

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA III (ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA)



TESIS DOCTORAL

**EMULACIÓN POR LÁSER DE LA RADIACIÓN CÓSMICA EN MEMORIAS
Y COMPARACIÓN CON LA RADIACIÓN NATURAL E INDUCIDA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Carlos Palomar Trives

Director

Juan Andrés de Agapito

Madrid, 2014

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
DEPARTAMENTO FÍSICA APLICADA III
(ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA)



TESIS DOCTORAL

**EMULACIÓN POR LÁSER DE LA RADIACIÓN
CÓSMICA EN MEMORIAS Y COMPARACIÓN
CON LA RADIACIÓN NATURAL E INDUCIDA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS

AUTOR: Carlos Palomar Trives

DIRECTOR: Juan Andrés de Agapito Serrano

Madrid, 2014

AGRADECIMIENTOS

Durante el estudio de ingeniería de telecomunicación siempre me he sentido atraído por todo lo relacionado con la electrónica. Una vez finalizada, mi interés e insistencia por poder dedicarme a la investigación y desarrollo en este sector me llevaron a conseguir una beca FPI (Formación de Personal Investigador) en el grupo de Instrumentación y Sensores (dpto. de Física Aplicada III. Electricidad y Electrónica) de la Facultad de Físicas de la UCM. El proyecto al que estuve vinculado (AYA2009-13300-C03-03), cuyo investigador principal fue Juan Andrés de Agapito Serrano, forma parte de un proyecto coordinado entre el Grupo de la Fundación Antonio de Nebrija, el Grupo de Instrumentación y Sensores (UCM) y el Grupo de Gestión de Hardware Dinámicamente Reconfigurable, GHADIR (UCM).

En estos años en los que he pertenecido al grupo de investigación no tengo más que palabras de agradecimiento a todos sus integrantes. Quisiera agradecer especialmente a Juan Andrés de Agapito Serrano, director de esta tesis, y a Francisco Javier Franco Peláez su inestimable esfuerzo, dedicación y ayuda día tras día durante estos cuatro años. A Mari Fe García Duran, por su colaboración en los diseños de todos los circuitos. Y de manera especial a Isabel López Calle por todo el trabajo de radiación con iones en Lovaina, en la toma de datos y preparación del experimento, gracias a ella se ha podido llevar a cabo la radiación con partículas.

Quisiera hacer una mención especial a Jesús González Izquierdo, responsable técnico del Centro de Láseres Ultrarrápidos (CLUR), por todo lo que he aprendido junto a él y por la amabilidad con la que siempre me ha tratado. Sin su ayuda hubiera sido imposible realizar la radiación con láser de los dispositivos. Ha sido un placer trabajar con él.

También quisiera agradecer a Juan Antonio Maestro y Pedro Reviriego, profesores de la Universidad Antonio de Nebrija, por sus comentarios sobre la topología de las memorias. Así como a Juan Antonio Clemente, profesor de la facultad de informática de la UCM, por su colaboración en los experimentos realizados en la fuente de neutrones GENEPI-2.

Además de las personas citadas, quiero agradecer de forma general a todas aquéllas con las que he tenido relación en este tiempo en la UCM. En particular a Carmen García Payo y Antonio Paz, por cómo me acogieron desde el primer día, por los buenos ratos que hemos pasado y por sus consejos a lo largo de este tiempo. También a Mar Gálvez, secretaria del departamento, por lo bien que siempre me ha atendido.

Por último, quiero agradecer a mis padres, Domingo e Inmaculada, a mi hermano Sergio y a Paula el ánimo y apoyo que me han dado tanto en el momento en el que se presentó la oportunidad de iniciar esta aventura como en el transcurso de ella.

ÍNDICE

- SUMMARY	I
- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
- CAPÍTULO 1. EFECTOS DE LA RADIACIÓN EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.	
- INTRODUCCIÓN	9
- 1.1 RAYOS CÓSMICOS	10
- 1.2 EFECTOS EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	12
- 1.2.1 Efectos acumulativos	13
- 1.2.1.1 Dosis total ionizante	13
- 1.2.1.2 Daño por desplazamiento	13
- 1.2.2 Efectos puntuales (SEE)	14
- 1.2.2.1 Errores leves	14
- 1.2.2.2 Errores graves	16
- CAPÍTULO 2. DISPOSITIVOS EXAMINADOS POR IRRADIACIÓN LÁSER. MEMORIAS SRAM.	
- INTRODUCCIÓN	19
- 2.1 DISPOSITIVOS BÁSICOS	20
- 2.2 DISPOSITIVOS ANALÓGICOS	21
- 2.3 DISPOSITIVOS DIGITALES	21
- 2.4 ELECCIÓN DE LAS MEMORIAS SRAM	22
- CAPÍTULO 3. EMULACIÓN DE LA RADIACIÓN CÓSMICA MEDIANTE EL USO DE LÁSER.	
- INTRODUCCIÓN	25
- 3.1 SISTEMA LÁSER DISPONIBLE EN EL CLUR	26
3.1.1 Especificaciones del sistema láser	26

3.1.2 Descripción del sistema láser	27
- 3.1.2.1 Láser de bombeo del oscilador de femtosegundos	27
- 3.1.2.2 Oscilador láser de femtosegundos	29
- 3.1.2.3 Láser de bombeo del amplificador regenerativo	29
- 3.1.2.4 Amplificador regenerativo.....	29
- 3.1.2.5 Amplificador Óptico Paramétrico (OPA)	30
- 3.2 CARGA DEPOSITADA.....	30
- 3.3 ABSORCIÓN LINEAL Y NO LINEAL	31
- 3.4 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO	33
- 3.4.1 Circuito de control de las memorias	33
- 3.4.2 Desencapsulado de las memorias SRAM a radiar	34
- 3.4.3 Dimensionado de las memorias desencapsuladas.....	36
- 3.4.4 Montaje experimental y sistema de adquisición de datos	37
- 3.4.5 Proceso de irradiación láser del dispositivo.....	43
- 3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE IRRADIACIÓN.....	45
- 3.5.1 Elección de los parámetros de radiación.....	45
- 3.5.2 Mapa de sensibilidad. Energías umbral.....	46
- 3.5.2.1 Memoria CY.....	48
- 3.5.2.2 Memoria AS.....	53
- 3.5.3 Sección eficaz.....	56
- 3.5.3.1 Memoria CY.....	57
- 3.5.3.2 Memoria AS.....	59
- 3.5.4 Topología. Análisis de MCUs e interleaving	61
- 3.5.4.1 Memoria CY.....	63
- 3.5.4.2 Memoria AS.....	67
- 3.5.4.3 Topología.....	70
- 3.6 CONCLUSIÓN	71

- CAPÍTULO 4. EFECTO DE LA RADIACIÓN NATURAL.

- INTRODUCCIÓN	73
- 4.1 NUESTRA ATMÓSFERA	78
- 4.1.1 Radiación ambiental a 10.000 m de altitud.....	80
- 4.2 BANCO DE MEMORIAS DE 350 nm	82
- 4.2.1 Preparación del experimento.....	82
- 4.2.1.1 Bloque de alimentación	83
- 4.2.1.2 Módulo principal.....	83
- 4.2.1.3 Comunicación con el usuario	84
- 4.2.1.4 Flujo del programa	85
- 4.2.2 Resultados	87
- 4.2.3 Conclusión	89
- 4.3 BANCO DE MEMORIAS DE 90 nm	89
- 4.3.1 Preparación del experimento.....	89
- 4.3.2 Resultados.....	91
- 4.3.3 Conclusión	93
- 4.4 EXPERIMENTOS EN GENEPI-2	94
- 4.4.1 Preparación del experimento.....	94
- 4.4.2 Características de la fuente de neutrones GENEPI-2.....	96
- 4.4.3 Resultados.....	99
- 4.5 CONCLUSIÓN	100

- CAPÍTULO 5. EFECTO DE LA RADIACIÓN INDUCIDA POR PARTÍCULAS.

- INTRODUCCIÓN	103
- 5.1 LET Y CARGA DEPOSITADA.....	104
- 5.2 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO	106
- 5.2.1 El ciclotrón. Descripción	106
- 5.2.2 Circuitos de control y placa con las memorias a radiar.....	111

- 5.2.3 Procedimiento	115
- 5.3 RESULTADOS	116
- 5.3.1 Curva de Weibull. Influencia del ángulo de incidencia	117
- 5.3.2 Dependencia del patrón escrito	125
- 5.3.3 Identificación de errores	126
- 5.4 CONCLUSIÓN	128
- CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	
- INTRODUCCIÓN	131
- 6.1 APROXIMACIÓN DE LA SECCIÓN EFICAZ.....	132
6.1.1 Memoria CY	132
6.1.2 Memoria AS	135
- 6.2 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN CON LÁSER E IONES	137
- 6.2.1 Micro latch-up.....	137
- 6.2.2 Sensibilidad con respecto al patrón.....	138
- 6.3 CARGA DEPOSITADA.....	140
- 6.4 CONCLUSIÓN	141
- CONCLUSIONES	143
- APÉNDICE 1: TABLAS CORRESPONDIENTES AL ANÁLISIS DE DIRECCIONES DE LAS MEMORIAS CY Y AS	147
- APÉNDICE 2: ERRORES GENERADOS EN LAS MEMORIAS CY Y AS DURANTE LOS ENSAYOS CON IONES.....	157
- APÉNDICE 3: NÚMERO DE ERRORES OBTENIDO CON LÁSER PARA DIFERENTES ZONAS Y ENERGÍAS EN LAS MEMORIAS CY Y AS	161
- BIBLIOGRAFÍA	165
- PUBLICACIONES RELACIONADAS	181

SUMMARY

Presently, the compatibility of the electronic devices or systems onboard satellites and space missions with the effects produced by cosmic radiation must be performed by carrying out experiments using the real radiation. By mean of this experiment, the device is subjected to radiation, either neutrons or charged particles, and the effect produced in the technology is studied. However, this entails two drawbacks. The first is the high cost of these experiments, since an hour at a radiation center costs several thousand of euros. The other problem is that the results are valid for that particular technology and this particular source of radiation. If you want to characterize other device or another environment, it is necessary to repeat the experiment. Faced with these problems, it is proposed as an alternative method of evaluation the test of electronic devices by laser irradiation.

