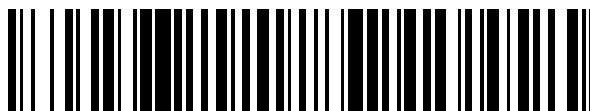


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 428 093**

51 Int. Cl.:

**G01R 31/302** (2006.01)

**G01R 31/28** (2006.01)

**G01R 31/308** (2006.01)

**G01R 31/3183** (2006.01)

**G01R 31/3181** (2006.01)

**G01R 31/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.10.2008 E 08843897 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.06.2013 EP 2203752**

54 Título: **Procedimiento de determinación de la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas**

30 Prioridad:

**26.10.2007 FR 0758621**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**05.11.2013**

73 Titular/es:

**EUROPEAN AERONAUTIC DEFENCE AND  
SPACE COMPANY EADS (33.3%)**

**37 Blvd. de Montmorency**

**75116 Paris, FR;**

**AIRBUS OPERATIONS (33.3%) y**

**ASTRIUM SAS (33.3%)**

72 Inventor/es:

**MILLER, FLORENT;**

**BUARD, NADINE;**

**WEULERSSE, CÉCILE;**

**CARRIERE, THIERRY y**

**HEINS, PATRICK**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 428 093 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Procedimiento de determinación de la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas

Dominio del invento

5 El propósito del invento es determinar la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas del tipo de iones pesados, neutrones y protones, poniendo en práctica la utilización conjunta de un sistema láser y de un código de predicción de fallo basado sobre la física de la interacción partícula/materia.

Estado de la técnica

10 Los entornos radiactivos naturales o artificiales (neutrones, protones, iones pesados, flash o destellos X, rayos gamma) pueden perturbar el funcionamiento de los componentes electrónicos. Estas perturbaciones son debidas a interacciones entre la materia y las partículas del entorno radiactivo. Una de las consecuencias es la creación de corrientes parásitas en el componente. Según la región en la que tienen lugar las interacciones entre la materia y las partículas, las corrientes parásitas producidas serán más o menos importantes. Esto traduce la presencia de zonas localizadas de acumulación o conjunto de cargas en el componente.

15 Tales agresiones por iones pesados y protones son típicamente encontradas, en el espacio, por satélites y lanzadores. A altitudes menos elevadas donde evolucionan aviones, se nota sobre todo la presencia de agresiones por neutrones. Al nivel del mar, tales agresiones pueden también ser encontradas y afectar a los componentes electrónicos embarcados en aparatos portátiles, o en vehículos.

20 Para poder predecir el comportamiento de los componentes frente a iones pesados, neutrones y protones, en particular para aplicaciones espaciales o aeronáuticas, es necesario conocer la extensión superficial de las zonas de acumulación de cargas así como su posición y dimensión en profundidad, lo que supone poder establecer cartografías de tres dimensiones.

25 Clásicamente, para evaluar la sensibilidad de un componente electrónico a las partículas del entorno radiactivo, el componente es sometido a un flujo de partículas y las perturbaciones son contabilizadas. En la medida en que todo el componente es irradiado, este tipo de ensayo no permite remontarse a la localización de las zonas de acumulación de cargas. Además, estos ensayos son relativamente costosos pues hay relativamente pocas instalaciones en el mundo susceptibles de producir flujos de partículas. Finalmente, incluso si la naturaleza de las partículas salidas de los aceleradores de partículas es la misma que la del entorno radiactivo, su energía puede ser diferente. Esto puede conducir a importantes errores, en particular a causa de su menor penetración en el componente.

30 Unos haces de pequeños tamaños pueden ser extraídos de la salida del acelerador de partículas. Es entonces posible utilizar estos micro-haces para cartografiar las zonas de sensibilidades de un componente. Esta cartografía se efectúa en un plano y no permite revelar más que de manera superficial la localización de las zonas de acumulación de cargas. Ninguna información sobre la localización en profundidad de la zona sensible es obtenida por este tipo de ensayo.

35 Hasta ahora, el láser era utilizado principalmente como un útil de caracterización previa de la sensibilidad de los componentes a las radiaciones. Del mismo modo que las partículas del entorno radiactivo, el láser puede, cuando su longitud de onda es apropiada, generar corrientes parásitas en el interior de los componentes.

Se conocen en el estado de la técnica:

- La solicitud de patente PCT N° WO 2007/119030 (EADS); y
- La solicitud de patente europea N° EP 1 231 551 (Infineon Technologies).

40 El láser presenta una ventaja muy interesante para el estudio del efecto de las radiaciones. En la medida en que la resolución espacial del láser puede alcanzar dimensiones relativamente pequeñas con relación a las estructuras elementales contenidas en los componentes electrónicos, es posible, del mismo modo que en el caso del micro-haz, cartografiar un componente electrónico e identificar sus zonas de acumulación de cargas. Variando el punto de localización en profundidad del haz, la cartografía de sensibilidad puede igualmente ser hecha en la tercera dimensión, y esto de manera facilitada industrialmente. Pero este conocimiento no es suficiente para conocer el comportamiento global del componente electrónico frente a radiaciones.

