeV/(mg/cm2) of material, which is the energy loss per density thickness. *Density thickness* (*td*) is the product of the material density and its thickness (*t*), *i.e.*, *td* =p·*t*. Therefore, the density thickness describes the areal density of electrons (electrons/cm2). The LET is dependent on the particle, its energy, and the material traversed.

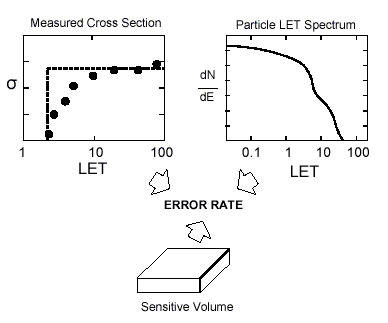
La energia depositada por unidad de longitud de la particula en la distancia recorrida a través del marial se define como Lineal Energy Transfer (LET). Teniendo en cuenta que LET se define normalmente como , en los estudios de SEU el LET es definido como “Mass Stopping Power” , donde es la densidad del material. Esto resulta en una unidad LET de MeV/(mg/cm2) de material, que es pérdida de energía por densidad de espesor. Density Thickness (td) es el producto de la densidad del material y su espesor (t), es decir, . Por lo tanto, el describe la densidad superficial de electrones (electrons/cm2).

El LET depende de la partícula, su energía, y el material atravesado.

**Practical SEU Calculation**

The upset rate may be reported as errors per day per chip, or errors per day per bit (errors/bit-day). Error rates of hardened devices can be of the order of 10-8 errors/bit-day; unhardened devices are generally several orders of magnitude higher.

La cantidad de perturbaciones se pueden registrar cono errors por day por chip, o errors por day por bit (errors/bir-day). El nivel de errores de los dispositivos endurecidos (con sistemas de disminución de susceptibilidad) estan por el orden de 108 errors/bit-day, y para aquellos no endurecidos, varias magnitudes mayores.

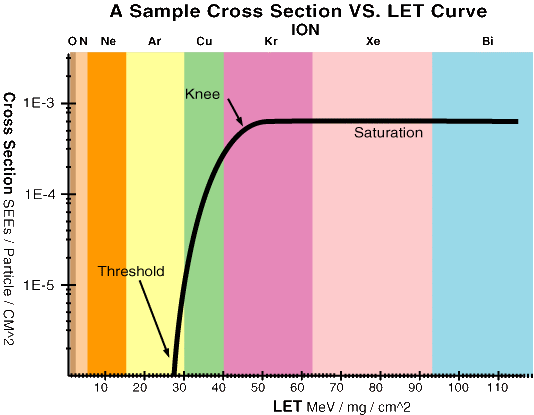
  
[Source: "[Space Radiation Effects on Microelectronics](http://parts.jpl.nasa.gov/docs/Radcrs_Final.pdf)," NASA Jet Propulsion Laboratory]

There are three basic steps in the calculation of SEU Rates:

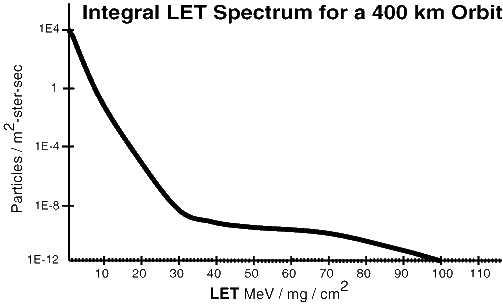
Hay tres pasos basicos para el registro de SEUs:

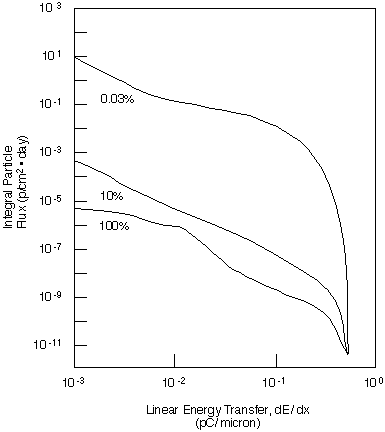
1. Measure the cross section (s) versus LET for example using accelerator testing. The device *cross section* is defined as the ratio of the number of upsets to the particle fluence. The experimentally determined cross section is a function of particle energy (LET).
2. Medición de la sección transversal () en función del LET.

La sección transversal del dispositivo se define como el cociente entre el número de perturbaciones y el flujo de partículas.

  
[Source: The Aerospace Corporation [SEE Primer](http://www.aero.org/capabilities/seet/primer.html)]

1. Determine the sensitive device volume. The sensitive volume is smaller than the actual device physical volume. The sensitive volume is generally different for SEE from heavy ions and protons, as well as SEL. The sensitive geometry and critical charge are the most difficult parameters to determine.
2. Determinar el volume del dispositivo en el cual este es sensible. Esta volumen de sensibilidad es siempre menor que el volumen físico del dispositivo y es diferente para los SEE de iones pesados y protones.
3. To determine the device error rate, integrate the cross section and sensitive device volume with the LET spectrum.
4. Para determinar el nivel de errors del dispositivo, hay que integrar la seccion transversal y el volumen sensible del dispositivo con el espectro de LET.

  
[Source: The Aerospace Corporation [SEE Primer](http://www.aero.org/capabilities/seet/primer.html)]

  
[Source: [The NASA ASIC Guide: Assuring ASICS for Space](http://parts.jpl.nasa.gov/asic/title.page.html)]

The Heinrich Curve above shows the integral energy loss spectrum at GEO. The 100% curve corresponds to solar max condition, and the environment is always worse. The 10% curve combines solar minimum cosmic rays and solar proton activity so that the environment is worse only 10% of the time. The 0.03% curve corresponds to an anomalously large solar flare.

Petersen *et al.* have developed a simple expression for the upset rate at GEO from galactic rays.[34] The GEO flux is due to galactic cosmic rays since protons at the outer edge of the radiation belts is assumed negligible. SEU error rate expressions are obtained using chord distribution function for the cross section. After integrating the flux and cross section over the range of energies (LET), the "figure of merit" formula for the error rate for the 10% environment results:

*R* = 5x10-10 ssat / (LETcrit)2

where *R* is the SEU error rate in errors per bit-day; ssat is the saturation SEU cross section in µm2; and LETcrit is the critical LET in units of pC/µm. For design purposes, the error rate may be estimated using the above expression with ssat = *a b* with (*a*,*b* >> *c*), and LETcrit=*Qcrit*/*c* where *c* is the silicon device depth, and *a*and *b* are its sides in microns (µm). The above expression provides an upper-bound estimate. One can replace the numeral 5 in the “figure of merit” equation with a value of 3.5 for GaAs devices. Multipliers have been developed for the figure of merit (FOM) formula to scale the error rate to other environments, especially solar flares:

|  |  |
| --- | --- |
| **Environment** | **Multiplier** |
| Petersen model (SEU figure of merit) | 1.0 |
| Galactic model (solar minimum) | 0.44 |
| "Ordinary" flare | 13 |
| 90% worst-case flare | 33 |
| Anomalously large flare | 5000 |