

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Máster en Física Aplicada



**INDUCCIÓN DE SUCESOS AISLADOS
EN MEMORIAS SRAM**

INDUCED SINGLE EVENTS IN SRAMs

Junio – 2012

AUTOR: Carlos Palomar Trives
(carlos.palomar@fis.ucm.es)

DIRECTOR: Francisco J. Franco
(fjfranco@fis.ucm.es)

Departamento de Física Aplicada III
Grupo de Instrumentación y Sensores

PALABRAS CLAVE: Memoria, circuito, radiación, láser, single event effect, single event upset, multiple bit upset, latch up, sensibilidad.

KEYWORDS: Memory, circuit, radiation, laser, efecto puntual, suceso aislado, suceso aislado multiple, latch up, sensitivity.

RESUMEN

Este proyecto consiste en emular los errores producidos en memorias semiconductoras por la radiación atmosférica mediante un láser pulsado que actúa de modo semejante a un ión. Se realiza un mapa de sensibilidad de la memoria identificando los puntos susceptibles de error y cuántos errores simultáneos se producen. Para ello es necesario realizar pasos muy delicados como desencapsular la memoria, construir placas de test tanto para el circuito examinado como para el sistema de caracterización, conseguir, mediante obturadores, la incidencia de un único pulso sobre la memoria, diseñar un sistema de adquisición de datos, fijar la energía y camino óptico del láser pulsado así como controlar de manera automática la posición en el plano XY donde incide el láser. Los resultados muestran que algunas zonas de la memoria son insensibles al láser en tanto que otras tienen una sensibilidad extremadamente alta. Por otra parte, se observa la existencia de dos tipos distintos de errores, uno llamado Single Event Upset (SEU) y, otro menos habitual, llamado Single Event Micro-latchup.

SUMMARY

This project is to emulate the errors in semiconductor memories for atmospheric radiation by pulsed laser that acts as an ion. A sensitivity map of the memory is performed identifying potential error areas and how many errors occur simultaneously. This requires very delicate steps, like unencapsulate memory, build test boards for the studied circuit and the characterization system, getting, through shutters, the incidence of a single pulse on memory, design an acquisition system data, set the energy laser and laser optical path and automatically controlling the position in the XY plane where the laser hits. The results show that some memory zones are insensitive to the laser while others have an extremely high sensitivity. Moreover, two distinct types of errors are observed, one called Single Event Upset (SEU) and other less common, called Single Event Micro-latchup.

ÍNDICE

- INTRODUCCIÓN	1
- CAPÍTULO 1. EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.....	5
- 1.1 INTRODUCCIÓN	5
- 1.2 EFECTOS ACUMULATIVOS	5
- 1.2.1 Dosis de ionización total.....	5
- 1.2.2 Daño por desplazamiento.....	6
- 1.3 EFECTOS DE NATURALEZA TRANSITORIA O EFECTOS PUNTUALES (SEE).....	6
- 1.3.1 Errores leves	7
- 1.3.2 Errores graves	8
- CAPÍTULO 2. DISPOSITIVOS SUSCEPTIBLES DE SER EXAMINADOS POR IRRADIACIÓN LÁSER. MEMORIAS SRAM	9
- 2.1 INTRODUCCIÓN	9
- 2.2 DISPOSITIVOS BÁSICOS	9
- 2.3 DISPOSITIVOS ANALÓGICOS	10
- 2.4 DISPOSITIVOS DIGITALES.....	10
- 2.5 ELECCIÓN DE LAS MEMORIAS SRAM	12
- CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LÁSER Y PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO.	13
- 3.1 INTRODUCCIÓN	13
- 3.2 ESPECIFICACIONES Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LÁSER	14
- 3.2.1 Especificaciones del sistema láser	14

- 3.2.2 Descripción del sistema láser	15
- 3.2.2.1 Láser de Bombeo del Oscilador de Femtosegundos	16
- 3.2.2.2 Oscilador Láser de Femtosegundo	17
- 3.2.2.3 Láser de Bombeo del amplificador regenerativo	17
- 3.2.2.4 Amplificador Regenerativo	18
- 3.2.2.5 Amplificador Óptico Paramétrico (OPA)	18
- 3.3 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO	19
- 3.3.1 Desencapsulado de las memorias SRAM a radiar	19
- 3.3.2 Dimensionado de las memorias desencapsuladas.....	22
- 3.3.3 Placas de circuito impreso.....	24
- 3.3.4 Descripción del montaje experimental y sistema de adquisición de datos.....	25
- 3.3.4.1 Descripción del montaje experimental	25
- 3.3.4.2 Sistema de adquisición de datos.....	27
- 3.3.5 Irradiación láser del dispositivo.....	30
- CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE IRRADIACIÓN Y CONCLUSIÓN	35
- 4.1 ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RADIACIÓN.....	35
- 4.2 RESULTADOS DE RADIACIÓN. MAPAS DE SENSIBILIDAD	36
- 4.3 CONCLUSIÓN.....	41
- PUBLICACIONES RELACIONADAS	42
- BIBLIOGRAFÍA	43

INTRODUCCIÓN.

Uno de los principales problemas que afectan al sector Espacial, desde el punto de vista de la Microelectrónica, es el efecto que produce la radiación en los componentes. Este problema se ha reportado numerosas veces en la literatura [ZI81, GO93, TO99], y es una preocupación real para la industria de este sector. La radiación natural presente en el espacio afecta a los componentes microelectrónicos que están embarcados en satélites y misiones espaciales, alterando su comportamiento e incluso dañándolos permanentemente. El hecho de que estos fenómenos se produzcan en el Espacio añade una serie de dificultades particulares que complican el problema:

- 1) Los fenómenos son muy variados y el entorno no siempre está caracterizado.
- 2) Los dispositivos durante una misión son inaccesibles.
- 3) Los costes de los proyectos de Espacio son muy altos.

Realizando un primer análisis de los distintos efectos que pueden ocurrir en la microelectrónica espacial debida a radiación, podemos distinguir dos grandes grupos:

- Efectos de daño permanente en los circuitos [BE04]. Esto puede ser debido a la dislocación física de los circuitos integrados por el choque de una partícula, o a una acumulación elevada de carga total, conocida como dosis total. En cualquiera de los casos, el dispositivo deja de funcionar de manera permanente y no se puede recuperar.

- Efectos temporales en los circuitos. Esto se produce por el impacto de una partícula que afecta repentinamente al estado de una celda de almacenamiento (SEU, Single Event Upset [NI11]) o que produce un transitorio en un elemento de interconexión (SET, Single Event Transient [NI11]). Recientemente, debido a la cada vez mayor densidad de transistores, se está observando de manera más frecuente la aparición de errores múltiples creados por una única partícula (MBU, Multiple Bit Upset y MCU, Multiple Cell Upset [NI11]).

De entre todos los componentes de los sistemas digitales, probablemente los módulos de memoria son los más afectados por la radiación y sus efectos [LA04]. Esto se debe fundamentalmente a dos motivos. El primero es su gran uso en los distintos sistemas, por lo que suponen una presencia constante en las aplicaciones espaciales. El segundo es el área que ocupan, habitualmente de gran tamaño, con lo que la probabilidad de ser afectados por la radiación es más grande.

Una forma habitual de proteger las memorias es el uso de bits redundantes que permitan reconstruir la información en caso de error. Uno de los sistemas más habituales es el uso de los denominados códigos SEC-DED, que corrigen errores aislados y detectan errores dobles. Existen muchas posibilidades de implementar estos códigos, por ejemplo usando codificación Hamming.

Inicialmente, este tipo de protección solía ser suficiente, pero con las nuevas generaciones tecnológicas, aparte de la gran frecuencia de aparición de SEUs que es esperable en las memorias, existen fenómenos más complejos que se pueden producir. Entre ellos, destacan la cada vez mayor presencia de MBUs. Esto es debido a que el nivel de integración en las memorias cada vez es más grande, por lo que los impactos de las partículas, que tienen una naturaleza local a la zona de incidencia, afectarán a un gran número de celdas. Es previsible que este efecto aumente con el tiempo, a medida que lo siga haciendo el nivel de integración.

El efecto de los MBUs es que, debido a que afectan a una zona local, suelen producir más de un error en la misma palabra lógica. De producirse esta situación, los códigos SEC-DED no podrían hacer frente a la situación,

produciéndose un fallo en el sistema. Para contrarrestar esto, existen una serie de técnicas, como el uso de interleaving [HA00].

La técnica de interleaving hace que los bits pertenecientes a la misma palabra lógica se almacenen en posiciones físicas distintas, a una distancia denominada distancia de interleaving. Esto hace que la ocurrencia de un MBU no tenga efectos muy negativos, ya que en teoría afectará a bits físicamente contiguos, que por lo tanto pertenecerán a palabras lógicas distintas. Como consecuencia, sólo un bit por palabra lógica se verá afectado, pudiendo ser corregido por el mecanismo SEC-DED.

Sin embargo, aunque estos mecanismos de protección puedan ser eficientes, siempre existe la posibilidad de fallo, ya que siempre es posible que varios eventos afecten simultáneamente a la misma palabra lógica.

Por tanto, actualmente, uno de los grandes retos de la industria espacial electrónica es la selección de componentes espaciales capaces de soportar las continuas radiaciones que sufren los componentes electrónicos y que pueden alterar seriamente su comportamiento eléctrico llegando, en el peor de los casos, a inutilizar equipos y sistemas. El empleo de nuevos materiales semiconductores para optimizar el consumo y mejorar el rendimiento, así como el incremento en la capacidad de integración, han contribuido a aumentar considerablemente el umbral de sensibilidad de los componentes electrónicos a estos efectos [LO10].

Según los estándares de radiación actuales, la caracterización de los componentes electrónicos debe hacerse frente a haces de partículas producidos en aceleradores lineales, es decir, es preciso la realización de experimentos usando radiación real para caracterizar la tecnología [LO10]. Esto es una actividad muy frecuente, tanto para empresas privadas como para agencias espaciales [AL05]. Mediante esta experimentación, se somete al dispositivo a radiación, bien sea de neutrones o de partículas cargadas, y se estudia el efecto que produce en la tecnología. No obstante, esto conlleva dos problemas. El primero es el alto coste de estos experimentos. Una hora en un centro de radiación cuesta varios miles de Euros, y considerando el tiempo que se necesita para preparar el experimento, la utilización real de la instalación es

baja. El otro problema es que los resultados obtenidos son válidos para esa tecnología en concreto y esa fuente de radiación particular. Si se quiere caracterizar bien otro dispositivo, bien otro entorno, es preciso repetir el experimento. Ante estos problemas, elevado coste y disponibilidad limitada expuestos anteriormente, recientes estudios se están centrando en la búsqueda de modos alternativos de ensayo o simulación válidos para la caracterización de componentes electrónicos en lo relativo a su sensibilidad a las radiaciones cósmicas [LO10].

La producción de fallos en un dispositivo electrónico, emulando su comportamiento en un ambiente de radiación espacial, es el paso inicial para el estudio posterior de su comportamiento, mitigación de errores o protección del dispositivo ante estos eventos.

El presente trabajo propone el estudio de un método alternativo de test (económico, sencillo y eficaz) que produce los efectos transitorios provocados por partículas energéticas procedentes de la radiación cósmica ionizante sobre los componentes electrónicos, concretamente sobre memorias SRAM. Este método está basado en la irradiación de los dispositivos electrónicos con pulsos láseres de suficiente energía, frecuencia, amplitud, duración y tamaño de impacto como para provocar en los dispositivos efectos similares a los producidos por partículas energéticas procedentes del cosmos. Es decir, el uso del láser para emular el efecto del impacto de partículas cargadas.

CAPÍTULO I

EFFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Los efectos causados por la radiación sobre los componentes electrónicos que, en definitiva, modifican las propiedades físicas de los materiales con los que se construyen, pueden ser divididos en efectos acumulativos y efectos de naturaleza transitoria [LO10].

1.2 EFECTOS ACUMULATIVOS.

Los efectos acumulativos se identifican con una degradación continua de los parámetros eléctricos del componente con el tiempo, hasta la pérdida de la funcionalidad.

Se dividen en Dosis de ionización total y Daño por desplazamiento [FR05].

1.2.1 Dosis de ionización total.

La TID o Dosis de Ionización Total se debe a las partículas ionizantes y a los fotones que interaccionan con los materiales, y generan pares electrón-hueco en los mismos. Parte de estos pares se recombinan, pero otra parte permanece atrapada en forma de carga eléctrica en las capas del material [SZ81, GI00]. Estas cargas son las causantes de los daños por ionización acumulada.

Este daño es progresivo. La velocidad de deposición de la dosis es normalmente constante para una misión específica, pero la velocidad con que se degrada un componente depende del propio componente, e implica derivaciones paramétricas irreversibles y en ocasiones fallo funcional del componente [LO10].

1.2.2 Daño por desplazamiento.

El Daño por Desplazamiento o DD (“Displacement Damage”) es otro efecto causado por las partículas espaciales en los materiales semiconductores. Si una partícula energética colisiona con un átomo, el átomo retrocederá de su posición en la malla del material. Si la energía transferida al átomo es suficiente, el átomo podrá moverse libre de su posición a otra intersticial, dejando una vacante. Si llevara mucha energía, podría desplazar a otros átomos creando grandes grupos de defectos en la red [FR05, LO10]. El efecto es la creación de grupos de átomos atrapados en el material, que pueden actuar como generadores, recombinadores o centros de atracción para otros átomos. Estos últimos merman la vida de los portadores minoritarios, incrementando el nivel de generación térmico de los pares electrón-hueco, y reduciendo la movilidad de los portadores [SU88]. La degradación lleva a derivas paramétricas irreversibles y eventualmente a fallos funcionales del componente.

1.3 EFECTOS DE NATURALEZA TRANSITORIA O EFECTOS PUNTUALES (SEE).

Los efectos de naturaleza transitoria o también llamados efectos puntuales son debidos al paso de una partícula energética por una zona sensible del dispositivo. La interacción típica de los iones pesados es la ionización directa mientras que los protones provocan interacción nuclear y emisión de núcleo de retroceso en el componente. La consecuencia es un impulso de corriente transitoria resultando en una perturbación funcional del dispositivo (error lógico, transitorio, cortocircuito, etc) [MA97].

Las partículas responsables de los efectos puntuales, también llamados SEE (Single Event Effect”) o SEP (“Single Event Phenomena”) son:

- Iones procedentes de la radiación cósmica (además de los hipotéticos iones por erupción solar).
- Protones de los cinturones de radiación y de erupción solar.

Hay muchas condiciones y modos de fallo debidos a SEE, dependiendo de la partícula incidente y del propio componente. Es conveniente clasificar los tipos de

SEEs en dos grupos: errores leves o “soft” (no destructivos) y errores graves o “hard” (destructivos) [LO10].