Exposición del invento

50 En el invento, para remediar este problema, se ha tenido la idea de proceder por simulación. Una vez que la carta de sensibilidad del componente ha sido adquirida, ésta se presenta en forma de un modelo, una matriz en la práctica, de cuatro a cinco dimensiones, en X Y Z y coeficiente de sensibilidad o en X Y Z T y coeficiente de sensibilidad. Se somete entonces este modelo de este componente, a una agresión simulada y se mide su respuesta simulada. Por ejemplo de

manera esquemática, si en un instante T dado, un ión simulado (ya se trate de un ión primario o producto de una reacción nuclear) pasa a través de una zona elemental de coordenadas XYZ, y si, en este instante, la zona elemental en cuestión tiene una sensibilidad s, se atribuye al componente el valor de calidad s. Luego se reitera la experiencia para otro ión simulado. Así sucesivamente, sobre una duración de estudio dada entonces según el caso, el tiempo varía y que la aplicación puesta en servicio por el componente se desarrolla, se recogen los valores s, luego, por ejemplo a la salida de una duración dada de medida, se compilan los valores de calidad medidos para conocer la calidad real del componente. Actuando así, en vez de disponer de una cartografía sometida a conjetura, se obtiene una medida verdadera de esta calidad.

Según el invento, el conocimiento proporcionado por las cartografías láser y relativa a la posición y a la profundidad de las zonas de sensibilidad de un componente electrónico puede ser utilizado como parámetro de entrada en códigos de predicción para cuantificar la sensibilidad del componente electrónico cartografiado frente a partículas ionizantes del entorno radioactivo natural. Los códigos de predicción permiten evaluar la ocurrencia de los disfuncionamientos en un componente electrónico. La evaluación de los riesgos ligados al entorno radiactivo impone dos aspectos: uno, probabilístico, tiene en cuenta la interacción partícula/materia, el otro, eléctrico, tiene en cuenta la acumulación de cargas en el interior del componente electrónico.

Con este método se determina la sensibilidad de componentes electrónicos frente a radiaciones a partir de los ensayos con láser: las informaciones sobre la geometría de las zonas de acumulación de cargas del componente sirven entonces de parámetros de entrada en simulaciones de predicción de error frente a partículas (iones pesados, neutrones, protones...). El método del invento permite poner en evidencia las debilidades de una tecnología para la resistencia a las radiaciones, lo que es una información importante para el desarrollo de los nuevos componentes electrónicos a utilizar en los sistemas electrónicos para que presenten las sensibilidades más débiles. En el invento, en el caso del estudio de la sensibilidad a los neutrones y a los protones, en vez de lanzarse en simulaciones exhaustivas de las reacciones nucleares con los núcleos constitutivos de los componentes electrónicos, se prefiere utilizar una base de datos previamente construida que, para una energía de agresión de una partícula incidente dada, da las características de los productos salidos de las reacciones posibles. En el caso de los iones pesados, las reacciones nucleares no son estudiadas y no existe base de datos pues los iones pesados tienen directamente un fuerte poder ionizante. El código de simulación permite evaluar, a partir de criterios, el efecto que habría tenido la interacción de estas partículas sobre el funcionamiento del componente electrónico.

El invento tiene pues por objeto un procedimiento de caracterización de la sensibilidad a las interacciones energéticas de un componente electrónico en el que:

- se pone el componente electrónico en servicio,
- se excita el componente electrónico así puesto en servicio por excitaciones producidas por una radiación láser,
- se mide un defecto de funcionamiento del componente electrónico puesto en servicio correspondiente a estas excitaciones,
- se establece una cartografía de zonas de sensibilidad del componente en que estas excitaciones tienen un efecto,
- se aplica a la cartografía de zonas de sensibilidad un programa de simulación de agresión por una partícula que provoca interacciones energéticas,
- este programa de simulación produce un gran número de recorridos posibles de las partículas en el componente, y en el caso de neutrones y de protones, un gran número de reacciones nucleares extraídas de una base de datos,
- este programa de simulación, pone en práctica, a partir de estos recorridos posibles y de la cartografía de la sensibilidad del componente un modelo de acumulación de cargas,
- este programa de simulación analiza estas acumulaciones de cargas y estatuye sobre la ocurrencia de errores ligados a recogidas de cargas,
- la señal de calidad del componente es deducida de este análisis y de estos estados.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- se utiliza, en el caso de los neutrones y de los protones, una base de datos que informa sobre productos y probabilidades de reacciones nucleares posibles y
- se mide el efecto de ionización sobre el funcionamiento del componente electrónico.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- se aplica un tratamiento a la cartografía láser establecido para extraer una cartografía útil, dando cuentas esta cartografía útil de la sensibilidad del componente a las partículas ionizantes.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

5 - se realiza una deconvolución matemática para tomar en consideración un tamaño de un impacto láser con relación a un tamaño estimado de una zona de sensibilidad del componente frente a partículas ionizantes.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- para componentes con integración fina se mide con la cartografía láser un tamaño máximo de zona de sensibilidad de una célula elemental.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

10 - para cuantificar la sensibilidad del componente, se simula con ayuda del programa de simulación una respuesta del componente electrónico a las excitaciones según criterios determinados para el disfuncionamiento estudiado.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- el programa de simulación elige reacciones nucleares en una base de datos correspondiente al tipo y a la energía de la partícula estudiada.