Specifically, we will focus on the study of these phenomena on memory devices, since they are often used in space applications, and most of the times they contain critical data. But not only the abundance of memories does attractive their study, but also their own technological features. Currently, the memories have a high degree of integration. This causes that the radiation effect is more apparent, and therefore, the need to study these effects and possible techniques to avoid it more important.

Trying to identify the behavior of SRAMs under radiation, we present three different tests:

i) Using a laser as an alternative way of simulating radiation. The aim is to emulate the errors in semiconductor memories by pulsed laser that acts as an ion. The memories were tested in a laser facility (CLUR - UCM) in order to obtain a sensitivity map, which allows identify potential error areas and how many errors occur simultaneously, and other characteristics as interleaving, type of error, etc. This requires very delicate steps: decapsulate the memory, design test boards for the circuit under test. The characterization system is made by mean of two shutters, in order to get the incidence of a single pulse on the memory. Then, it is necessary to 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. Once the most sensitive zones were identified, the laser energy is increased to study how the type of errors changed. First of all, the original Single Event Upsets (SEUs) became Multiple Cell Upsets (MCUs) with larger values. After, the type of error gave up from MCUs to become Recoverable Micro Latch-Up (RMLU), that disappears after several writing-reading cycles, and eventually Classical Micro Latch-Up (CMLU), only recoverable switching the power supply off. To the authors' knowledge, this is the first time that the transition among two kinds of soft errors in a specific points is detected and related to the pulsed laser energy.

ii) Studying the effect of natural radiation. Experiments on the memories are performed onboarding it on a plane and performing tests in a neutrons source facility (GENEPI-2 at LPSC in Grenoble). The results show an increase in the sensitivity as the level of integration increases in CMOS technology.

iii) Analyzing data from ions radiation tests. The memories were tested in a heavy ions facility (Cyclotron Resource Centre at Louvain-la-Neuve). The results obtained show a dependence of the sensitivity on the written pattern due to the design of the cell. The exhaustive analysis of the errors generated by laser allows identify correctly the events generated by ions radiation.

Finally, the correlation of the results is performed. Specifically, the values of the laser energy are associated with the LETs of the ions when the value for the cross section are the same or similar.

In conclusion, it is demonstrated that by mean of the laser radiation is possible to obtain the same effects that by particle radiation. Moreover, the laser presents the advantage of being simpler, more effective and cheaper, contributing to reduce the costs associated with the radiation tests in the ions facilities.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La electrónica está presente en todas las facetas de la vida cotidiana siendo el empleo de dispositivos electrónicos una constante, por lo que su correcto funcionamiento es una preocupación cada día mayor en el mundo tecnológico en el que se vive.

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 mencionado numerosas veces en la literatura [ZI81, GO93, TO99], y es una preocupación real para la industria del sector. La radiación natural existente en el Espacio puede dañar los componentes microelectrónicos presentes en satélites y misiones espaciales modificando su comportamiento e incluso pudiendo llegar a dañarlos de forma permanente.

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, BE05]. Pueden ser debidos a la alteración de la red cristalina o acumulación de carga estática por el choque de una partícula. En cualquiera de los casos, el dispositivo deja de funcionar de manera permanente y no se puede recuperar. Un ejemplo es el SEL, *Single Event Latch-Up*.
- Efectos temporales en los circuitos. Se producen por el impacto de una partícula que afecta repentinamente al estado de una celda de almacenamiento (SEU, *Single Event Upset*) [NI05, MA78, NO96, MA10] o que produce un transitorio en un elemento de interconexión (SET, *Single Event Transient*) [GA04]. 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*) [RA05].

El primer SEU documentado fue observado en el Espacio en 1975. Desde entonces una gran variedad de SEUs y defectos de otra especie han sido detectados en las misiones espaciales internacionales. Algunos ejemplos de los múltiples sucesos documentados durante la exploración espacial son:

1. La misión Cassini [LIN]: lanzada el 15 de octubre de 1997 para realizar observaciones en Júpiter y su luna Titán. En varios de los envíos de datos a la Tierra, se observaron MBUs.
2. Deep Space 1 [LIN]: lanzado el 24 de octubre de 1998. Este satélite se envió al Espacio para realizar una aproximación al asteroide 9969 Braille. En dicha misión se produjo un error, aunque no se ha podido determinar si fue un SEL (*Single Event Latch-Up*) o un SEGR (*Single Event Gate Rupture*) el que impidió el control de uno de los paneles solares del satélite.
3. Mars Odyssey [LIN]: lanzada el 7 de abril de 2001. Esta misión comenzó con un coste estimado de aproximadamente 300 millones de dólares. Fue enviada a Marte para buscar pruebas de la existencia de agua en el planeta rojo. Durante su misión se detectaron SELs.
4. Satélites Grace [LIN]: el proyecto GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) fue una misión conjunta entre la NASA y el German Aerospace Center, compuesto por varios satélites que realizan mediciones sobre la tierra empleadas para realizar modelos tanto ambientales como gravitacionales. Los satélites fueron lanzados el 17 de marzo de 2002. Durante sus mediciones, algunos satélites se reiniciaron por errores de tipo MCU.
5. Una tormenta solar en 2005 dejó inoperativos 15 satélites que se encontraban en órbita alrededor de la Tierra [LIN].
6. Satélite Ruso [DOC]: el 31 de mayo de 2005 fue puesto en órbita un satélite ruso que debía haber realizado 253 órbitas alrededor de la Tierra. A la 5ª órbita, un 2% de las totales, el satélite falló (cerca de Australia) y se precipitó sobre la Tierra. La investigación determinó que el problema fue debido a un latch-up en las memorias SRAM instaladas en el satélite.
7. Sonda Phobos-Grunt [SPE]: el 9 de noviembre de 2011 fue puesta en órbita esta sonda rusa que debería haber viajado a Marte. Tras ser lanzada se perdió el control sobre la sonda quedándose orbitando sobre la Tierra. Se intentó poner en funcionamiento en varias ocasiones sin éxito, hasta que el 15 de enero de 2012

realizó una entrada no controlada en la atmósfera cayendo en el océano Pacífico, al oeste de Chile. Se piensa que el problema fue debido a problemas con SEUs en las memorias de la sonda, consecuencia del uso de componentes de tipo militar pensando que eran “rad-hard” o tolerantes a la radiación.

El hecho de que estos fenómenos se produzcan en el Espacio añade una serie de dificultades particulares que complican el problema [LO10]:

- 1) Los fenómenos son muy variados y el entorno no siempre está caracterizado. Las fuentes de radiación son heterogéneas y muy dependientes de la localización y el tiempo, por lo que es complicado predecir el entorno exacto en el que tendrá que trabajar la electrónica. Esto hace que haya que considerar una casuística amplia y proteger los dispositivos en casos muy variados.
- 2) Los dispositivos durante una misión son inaccesibles. Si se produce algún problema, sólo se puede gestionar remotamente por lo que es preciso garantizar un nivel de protección suficiente para no incurrir en problemas graves que imposibiliten la misión.
- 3) Los costes de los proyectos de Espacio son muy altos, e implican una alta carga política. El fracaso de una misión suele acarrear muchos perjuicios, algunos de ellos intangibles, por lo que es preciso garantizar una correcta operativa durante todo el ciclo de vida del proyecto.

A la hora de proteger la microelectrónica de estos fenómenos, se puede optar por dos tendencias distintas. La primera es robustecer físicamente el material [VE94, WE87, BE93, LI92], o bien blindarlo, para hacerlo más resistente. Esta opción es muy costosa, ya que precisa de procesos de fabricación específicos. La segunda es utilizar técnicas de diseño particulares que hagan que la estructura propia de los circuitos “filtre” los errores. En este segundo grupo de técnicas se pueden encontrar:

- Triplicación modular de componentes (TMR) [CA01], para contar con múltiples copias operativas de los módulos. El problema de esta técnica es el alto coste que conlleva tanto en área como en consumo de potencia.
- Técnicas genéricas de redundancia, como el uso de bits de paridad en memorias o de códigos estándar como Hamming [HAM].
- Técnicas específicas diseñadas ad-hoc para componentes particulares [RE90].

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, HA05, AL03a], de ahí que el presente trabajo se centre en el estudio de las memorias SRAM. Esto se debe fundamentalmente a dos razones:

La primera de ellas 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 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 sus propias características tecnológicas. Actualmente, las memorias cuentan con un grado de integración alto. 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.

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 existen fenómenos más complejos que se pueden producir. Entre ellos, destacan la cada vez mayor presencia de MBUs. Esto es debido a que el aumento del nivel de integración en las memorias provoca que los impactos de las partículas, que tienen una naturaleza local a la zona de incidencia, afecten 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 celdas físicamente contiguas, 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, uno de los grandes desafíos en la industria de la electrónica espacial es la selección de dispositivos tolerantes a la radiación que han de soportar en su ambiente de operación.

Actualmente, la compatibilidad con la radiación de los dispositivos electrónicos tiene que realizarse mediante la realización de experimentos usando radiación real. 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.