1.3.1 Errores leves.

Los errores leves son fallos que afectan al sistema electrónico de manera temporal, manifestándose como anomalías totales o parciales. Aún siendo la naturaleza del fallo siempre la misma, el fallo depende del área de impacto de la partícula y de la energía, el efecto del fallo es claramente diferenciable en función del tipo de dispositivo afectado. Así su nomenclatura varía en función de que el dispositivo afectado sea analógico o digital. Algunos de los fenómenos de tipo "soft" más típicos son los siguientes [LO10]:

- ❖ Single Event Upset o **SEU**: Se produce el fenómeno de SEU cuando una partícula atraviesa una celda de memoria de un circuito digital (p. e., una RAM) y el rastro de portadores creados produce un cambio en el valor que almacena. Es el suceso aislado mejor estudiado puesto que fue predicho en 1962 y observado experimentalmente en 1975 [FR05].
- ❖ Multiple Bit Upsets o **MBU**: Este error consiste en una producción simultánea de SEUs. Es decir, el impacto de la partícula produce fallos en zonas que afectan a varias celdas de memoria simultáneamente [GE03].
- ❖ Single Event Transient o **SET**: Es la respuesta transitoria de un circuito a la acción de un SEE. Normalmente se detecta una perturbación en los niveles de tensión durante un corto periodo de tiempo [SA01]. Existen dos tipos de SET:
 - ASET: Para circuitos analógicos
 - DSET: Para circuitos digitales.
- ❖ Single Event Functional Interrupt o **SEFI**: Es la respuesta del circuito a SEEs provocados en zonas extremadamente sensibles como son circuitos de reloj, inicialización, test. Un ejemplo de ello son los efectos puntuales producidos en la etapa lógica encargada de implementar un código redundante a prueba de errores [AR04].

Los errores leves pueden ser corregidos mediante el reiniciado del sistema o por técnicas de redundancia en circuitos digitales.

1.3.2 Errores graves.

Los errores graves son fallos que suponen una avería permanente del circuito ya que normalmente afectan a su integridad física. Algunos de los fenómenos de tipo "hard" más típicos son los siguientes:

- ❖ Single Event Latch-Up o **SELU**: Aparece en dispositivos integrados CMOS, en los que una partícula cargada activa un tiristor parásito cuyo consumo de corriente es tan elevado que provoca la ignición del dispositivo [JO00] (Fig. 1.1). Este fenómeno sólo puede ser evitado añadiendo limitadores de corriente e interruptores que apaguen el circuito cuando se advierta la presencia de un fenómeno de este tipo [DE00].

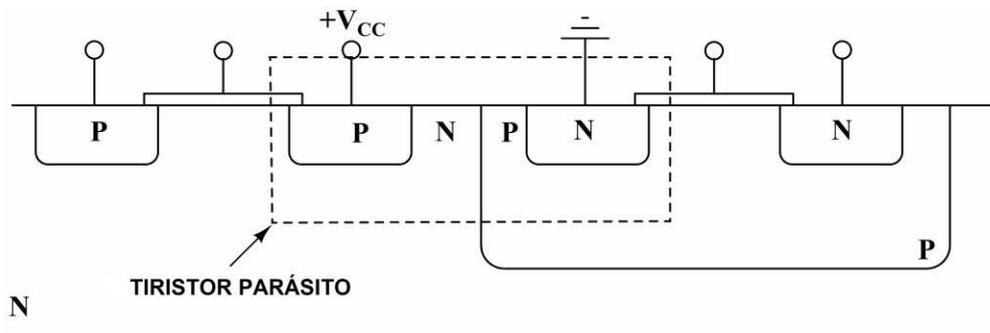


Fig. 1.1. Fenómeno de Latch-up. Imagen adaptada de [FR05].

- ❖ Single Event Gate Rupture o **SEGR**: Se produce cuando una partícula cargada atraviesa la puerta de un transistor MOS creando un plasma conductor que cortocircuita los terminales de puerta y el canal [BA98].
- ❖ Single Event Burn-Out o **SEBO**: Estos fenómenos se producen cuando un transistor de potencia (bipolar o de efecto campo) se encuentra en situación de corte y una partícula cargada viajera crea un plasma conductor entre los extremos (Drenador y fuente, colector y emisor). El cortocircuito que se produce conlleva la destrucción por calor del dispositivo [KU00].

CAPÍTULO 2

DISPOSITIVOS SUSCEPTIBLES DE SER EXAMINADOS POR IRRADIACIÓN LÁSER. MEMORIAS SRAM.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Una vez analizado el comportamiento de los dispositivos bajo diferentes tipos de radiación, los efectos de la radiación láser se corresponderían con la radiación ionizante transitoria y por lo tanto puede ser asociado a los daños producidos por ésta. Como consecuencia hay que concluir que todos los dispositivos que muestran los efectos de este tipo de radiación serían susceptibles de ser utilizados en este proyecto de emulación de entorno espacial mediante láser.

En los siguientes apartados, se examinarán brevemente los distintos elementos examinados así como los efectos que se han podido investigar.

2.2 DISPOSITIVOS BÁSICOS.

Las irradiaciones láseres han permitido conocer la sensibilidad de algunos dispositivos sencillos tales como:

1. Fotodetectores: Se han realizado estudios para determinar la forma y estructura de los ASETs esperados en estos dispositivos [LA06].
2. Transistores discretos: Se han realizado estudios para la investigación de corrientes transitorias en transistores construidos en tecnología MESFET de GaAs y se han encontrado resultados de irradiaciones en transistores aislados en circuitos integrados complejos [DO05].

2.3 DISPOSITIVOS ANALÓGICOS.

Generalmente, el suceso aislado de mayor interés es el ASET aunque también se ha investigado la incidencia de Latch-Ups en estos dispositivos:

1. Amplificadores operacionales: En prácticamente todos los trabajos se ha buscado un estudio de los ASETs generados al irradiar puntos específicos del componente. La mayor parte de los trabajos se centran en el LM124 [MO04, BO04, BO02, BU04a].
2. Comparadores: A semejanza de los amplificadores operacionales, en estos dispositivos se ha estudiado la generación, duración y amplitud de ASETs, tanto en versiones comerciales como en versiones resistentes a la radiación [LA02, BU04a].
3. Reguladores de tensión: Se han investigado la incidencia de ASETs tanto en circuitos integrados (LM137) [JO06] como en circuitos equivalentes a partir de componentes discretos [AD06].
4. Osciladores controlados por tensión ("VCO"): Otro grupo de dispositivos estudiados son estos osciladores, en los que se ha investigado la distorsión causada por el impacto de pulsos de láser [CH03, CH06].
5. Moduladores de anchura de pulso ("PWM"): En estos dispositivos, se ha investigado la incidencia de SETs así como la posibilidad de Latch-Up [CH05].

2.4 DISPOSITIVOS DIGITALES.

En estos dispositivos, la variedad de sucesos aislados posibles de estudiar es mucho mayor que en los casos anteriores. Asimismo, existe un mayor número de trabajos, dedicados fundamentalmente al estudio de memorias:

1. Flip-flops: En un estudio relativamente antiguo [BU90], se demuestra que se pueden inducir SEUs y Latch-Ups por medio de láser en flip-flops bipolares.

2. Conversores A/D: Se han realizado estudios sobre conversores analógico-digitales en tecnología CMOS investigando la incidencia de SEUs [PO04, BU00a] y de Latch-Ups [MI01].
3. Fabric switches: Se conoce al menos un trabajo en el que se hallaron los puntos sensibles a SEUs y SEFIs en un componente de este tipo (AD8151) [BU04b].
4. Registros de desplazamiento (Shift Registers): Se ha encontrado un artículo en el que se explica el método de test de estos componentes [SU06].
5. CPLDs, FPGAs, ASICs y microprocesadores: Algunos trabajos indican que es posible utilizar láseres para investigar sucesos aislados en dispositivos programables [JO01].
6. DRAMs: Se han encontrado algunos trabajos en los que se han estudiado sucesos aislados en RAM dinámicas. En ellos, se ha investigado SEUs y MBUs [DU00].
7. SRAMs: El circuito digital más estudiado por medio de haces láser es la SRAM [JO01, OL05, BU00b, JO99, BU94]. Se han investigado SRAMs en diversas tecnologías, incluyendo bipolares o resistentes a la radiación [BU94]. En estos dispositivos, se ha investigado sobre todo la ocurrencia de SEUs aunque también se han buscado MBUs [BU00b]. Son los dispositivos en los que se centra este trabajo, por varios motivos explicados a continuación.

El presente trabajo se centra en la radiación láser de memorias SRAM. La primera razón para proponer esta investigación es la gran abundancia de memorias en el sector Espacio, las cuales se utilizan en la mayoría de sistemas digitales (por ejemplo sistemas empotrados o FPGAs). Esta gran presencia hace que el estudio tenga un campo de aplicación amplio, y que sus resultados ofrezcan un interés

para un gran número de personas implicadas en este sector. Además, debido al área que ocupan, habitualmente de gran tamaño, tienen mayor probabilidad de ser afectados por la radiación.

Por otra parte, no sólo la abundancia de memorias hace atractivo su estudio, sino también las propias características tecnológicas de las mismas. Actualmente, las memorias cuentan con un grado de integración alto, siendo la densidad de transistores muy elevada. Esto hace que el efecto de la radiación sea más evidente, y por lo tanto, la necesidad de estudiar dichos efectos y posibles técnicas para evitarlos, más importantes.

Más aún, el nivel de integración de las memorias se prevé que continuará avanzando en los próximos años, lo que hará el efecto de la radiación mucho más aparente, presentando problemas que es preciso analizar hoy a fin de buscar una solución. Para aplicaciones críticas, como suelen ser las de Espacio, es vital conocer la fiabilidad de los componentes, en este caso de las memorias, para analizar si es suficiente.

2.5 ELECCIÓN DE LAS MEMORIAS SRAM.

Se han seleccionado dos memorias SRAM de dos fabricantes diferentes, ALLIANCE AS6C6264 y CYPRESS CY62256-70PC. La capacidad de dichas memorias es de 8kx8bits y de 32kx8bits respectivamente. La razón de seleccionar estas memorias responde en principio a dos razones fundamentales. La primera de ellas es la posibilidad de realizar fácilmente su desencapsulado, proceso que se detallará en el apartado siguiente, tanto por arriba como por abajo. La segunda razón es que, y aunque la tecnología no es la más moderna, es de destacar que la ESA utiliza en sus campañas de análisis y estudio de memorias embarcadas en satélites estas memorias por ser altamente fiables.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LÁSER Y PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO.

3.1 INTRODUCCIÓN.

La producción de fallos en un dispositivo electrónico es el paso inicial para el estudio posterior del comportamiento y el sistema láser de emulación de impacto de iones se convierte así en una herramienta de generación de fallos sobre dispositivos electrónicos de alto interés para la industria electrónica espacial.

Hasta la fecha sólo existen 8 laboratorios en el mundo que realizan este tipo de test (Fig. 3.1).

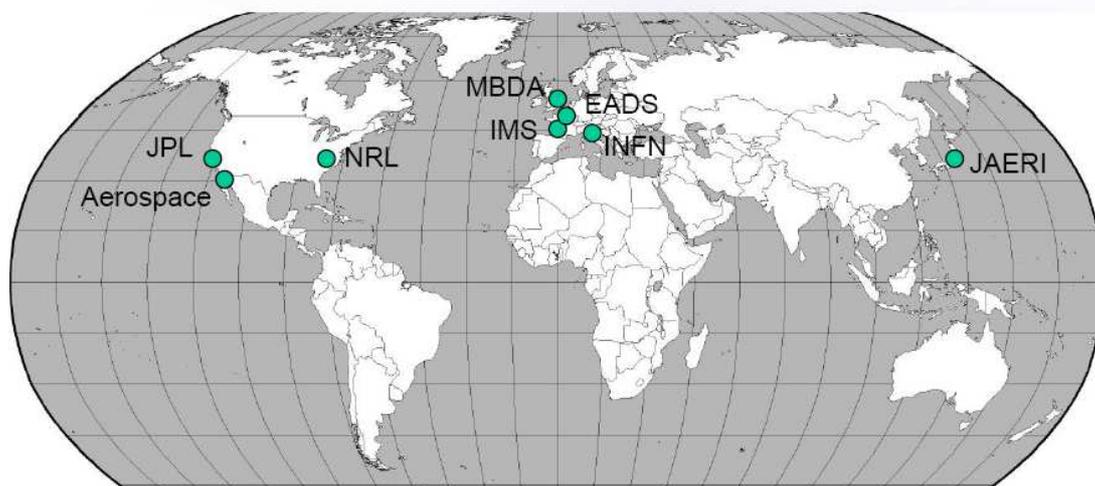


Fig. 3.1. Laboratorios que realizan ensayos de radiación mediante la técnica láser [LO10].

La emulación del impacto de partículas cargadas por medio de la radiación láser se lleva a cabo tratando de generar un volumen de carga equivalente al del ión. Para ello se disponen de diversos parámetros del láser. En primer lugar, se utiliza un láser pulsado, siendo la duración del pulso la del tiempo de tránsito del ión. En segundo lugar la longitud de onda define la profundidad de penetración de la radiación

electromagnética y la generación de carga (efecto fotoeléctrico). En tercer lugar hay que considerar la anchura del haz como una magnitud fundamental para determinar el volumen de carga equivalente. Y finalmente, la energía de la radiación fija el volumen final de carga generado.

No obstante, el uso del láser sobre memorias presenta un número de complicaciones añadidas, como el alto nivel de integración. La anchura mínima del haz está limitada por la longitud de onda debido a los efectos de difracción, lo que implica que sea difícil conseguir reducir la sección de un láser hasta los niveles necesarios para poder perturbar una única celda de memoria individual, cosa que de no producirse generaría una perturbación excesivamente amplia en una zona local. Por lo tanto, este proyecto presenta como novedad la irradiación mediante láser de memorias con un alto nivel de integración, como elemento diferenciador de estudios similares que se han producido recientemente.

El sistema de irradiación necesario para establecer experimentalmente el modelo de emulación de impacto de iones sobre dispositivos electrónicos es la parte más sensible del trabajo de experimentación. En el Centro de Asistencia a la Investigación o CAI de Espectroscopia Multifotónica y de Femtosegundo (Fac. CC. Químicas - UCM) se dispone de la herramienta básica para la inducción de fallos, la cual se describe en el siguiente apartado.

3.2 ESPECIFICACIONES Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA LÁSER.

3.2.1 Especificaciones del sistema láser.

El sistema de irradiación/iluminación con láser cumple con las siguientes especificaciones [LO10]:

– Emisión de luz láser:

- Permite la emisión de pulsos de luz lo más cortos posibles (entre unos pocos picosegundos a femtosegundos) y el ajuste o la selección de la longitud de onda en un rango entre 300 y 1300 nm.