15 Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- a título de medida de interacción energética se miden, por simulación láser, interacciones de iones pesados y o de protones y o de neutrones.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

20 - la energía del fotón láser de la fuente láser es superior al valor de la banda prohibida del componente semiconductor.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- la fuente láser provoca una absorción simultánea de varios fotones en el material semiconductor.

Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- la cartografía láser es realizada según las tres dimensiones del espacio.

25 Ventajosamente el invento está igualmente caracterizado porque

- la cartografía láser es realizada según cuatro dimensiones, las tres dimensiones del espacio así como el tiempo.

El invento tiene igualmente por objeto un dispositivo que incluye medios aptos para poner en práctica el procedimiento de determinación de la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas del invento.

Breve descripción de las figuras

30 El invento será mejor comprendido con la lectura de la descripción que sigue y con el examen de las figuras que le acompañan. Estas no están dadas más que a título indicativo y en ninguna forma limitativo del invento. Las figuras muestran:

La figs. 1a a 1c, tres casos diferentes de estudio que permiten distinguir la eficacia de la agresión según un nivel de integración del componente.

35 La fig. 2: el contenido simbólico de una base de datos que detalla los productos creados durante una reacción nuclear para una partícula incidente de una energía dada y la probabilidad asociada a esta reacción.

La fig. 3: el principio general de un código de Monte-Carlo para la predicción de sensibilidad de componentes electrónicos.

Las figs. 4a y 4b: la representación temporal de la acumulación de los portadores depositados por el paso de un ión y el principio de un criterio ( $I_{max}$ ,  $t_{I_{max}}$ ) de SEU para una tecnología de 0,6  $\mu m$ .

40 Descripción detallada de modos de realización del invento

Según el invento, un dispositivo láser permite, previamente, poner un componente electrónico a ensayar en servicio,

excitarle por excitaciones producidas por una radiación láser, y medir un defecto de funcionamiento del componente electrónico puesto en servicio correspondiente a estas excitaciones. Este dispositivo permite así establecer una cartografía de zonas de sensibilidad del componente en que estas excitaciones tienen un efecto. En un ejemplo, la fuente láser provoca una absorción de fotones en el material semiconductor del componente.

5 El presente invento está basado a continuación sobre la utilización conjunta de tal sistema láser y de un código de predicción para calcular la sensibilidad de un componente electrónico frente al entorno radiactivo natural. El láser es utilizado para cartografiar la sensibilidad del componente frente a la inyección localizada de cargas. Un criterio es observado. Este último permite rendir cuentas del evento estudiado. Puede tratarse de una señal eléctrica que cuando el evento se desencadena es diferente de la señal esperada. En el caso de un componente lógico como una memoria, puede tratarse del valor almacenado en una célula de memoria. Para un componente lineal, puede tratarse de una señal analógica del componente.

El sistema comprende:

- una fuente láser cuya longitud de onda permite la generación de cargas en el material semiconductor considerado (por mecanismo de absorción lineal o no lineal);
- 15 - un dispositivo que permite el desplazamiento relativo del láser con relación al componente bajo ensayo según las tres direcciones del espacio;
- eventualmente, una interfaz que permite la comunicación entre el componente bajo ensayo y el sistema de control del láser;
- un dispositivo de modificación de la energía láser;
- 20 - un dispositivo que permite establecer si un evento ha tenido lugar o no.

Una cartografía de sensibilidad del componente es efectuada según las tres dimensiones del espacio. Puede igualmente tener en cuenta el tiempo, lo que añade otra dimensión. Para cada posición X, Y, Z de la cartografía y según el caso para cada instante t del ciclo de funcionamiento del componente o de la aplicación ejecutada por este componente, es efectuado un disparo láser. Este disparo láser provoca la generación de cargas en el seno del material semiconductor. Bajo la influencia en particular de los campos eléctricos y de los mecanismos de difusión, las cargas se ponen en movimiento y crean corrientes que pueden perturbar el funcionamiento del componente electrónico. Todas las posiciones (espaciales y temporales) de la cartografía no tendrán la misma sensibilidad pues espacialmente, los parámetros físicos del componente no son los mismos según la posición, y temporalmente, todas las zonas del componente no son solicitadas de la misma manera en el curso del tiempo. La cartografía láser permite revelar las zonas de sensibilidad de un componente con una generación localizada de cargas, es decir, poner en evidencia las variaciones de sensibilidad espacial y eventualmente temporal. Son estas zonas las que serán sensibles a partículas ionizantes (directa o indirectamente) como los iones pesados, los neutrones y los protones.

Una cartografía láser permite identificar en particular:

1. la posición espacial X, Y, Z de una zona de sensibilidad;
- 35 2. la posición temporal de una zona de sensibilidad, es decir los instantes en que una zona aparece como sensible a la inyección de carga;
3. la forma y el volumen de esta zona de sensibilidad (que evolucionan según el caso en función del tiempo);
4. la posición relativa de esta zona de sensibilidad con relación a las zonas de sensibilidad vecinas;
- 40 5. en el caso de los componentes lógicos y si existe, la función lógica impactada durante una inyección de cargas en la zona de sensibilidad.