Frente a estos problemas, se propone como un método alternativo de ensayo la evaluación de dispositivos electrónicos mediante radiación con láser. Este método tiene una doble vertiente: además de la posibilidad de certificar la compatibilidad de las memorias frente a la radiación ionizante, posibilita el análisis de su comportamiento en todos los puntos del *lay-out*. De esta forma, proporciona una información detallada acerca de su funcionamiento pudiendo contribuir a que el fabricante modifique el diseño del componente para mejorar su robustez.

Una vez presentadas las razones que motivan la presente investigación, se resume a continuación cómo se llevará a cabo. Para ello, se realiza una experimentación sobre las memorias desde tres puntos de vista:

1. Emulación de la radiación cósmica mediante el uso de láser. Se pretende emular las perturbaciones causadas por partículas energéticas procedentes de la radiación cósmica con un método alternativo como es el láser. Para ello se irradian las memorias con pulsos láser cuyos parámetros (energía, longitud de onda y duración) sean los adecuados para provocar los mismos efectos sobre los dispositivos que el impacto de partículas cargadas. El que las memorias presenten un considerable nivel de integración es un hecho novedoso que conlleva una serie de complicaciones añadidas. Este método es sencillo y eficaz, y mucho más barato, contribuyendo también a bajar los costes asociados a los ensayos de radiación. Los resultados obtenidos son de gran interés y aportan una gran información acerca de las memorias, tanto en lo que concierne a su sensibilidad como en lo relativo a su construcción o topología.

2. Estudio del efecto de la radiación natural. El siguiente paso, antes de estudiar la radiación inducida por iones, sería el estudio de los efectos de la radiación natural sobre los dispositivos en zonas donde ésta sea relativamente fuerte. Con esto se pretende ver de manera directa cómo es el umbral de tolerancia a fallos sobre los dispositivos por fuentes no inducidas, estableciendo una correlación entre este parámetro y la altitud y/o coordenadas geográficas. De esta manera, se puede ver cómo afecta el aumento del nivel de integración en este hecho. En otras palabras, las memorias cada vez van a ser más sensibles. El objetivo es la presentación de errores ocasionados por la radiación cósmica natural en distintas tecnologías CMOS, incidiendo en particular en la evolución de la tasa de error en estos componentes.

3. Estudio del efecto de la radiación inducida por partículas. Se obtendrán datos reales de experimentos de radiación con partículas cuyos resultados son muy interesantes y serán estudiados profundamente. De esta manera, se puede ver, dada una fuente de radiación el efecto que causa en memorias de distintos fabricantes y extrapolar conclusiones.

Posteriormente, y como punto de llegada de los objetivos anteriores, se compararán los resultados obtenidos pudiendo asociar la radiación correspondiente al láser de estas características con el ion que causa los mismos efectos ionizantes.

La investigación que condujo a la realización de esta memoria fue financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto concedido a la Universidad Complutense de Madrid, con referencia AYA2009-13300-C03-03 y título “Emulación por láser de la radiación cósmica en memorias y comparación con la radiación natural e inducida”, cuyo Investigador Principal es Juan Andrés de Agapito Serrano.

CAPÍTULO 1

EFFECTOS DE LA RADIACIÓN EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

INTRODUCCIÓN.

Hay varios tipos de daños directos que la radiación cósmica, ionizante o no ionizante, puede causar sobre los componentes electrónicos acortando el tiempo de vida útil de los equipos. Éstos pueden resumirse en daños por desplazamiento y por ionización, la cual puede ser directa o secundaria.

Si la energía de la partícula incidente es suficientemente alta, el impacto con un átomo de la red cristalina puede provocar el desplazamiento de éste en la red generando un defecto puntual temporal o permanente. Estos desplazamientos afectan directamente a la movilidad y al tiempo de vida de los minoritarios, lo que conlleva una modificación en las características eléctricas de los componentes.

Otro efecto de interés está provocado por la ionización local debida al impacto de una partícula. En la figura 1.1, la partícula interactúa con un núcleo de silicio produciendo una ionización (protones, partículas alfa, etc.) que genera pares electrón-hueco tanto en los aislantes como en las zonas activas de los dispositivos semiconductores.

Los fenómenos anteriores son de naturaleza probabilística y dependen, entre otros factores, de las dimensiones del núcleo, de la densidad atómica del dispositivo y del flujo de partículas [AM12]. La profundidad de penetración y la región donde puedan ocurrir los problemas dependerá de la energía de la partícula. La ionización es generalmente el mecanismo dominante en la degradación del rendimiento de placas electrónicas.

Las consecuencias de los transitorios de corriente que se pueden detectar en materiales semiconductores debidas a partículas individuales han sido extensamente estudiadas desde los años 70, recibiendo el nombre de SEE (*Single Event Effects*) para cualquiera de ellas.

Los efectos son muy variados, afectando a los datos almacenados o incluso llegando a provocar la destrucción de la electrónica que emplean dichos dispositivos.

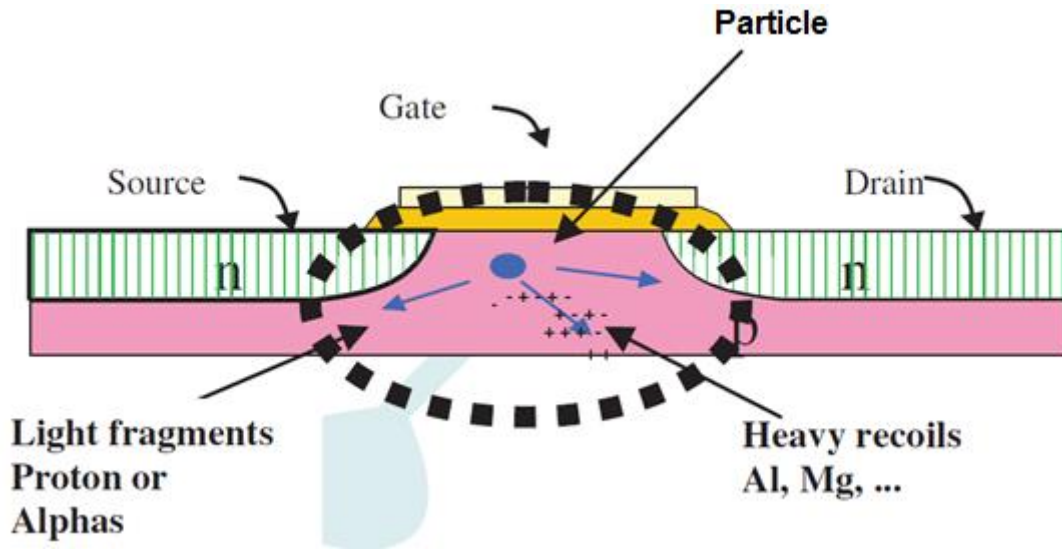


Fig. 1.1. Interacción de una partícula en el interior de un transistor [AM12].

La mayor parte de la prevención y disminución de estos eventos recae sobre la ingeniería de los materiales y dispositivos, que deben construirse de forma que puedan soportar el daño que las distintas partículas puedan causar. El grado de protección dependerá del nivel de radiación en el ambiente de operación.

1.1 RAYOS CÓSMICOS.

Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el Espacio y bombardean constantemente la atmósfera desde todas direcciones. La mayoría de estas partículas son protones o núcleos de átomos (92 %), partículas alfa (6 %) e iones pesados (2 %). Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza. Los rayos cósmicos ultraenergéticos viajan a una velocidad cercana a la de la luz y tienen cientos de millones de veces más energía que las partículas producidas en el acelerador más potente construido por el ser humano [VIS].

Los rayos cósmicos con energías por debajo de 10^{15} - 10^{18} eV que están siendo detectados de forma continuada en la Tierra proceden de fuentes en nuestra galaxia (erupciones solares, supernovas...). Mientras que los rayos cósmicos de mayor energía que el límite superior al anteriormente expuesto tendrían un origen extragaláctico [NMDa]. Esta radiación afecta a los dispositivos embarcados. Sin embargo, también puede afectar a dispositivos en la superficie terrestre.

En el momento en que un rayo cósmico choca con un átomo o molécula del aire se producen gran cantidad de partículas secundarias. Si se trata de un ion pesado, se romperá formando núcleos más ligeros, protones o neutrones. Todas esas partículas continúan su movimiento descendente y pueden, de nuevo, reaccionar con otras moléculas de aire si aún tienen energía suficiente. Esto provoca una cascada de rayos cósmicos que van perdiendo energía a medida que van penetrando en la atmósfera. Se estima que el rayo cósmico primario debe tener una energía mínima de unos 450 MeV para producir un número significativo de secundarios capaces de alcanzar el nivel del mar. Si la energía del rayo cósmico primario no supera el valor anterior, sería necesario subir a lo alto de las montañas o utilizar globos, aviones o naves espaciales para detectar secundarios.