– Trayectoria y Atenuación del haz:

- Permite el control de la energía del láser y conducir el haz hacia el sistema de focalización mediante elementos ópticos.

- Focalización del Haz:
 - Permite enfocar el láser sobre la muestra consiguiendo tamaños de foco inferiores a 3 μm .
- Posicionamiento y Movimiento de la muestra:
 - Permite movimientos de la muestra en las tres direcciones de movimiento en pasos mínimos de 1 μm con una precisión de 0,5 μm .

3.2.2 Descripción del sistema láser.

El sistema láser pulsado de femtosegundos disponible en el Centro de Asistencia a la Investigación o CAI de Espectroscopia Multifotónica y de Femtosegundo (Fac. CC. Químicas - UCM) se describe a continuación.

En la Fig. 3.2 se detalla la composición íntegra del sistema láser de femtosegundo. Como se observa, el sistema no consta de un único láser pulsado, sino que requiere de láseres de bombeo adicionales y otros sistemas ópticos para obtener pulsos ultracortos de diferentes longitudes de onda [LO10].

En la tabla 3.1 se resumen las principales características de los elementos que componen el sistema láser de femtosegundo descritos en la Fig. 3.2. Además, se describe más detalladamente la función de cada elemento en los siguientes puntos.

Tabla 3.1. Características principales de la tecnología integrada en el sistema láser de femtosegundo [HTTP-UCM].

Sistema Láser de Femtosegundo.	
1	Láser de Bombeo del oscilador de Femtosegundos Nd:Vanadato 5 W, 532 nm
2	Oscilador de Femtosegundos Ti:Zafiro 430 mW, 800 nm, 80 MHz, 50 fs/pulso
3	Láser de Bombeo del Amplificador Regenerativo Nd:YLF 20 mJ/pulso, 527 nm, 1 KHz
4	Amplificador Regenerativo Ti:Zafiro 3.6 mJ/pulso, 800 nm, 1 KHz, 35 fs/pulso

5 Amplificador Óptico Paramétrico

Radiación sintonizable desde el UV (300 nm) hasta el IR (3 μm)

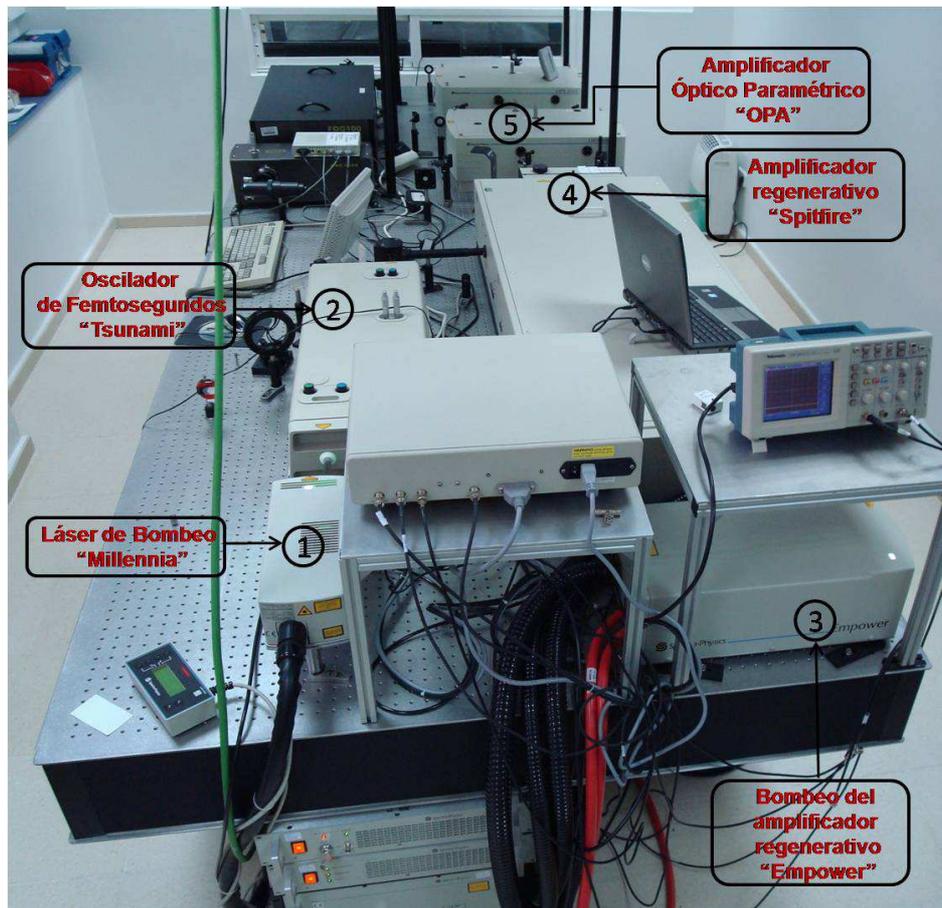


Fig. 3.2. Sistema Láser de Femtosegundo en la UCM [LO10].

3.2.2.1 Láser de Bombeo del Oscilador de Femtosegundos [HTTP-UCM].

El láser de bombeo "Millennia Vs J" es un láser continuo de Nd:YVO₄ bombeado por diodos, que emite radiación en el visible (532 nm) con una potencia de hasta 5W. Este láser emplea la salida de dos láseres diodos para bombear iones Nd⁺³ que dopan una matriz cristalina de ytrio vanadato (Nd:YVO₄), que actúa como medio activo, proporcionando radiación láser a 1064 nm (de igual forma que los láseres de Nd:YAG). Posteriormente esta radiación es doblada en frecuencias en un cristal no lineal de triborato de litio (LBO) para generar radiación láser a 532 nm, que es la que se emplea para bombear al oscilador láser de femtosegundos.

3.2.2.2 Oscilador Láser de Femtosegundo [HTTP-UCM].

El oscilador láser de femtosegundo “Tsunami” (Fig. 3.3) es un láser de estado sólido en el que el medio activo es un cristal de zafiro dopado con iones Ti^{3+} (Ti:Zafiro). La producción de pulsos láser de femtosegundos en el oscilador se consigue por medio del anclaje de los modos de la cavidad.

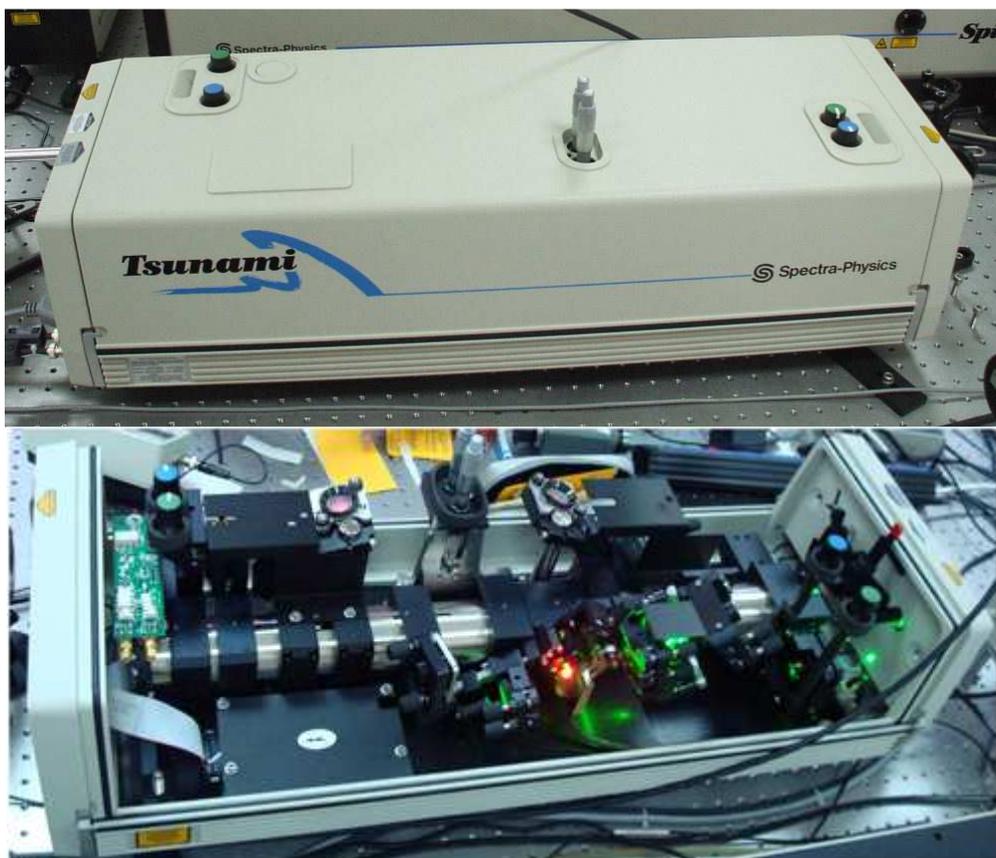


Fig. 3.3. Oscilador Láser de Femtosegundo “Tsunami”.

3.2.2.3 Láser de Bombeo del amplificador regenerativo [HTTP-UCM].

El láser de bombeo “Empower-30” es un láser pulsado de Nd:YLF, bombeado por un conjunto de diodos de AlGaAs, que generan la excitación óptica necesaria al medio activo de Nd:LiYF₄ obteniéndose radiación a 1053 nm. Por medio de dos moduladores acusto-ópticos Q-Switches sincronizados se obtiene pulsos láser de entre 500 Hz a 10 kHz en la escala de los nanosegundos. Finalmente, la radiación láser generada pasa a través de un cristal de triborato de litio (LBO), duplicándose a 527 nm. A 1 kHz se obtienen energías por pulso de 20 mJ, y a 5 kHz de 6 mJ.

3.2.2.4 Amplificador Regenerativo [HTTP-UCM].

En el amplificador regenerativo “Spitfire” (Fig. 3.4) se consigue una amplificación de la energía de los pulsos láser de femtosegundo procedentes del oscilador (Tsunami) de hasta seis órdenes de magnitud, manteniéndose prácticamente invariable la anchura temporal de los mismos. La amplificación tiene lugar cuando el pulso óptico que llega del oscilador (Tsunami) pasa a través del medio activo, que es también un cristal de Ti:Zafiro, y que es bombeado a su vez por los pulsos láser de 527 nm, a la frecuencia de 1 kHz procedentes del “Empower”.

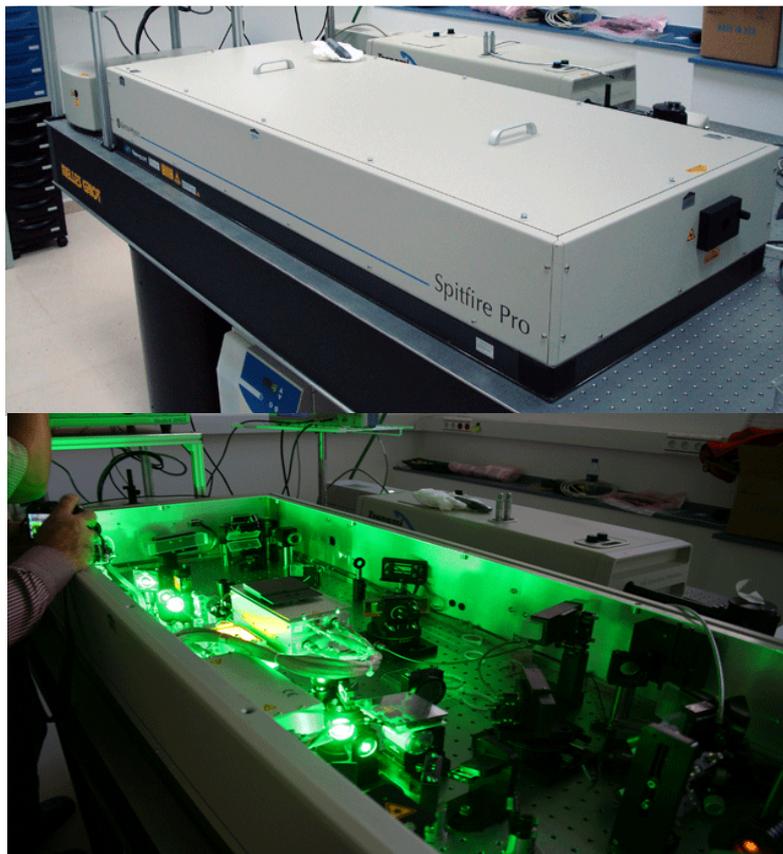


Fig. 3.4. Amplificador regenerativo “Spitfire”.

3.2.2.5 Amplificador Óptico Paramétrico (OPA) [HTTP-UCM].

Un amplificador óptico paramétrico se basa en un principio diferente al de los láseres convencionales. La ganancia de un láser convencional procede de una inversión de población entre diferentes estados, mientras que para un amplificador óptico paramétrico la ganancia procede de la conversión de frecuencia no lineal. Este tipo de proceso se origina por la interacción del campo electromagnético con los electrones enlazantes de un medio no lineal.

3.3 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO.

La Fig. 3.5 resume los procedimientos que hay que realizar para implementar experimentalmente el modelo teórico de irradiación láser.



Fig. 3.5. Procedimientos a realizar para la irradiación de memorias mediante láser. Imagen adaptada de [LO10.]

3.3.1 Desencapsulado de las memorias SRAM a radiar [LO10].

La aplicación de la técnica de emulación mediante irradiación láser en circuitos integrados requiere en todos los casos la iluminación directa del "chip", por lo que será siempre necesario proceder a la apertura del encapsulado, lo cual no siempre es tarea fácil, hasta conseguir el acceso visual sobre la superficie del integrado.

El término "desencapsulado" se utiliza indistintamente tanto para dispositivos encapsulados herméticamente como para dispositivos encapsulados en polímero. La desencapsulación es el procedimiento de eliminación de la tapa o del material encapsulador mediante procedimientos mecánicos, térmicos o químicos. La apertura del dispositivo expone el circuito integrado con el propósito de su análisis posterior.

Las técnicas deben ser compatibles con los diferentes empaquetados a fin de minimizar la introducción de sustancias extrañas o daños en el dispositivo.

Las técnicas de desencapsulado dependen del encapsulado o empaquetado del circuito integrado y el usuario debe escoger la solución adecuada. Algunas de estas técnicas son tan simples como la idea de utilizar un cascanueces y otras son más complicadas ya que hay que trabajar con ácidos tóxicos y corrosivos.

Dado que las memorias seleccionadas tienen un encapsulado plástico, a continuación, se explica y desarrolla la técnica utilizada para este tipo de encapsulado.