Las informaciones 4 y 5 extraídas de la cartografía láser dependen de la tecnología, de las condiciones de utilización, según el caso de la aplicación operada por el componente. No dependen por el contrario de la forma o depósito de carga y son por tanto válidas cualquiera que sea el depósito de carga considerado (partículas o láser por ejemplo). Las informaciones 1, 2 y 3 extraídas de la cartografía láser dependen de la tecnología, de las condiciones de utilización, según el caso de la aplicación operada por el componente. Dependen también de la forma temporal (para 2) y espacial (para 1 y 3) del depósito de carga. En el caso de 2, existen láseres que tienen duraciones de impulsos equivalentes a la duración del depósito de cargas de una partícula ionizante en un material semiconductor (próximo del picosegundo) y en este caso, las informaciones obtenidas son válidas cualquiera que sea el depósito de carga considerado (partículas o láser por ejemplo).

50 Así, las cartografías láser permiten obtener dos tipos diferentes de informaciones. En el primer caso, la cartografía láser

puede ser directamente explotada para extraer datos sobre la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas del entorno radiactivo, casos 4 y 5.

5 En el segundo caso, casos 1, 2 y 3, es necesario aplicar un tratamiento a la cartografía láser para extraer informaciones útiles para estimar la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas, tratamiento que tiene en cuenta la especificidad de la interacción partícula/materia.

10 En lo que se refiere a la explotación directa de las cartografías láser, casos 4 y 5, el láser va a permitir identificar las posiciones relativas de las zonas de sensibilidad (y en función del tiempo o no). La precisión de esta información no está ligada al tamaño de la mancha sino al tamaño del paso de desplazamiento utilizado para realizar la cartografía láser. En este sentido, la obtención de esta información de distancia entre zonas sensibles es independiente del tamaño del haz considerado.

Para los componentes más integrados que posean una disposición periódica muy fina de células elementales (como las memorias), la información geométrica de la distancia entre una célula y sus vecinas más próximas obtenida gracias a la cartografía láser permite igualmente dar el tamaño máximo de la zona de sensibilidad de una célula elemental (siendo vista toda la célula como sensible). Esta información es obtenida directamente y puede ser explotada sin tratamiento.

15 En lo que se refiere al tratamiento de las cartografías láser, en el segundo caso identificado 1, 2 y 3, es necesario aplicar un tratamiento a la cartografía láser para extraer informaciones útiles para estimar la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas del entorno radiactivo. Conviene entonces distinguir tres casos diferentes de estudios según el nivel de integración del componente. Estos tres casos son explicados con relación a las figs. 1a y 1c.

20 Caso A: Componentes poco integrados para los cuales la traza de ionización del láser y la traza de ionización de un ión de energía dada son de tamaño inferior a las dimensiones características de las estructuras elementales y/o a las zonas de sensibilidad del componente electrónico.

Caso B: Componentes integrados para los cuales la traza de ionización del láser es de tamaño superior a las dimensiones características de las estructuras elementales o a las zonas de sensibilidad del componente electrónico mientras que la traza de ionización de un ión de energía dada es de tamaño pequeño con relación a estas estructuras.

25 Caso C: Componentes muy integrados para los cuales la traza de ionización del láser y la traza de ionización de un ión de energía dada son de tamaño superior a las dimensiones características de las estructuras elementales o a las zonas de sensibilidad del componente electrónico.

En cada uno de los casos, es posible tratar los datos para conocer la zona de sensibilidad frente a partículas ionizantes (ya se trate de una ionización directa o indirecta).

30 En el primer caso A, el depósito de carga obtenido por un láser focalizado y el depósito de cargas obtenido, por un ión están muy localizados con relación a la estructuras elementales del componente. Las zonas identificadas como sensibles por el láser lo serán también para los iones. La cartografía láser permite pues en este caso identificar directamente de manera espacial y o temporalmente las zonas que son sensibles al paso de una partícula ionizante (directa o indirectamente).

35 En el segundo caso B, el láser va a sobreestimar el tamaño de la zona de sensibilidad con relación a lo que sería detectado como sensible por un ión. Dicho de otro modo, la zona de sensibilidad detectada por el láser aparece como una convolución de la zona de sensibilidad real del componente con el tamaño de la traza de ionización generada por el láser. Se procede entonces a una deconvolución matemática que permite tomar en consideración el tamaño de la mancha láser para extraer a partir de una categoría láser el tamaño estimado de la zona de sensibilidad del componente frente a partículas ionizantes. La deconvolución matemática consiste en encontrar la zona de sensibilidad real del componente conociendo la zona de sensibilidad detectada por el láser y la forma y el tamaño de la traza de ionización del láser. Desde el punto de vista matemático esto puede traducirse por la resolución de la ecuación siguiente:

$$Z_{\text{Laser}} = f(Z_{\text{Si}})$$

45 Donde:  $Z_{\text{Laser}}$  es la zona de sensibilidad identificada por el láser.  $Z_{\text{Si}}$  es la zona de sensibilidad del componente frente a partículas, y  $f$  es una función de la traza de ionización del láser.