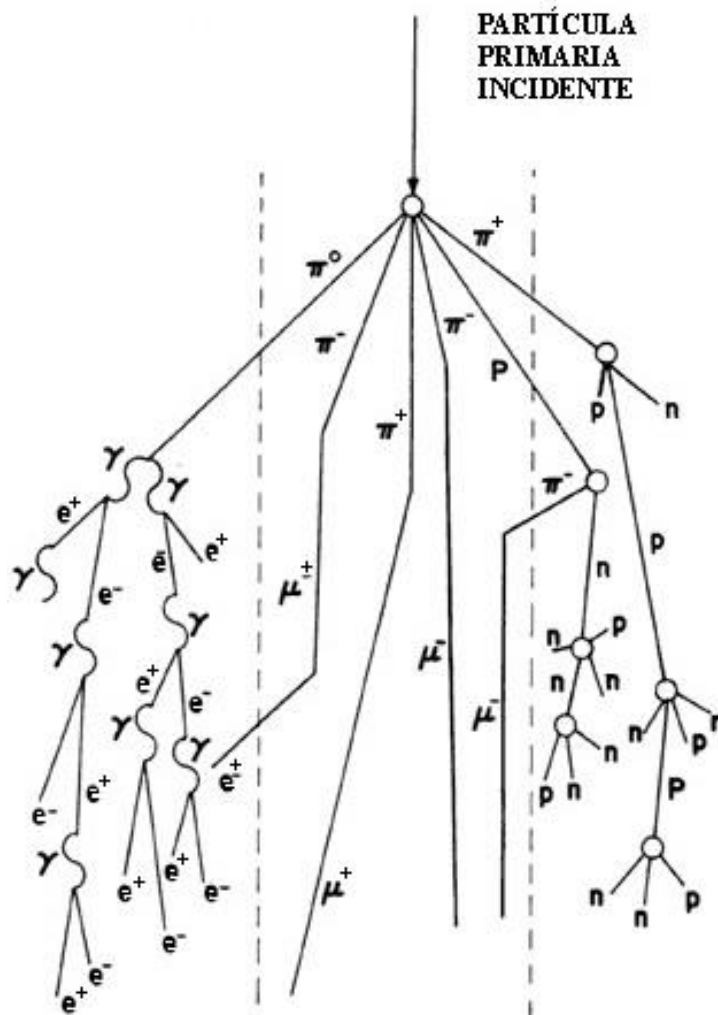


Fig. 1.2. Interacción de las radiaciones cósmicas con las partículas atmosféricas [BIB].

La figura 1.2 muestra una cascada típica de rayos cósmicos. Las reacciones individuales que suceden desde el primer impacto hasta la llegada de los productos de la desintegración al suelo son las siguientes:

Entre las partículas producidas por el impacto del rayo cósmico primario hay piones (π^\pm) cargados y neutros (π^0), esto es, partículas con masas comprendidas entre las del electrón y el protón. Estas partículas son inestables desintegrándose en neutrones (n), protones (p), fotones gamma (γ), que a su vez pueden generar neutrones y pares electrón-positrón (e^\pm), y en muones (μ^\pm), que a su vez pueden producir electrones y positrones. Algunos muones pueden producir reacciones nucleares generando protones y neutrones. Otro tipo de reacciones generan nucleones rápidos, neutrones y protones, con un amplio espectro de energía. Si son suficientemente energéticas, pueden entonces interactuar con otros nucleones del aire [NMDb].

Por tanto, los rayos cósmicos interactúan con los núcleos de aire de la atmósfera generando partículas, entre las que se encuentran protones, neutrones, etc. Las partículas atmosféricas son el resultado de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. El máximo de intensidad en la radiación se alcanza aproximadamente a unos 20.000 m de altura, y va disminuyendo a medida que nos acercamos a la superficie, hasta que a nivel del mar el flujo de neutrones es el único significativo.

1.2 EFECTOS EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS.

Los efectos que provoca la radiación al incidir sobre los dispositivos electrónicos se pueden dividir en dos grandes grupos [LO10]:

- Efectos acumulativos:
 - Dosis Total Ionizante o TID ("Total Ionization Dose"): Se debe a la acumulación de cargas en los materiales que componen el dispositivo.
 - Daños por Desplazamiento o DD ("Displacement Damage"): Se deben al desplazamiento de los átomos de la red cristalina.

- Efectos puntuales o SEE ("Single Event Effects"):
 - Errores Leves o "Soft Error": Engloban los efectos debidos a una ionización transitoria que producen un mal funcionamiento del dispositivo, pero sin llegar a destruirlo.
 - Errores Graves o "Hard Error": Engloban los efectos debidos a una ionización transitoria que provocan consecuencias consideradas como graves en el funcionamiento del dispositivo, pudiendo incluso llegar a destruirlo.

A continuación se describen con más detalle estos efectos:

1.2.1 Efectos acumulativos.

Los efectos acumulativos se identifican con una degradación progresiva de los parámetros eléctricos del componente con el tiempo, hasta la pérdida de la funcionalidad. Son debidos a la acumulación de cargas por ionización en el conjunto de aislantes del componente durante el curso de la misión (Dosis Total Ionizante) y al incremento de los defectos en las mallas cristalinas producidas por los desplazamientos atómicos (Daño por Desplazamiento), que a su vez agrava aún más el nivel de degradación por ionización. Estos efectos acumulativos están relacionados directamente con la duración de la misión [FR05, LO10].

1.2.1.1 Dosis total ionizante.

La TID o Dosis Total Ionizante se debe a las partículas ionizantes y a los fotones que interaccionan con los materiales generando pares electrón-hueco. Parte de estos pares se recombinan, pero otra parte permanece atrapada en forma de carga eléctrica en las capas del material. Esta acumulación de carga va modificando de forma irreversible los parámetros eléctricos del material (tensión umbral, movilidad superficial...) causando un daño progresivo en la funcionalidad del componente. Este efecto hay que valorarlo junto con los posibles daños por desplazamiento, envejecimiento y temperatura para intentar garantizar que el equipo funcione correctamente durante el tiempo estimado [SZ81, GI00, AN00a, LO10].

1.2.1.2 Daño por desplazamiento.

El Daño por Desplazamiento o DD es otro efecto causado por la radiación en los materiales. Si una partícula lo suficientemente energética colisiona con un átomo, éste podría retroceder de su posición en la estructura del material creando un defecto o dislocación. Este átomo, si la energía de la partícula incidente es muy elevada, podría a su vez desplazar a otros átomos creando grandes grupos de defectos en la red.

La primera consecuencia del DD es la creación de dislocaciones en la estructura del material que se traduce en centros de recombinación. Estos últimos son más propensos a la generación de pares electrón-hueco y a la recombinación [SU87, SU88, MA89, SU93]. Al igual que en la TID, este efecto conlleva una modificación de los parámetros eléctricos del material pudiendo provocar un daño en la funcionalidad del componente. Debe estudiarse con los debidos por otros fenómenos (temperatura, envejecimiento...) para garantizar el correcto funcionamiento durante el tiempo estimado [FR05, LO10].

1.2.2 Efectos puntuales (SEE).

Los efectos puntuales, también conocidos como SEP (*Single Event Phenomena*), son provocados por el paso de una partícula energética por la región sensible del dispositivo. La consecuencia es la generación de una corriente transitoria que origina una perturbación en su funcionamiento [LO10].

Hay una gran cantidad de efectos de este tipo que y se clasifican en dos grupos: errores leves o “soft” y errores graves o “hard”. Los primeros provocan una alteración en el funcionamiento normal del componente sin llegar a causar un daño permanente. Los segundos provocan consecuencias mucho más graves en su funcionamiento, pudiendo causar daños irreparables.

1.2.2.1 Errores leves.

A continuación se muestran los errores leves más comunes, cuyos efectos y nomenclatura dependen de que el dispositivo electrónico afectado sea analógico o digital.

- Single Event Upset (SEU): Se produce un fenómeno de este tipo cuando una partícula atraviesa la región sensible de una celda de memoria de un circuito digital (p. e., una SRAM) produciendo un cambio en el valor que almacena [FR05]. Es el suceso aislado mejor estudiado puesto que fue vaticinado en 1962 y observado experimentalmente en 1975 [MA97, KO97]. A menor tensión de alimentación hay más probabilidad de obtener SEUs pues la carga crítica necesaria para conmutar una celda se reduce [ZI04].
- Multiple Bit Upsets (MBU): Este error se produce cuando el impacto de una partícula produce de forma simultánea SEUs en celdas pertenecientes a la misma palabra de datos [NI11]. No corregible mediante ECC (Error Correction Codes).
- Multiple Cell Upset (MCU): Se produce cuando una única partícula provoca el cambio de valor en varias celdas de la memoria al mismo tiempo y pertenecientes a palabras de datos distintas [NI11]. Como se resume en la figura 1.3 hay cinco posibles mecanismos de generación de MCUs: (A) Un golpe consecutivo por un ion; (B) Múltiples golpes por múltiples iones secundarios; (C) Flujo de carga hacia nodos adyacentes; (D) Acción bipolar parásita entre fuente y drenador; (E) Falso MCU causado por un fallo en los circuitos periféricos (ej. Decodificador/codificador) [NA08].

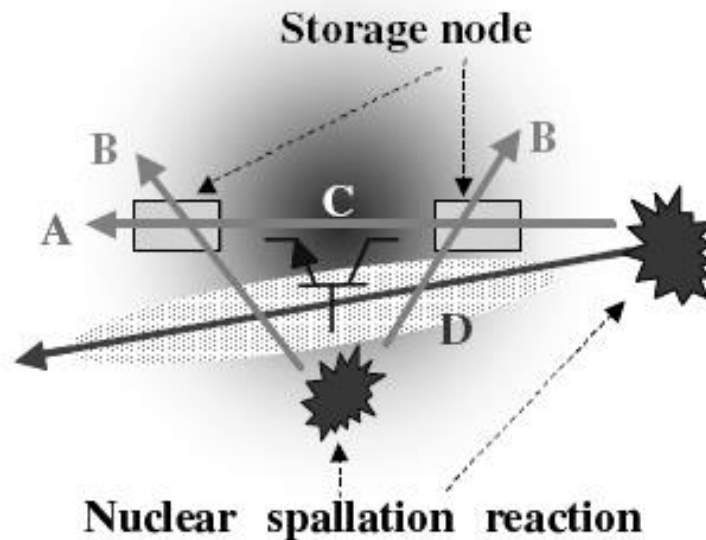


Fig. 1.3. Mecanismos de generación de MCUs [NA08].