La técnica más efectiva para desencapsular empaquetados plásticos de polímero es mediante ataque químico. Existen máquinas comerciales para realizar este tipo de desencapsulado pero también se pueden utilizar técnicas manuales. Antes del ataque químico es conveniente pulir parte del plástico mecánicamente para acelerar el proceso. Así, mediante una fresa se realiza una cubeta en el encapsulado plástico (Fig. 3.6) donde posteriormente se depositará el ácido gota a gota.

Para el tipo de polímero que se utiliza típicamente en los encapsulados comerciales el ácido adecuado para realizar el cometido es el ácido nítrico rojo a una temperatura de unos 75-80°C. Debido a que este ácido ataca al polímero y al metal, el desencapsulado por la parte superior del chip es mucho más destructivo, ya que, el ácido ataca igualmente a los contactos metálicos, las patillas e incluso a las pistas del circuito integrado.

Por tanto, en los procesos de desencapsulado se alcanza un bajo porcentaje de supervivencia del integrado, siendo menor cuando el desencapsulado se realiza por la parte superior del dispositivo, ya que, normalmente es donde se sitúan los microcontactos eléctricos. Es mucho menos destructivo y más efectivo si se realiza por la parte inferior del chip. En la Fig. 3.7 se muestra una memoria CYPRESS desencapsulada por la parte superior mediante este tipo de desencapsulado, donde el dispositivo queda totalmente operativo y visible por su parte superior quedando preparado para irradiarlo con láser.



Fig. 3.6. Memoria CY62256-70PC donde por la parte superior del dispositivo se ha realizado una cubeta mediante pulido mecánico.

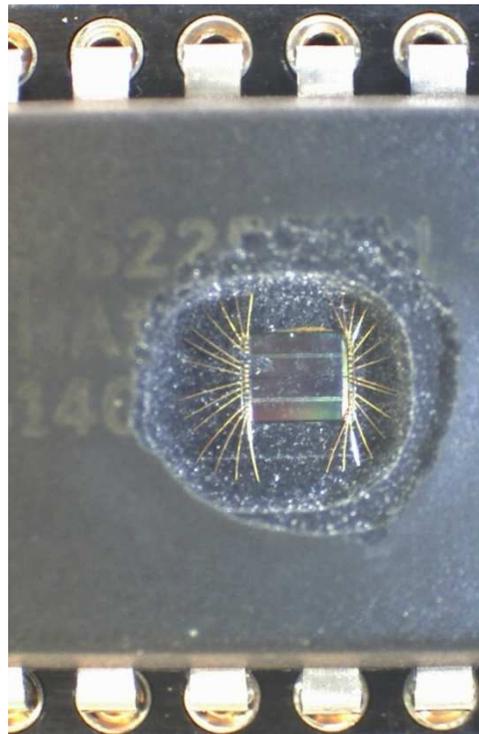
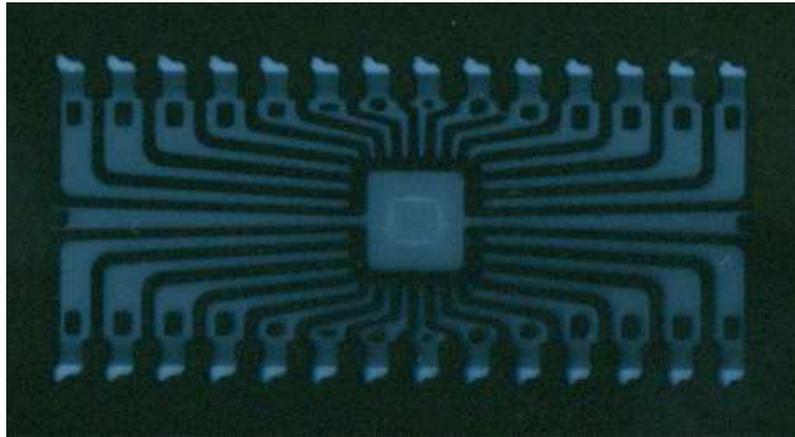


Fig. 3.7. Memoria CY62256-70PC desencapsulado por la parte superior del dispositivo. La superficie del circuito integrado ha quedado intacta y al descubierto después del ataque químico.

Antes de realizar este tipo de ataque es conveniente realizar una imagen de rayos X para conocer la posición del chip dentro del encapsulado y realizar el ataque químico en el sitio adecuado (Fig. 3.8).



*Fig. 3.8. Imagen de Rayos X del interior de la memoria CY62256-70PC de encapsulado plástico.
Imagen obtenida gracias la colaboración del CIEMAT.*

3.3.2 Dimensionado de las memorias desencapsuladas.

El desencapsulado del dispositivo es asimismo necesario con el fin de estudiar el “lay-out” o diseño del circuito integrado y disponer del dimensionado XYZ necesario para definir las condiciones de iluminación y barrido con el láser. Por tanto, una vez desencapsuladas las memorias se realiza una foto con el microscopio con el fin de obtener un mapa a gran escala y dimensionado del chip a radiar, que facilitará la tarea de ubicar el spot del láser en la zona determinada [LO10].

Además, y con el fin de aplicar correctamente el método y sobre todo de analizar los resultados, es importante conocer lo más detalladamente posible el diseño del dispositivo a irradiar. En ocasiones existe de antemano un conocimiento de este diseño por información directa del fabricante o del diseñador del chip, pero en otras ocasiones esta información no está disponible. En este último caso, se puede realizar el ejercicio de intentar identificar sobre el chip los elementos más importantes a partir del esquema del circuito que suele incluir el fabricante en la hoja de características. A veces, la propia experiencia del analista permite identificar elementos críticos del circuito a partir de su descripción funcional y del esquema de las conexiones externas del dispositivo [LO10].

En las figuras siguientes (Fig. 3.9 y Fig. 3.10) se observa el mapa dimensionado y con los pines identificados para las memorias ALLIANCE AS6C6264 y CYPRESS CY62256-70PC estudiadas.

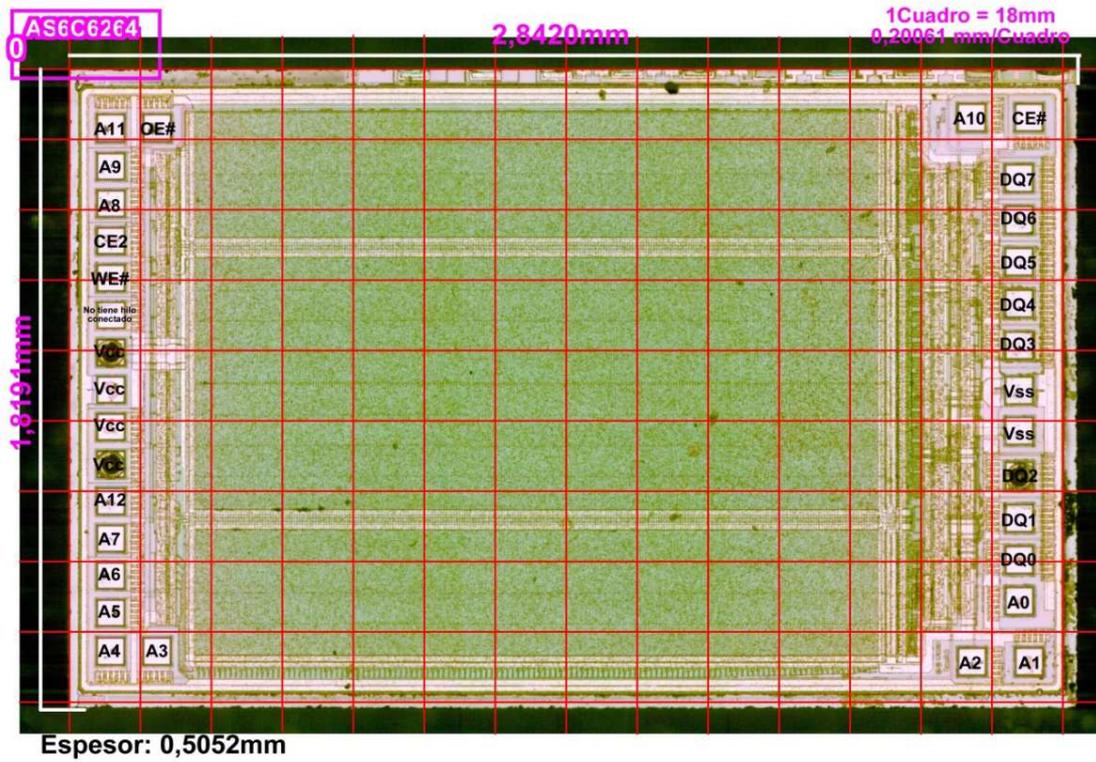


Fig. 3.9. Mapa del chip a radiar de la memoria AS6C6264.

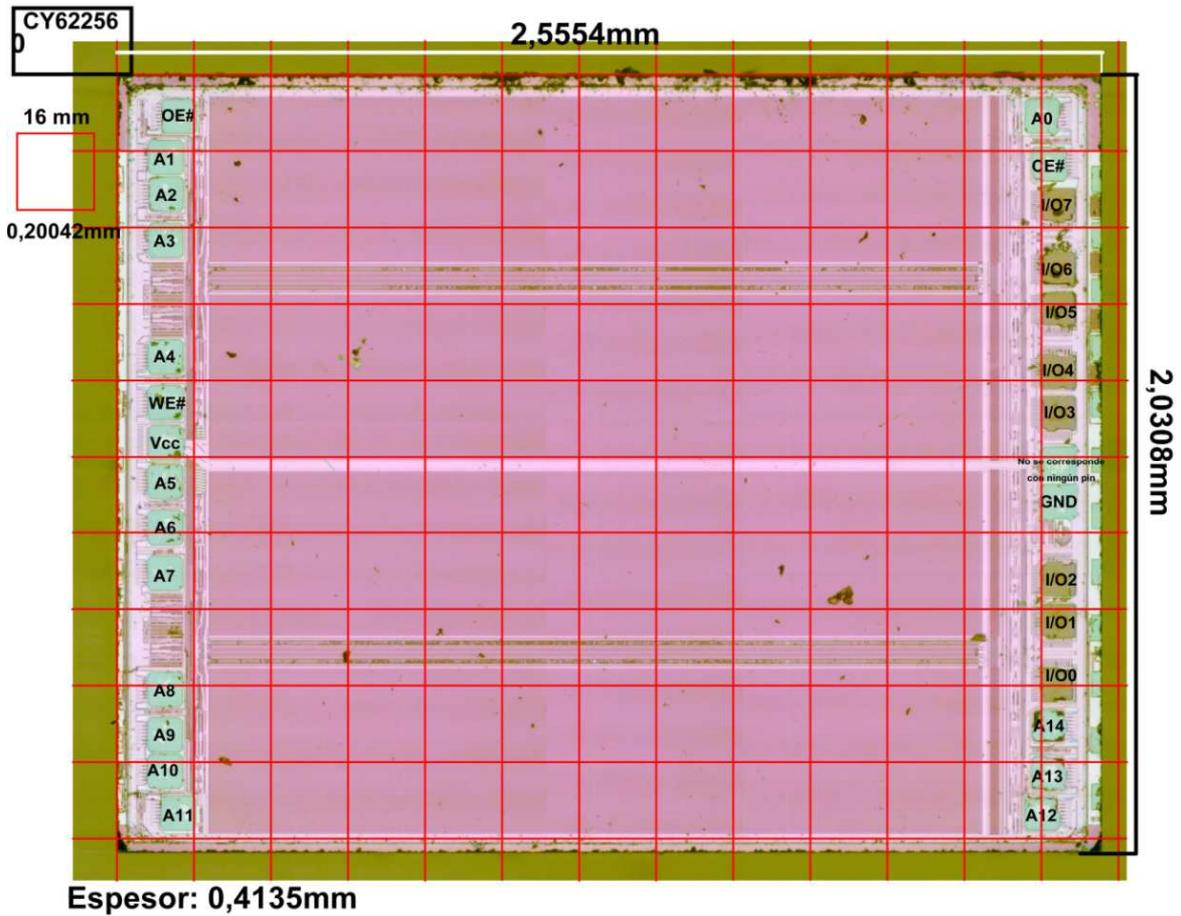


Fig. 3.10. Mapa del chip a radiar de la memoria CY62256-70PC.

Con la información obtenida del estudio detallado del diseño se puede simplificar la secuencia de ensayo dirigiendo el barrido del láser directamente a la zona más crítica o representativa del chip. Con ello se obtienen ciertas ventajas en la realización del ensayo con el láser:

- Caracterización directa de la sensibilidad de un transistor o de una celda de memoria concreta con una estructura concreta (gracias a la directividad del láser).
- Reducción del tiempo de radiación al limitar la zona radiada.
- Se puede utilizar una zona determinada para calcular con precisión la “sección eficaz láser”.

3.3.3 Placas de circuito impreso.

Una vez desencapsulado y dimensionado el circuito integrado, es necesario diseñar una placa de circuito impreso para su configuración electrónica y niveles de polarización.

A la hora de realizar el diseño es necesario tener en cuenta las dimensiones del porta-muestras y las características de los motores respecto al peso que pueden soportar, ya que, su libertad de movimiento es imprescindible para realizar un barrido completo de la superficie del chip.

La Fig. 3.11 muestra la placa de circuito impreso que se ha diseñado y fabricado para el control de la memoria y comunicación con un PC para la toma de datos.

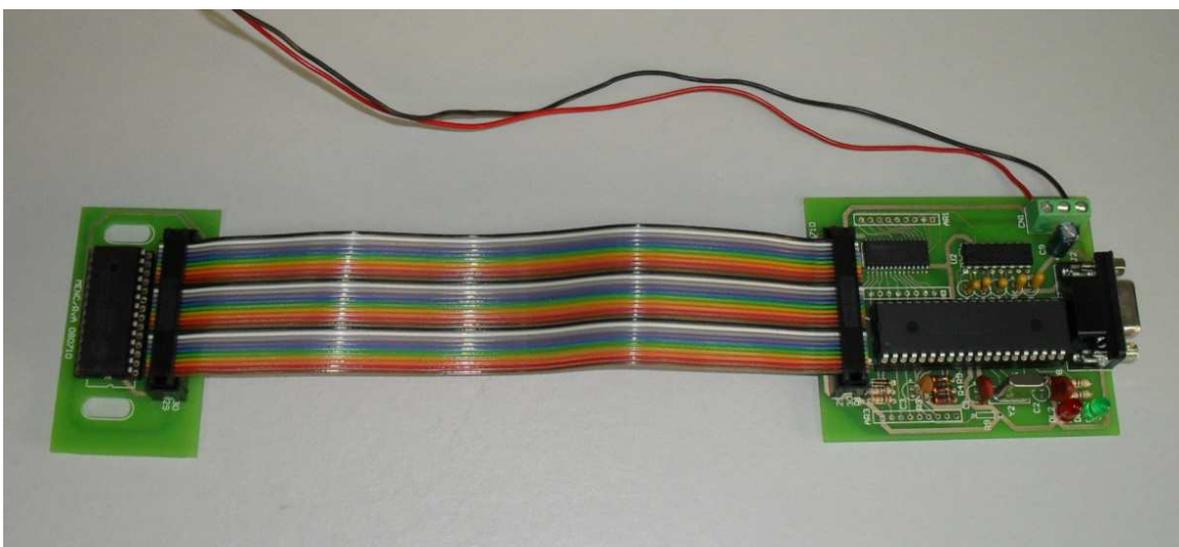


Fig. 3.11. Placa de circuito impreso para la comunicación de la memoria con el PC.