La resolución de la ecuación consiste en encontrar la función  $f^{-1}$  de manera que se pueda determinar:  $Z_{\text{Si}} = f^{-1}(Z_{\text{Laser}})$ .

50 En el tercer caso C, ya sea el depósito de cargas debido a un ión o a un láser, éste tiene un tamaño más importante que el tamaño de la estructura elemental del componente. Desde el punto de vista de esta estructura elemental, el depósito de carga debido a un ión o a un láser es casi el mismo pues cargas son creadas en toda la estructura elemental. La correlación es, en este caso, simple de hacer para pasar informaciones de sensibilidad obtenidas con el láser hacia informaciones de sensibilidad esperadas frente a partículas ionizantes ya que toda la estructura elemental es en este caso

sensible. Las zonas de sensibilidad asociadas a las estructuras elementales y detectadas por el láser y por el ión están directamente ligadas al tamaño de las trazas de ionización respectivamente, del láser y del ión.

La determinación de la localización de las zonas de sensibilidad en profundidad se hace haciendo variar el punto de focalización del haz láser, ya sea cambiando el foco, ya sea desplazando el láser focalizado en profundidad con relación al componente.

Así el láser permite remontarse a informaciones geométricas relativas a la posición y al tamaño de las zonas de sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas ionizantes. Según el caso, caso B, habrá retratamiento o no. A continuación, para cuantificar la sensibilidad de los componentes electrónicos frente a partículas ionizantes, es necesario, acoplar estas informaciones geométricas con un código de predicción tal como el descrito a continuación.

Con el propósito de evaluar la sensibilidad de un componente electrónico dado en un entorno radiactivo dado (entorno espacial o aviónico), se han desarrollado numerosos útiles de predicción, de los cuales SMC DASIE (Análisis Detallado de Monte Carlo Simplificado de Efectos de Ión Secundario). Este método ha sido descrito en "Una revista de familia de códigos DASIE: contribución a la comprensión de SEU/MBU" por G. Hubert y col., publicada en « 11º Simposio Internacional de Ensayo En línea de IEEE » en 2005. Las diferentes versiones de este código están basadas en el mismo principio, la explotación de las bases de datos nucleares, acopladas con modelos de acumulación de cargas y criterios de desencadenamiento de los efectos. El láser permite extraer los datos de procedimiento y de sensibilidad a la inyección de cargas localizada para un componente particular de tecnología desconocida al comienzo. Estos útiles del cálculo de Monte Carlo reposan sobre la extracción aleatoria de un gran número de interacciones que reproducen las condiciones de trazas ionizantes posibles consecutivas a la interacción de iones pesados o a las reacciones nucleares de neutrón o protón con los núcleos que constituyen el componente. Calculan por tanto la frecuencia de los errores (SER, Alteración de un Solo Evento).

Ciertos códigos de predicción de Monte Carlo permiten tener en cuenta un gran número de células elementales y por tanto de tratar la problemática de los efectos múltiples que aparecen simultáneamente en diferentes células del componente.

El empleo de un método de Monte Carlo consiste en gestionar tres problemáticas:

1. Gestión de la extracción de Monte Carlo de las interacciones en función del entorno considerado;
2. Física de la interacción partícula/materia (base o bases de datos): conocimiento de las características de los iones primarios o de los iones secundarios producidos por las reacciones de neutrón o protón con los núcleos que constituyen el componente;
3. Criterio de error: determinación de la acumulación de las cargas y de su consecuencia.

Para estudiar los efectos singulares inducidos en los componentes electrónicos por los neutrones atmosféricos o los protones de los cinturones de radiaciones, es necesario conocer los productos ionizantes (llamados iones secundarios, núcleos de retroceso, fragmentos o productos de espalación) que estos nucleones provocan con los átomos del objetivo.

Habida cuenta de la extensión energética (de 1 MeV a 1 GeV) de los diferentes tipos de interacción (elástico, no elástico, etc.), se han utilizado diferentes códigos para la generación de las bases de datos a fin de describir los diferentes mecanismos de interacción según sus especificidades, es decir, tipos de reacción y energías. Unos códigos de cálculo dedicados como HETC, MC-RED, MC-Recoil, GEANT4, GNASH, o MCNP (según la energía de la partícula incidente) o unas bases de datos de las interacciones como ENDF o JENDL pueden ser utilizados. La mayor parte de estos códigos nucleares son accesibles vía Internet. El principio de interacción de un neutrón n, o de un protón p con un núcleo objetivo está simbolizado en la fig. 2.

Para las energías de neutrón/protón inferiores a 10 MeV, las reacciones elásticas son preponderantes. A la inversa, para las energías superiores a 50 MeV, las reacciones de tipo no elástico son mayoritarias. Las reacciones de tipo elástico son las que inducen una pérdida de energía del n/p incidente y un ión de retroceso (conservación de la energía cinética y del número de masa). Las reacciones no elásticas son variadas, cada reacción se caracteriza por un umbral energético de aparición. Estas reacciones inducen la generación de uno o varios iones secundarios.