- Single Event Transient (SET): Es la respuesta transitoria de un circuito a la acción de un SEE. Se suele detectar una alteración en los niveles de tensión durante un corto periodo de tiempo [LO10, SA01]. Existen dos tipos de SET:
 - ASET: Para circuitos analógicos
 - DSET: Para circuitos digitales.
- Single Event Functional Interrupt (SEFI): Mal funcionamiento del dispositivo provocado por el paso de una partícula energética a través de zonas donde está implementada la lógica de control, circuitos de reloj, códigos de detección y corrección de errores... Los efectos pueden ser muy variados, por ejemplo obtener rangos de direcciones con datos incorrectos o "stuck bits" en los datos leídos de la memoria. No requiere de un reinicio de la alimentación para ser corregido [NI11, GR03, AR04].
- Static Soft Error (SSE): Error que no puede ser corregido repitiendo el ciclo de lectura pero sí repitiendo la escritura y sin desconectar la alimentación del dispositivo [NI11].
- Transient Soft Error (TSE): Error que puede ser corregido repitiendo el ciclo de lectura sin desconectar el dispositivo de la alimentación [NI11].

Los errores leves pueden ser corregidos por técnicas de redundancia en circuitos digitales [AN00b, MO03a], o en general, realizando una o más funciones normales del dispositivo [NI11].

1.2.2.2 Errores graves.

Los errores graves son fallos que provocan consecuencias consideradas graves en el funcionamiento del dispositivo, generando incluso un daño irreparable. Algunos de los errores graves más típicos son los siguientes:

- Single Event Latch-Up (SEL): Aparece en dispositivos CMOS cuando una partícula cargada produce un pico de corriente capaz de activar uno de los dos transistores combinándose en un circuito con realimentación positiva, es decir, un tiristor parásito cuyo consumo de corriente es tan elevado que provoca la ruptura del dispositivo [JO00] (Fig. 1.4). El SEL es peor para tensiones de alimentación altas ya que se incrementa la corriente a través del tiristor [ZI04]. 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]. También durante el diseño del circuito electrónico incorporando anillos de guarda o anillos de contactos a sustrato. Estas estructuras evitan que la corriente active el circuito parásito que conforma el latch-up desviándola hacia tierra o alimentación [DI03].

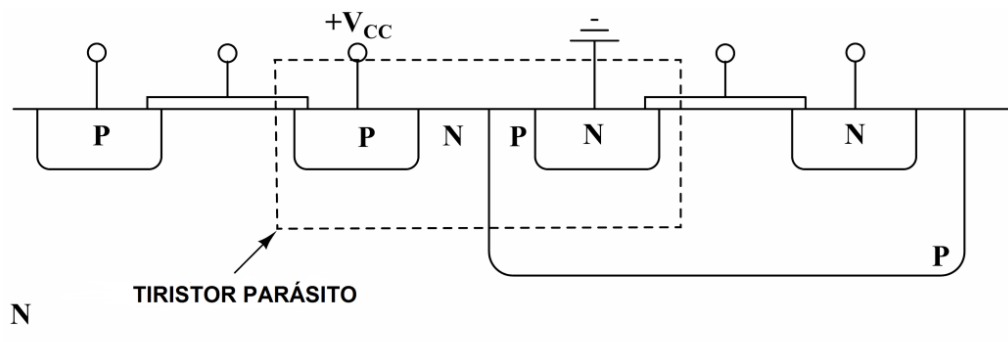


Fig. 1.4. Fenómeno de latch-up. Imagen adaptada de [FR05].

- Micro Latch-Up (MLU): Es un SEL donde la corriente del dispositivo se mantiene por debajo del máximo especificado para que el dispositivo llegue a dañarse. A diferencia del SEL, un MLU no produce un daño irreparable sino que causa un mal funcionamiento del dispositivo únicamente recuperable reiniciando la alimentación del mismo [ZI04].

- Single Event Gate Rupture (SEGR): Este fenómeno se produce cuando una partícula cargada atraviesa la puerta de un transistor MOS creando un plasma conductor que cortocircuita el terminal de puerta y el canal formado entre la fuente y el drenador [LO10, DA93, BA98, WH94].
- Single Event Burnout (SEB): Ocurre en transistores de potencia (BJT o MOS) en situación de corte cuando el golpeo de una partícula energética induce una alta corriente localizada entre los extremos que resulta en un fallo catastrófico [NI11].

CAPÍTULO 2

DISPOSITIVOS EXAMINADOS POR IRRADIACIÓN LÁSER. MEMORIAS SRAM

INTRODUCCIÓN.

Una vez analizados los distintos efectos que la radiación puede provocar sobre los dispositivos electrónicos, los efectos de la radiación mediante láser se corresponderían con la radiación ionizante transitoria. Por tanto, de forma general todos los dispositivos sometidos a este tipo de radiación podrían ser utilizados en este proyecto de emulación mediante irradiación láser de la radiación cósmica.

En particular, los dispositivos fabricados en tecnología MOS son muy afectados por la radiación ionizante, produciendo en ellos daños que afectarán dramáticamente a su funcionamiento y en especial sucesos aislados. Sin embargo, no es éste el caso de los dispositivos en tecnología bipolar. Éstos son más robustos y tolerantes a la radiación ionizante acumulada, aunque los efectos de creación fugaz de carga asociados a la radiación ionizante también pueden provocar transitorios no deseados cuyos efectos pueden ser catastróficos. Aunque no siempre es posible conocer la topología de los circuitos, ya que no es fácil que la proporcione el fabricante, sí es importante conocer la posibilidad de que se presenten estos transitorios, incluso sin una explicación precisa del suceso, para intentar minimizar sus consecuencias mediante un diseño apropiado de la instrumentación [FR05, LO10].

Por los motivos ya avanzados en la introducción, el presente trabajo se centra en el estudio de las memorias SRAM, suponiendo el inicio del grupo en la investigación de dispositivos digitales. Para llevar a cabo el análisis de las memorias ha resultado fundamental la dilatada experiencia que nuestro grupo posee en temas de radiación. El punto de partida se remonta al año 1999, cuando se comenzaron a realizar ensayos de radiación en el Instituto Tecnológico y Nuclear (ITN) situado en Lisboa (Portugal). En los experimentos realizados se examinaron diferentes dispositivos electrónicos frente a

neutrones y radiación gamma. Entre los dispositivos analizados se pueden encontrar amplificadores operacionales [FR01, FR02, FR04a], switches analógicos [AG02, FR04b, ZO04], conversores D/A [AG02, AG06], reguladores [ZO05a] y circuitos supervisores [ZO05b].

Posteriormente, a partir del año 2007, los estudios se centran en la emulación de la radiación cósmica mediante láser. A lo largo de estos años, se ha trabajado tanto en la definición del proceso e implementación del montaje experimental [FR07, VE07, LO09a, FE09, LO11e, LO11d, LO11c, LO10, LO12] como en el análisis de dispositivos analógicos [LO09b, LO10, LO11a, LO11b, PA11, FR10, FR11, PA13, PA14]. Estos trabajos forman parte del gran número existente en los que dispositivos electrónicos han sido sometidos a ensayos de radiación mediante láser. El objetivo ha sido estudiar los efectos producidos y así conocer su comportamiento frente a la radiación. A continuación se presentan, de una forma breve, los distintos componentes que han sido examinados así como los efectos que se han generado.

2.1 DISPOSITIVOS BÁSICOS.

Aunque el volumen de trabajos relativos a este tipo de dispositivos no es tan elevado en comparación con otros, se pueden encontrar en la literatura trabajos bastante interesantes de irradiaciones con láser que han permitido conocer la sensibilidad de algunos de estos dispositivos sencillos, como son [LO10]:

1. *Fotodetectores*: Se han llevado a cabo estudios para determinar la morfología y estructura de los ASETs, cuyos resultados experimentales no se restringen al silicio pudiéndose realizar experimentos similares en otros semiconductores como GaAs, InP y InGaAs [LA06, LA05a, LA03, LA05b].
2. *Transistores discretos*: Los estudios se han centrado en la investigación de corrientes transitorias en transistores construidos en tecnología MESFET de GaAs [BU96a, MO90, MO93, SC95], resultando más difícil encontrarlos para otros transistores más convencionales [MI06a]. Así, se han encontrado resultados de irradiaciones en transistores aislados en circuitos integrados complejos [DO05, FE06, MU00].

2.2 DISPOSITIVOS ANALÓGICOS.

Hay disponible una gran cantidad de estudios que describen investigaciones en este tipo de dispositivos. Generalmente, el suceso aislado de mayor interés es el ASET aunque también se ha investigado la incidencia de latch-ups [LO10]:

1. *Amplificadores operacionales*: Prácticamente todos los trabajos se han enfocado en el estudio de los ASETs generados al irradiar puntos específicos del componente, centrándose en su mayor parte en el LM124, amplificador operacional de referencia en tecnología espacial [LO09b, FR10, LO10, LO11b, PA11, MO04, BO04, BO02, BU04a, ST02, PO01, PE02, MO05].
2. *Comparadores*: Al igual que en los anteriores, se ha estudiado la generación, duración y amplitud de ASETs, tanto en versiones comerciales como en versiones resistentes a la radiación [FR11, LO11a, LO11b, LA02, BU04a, PO02, BU02].
3. *Reguladores de tensión*: Se ha investigado la incidencia de ASETs tanto en circuitos integrados (LM137) [JO06] como en circuitos equivalentes a partir de componentes discretos [PA14, PA13, AD06].
4. *Osciladores controlados por tensión ("VCO")*: En este tipo de osciladores se ha investigado la distorsión causada por el impacto de pulsos de láser [CH03, CH06].
5. *Moduladores de anchura de pulso ("PWM")*: Se ha investigado tanto la incidencia de SETs como la posibilidad de latch-up [CH05].