El microprocesador (a la derecha) se comunica con un PC por medio de un puerto USB (mediante un cable conversor de serie RS232 a USB). A la izquierda, en una placa independiente que irá sujeta al porta-muestras o plataforma que permite el movimiento XYZ frente al haz LASER, se sitúa la memoria a radiar, que se comunica con el microprocesador a través de un bus de direcciones y datos.

Una vez construido el circuito se programa dicho microprocesador para:

- Escribir la memoria con el patrón deseado. El programa ofrece la posibilidad de elegir entre un gran número de patrones, como por ejemplo: todo ceros o todo unos, o bien alternadamente o aleatoriamente unos y ceros.

- Leer el contenido de la memoria.

- Comprobar el estado de todas las celdas de la memoria, es decir, leer todas las direcciones de la memoria, compararlas con el patrón escrito y almacenar en un fichero el resultado de dicha comparación.

- Transmitir a un PC el estado de la memoria. Los errores, caso de que los hubiera y la dirección de las celdas en que se hubieran producido.

3.3.4 Descripción del montaje experimental y sistema de adquisición de datos.

3.3.4.1 Descripción del montaje experimental.

La Fig. 3.12 muestra una descripción gráfica del sistema láser de irradiación.

Toda la instrumentación que se ha utilizado viene descrita en la tabla 3.2 con sus características principales.

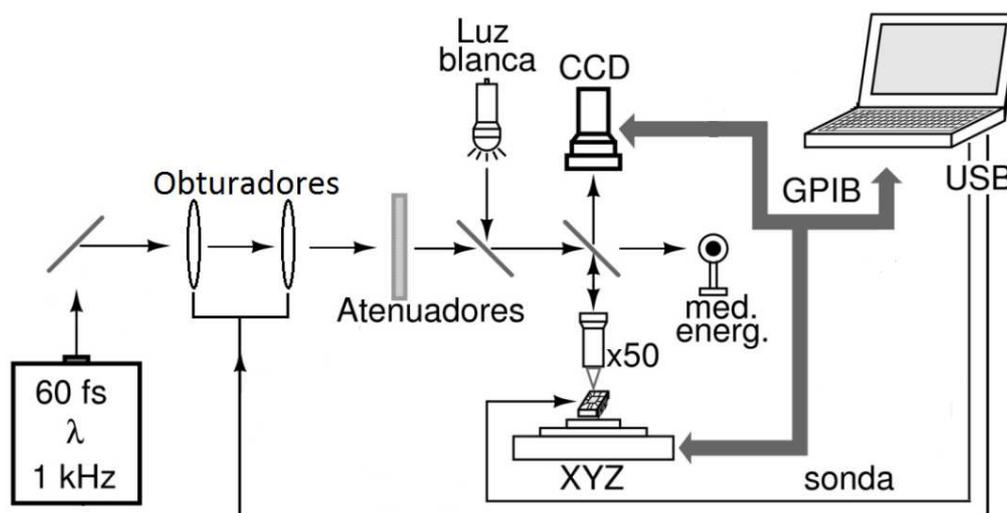


Fig. 3.12. Esquema del montaje experimental de ensayos definido en el CAI de Espectroscopia Multifotónica y de Femtosegundo de la UCM.

Tabla 3.2. Características principales de la instrumentación integrada en el sistema de emulación de radiación espacial. Tabla adaptada de [LO10].

INSTRUMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	DISTRIBUIDOR	CARACTERÍSTICAS
Motores de Movimiento	Precision Motorized Actuators LTA-HS	Newport	Resolución : 0.035 μm Incremento Mínimo: 0.1 μm Repetitividad unidireccional: 0.5 μm , bidireccional: 2 μm
Controlador Motores	3 Axis Motion Controller/Driver ESP300	Newport	Procesador DSP de 32 bits para control sincronizado de alta precisión.
Objetivo Microscopio	Mitutoyo M Plan APO NIR 50X Infinity Corrected	Edmun Optics	Distancia de Trabajo: 17 mm (Larga distancia de trabajo)
Detector Energía	Power Detector 918D-IR	Newport	Rango Espectral: 0.78-1.8 μm
Medidor Energía	1918-C	Newport	Potencia: 11pW-20kW
Cámara CCD	Sony XC-ST50	RS	Optimizada para visible e infrarrojo.
Atenuadores	NDC-100S-4M NDC-25C-2	Thorlabs	Filtro de 8 pasos de transmisión variable y continua.
Obturadores	Fast Smart Shutter	Sutter Instrument	Obturador rápido con tiempos de respuesta, apertura y cierre de 8 ms.

Una vez desencapsulado y montado en una placa de circuito impreso, la placa se monta en un porta-muestras motorizado en los tres ejes de movimiento XYZ con una precisión de 0,1 μm en su movimiento. El haz láser se focaliza mediante un objetivo de microscopio de larga distancia de trabajo y de 50X aumentos, apropiado para luz infrarroja, con el que se obtiene un diámetro de “spot” del orden de 1 a 1,5 μm en función de la longitud de onda utilizada. Una cámara CCD permite observar el correcto emplazamiento del punto de disparo [LO10].

La frecuencia de los pulsos láser es sintonizable desde 20 Hz a 1Khz. Además, también se puede configurar el láser para lanzar un solo pulso mediante una señal de control exterior.

La simultaneidad de experimentos en el CAI impone una frecuencia de trabajo del láser a 1kHz. Esta frecuencia implica que en cada punto de disparo inciden unos mil pulsos de energía por segundo [LO10]. En principio, esta frecuencia de trabajo supone un serio problema, ya que, para asegurar que se producen errores en la memoria y que éstos son contabilizados de manera correcta se necesita que sobre la memoria incida un único pulso, y no vuelva a incidir el siguiente hasta que se ha chequeado la memoria, se ha almacenado el resultado de la acción de ese único

pulso y se ha desplazado la memoria para ser irradiada en el punto siguiente. El tiempo que se emplea en chequear toda la memoria y escribir el resultado es muy superior al tiempo existente entre pulsos trabajando a una frecuencia de 1Khz, es decir, 1 ms, por tanto es necesario asegurar que sobre la memoria únicamente incide un pulso y que no incide el siguiente hasta que la memoria se encuentra preparada para recibir el siguiente disparo, esto es, hasta que se han realizado las acciones anteriores. Es por ello que se hace uso de los obturadores, mediante los cuales, y con una correcta configuración de los tiempos para que ambos estén abiertos durante 1 ms, se consigue que al accionarlos únicamente pase un único pulso que incidirá sobre la memoria y no se accionarán de nuevo hasta que haya pasado el tiempo necesario para que la memoria esté preparada de nuevo. Además, mediante el uso de dichos obturadores se consigue que se incida en cada punto exactamente con el mismo flujo de radiación.

La Fig. 3.13 muestra una imagen real del sistema descrito.

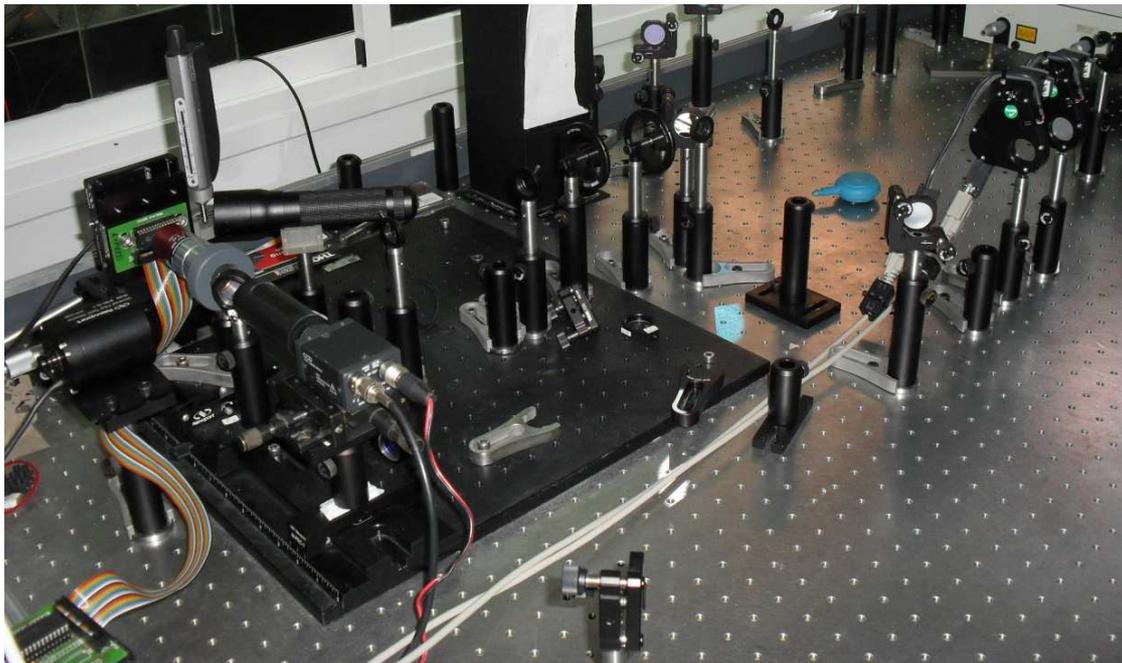


Fig. 3.13. Imágenes reales del sistema.

3.3.4.2 Sistema de adquisición de datos.

El objetivo siempre será diseñar programas de control y adquisición que puedan ser utilizados con diferentes modelos de dispositivos y para diferentes configuraciones.

La adquisición y tratamiento de datos se realizará de tal forma que se puedan llevar a cabo los mapas 3D de sensibilidad del dispositivo.

El sistema de adquisición de datos deberá cumplir con las siguientes especificaciones [LO10]:

– Sincronización:

- Para realizar un análisis de sensibilidad por zonas se debe diseñar un sistema de sincronización que controle el movimiento de la muestra (movimiento del láser sobre el chip), el disparo del láser y el sistema de medida o detección de errores.

– Configuración eléctrica del dispositivo:

- La muestra bajo ensayo debe estar configurada eléctricamente de manera estática o dinámica, de forma que se facilite la detección de errores eléctricos creados por el láser y diferenciarlos de otros posibles errores.

– Detección de errores:

- Se debe diseñar un sistema de medida que sea capaz de detectar los errores o cambios en los parámetros eléctricos que se produzcan a causa de la iluminación con el láser. El sistema debe ser tal que permita la sincronización con el sistema de movimiento de la muestra y con el sistema de disparo del láser.

La toma de datos y el control de toda la instrumentación descrita anteriormente se realiza mediante una aplicación específica programada en LabView, lenguaje de programación gráfico desarrollado por "National Instruments" en 1976 y que actualmente es el software de control de instrumentación más ampliamente utilizado en la industria y laboratorios de investigación, y bajo los protocolos de comunicación GPIB o USB dependiendo del instrumento a controlar. La Fig 3.14 muestra la interfaz de usuario de dicho programa. Esta pantalla está formada por tres módulos principales de configuración.

En el módulo *file path* se selecciona la ubicación y el nombre para el archivo donde el programa almacenará los resultados del barrido para su posterior tratamiento y análisis. En el módulo *número de puntos de barrido y paso* se

selecciona el número de disparos y la distancia entre los mismos para realizar el barrido del área seleccionada. Por último, los *indicadores X e Y* muestran el número de disparos realizados en tiempo real, útiles para saber que el barrido se está ejecutando correctamente y tener una estimación del tiempo.

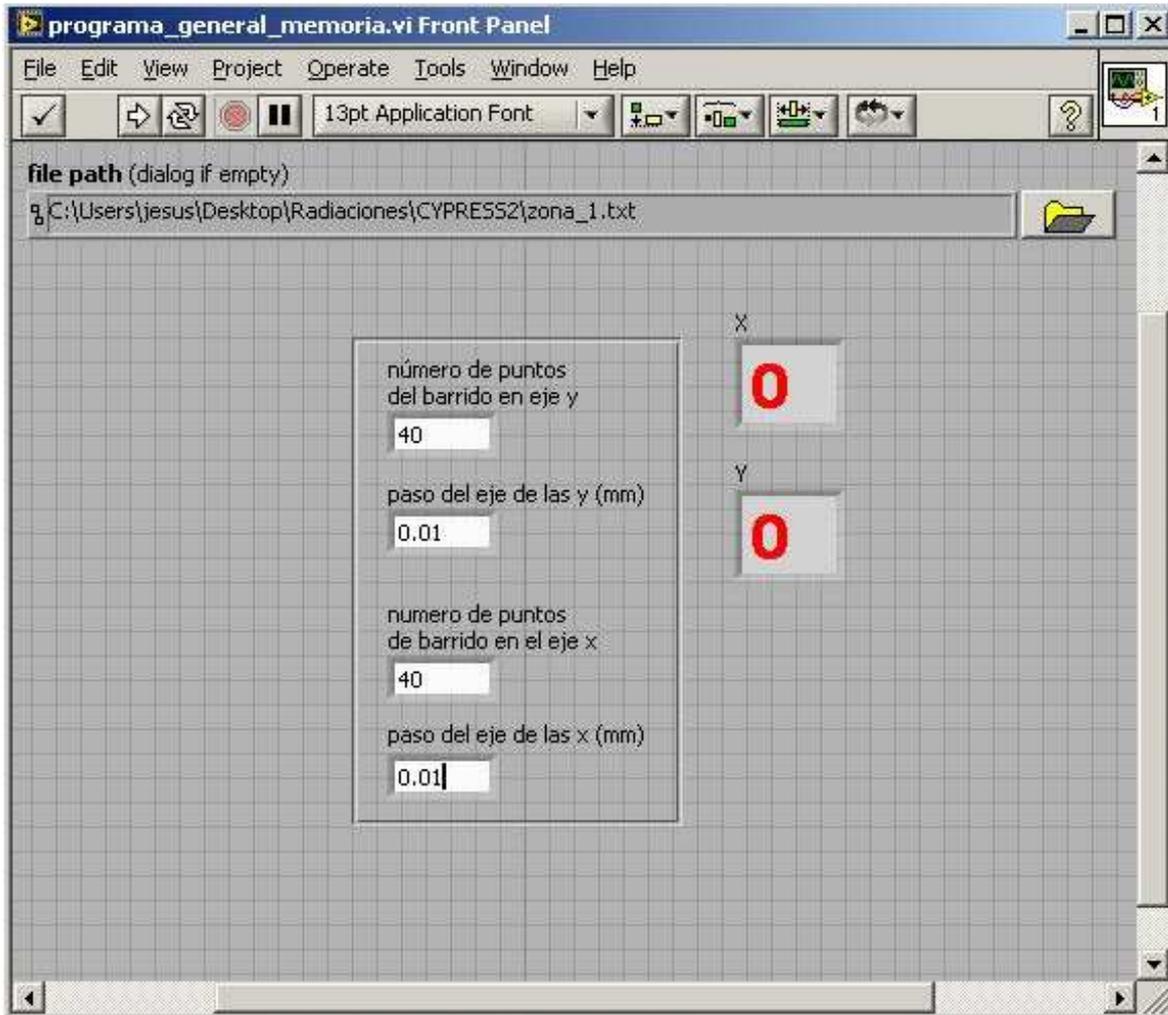


Fig. 3.14. Interfaz del programa de control durante el proceso de caracterización de componentes en línea. Esta experiencia se utilizó para dispositivos analógicos.