Las bases de datos tratan las interacciones neutrón/materia o protón/materia y se componen, para cada energía incidente, de centenares de miles de eventos nucleares no elásticos y elásticos con el detalle de las reacciones nucleares, es decir, los números nucleares y de masa de los iones secundarios, sus energías y sus características de emisión (ángulos de emisión).

El principio general de un código de Monte Carlo para la predicción de sensibilidad de componentes electrónicos está ilustrado en la fig. 3. El método consiste en realizar un conjunto de extracciones aleatorias de reacciones nucleares asociadas a una extracción de su localización en el componente. La realización de este conjunto de extracción es asimilada a una duración de experiencia. Para cada una de estas configuraciones, un análisis, fundado sobre un modelo

simplificado del estudio de los mecanismos físicos de acumulación de las cargas, permite estatuir sobre la ocurrencia de un error inducido por iones secundarios que tienen tal característica. En el caso del estudio de iones pesados, el método sigue siendo idéntico pero no hay extracción aleatoria de las reacciones nucleares, ya que solo es estudiada una partícula primaria.

5 Según el caso, estos códigos de simulación tienen en cuenta el tamaño de la traza de ionización de las partículas cargadas. En lugar de depositar la carga en un solo punto, es introducida una distribución radial de la carga.

La simplificación del modelo físico es obtenida a partir del estudio de un gran número de simulaciones componentes. Estos últimos permiten resolver, para una estructura dada y previamente mallada, las ecuaciones del semiconductor para cada punto de mallado de la estructura pero igualmente, en cada instante del dominio temporal estudiado. Estas simulaciones permiten estudiar de manera muy precisa el comportamiento que un componente electrónico tendrá frente a una interacción ionizante. Sin embargo, estas simulaciones son muy costosas en tiempo de cálculo. Por esta razón, en el marco del invento, es necesario proceder a una simplificación del método que permita simular los disfuncionamientos estudiados. Es el estudio previo de un gran número de simulaciones componentes lo que permite identificar los parámetros que influyen sobre la aparición del error y definir los modelos simplificados de los mecanismos físicos empleados que serán puestos en práctica en el útil de predicción.

Así, por ejemplo y sin que esto no sea limitativo del tipo de componente al que el invento puede aplicarse, es conocido en particular que en el caso de un basculamiento de una célula SRAM, su sensibilidad está caracterizada por el parámetro de LET crítico (definido como la pérdida de energía por unidad de recorrido) o de carga crítica. Para que un error sea provocado, es preciso que el ión o los iones generados por la reacción nuclear depositen suficiente energía en los drenajes de los transistores en el estado DESACTIVADO (OFF). Las simulaciones componentes han mostrado que las condiciones favorables a la creación de un error son que su traza pasa bastante cerca de una de las zonas sensibles, o bien la atraviesa, a fin de inducir en ella una corriente parásita o una acumulación de cargas suficiente para crear un basculamiento. Unos modelos simples (en particular analíticos) de difusión-acumulación basados en la difusión ambipolar de los portadores y la acumulación de las cargas sobre los drenajes bloqueados permiten describir el desplazamiento de los portadores.

Pueden ser utilizados diferentes métodos que permiten evaluar si el disfuncionamiento como consecuencia del paso de un ión ha tenido lugar o no. El primer método procede por una aproximación simplificada (de primer orden). Está fundamentado sobre la determinación de la carga depositada por el ión en el volumen sensible de la célula elemental y de la comparación de ésta a un valor umbral de basculamiento.

30 El segundo método es un estudio más fino del fenómeno (de segundo orden). En la fig. 4a, la acumulación de los portadores depositados por el paso del ión es estudiada temporalmente a fin de reconstruir la corriente. La evolución temporal de la corriente permite determinar si se produce o no un basculamiento. Por ejemplo, el criterio dinámico ( $I_{max}$ ,  $tI_{max}$ ) introduce una curva frontera que separa los pares ( $I_{max}$ ,  $tI_{max}$ ) que inducen basculamientos igualmente llamados SEU (Alteración de un Solo Evento) de los que no los inducen. Partiendo de la observación de que todos los pasos de partículas inducen corrientes que tienen la misma forma, es decir, un rápido crecimiento seguido de un lento decrecimiento, cada paso de ión puede estar caracterizado por el par amplitud máxima de la corriente ( $I_{max}$ ) y el tiempo en el que se estatuye ( $tI_{max}$ ).

La fig. 4b muestra el ejemplo del principio del criterio dinámico ( $I_{max}$ ,  $tI_{max}$ ) para estudiar la sensibilidad a los SEU para una tecnología de 0,6  $\mu m$ . Para medir el defecto de funcionamiento del componente, se mide la evolución temporal de la corriente resultante de la excitación. El criterio ( $I_{max}$ ,  $tI_{max}$ ) de esta corriente permite estatuir sobre el basculamiento del estado lógico del componente.

Los ejemplos ya citados son relativos al estudio del mecanismo de SEU en un punto de memoria SRAM pero el objeto del invento se aplica a cualquier tipo de componente electrónico y a cualesquiera tipos de efectos inducidos por las radiaciones una vez que el criterio del efecto inducido por las radiaciones es identificado (un mismo criterio que puede ser común a varios efectos inducidos por las radiaciones).