2.3 DISPOSITIVOS DIGITALES.

Existe un gran número de dispositivos digitales en los cuales se puede estudiar una gran variedad de sucesos aislados [LO10]:

1. *Flip-flops*: Un trabajo relativamente antiguo [BU90] ya demostró que se pueden inducir SEUs y latch-ups por medio de láser en flip-flops bipolares. En otro trabajo más reciente se estudia la sensibilidad de estos dispositivos y técnicas de mitigación en tecnología de 90 nm [NE13].
2. *Conversores A/D*: Con el objetivo de investigar la incidencia de SEUs [PO04, BU05, BU00a] y de latch-ups [MI01] se han realizado estudios sobre estos dispositivos en tecnología CMOS.

3. *Switches*: Es habitual estudiar los puntos sensibles a SEUs y SEFIs en un componente de este tipo (AD8151) [BU04b].
4. *Registros de desplazamiento*: Es posible encontrar trabajos en los que se explican los métodos de test en estos componentes para capturar el punto donde se ha producido el suceso aislado [SU06].
5. *CPLDs, FPGAs, ASICs y microprocesadores*: Es posible utilizar láseres para investigar sucesos aislados en dispositivos programables [AL03b, JO01].
6. *DRAMs*: Se han investigado SEUs y MBUs [DU00, PO00a].
7. *SRAMs*: Es el circuito digital más estudiado mediante láser [DO06, DO05, MI04, DA02a, DA02b, DA03, MO03b, MI06b, BU90, JO01, PO00b, OL05, BU00b, JO99, BU96b, BU94] y en diversas tecnologías, incluyendo bipolares [BU94] o tolerantes a la radiación [PO00a, OL05]. Se ha investigado sobre todo la ocurrencia de SEUs, aunque también se han buscado MCUs y MBUs [OL05, BU00b]. Son los dispositivos en los que se centra este trabajo.

2.4 ELECCIÓN DE LAS MEMORIAS SRAM.

Se han seleccionado dos memorias SRAM de dos fabricantes distintos, Cypress y Alliance, cuyas características generales se resumen en la tabla 2.1 y a las que de aquí en adelante nos referiremos como CY y AS respectivamente. Ambas están fabricadas en tecnología CMOS de 350 nm. La primera de ellas tiene una capacidad de 32768 palabras x 8 bits, mientras que la segunda es de baja prestación y tiene una capacidad menor, 65536 bits organizada en 8192 palabras de 8 bits. Cabe reseñar la diferencia en la construcción de la celda de memoria. La memoria CY presenta la construcción típica con 6 transistores mientras que en la AS se sustituyen dos transistores por dos resistencias, tal y como se muestra en la figura 2.1. El comportamiento de ambas es el mismo con la diferencia que la memoria AS presenta un mayor consumo en reposo, como se verá en el siguiente capítulo.

Fabricante	Código	Encapsulado	Capacidad	Tipo
Cypress	CY62256-70PC	DIP	32 Kbyte	6T
Alliance	AS6C6264-55PCN	DIP	8 Kbyte	4T + 2R

Tabla 2.1. Características de las memorias estudiadas. Información proporcionada por el fabricante.

El hecho de seleccionar estas memorias responde en principio a dos razones. La primera de ellas y fundamental es que, y aunque la tecnología no es la más moderna, es de destacar que estas memorias aún se utilizan en aplicaciones espaciales por haber sido validadas, encontrándose todavía en producción. La segunda es debido a su encapsulado, ya que, al ser de tipo DIP permite la colocación de la memoria en un socket facilitando así el proceso de desencapsulado, el cual se describe en el capítulo siguiente.

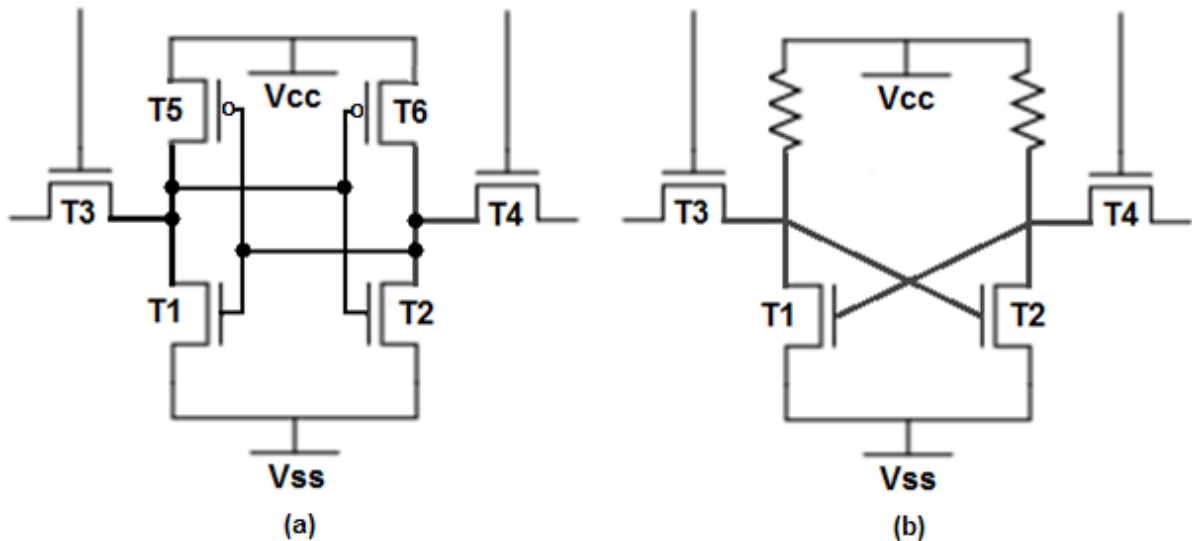


Fig. 2.1. Celdas de memoria implementadas con 6T (a) y 4T-2R (b) correspondientes a la memoria CY y AS respectivamente.

Por otra parte, se debe hacer hincapié en que se está empezando con el análisis de memorias, por lo que interesa que no sea una tecnología de la más moderna para poder trabajar con ellas y partir de una base a partir de la cual poder avanzar hacia el análisis de memorias más avanzadas.

CAPÍTULO 3

EMULACIÓN DE LA RADIACIÓN CÓSMICA MEDIANTE EL USO DE LÁSER

INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describe con detalle todo el montaje y proceso experimental, así como el posterior análisis de los resultados obtenidos, para emular los efectos de la radiación cósmica ionizante mediante la generación de carga que produce el impacto del láser, justificando los parámetros del mismo que corresponden a la emulación.

La emulación por medio de la radiación láser se lleva a cabo tratando de generar un volumen de carga equivalente al del ión, es decir, el volumen de carga generada por la radiación láser debe tener la profundidad de las diferentes capas activas y la anchura correspondiente a la del volumen de carga depositado por el ión. Para ello se disponen de diversos parámetros del láser. En primer lugar, se utiliza un láser pulsado, siendo la duración del pulso del orden de 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.

Existen trabajos previos en los que se da cuenta con éxito de esta actividad [ME94, MO99]. No obstante, y tal y como se avanzó en la introducción de este trabajo, el uso del láser sobre memorias de un notable nivel de integración de las celdas hace muy complicado el proceso experimental. 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.

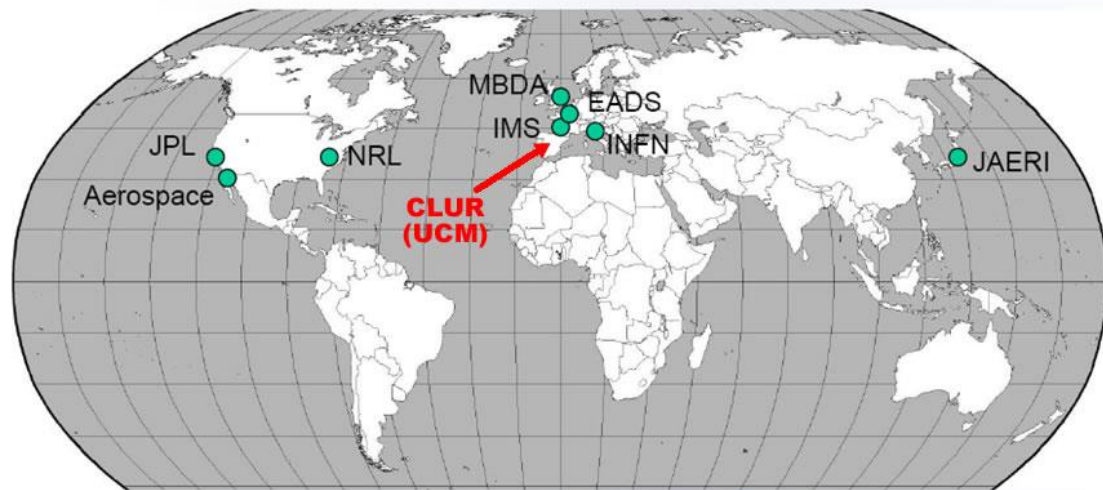


Fig. 3.1. Laboratorios donde se realizan experimentos de radiación con láser.

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. Hasta la fecha sólo existen 9 laboratorios en el mundo que realizan este tipo de test (Fig. 3.1). Entre ellos se encuentra el Centro de Láseres Ultrarrápidos (CLUR), situado en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

En el CLUR se dispone de la herramienta básica e imprescindible para la inducción de fallos, un láser pulsado de femtosegundos, cuya característica más importante es que la longitud de onda de emisión es sintonizable desde el ultravioleta (300 nm) hasta el infrarrojo (3 μ m). Además de toda la instrumentación óptica sensible en el rango de configuración del haz láser necesaria para establecer la emulación [LO10].