Este programa gobierna a todos los componentes mencionados anteriormente a través de una tarjeta GPIB basada en el protocolo IEEE-488.2, que permite la transmisión de mensajes entre componentes de una forma efectiva y rápida y a través de los puertos USB. Para realizar el barrido completo, el dispositivo se monta en un porta-muestras motorizado en los tres ejes cuyo movimiento también se programa, sincroniza y se integra en el programa de LabView.

3.3.5 Irradiación láser del dispositivo.

La irradiación láser de los dispositivos se realiza posteriormente al diseño de las herramientas, programas de control y adquisición de datos específicos para cada dispositivo.

Para alcanzar todas las zonas sensibles del dispositivo se impone la irradiación láser tanto por la parte delantera del integrado (“Frontside”) como por la parte trasera (“Backside”).

Aunque la iluminación del integrado desde la parte superior (“Frontside”) es generalmente más sencilla desde el punto de vista de la preparación de la muestra, en ocasiones puede ser necesario recurrir a la irradiación por la parte inferior del mismo. La decisión sobre la iluminación del chip desde la parte superior o desde la parte inferior del mismo depende de los siguientes parámetros [LO10]:

- Proporción metal/silicio en superficie, espesor de la metalización y niveles de metalización: En los casos en los que la parte activa del chip esté cubierta por las metalizaciones, no será posible acceder con el láser directamente a la zona activa, pues el metal es opaco al láser para las longitudes de onda utilizadas. Por ello, para llegar con la luz a la zona activa debemos hacerlo a través del silicio, desde la parte posterior.
- Profundidad de la zona activa: dependiendo de la longitud de onda del láser, la capacidad de penetración del mismo en el silicio es diferente. En casos en los que se estén utilizando longitudes de onda con escasa penetración, si la zona activa del chip está a suficiente profundidad, puede que ésta no sea alcanzable con el láser y sea necesario hacerlo desde la parte posterior puliendo la oblea de silicio hasta asegurarnos un espesor tal que permita enfocar el láser a la profundidad deseada. Una solución alternativa es utilizar la técnica del doble fotón, permitiendo enfocar el láser en el interior y propiciando el proceso de absorción de dos fotones al mismo tiempo. Para ello, la longitud de onda del láser debe ser seleccionada cuidadosamente.

El barrido completo de toda la superficie se realiza básicamente siguiendo el diagrama de estados reflejado en la Fig. 3.15.

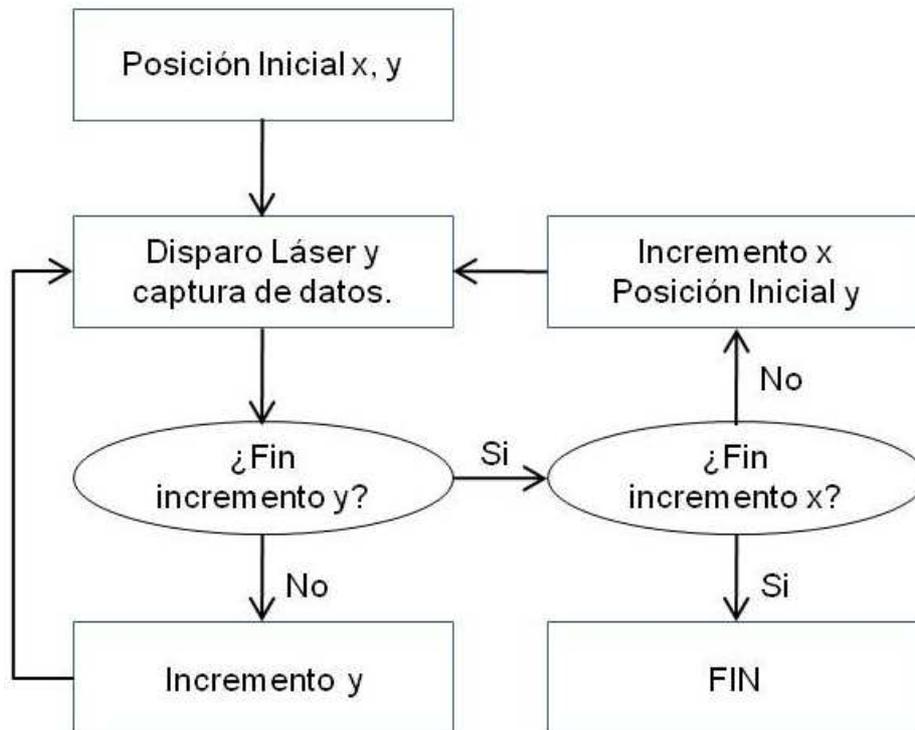


Fig. 3.15. Diagrama de estados programado en Labview para realizar el proceso de barrido del dispositivo [LO10].

Más detalladamente, mediante el programa general desarrollado en LabView se radian las memorias siguiendo la siguiente secuencia:

1. Se escribe la memoria con el patrón seleccionado.
2. Se posiciona el foco del Láser en un punto de referencia inicial para tomar después posiciones relativas. Para ello se utiliza el lay-out del chip (Fig. 3.9 y 3.10) debidamente calibrado.
3. A partir del punto de referencia el movimiento del foco se realizará en pasos constantes en la dirección Y y una vez realizado el barrido en toda esa fila se vuelve al comienzo de ella para avanzar un paso idéntico al anterior, pero en la dirección X. Después de esto se barre la siguiente fila.
4. La radiación y lectura de errores se lleva a cabo automáticamente con el programa en LabView.
 - a. Se actúa sobre los obturadores para conseguir un pulso único sobre el punto en que está posicionado el foco del haz.

- b. A continuación se lee la totalidad de las celdas de memoria y se compara su estado con el del patrón grabado inicialmente.
 - c. Se transmite al PC el resultado de la comparación y se almacena en un archivo.
 - d. Se vuelve al estado original el contenido completo de la memoria.
 - e. Se mueve el chip para alcanzar la siguiente posición y se comienza un nuevo ciclo.
5. Los resultados de la radiación se analizan una vez terminada la secuencia de barrido de toda la memoria y se superponen a la fotografía del lay-out del chip.

La duración de la caracterización completa del dispositivo es función de las dimensiones del barrido.

Así, con la configuración que aparece en el ejemplo (Fig. 3.14), se obtendría una superficie de barrido de $400 \mu\text{m}^2$, lo que le corresponde a un total de 1600 posiciones de disparo. Ésta sería el área máxima de barrido, pues se ha comprobado que para barridos de áreas mayores el haz del láser se desenfoca debido a la colocación del chip el propio circuito integrado. Teniendo en cuenta las dimensiones de las memorias, más de 2 mm^2 , para barrer toda su superficie se ha de realizar barriendo por zonas, por lo que se obtiene una gran cantidad de datos y por tanto el tratamiento de los mismos debe ser realizado de una forma rápida y eficiente.

El posicionado y captura de datos en cada punto de disparo dura en torno a 1.5 s. A este tiempo hay que añadirle lo que tarda en posicionarse en la nueva coordenada X, cuando ya se ha realizado un barrido completo en la coordenada Y. Esta duración es dependiente del número de disparos en la coordenada Y y se estima en torno a unos 5 s ya que el programa también introduce intervalos de espera para que no se solapen las órdenes. Por tanto, la estimación de la duración del barrido de una zona de $400 \mu\text{m}^2$ es de 1 hora y 50 minutos aproximadamente.

A modo de ilustración, en la Fig. 3.16, se puede observar uno de los puntos de disparo sobre el circuito integrado. La imagen corresponde a la captura de imagen que se obtiene a través de la cámara CCD para infrarrojo. El circuito integrado se observa debido a que la muestra está también iluminada mediante luz blanca.

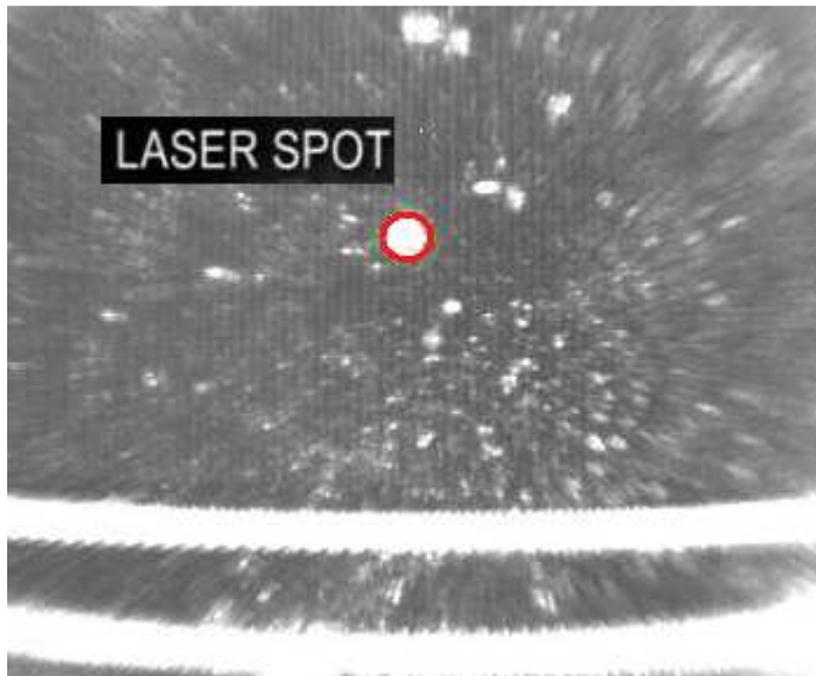


Fig. 3.16. Imagen capturada por la cámara CCD en uno de los puntos de disparo láser en la superficie del circuito integrado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE IRRADIACIÓN Y CONCLUSIONES.

4.1 ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RADIACIÓN.

Ya está todo preparado para comenzar a radiar las memorias mediante el proceso explicado en el capítulo anterior (apartado 3.3.5), pero antes resta elegir los parámetros de radiación:

- **Elección del paso en los ejes X e Y:** Por la tecnología de construcción de las memorias elegidas, el tamaño de la celda será de un mínimo de 2 μm . Para asegurar que entre un disparo y otro no hay solape, la distancia elegida entre disparos será de 10 μm .
- **Elección de la longitud de onda:** Se radian las memorias a una longitud de onda de 800 nm, por ser lo más estándar, conocido y utilizado, trabajando en régimen de absorción lineal. Como bien se sabe, a mayor longitud de onda mayor penetración en el silicio. Debido al alto índice de refracción del silicio, a dicha longitud de onda prácticamente no hay penetración y se está incidiendo sobre la primera capa de celdas. Si se aumenta la longitud de onda para una mayor penetración, se tiene el inconveniente de encontrar partes metálicas donde no existe penetración, además de que la penetración no sería mucho mayor.
- **Anchura del haz del foco:** Debido a la instrumentación óptica utilizada el haz del foco estará en torno a 1.5 μm , nunca inferior, lejos de los 0.8 μm que es el límite de difracción para una longitud de onda de 800 nm, y por tanto más que suficiente.

- **Elección de la energía de radiación:** Para elegir la energía a la que se van a radiar las memorias, primeramente se realizan unas pruebas realizando varios disparos sobre las memorias y en diversos puntos. Dichos disparos se realizan comenzando a una energía relativamente baja, y subiendo poco a poco, con el fin de establecer una energía de radiación para cada memoria a la cual se producen errores con un único disparo, serán zonas sensibles, y no produciendo errores con un único disparo, serán las zonas menos sensibles. Dichas energías de radiación son de unos 550 pJ y 640 pJ para las memorias de ALLIANCE y CYPRESS respectivamente.

Se debe de tener en cuenta que siempre que se hable de energía se refiere a la energía que indica el medidor. Para una longitud de onda de 800 nm, la energía que incide sobre la muestra es la energía que marca el medidor dividida entre cuatro (pues se utiliza entre el medidor y muestra un beam splitter 80:20, es decir, que transmite el 80 % de lo que le llega y que entra al medidor y refleja el 20% de lo que le llega y va hacia a la muestra) y multiplicada 0,96 ó factor de atenuación del microscopio que hay justo antes de la muestra.

- **Patrón escrito:** Durante el proceso anterior de “Elección de la energía de radiación” se escribieron todas las direcciones de memoria con ceros y unos. Finalmente, al radiar las memorias se decide escribir todas las direcciones con el dato “01010101”, con el fin de tener toda la memoria escrita alternativamente con unos y ceros, y no todas con ceros o con unos.

4.2 RESULTADOS DE RADIACIÓN. MAPAS DE SENSIBILIDAD.

Los datos de radiación o mapa de sensibilidad para la memoria ALLIANCE con una longitud de onda de 800nm, una energía de 550 pJ, una anchura mínima del haz en el foco de 1.5 μm y escritas con el patrón “01010101” se representan a continuación (Fig.4.1 y 4.2).