Además de la base de datos nucleares descrita anteriormente, son proporcionadas curvas por un código de cálculo que describe el comportamiento del depósito energético de los iones secundarios o de los iones pesados durante sus pasos en el material (como el útil SRIM accesible vía Internet). La base de datos y las curvas SRIM son fijas cualquiera que sea el tipo de error estudiado pero dependen de los materiales que constituyen el componente electrónico. Las entradas tecnológicas necesarias para el código de cálculo son las informaciones relativas a la topología del componente (es decir el volumen de las zonas sensibles y la distancia entre 2 zonas sensibles). Estos parámetros varían según el componente y el tipo de error estudiado.

Las entradas necesarias para la predicción de sensibilidad de un componente electrónico son: las dimensiones de una célula elemental, la dimensión y la posición del volumen sensible de una célula asociada al fenómeno deseado y las posiciones de las zonas de sensibilidad vecinas. El útil de láser permite obtener estas informaciones. El acoplamiento



entre el útil de predicción y las cartografías láser permite a partir de entonces cuantificar la sensibilidad, la calidad, de los componentes electrónicos. El tratamiento eventual de las informaciones obtenidas por las cartografías láser depende del nivel de integración del componente con relación a los tamaños de la mancha de láser y de las trazas de ionización de las partículas empleadas. Estos datos geométricos son utilizados como entrada de los códigos de predicción para cuantificar la sensibilidad de un componente electrónico frente a partículas del entorno radiactivo natural.

5

**REIVINDICACIONES**

- 1.- Un procedimiento de caracterización de la sensibilidad a las interacciones energéticas de un componente electrónico en el que:
- se pone el componente electrónico en servicio,
  - 5        - se excita el componente electrónico así puesto en servicio por excitaciones producidas por una radiación láser,
  - se mide un defecto de funcionamiento del componente electrónico puesto en servicio correspondiente a estas excitaciones,
  - se establece una cartografía de zonas de sensibilidad del componente en que estas excitaciones tienen un efecto,
  - 10       - se aplica a la cartografía de zonas de sensibilidad un programa de agresión por una partícula que provoca interacciones energéticas,
  - este programa de simulación produce un gran número de recorridos posibles de las partículas en el componente, y en el caso de neutrones y de protones, un gran número de reacciones nucleares extraídas de una base de datos,
  - 15       - este programa de simulación, pone en práctica, a partir de estos recorridos posibles y de la cartografía de la sensibilidad del componente un modelo de acumulación de cargas,
  - este programa de simulación analiza estas acumulaciones de cargas y estatuye sobre la ocurrencia de errores ligados a acumulaciones de cargas,
  - la señal de calidad del componente es deducida de este análisis y de estos estados,
- estando caracterizado el procedimiento porque:
- 20       - se utiliza, en el caso de los neutrones y de los protones, una base de datos que informa sobre productos y probabilidades de reacciones nucleares posibles,
  - se mide el efecto de la ionización sobre el funcionamiento del componente electrónico.
  - para componentes con integración fina se mide con la cartografía láser un tamaño máximo de zona de sensibilidad de una célula elemental, y
  - 25       - el programa de simulación elige reacciones nucleares en una base de datos correspondiente al tipo y a la energía de la partícula estudiada.
- 2.- Un procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque
- se aplica un tratamiento a la cartografía láser establecida para extraer una cartografía útil, dando cuenta esta cartografía útil de la sensibilidad del componente a las partículas ionizantes.
- 30    3.- Un procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado porque
- se realiza una deconvolución matemática para tomar en consideración un tamaño de un impacto láser con relación a un tamaño estimado de una zona de sensibilidad del componente frente a partículas ionizantes.
- 4.- Un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque
- 35       - para cuantificar la sensibilidad del componente, se simula con ayuda del programa de simulación una respuesta del componente electrónico a las excitaciones según criterios determinados para el disfuncionamiento estudiado.
- 5.- Un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque
- a título de medida de interacción energética se miden, por simulación láser, interacciones de iones pesados y o de protones y o de neutrones.
- 6.- Un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque
- 40       - la energía del fotón láser de la fuente láser es superior al valor de la banda prohibida del componente semiconductor.
- 7.- Un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado porque

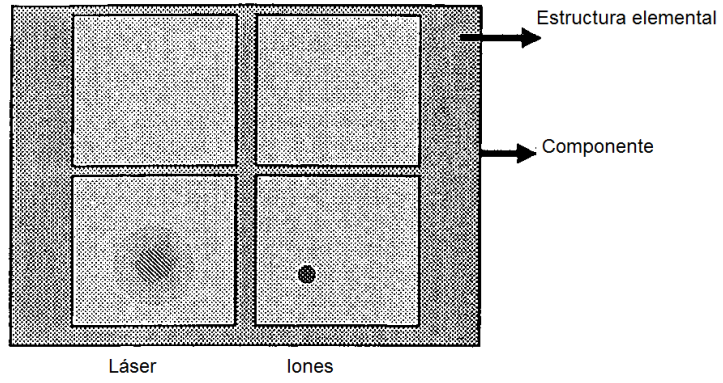
- la fuente láser provoca una absorción simultánea de varios fotones en el material semiconductor.