3.1 SISTEMA LÁSER DISPONIBLE EN EL CLUR.

Tal y como se avanzó en la introducción, los experimentos de irradiación láser se realizan en el Centro de Láseres Ultrarrápidos (CLUR), situado en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). A continuación se detallan las especificaciones del sistema y se describen los elementos que lo componen.

3.1.1 Especificaciones del sistema láser.

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

- Emisión de luz láser:
 - o Permite la emisión de pulsos de luz del orden de femtosegundos.

- Permite el ajuste o la selección de la longitud de onda en un rango entre 300 y 3000 nm.
- Trayectoria y Atenuación del haz:
 - Conduce el haz láser hacia el sistema de focalización mediante elementos ópticos.
 - Permite el control de la energía del láser mediante filtros y atenuadores hasta valores del orden de picojulios.
- Focalización del Haz:
 - Permite enfocar el láser sobre la muestra consiguiendo tamaños de foco inferiores a 3 μm . Los objetivos deben seleccionarse con distancias de trabajo grandes (*Long working distance*) para permitir enfocar en la zona de interés sin que el objetivo tropiece con la muestra.
- Posicionamiento y Movimiento de la muestra:
 - Permite movimientos de la muestra en las tres direcciones XYZ en pasos mínimos de 1 μm con una precisión de 0,5 μm . Este sistema está motorizado y sincronizado con el sistema de irradiación y medida de los parámetros eléctricos críticos.

3.1.2 Descripción del sistema láser.

La figura 3.2 detalla la composición íntegra del sistema, el cual está constituido por una serie de láseres y complementos (osciladores, amplificadores, generadores de armónicos, equipos de diagnóstico) que permiten disponer de un amplio abanico de pulsos láser a muy diversas longitudes de onda, energías y frecuencias de repetición.

En la tabla 3.1 se resumen las principales características de los elementos descritos en la figura 3.2. Además, se describe más detalladamente la función de cada elemento en los siguientes puntos.

3.1.2.1 Láser de bombeo del oscilador de femtosegundos [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 diodos láser 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 (como 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.

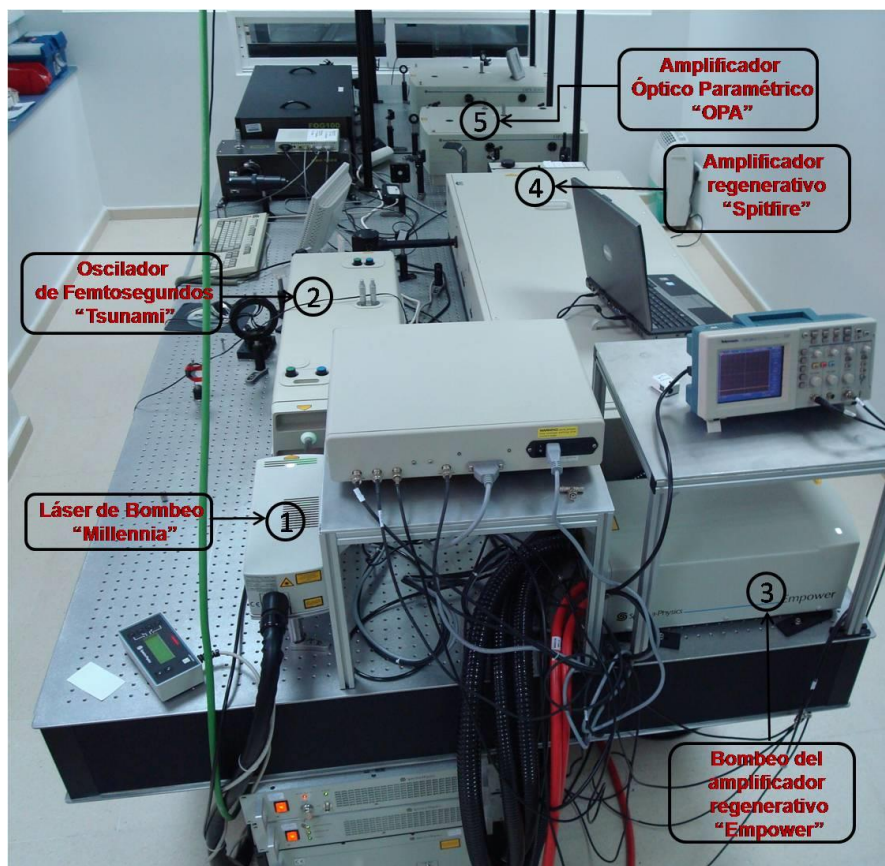


Fig. 3.2. Sistema láser de femtosegundos en la UCM [LO10].

Sistema láser de femtosegundos	
Láser de bombeo del oscilador de femtosegundos	Nd:Vanadato 5 W, 532 nm
Oscilador de femtosegundos	Ti:Zafiro 430 mW, 800 nm, 80 MHz, 50 fs/pulso
Láser de bombeo del amplificador regenerativo	Nd:YLF 20 mJ/pulso, 527 nm, 1 KHz
Amplificador regenerativo	Ti:Zafiro 3,6 mJ/pulso, 800 nm, 1 KHz, 50 fs/pulso
Amplificador óptico paramétrico	Radiación sintonizable desde el UV (300 nm) hasta el IR (3 μ m)

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

3.1.2.2 Oscilador láser de femtosegundos [UCM].

El oscilador láser de femtosegundos “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.

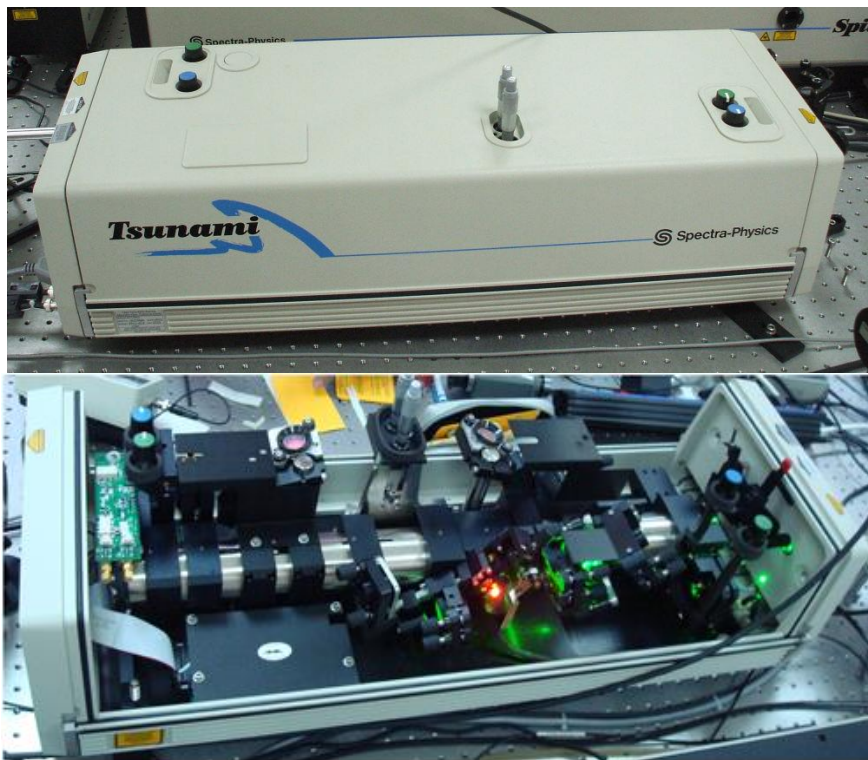


Fig. 3.3. Oscilador láser de femtosegundos “Tsunami”.

3.1.2.3 Láser de bombeo del amplificador regenerativo [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 obtienen pulsos láser de entre 500 Hz a 10 kHz, con una anchura del orden de 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.

3.1.2.4 Amplificador regenerativo [UCM].

Un amplificador óptico es un dispositivo que amplifica una señal óptica directamente, sin la necesidad de convertirla previamente en una señal eléctrica. En el amplificador regenerativo “Spitfire” (Fig. 3.4) la amplificación tiene lugar cuando el pulso óptico que llega del oscilador (Tsunami) pasa a través del medio activo (emisión estimulada), 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”. 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.

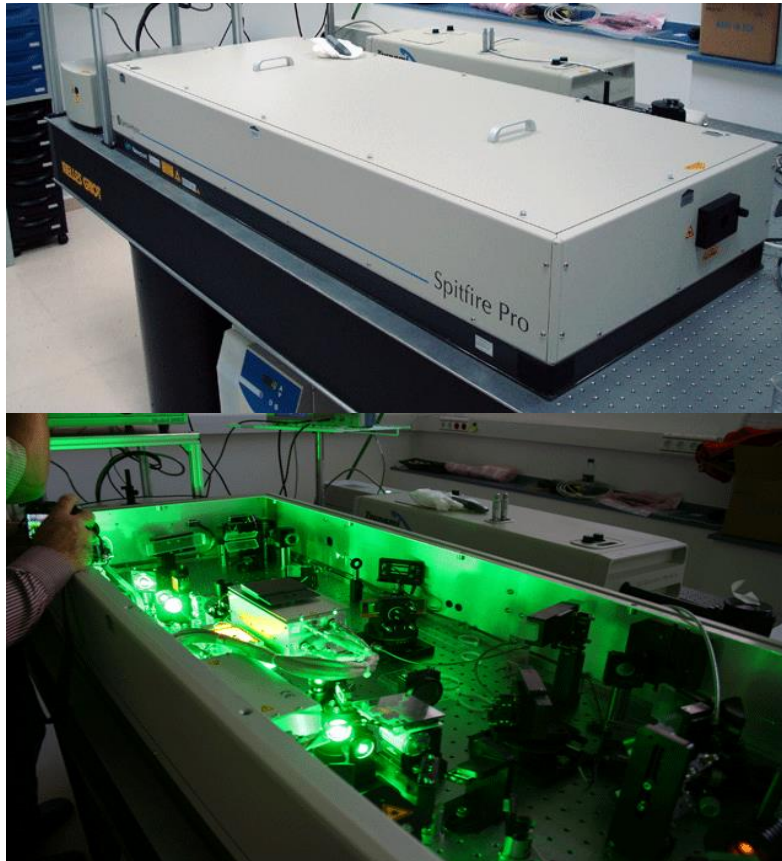


Fig. 3.4. Amplificador regenerativo “Spitfire”.