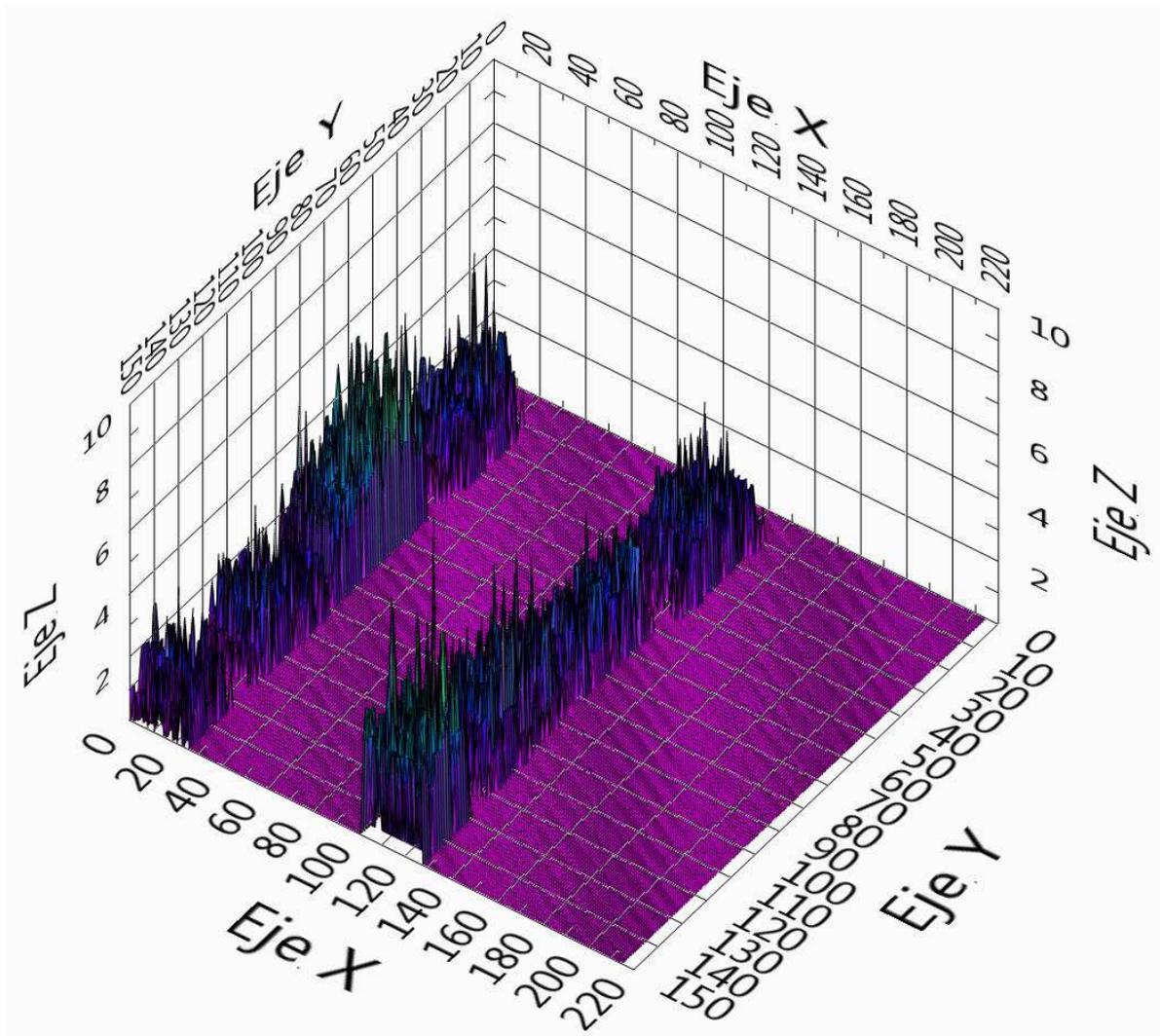


Fig. 4.1. Mapa de sensibilidad de la memoria Alliance.

Se puede observar cómo hay unas zonas más sensibles que otras y que hay toda una región en que no se tiene ningún resultado. Estas últimas son regiones que están deshabilitadas en este modelo de memoria. Este hecho pone de manifiesto que aunque la capacidad de estas memorias es pequeña, en realidad corresponden a una capacidad mucho mayor ya que determinadas zonas de la memoria están deshabilitadas. Para nuestro propósito es más interesante este caso, pues podemos controlar el dispositivo con menores recursos. En efecto, la memoria de ALLIANCE es de 8kx8bits, lo que significa que se puede controlar con un microprocesador de pequeña capacidad de memoria, aunque es como si se analizara una memoria de 32kx8bits (256k).

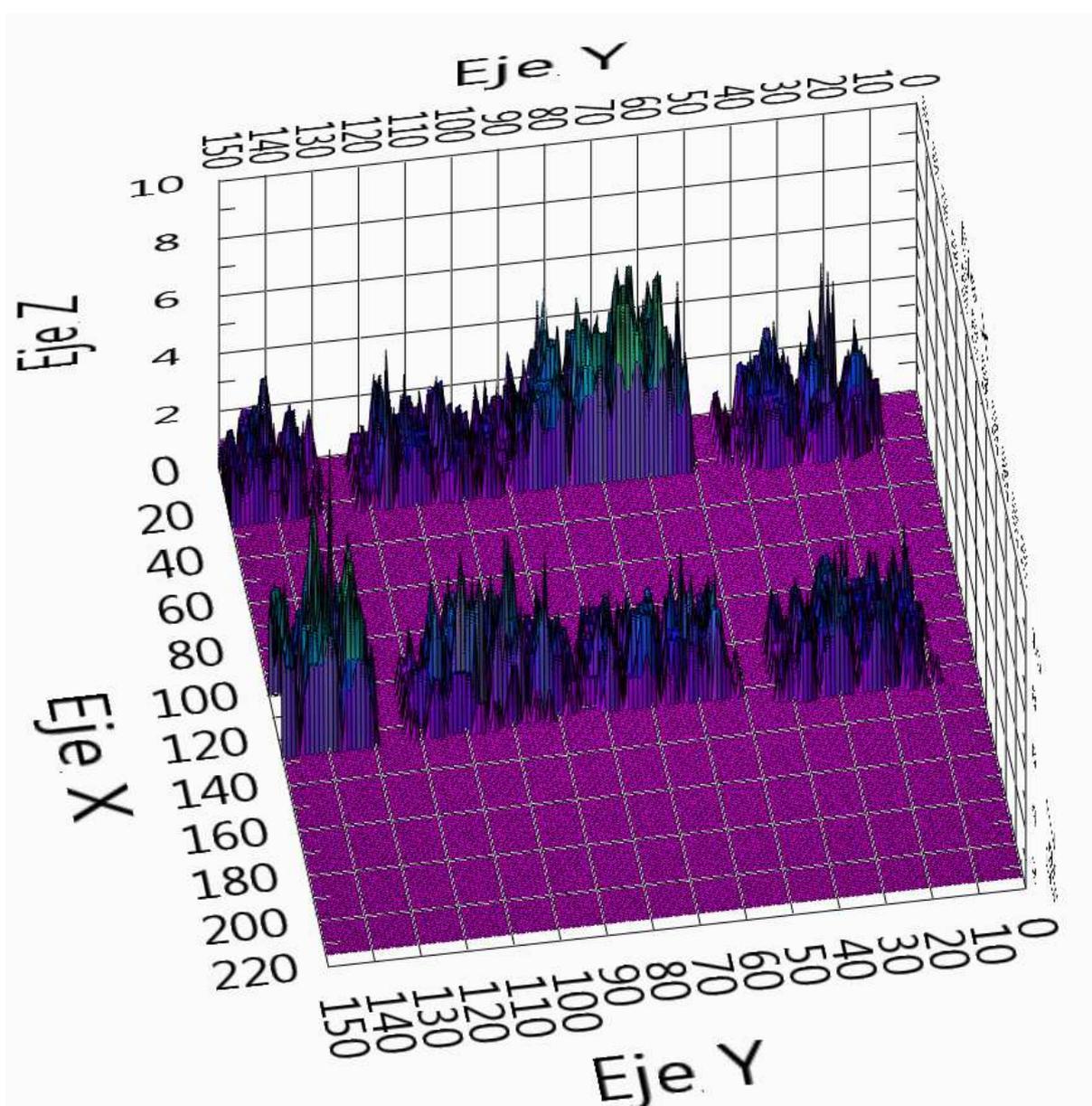


Fig. 4.2. Mapa de sensibilidad de la memoria Alliance.

En la Figura 4 se puede observar que hay como una especie de dos canales o hendiduras sin errores en la zona de errores. Estos canales se corresponden con las dos líneas horizontales que se observan en el layout del chip (Fig. 3.9) y que probablemente son líneas metálicas o zonas donde está implementada la lógica del circuito integrado o memoria.

Los datos de radiación o mapa de sensibilidad para la memoria CYPRESS con una longitud de onda de 800nm, una energía de 640 pJ, una anchura mínima del haz en el foco de 1.5 μm y escritas con el patrón "01010101" se representan a continuación (Fig. 4.3 y 4.4).

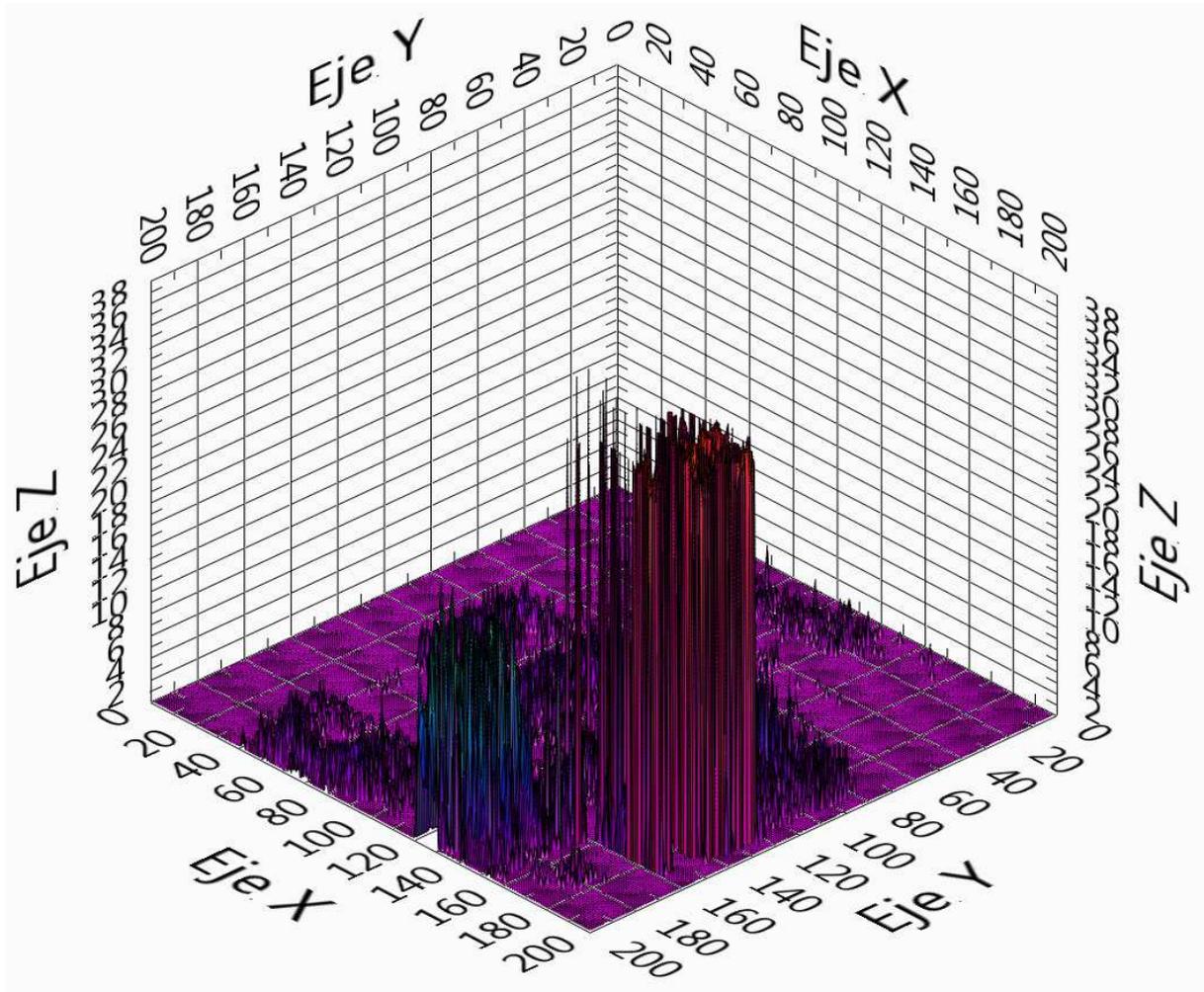


Fig. 4.3. Mapa de sensibilidad de la memoria Cypress.

En esta memoria no se observa de manera tan clara como para la memoria anterior zonas no conectadas, sino que se puede diferenciar entre zonas no sensibles, zonas de sensibilidad media y alguna zona muy sensible.

En la Fig. 4.4, y al igual que para la memoria anterior, se puede observar esa especie de dos canales o hendiduras sin errores que se corresponden con las dos líneas horizontales que se observan en el layout del chip (Fig. 3.10) y que probablemente son líneas metálicas o zonas donde está implementada la lógica del circuito integrado o memoria.