8.- Un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque

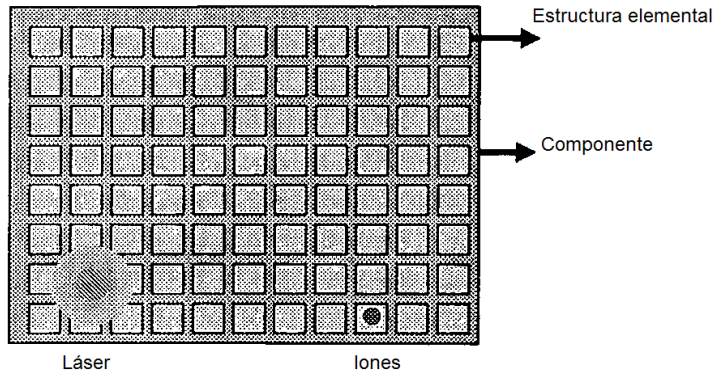
- la cartografía láser es realizada según las tres dimensiones del espacio.

9.- Un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado porque

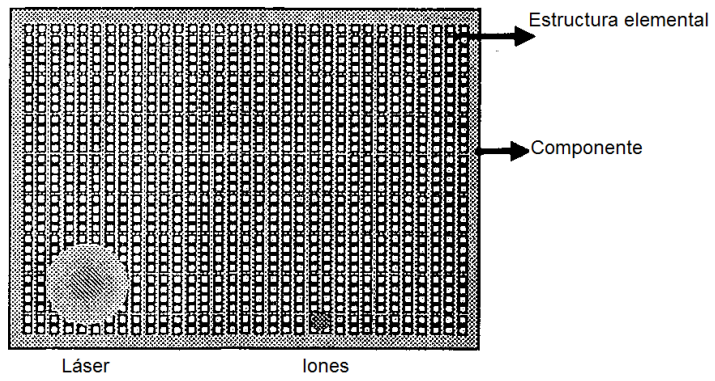
- 5
- la cartografía láser es realizada según cuatro dimensiones, las tres dimensiones del espacio así como el tiempo.



**Fig 1a**



**Fig 1b**



**Fig 1c**

Fig 2

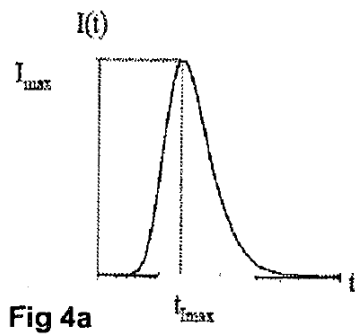
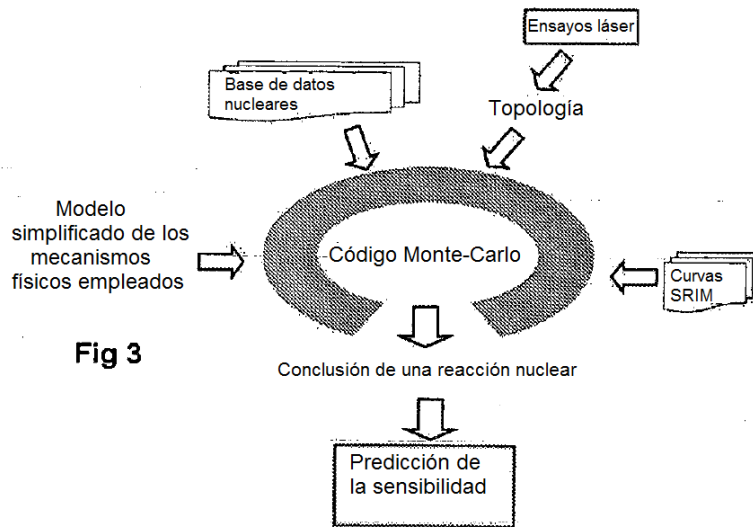
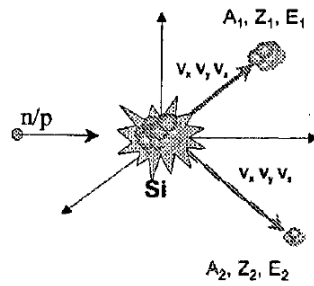


Fig 4a

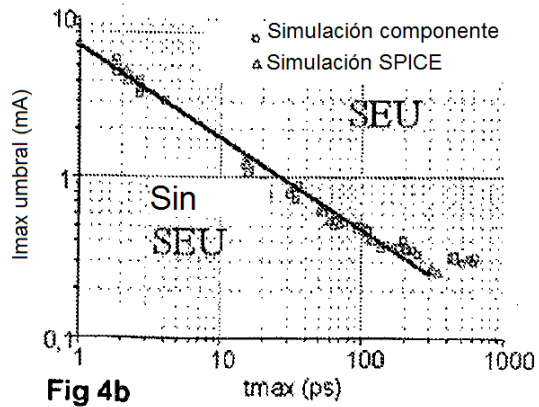


Fig 4b