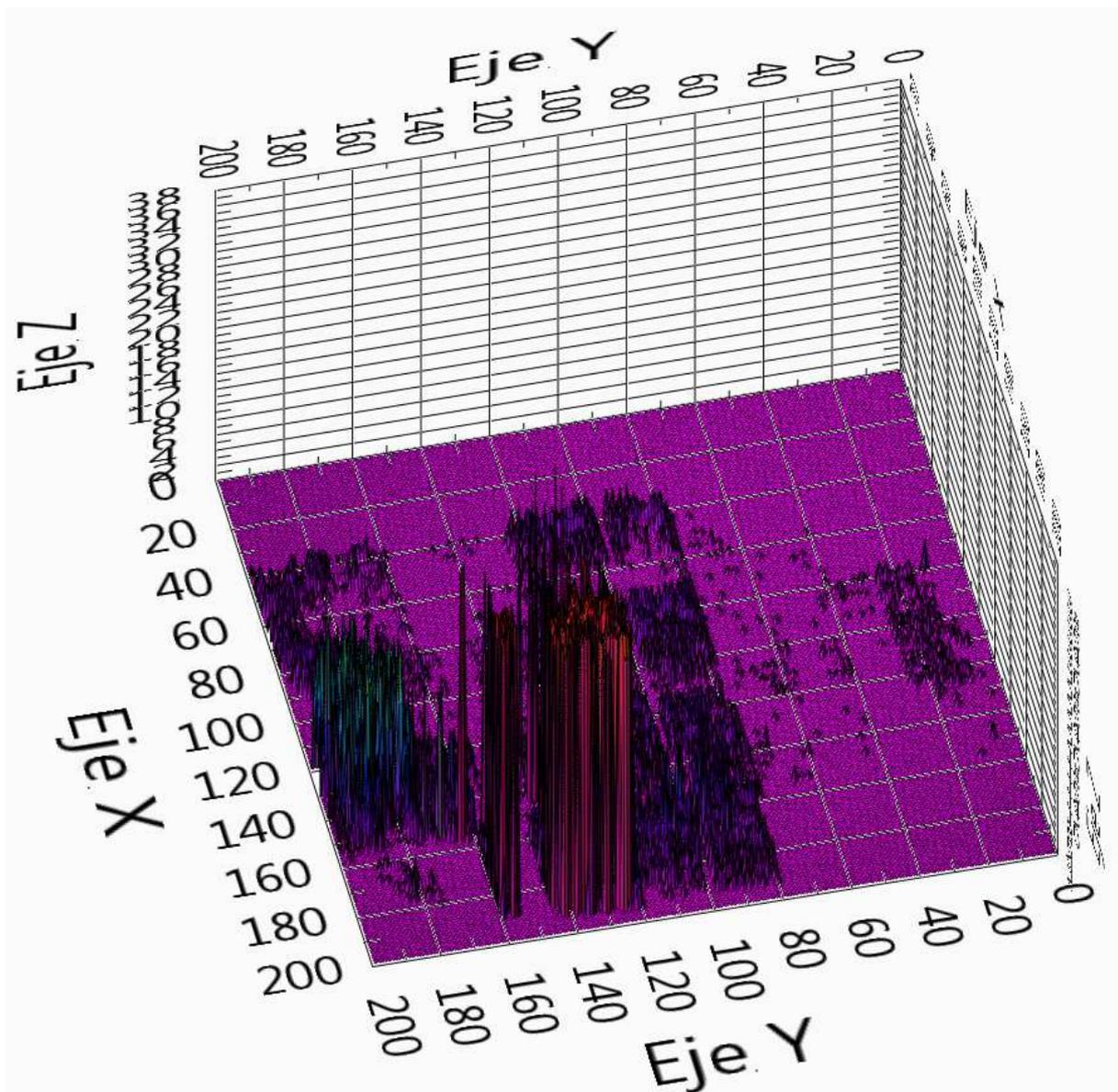


Fig. 4.4. Mapa de sensibilidad de la memoria Cypress.

Cabe destacar que durante el proceso para determinar la energía de radiación para la memoria CYPRESS se observó que para valores de energía superiores, a partir de 700pJ, se producía micro latch-up. Una vez determinado este valor se decidió radiar con energías más bajas y observar los errores en cada disparo tal y como se recogen en la Fig. 4.3 y 4.4. Es interesante resaltar que estos micro latch-up producían un mal funcionamiento, recuperable sólo reiniciando la alimentación, pero no dejaban inutilizable la memoria [NI11, ZI04].

Además, y viendo que se observó el fenómeno de micro latch-up en la memoria CYPRESS se decide hacer pruebas para intentar observar el mismo fenómeno en la memoria ALLIANCE, puesto que en el proceso de determinar la energía de radiación para dicha memoria no se observó nada. Para ello nos situamos en varios puntos correspondientes a zonas más sensibles y vamos subiendo la energía de radiación poco a poco observando que en este tipo de memoria no se da tal fenómeno, incluso realizando disparos sobre la memoria a energías muy altas, más o menos unos 3 μW .

4.3 CONCLUSIÓN.

De todo lo expuesto anteriormente, y a modo de conclusión, queda demostrado que con el láser se pueden inducir SEU's en memorias SRAM. El sistema láser de emulación de entorno espacial se convierte así en una herramienta de generación de fallos sobre dispositivos electrónicos de alto interés en tecnología electrónica espacial.

Dichos errores inducidos en la memoria SRAM podrán ser comparados con los mapas de radiación obtenidos tanto en un acelerador de partículas como mediante radiación natural y establecer así si el láser es un método de test alternativo, con todas las ventajas que ello supone, es decir, método más sencillo y económico, para la radiación de dispositivos electrónicos.

PUBLICACIONES RELACIONADAS

- C. Palomar, I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, & J. A. Agapito, "**Laser Test on a Power Operational Amplifier**", Proceedings of the 12th IEEE European European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS11) Sevilla (Spain). September 2011.
- F. J Franco, C. Palomar, S. F. Liu, I. Lopez-Calle, J. A. Maestro, & J. A. Agapito, "**Defining a Strategy to Perform Life-Test with Analog Devices**", Proceedings of the 12th IEEE European European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS11) Sevilla (Spain). September 2011.

BIBLIOGRAFÍA

- [AD06] P. C. Adell, A. F. Witulski, R. D. Schrimpf, R. Marec, V. Pouget, P. Calvel, and F. Bezerra, "Single event-induced instability in linear voltage regulators," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 3506–3511, December 2006.
- [AL05] M. Alderighi, A. Candelori, F. Casini, S. D'Angelo, M. Mancini, A. Paccagnella, S. Pastore, G.R. Sechi, "Heavy Ion Effects on Configuration Logic of Virtex FPGAs", 11th IEEE International On-Line Testing Symposium, July 2005, pp 49-53.
- [AR04] J. M. Armani, G. Simon, and P. Poirot, "Low-Energy Neutron Sensitivity of Recent Generation SRAMs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, pp. 2811-2816, December 2004.
- [BA98] C. Barillot, O. Serres, R. Marec and P. Calvel, "Effects of reliability screening tests on bipolar integrated circuits during total dose irradiation", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 45, n° 6, pp. 2638-2643, December 1998.
- [BE04] S. Bertazzoni, D. Di Giovenale, M. Salmeri, A. Mencattini, A. Salsano, M. Florean, "Monitoring methodology for TID damaging of SDRAM devices based on retention time analysis", *Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems*, 2004.
- [BO02] Y. Boulghassoul, L. W. Massengill, A. L. Sternberg, R. L. Pease, S. Buchner, J. W. Howard, D. McMorrow, M. W. Savage, and C. Poivey, "Circuit modeling of the LM124 operational amplifier for analog single-event transient analysis," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, pp. 3090–3096, December 2002.
- [BO04] Y. Boulghassoul, S. Buchner, D. McMorrow, V. Pouget, L. W. Massengill, P. Fouillat, W. T. Holman, C. Poivey, J. W. Howard, M. Savage, and M. C. Maher, "Investigation of millisecond-long analog single-event transients in the LM6144 op amp," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, pp. 3529–3536, December 2004.
- [BU94] S. Buchner, J. B. Langworthy, W. J. Stapor, A. B. Campbell, and S. Rivet, "Implications of the spatial dependence of the single-event-upset threshold in SRAMs measured with a pulsed laser," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 41, pp. 2195–2202, December 1994.
- [BU00a] S. P. Buchner, T. J. Meehan, A. B. Campbell, K. A. Clark, and D. McMorrow, "Characterization of single-event upsets in a flash analog-to-digital converter (AD9058)," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 47, pp. 2358–2364, December 2000.

- [BU00b] S. Buchner, A. B. Campbell, T. Meehan, K. A. Clark, D. McMorrow, C. Dyer, C. Sanderson, C. Comber, and S. Kuboyama, "Investigation of single-ion multiple-bit upsets in memories onboard a space experiment," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 47, pp. 705–711, June 2000.
- [BU04a] S. Buchner, J. J. Howard, C. Poivey, D. McMorrow, and R. Pease, "Pulsed-laser testing methodology for single event transients in linear devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, pp. 3716–3722, December 2004.
- [BU04b] S. Buchner, M. A. Carts, D. McMorrow, K. Hak, P. W. Marshall, and K. A. Label, "Characteristics of single-event upsets in a fabric switch (AD8151)," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, pp. 2840–2845, October 2004.
- [CH03] W. Chen, V. Pouget, H. J. Barnaby, J. D. Cressler, G. Niu, P. Fouillat, Y. Deval, and D. Lewis, "Investigation of single-event transients in voltage-controlled oscillators," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, pp. 2081–2087, December 2003.
- [CH05] A. M. Chugg, R. Jones, M. J. Moutrie, P. H. Duncan, R. H. Sorensen, S. Mattsson, S. Larsson, R. Fitzgerald, and T. O'Shea, "Laser simulation of single event effects in pulse width modulators," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, pp. 2487–2494, December 2005.
- [CH06] W. Chen, V. Pouget, G. K. Gentry, H. J. Barnaby, B. Vermeire, B. Bakkaloglu, K. Kiaei, K. E. Holbert, and P. Fouillat, "Radiation hardened by design rf circuits implemented in 0.13 mm CMOS technology," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 3449–3454, December 2006.
- [DE00] M. Dentan, "Radiation Effects on Electronics Components and Circuits", CERN training course, Ginebra (Suiza), 10-12 de Abril de 2000.
- [DU00] S. Duzellier, D. Falguere, L. Guibert, V. Pouget, P. Fouillat, and R. Ecoffet, "Application of laser testing in study of SEE mechanisms in 16-mbit DRAMs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 47, pp. 2392–2399, December 2000.
- [FR05] Franco, F. J., "El Amplificador Operacional bajo radiación de neutrons rápidos y consecuencias en otros dispositivos", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 2005.
- [GE03] J. George et al., "SEE Sensitivity Trends in Non-hardened High Density SRAMs with Sub-micron Feature Sizes," in *IEEE Radiation Effects Data Workshop Rec.*, pp. 83-88, July 2003.
- [GI00] K. Gill, "Radiation effects on electronics components and systems for the LHC", CERN training course, Ginebra (Suiza), 10-12 de Abril de 2000.

- [GO93] C. A. Gossett, B. W. Hughlock, M. Katoozi, G. S. LaRue and S. A. Wendler, "Single event phenomena in atmospheric neutron environments", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 40, pp. 1845–1856, 1993.
- [HA00] T.P. Haraszit, "CMOS Memory Circuits", Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [HTTP-UCM] <http://www.ucm.es/info/mpifemto/laseres.html>.
- [JO99] R. Jones, A. M. Chugg, C. M. S. Jones, P. H. Duncan, C. S. Dyer, and C. Sanderson, "Comparison between SRAM SEE cross-sections from ion beam testing with those obtained using a new picosecond pulsed laser facility," in Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 1999 (RADECS99), (Fontevraud (France)), pp. 148–153, September 1999.
- [JO00] R. Jones, A. M. Chugg, C. M. S. Jones, P. H. Duncan, C. S. Dyer, and C. Sanderson, "Comparison between SRAM SEE cross-sections from ion".
- [JO01] R. Jones and A. M. Chugg, "Utilisation of pulsed laser for SEE testing. study at two wavelengths," tech. rep., European Space Agency (ESA), May 2001.
- [JO06] A. H. Johnston, T. F. Miyahira, F. Irom, and J. S. Laird, "Single-event transients in voltage regulators," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, pp. 3455–3461, December 2006.
- [KU00] S. Kuboyama, T. Suzuki, T. Hirao and S. Matsuda, "Mechanism for Single-Event Burnout of Bipolar Transistor", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 47, n^o. 6, pp. 2634-2639, December 2000.
- [LA02] S. D. LaLumondiere, R. Koga, P. Yu, M. C. Maher, and S. C. Moss, "Laser-induced and heavy ion-induced single-event transient (SET) sensitivity measurements on 139-type comparators," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, pp. 3121– 3128, December 2002.
- [LA04] T.E.Langley, P. Murray, "SEE and TID test results of 1 Gb flash memories", IEEE Radiation Effects Data Workshop, July 2004, pp 58 – 61.
- [LA06] J. S. Laird, T. Hirao, S. Onoda, H. Itoh, and A. Johnston, "Comparison of above bandgap laser and MeV ion induced single event transients in high-speed Si photonic devices," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, pp. 3312–3320, December 2006.
- [LO10] I. López Calle, "Emulación de los efectos de la radiación ionizante en dispositivos analógicos mediante láser pulsado de femtosegundo sintonizable", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 2010.
- [MA79] T.C. May and M.H. Woods, "Alpha-Particle-Induced Soft Errors in Dynamic Memories", IEEE Trans. Elec. Dev. ED-26, 2, 1979.

- [MA02] D. G. Mavi and P. H. Eaton, "Soft error rate mitigation techniques for modern microcircuits," in Proc. 40th Annual Reliability Physics Symp., 2002, pp. 216–225.
- [MI01] T. F. Miyahira, A. H. Johnston, H. N. Becker, S. D. LaLumondiere, and S. C. Moss, "Catastrophic latchup in CMOS analog-to-digital converters," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 48, pp. 1833–1840, December 2001.
- [MO04] D. McMorrow, S. Buchner, W. T. Lotshaw, J. S. Melinger, M. Maher, and M. W. Savage, "Single-event effects induced by two-photon-absorption: Overview and current status," in 5th Radiation Effects on Components and Systems (RADECS) Workshop (E. Ragel, R. Tamayo, and C. Sanchez de la Fuente, eds.), (Madrid (Spain)), pp. 305–310, September, 22-24th 2004.
- [NI11] M. Nicolaidis, "Soft Errors in Modern Electronic Systems", Springer Science, vol. 41, 2011.
- [PO04] V. Pouget, D. Lewis, and P. Fouillat, "Time-resolved scanning of integrated circuits with a pulsed laser: application to transient fault injection in an ADC," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, pp. 1227–1231, August 2004.
- [SA01] M. V. Savage, T. Turflinger, J. W. Howard Jr. and S. Buchner, "A compendium of single event transient data", Proceedings of the 2001 IEEE Radiation Effects Data Workshop, pp. 134-141, Vancouver (Canada), July, 16th-20th, 2001.
- [SU88] G. P. Summers, E. A. Burke, M. A. Xapsos, C. J. Dale, P. W. Marshall and E. L. Petersen, "Displacement Damage in GaAs structures" IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 35, n^o 6, pp. 1121-1226, December 1988.
- [SU06] A. K. Sutton, R. Krithivasan, P. W. Marshall, M. A. Carts, C. Seidleck, R. Ladbury, J. D. Cressler, C. J. Marshall, S. Currie, R. A. Reed, G. Niu, B. Randall, K. Fritz, D. McMorrow, and B. Gilbert, "SEU error signature analysis of Gbit/s SiGe logic circuits using a pulsed laser microprobe," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, pp. 3277–3284, December 2006.
- [SZ81] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. U.S.A, 1981.
- [TO99] Y. Tosaka, H. Kanata, T. Itakura and S. Satoh, "Simulation Technologies for Cosmic Ray Neutron-Induced Soft Errors: Models and Simulation Systems", IEEE Transactions On Nuclear Science, vol. 46, no. 3, June 1999, pp. 774-779.
- [ZI81] J. F. Ziegler and W. A. Lanford, "The effect of sea level cosmic rays on electronic devices", J. Appl. Phys., vol. 52, pp. 4305–4318, 1981.

- [ZI04] J.F. Ziegler, H. Puchner, "SEE-History, Trends and Challenges", Cypress Semiconductor Corporation, Cap. III. 2004.