3.1.2.5 Amplificador Óptico Paramétrico (OPA) [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. La diferencia de frecuencias entre un bombeo intenso (ω_3) y un haz más débil (ω_1) en un material no lineal tiene como resultado la generación de un haz de frecuencia $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$ (amplificación del haz ω_1).

3.2 CARGA DEPOSITADA.

La energía por pulso del haz láser determina, junto con los parámetros ópticos del material y la energía asociada a cada fotón (longitud de onda de emisión), la tasa de pares e-h generados $N(r,z)$ por unidad de volumen. Multiplicando $N(r,z)$ por la carga del electrón se

obtiene la cantidad de carga generada o depositada por unidad de volumen, tal y como muestra la expresión [3.1] [LO10].

$$\frac{Q_{laser}}{V} = q_e \cdot N(z, r) = q_e \cdot \left(\frac{\alpha}{E\gamma} I(r, z) + \frac{\beta_2}{2 \cdot E\gamma} I^2(r, z) \right) \cdot t_p \quad [C \cdot cm^{-3}] \quad [3.1]$$

Donde E_γ es la energía del fotón incidente, $I(r, z)$ es la intensidad del pulso, α es el coeficiente de absorción lineal, β_2 es el coeficiente de absorción no lineal de segundo orden y t_p es la duración del pulso.

Multiplicando la expresión [3.1] por el volumen de generación de carga, se obtiene la carga total depositada Q_{total} en una determinada profundidad de penetración del haz láser en el interior del semiconductor. Si la Q_{total} en la región activa supera el valor umbral necesario, o carga crítica (Q_{crit}), para generar una transición, se provocará un error [LO10].

$$Q_{total} = q_e \cdot N(z, r) \cdot V \quad [3.2]$$

3.3 ABSORCIÓN LINEAL (SPA) Y NO LINEAL (TPA).

En función de la longitud de onda seleccionada se trabajará en régimen de absorción lineal o no lineal. Ello se debe al valor de la energía de la banda prohibida o "GAP" indirecto del silicio ($E_g = 1.12$ eV). Este valor conduce a diferenciar dos rangos de longitudes de onda que corresponden a los dos mecanismos diferentes de absorción [LO10]:

- a) Absorción lineal: si $\lambda < 1107$ nm ($E > 1.12$ eV) se puede extraer un electrón de la banda de valencia mediante la absorción de un sólo fotón. Técnica denominada "Single Photon Absorption" o SPA. Para longitudes de onda alejadas y por debajo de 1107 nm, se puede despreciar la generación de portadores por absorción multifotónica. Esta interacción no lineal puede aparecer incluso en el caso de que el fotón tenga suficiente energía para producir un par electrón-hueco. Sin embargo, en la práctica, existe unanimidad al despreciar la creación no lineal de pares electrón-hueco frente a la lineal en el caso de que ésta última se pueda producir. Así, para longitudes de onda por debajo de 1107 nm, la ecuación que describe la absorción lineal del haz en función de la profundidad de penetración (z) en el material semiconductor es:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad [3.3]$$

Siendo I_0 la intensidad del pulso incidente y α el coeficiente de absorción lineal.

La profundidad de penetración $d(\alpha)$, se define como la distancia para la cual la intensidad decae hasta un factor $1/e$ de su valor en la superficie:

$$d(\alpha) = \frac{1}{\alpha} \quad [3.4]$$

El parámetro α o coeficiente de absorción óptica lineal, aunque es dependiente de algunos factores, se puede calcular en función del coeficiente de extinción k mediante la aproximación:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad [3.5]$$

- b) Absorción no lineal: Si $\lambda > 1107$ nm ($E < 1.12$ eV) se puede extraer un electrón de la banda de valencia mediante la absorción de 2 o más fotones simultáneamente. Técnica denominada "Two Photon Absorption" o TPA.

A diferencia de la interacción simple, este otro mecanismo de interacción necesita la participación de dos fotones. Para longitudes de onda alejadas y por encima de 1107 nm la absorción no lineal es el único mecanismo de absorción en el material. En este caso la ecuación que describe la absorción del haz en función de la profundidad de penetración (z) en el material semiconductor es:

$$I(z) = \frac{I_0}{1 + \beta_2 \cdot I_0 \cdot z} \quad [3.6]$$

Donde I_0 es la intensidad del pulso incidente y β_2 el coeficiente de absorción no lineal de segundo orden.

Para el cálculo de I_0 se emplea la expresión [3.7], siendo W_0 el radio del impacto del haz láser, y E_p y t_p la energía y la duración del pulso respectivamente. Esta expresión es válida cuando el espesor de la capa sensible (d) es muy pequeño (del orden de 1 μm), de manera que se puede considerar que el radio del haz es constante en su trayectoria a través de la capa sensible o para todo el espesor [LO10].

$$I_0 = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot W_0^2 \cdot t_p} \quad [3.7]$$

3.4 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO.

La figura 3.5 muestra una imagen real del montaje experimental. Se ha indicado (en rojo) el camino óptico que sigue el haz desde que sale del láser hasta que impacta con la memoria. A lo largo de su trayectoria se intercala toda la instrumentación óptica necesaria para guiar el haz, trabajar con un único pulso y seleccionar la energía. La memoria se coloca en un porta-muestras motorizado que permite su movimiento.

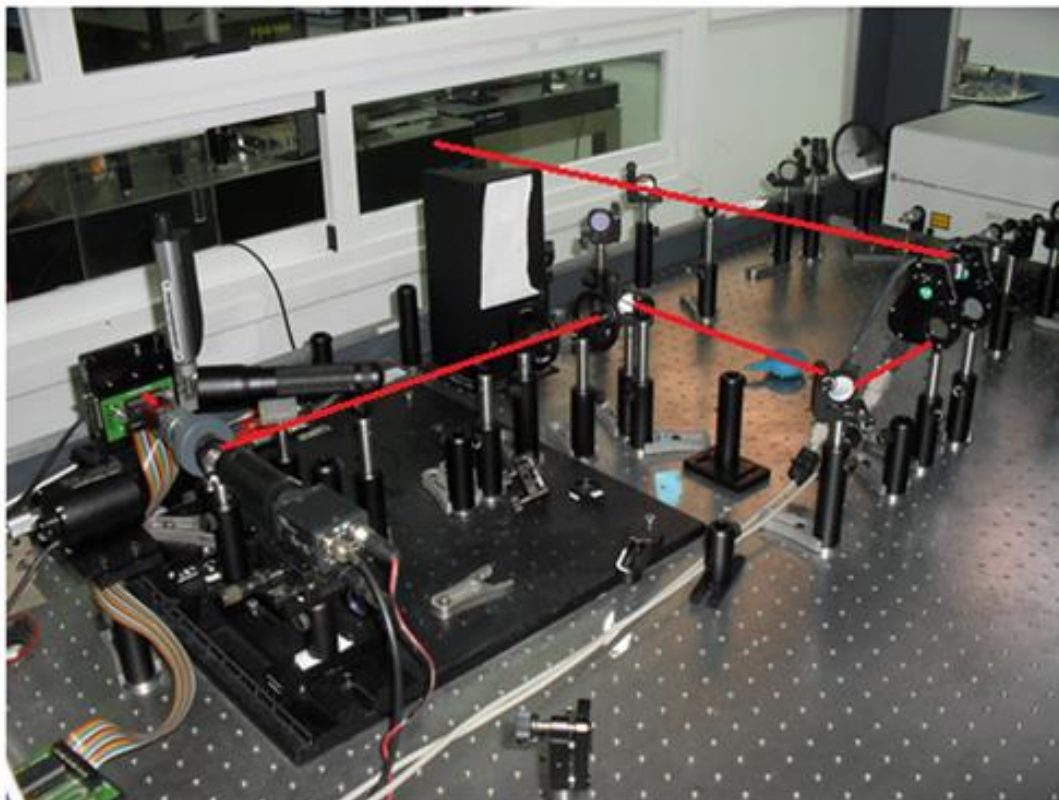


Fig. 3.5. Montaje experimental para la radiación de las memorias con láser. Se ha indicado (en rojo) el camino óptico seguido por el haz.

A continuación se detallan los procesos seguidos para implementar el sistema (Fig. 3.5) y poder radiar con láser las memorias seleccionadas.

3.4.1 Circuito de control de las memorias.

El paso inicial es el diseño y fabricación de un circuito que permita la escritura y lectura de las memorias a través de un PC (Fig. 3.6).

El microcontrolador (PIC 18F4331 del fabricante Microchip), a la derecha en la figura 3.6, se comunica con un PC a través del puerto serie por medio del protocolo RS-232. Para transmitir las órdenes y recibir los datos se utiliza el programa *Hyperterminal*. A la izquierda, en una placa independiente adaptada a las características del porta-muestras

donde irá colocada, se sitúa la memoria a radiar. El porta-muestras motorizado posibilita el movimiento XYZ frente al haz del láser. El microcontrolador y la memoria se comunican a través de un bus de direcciones y datos.

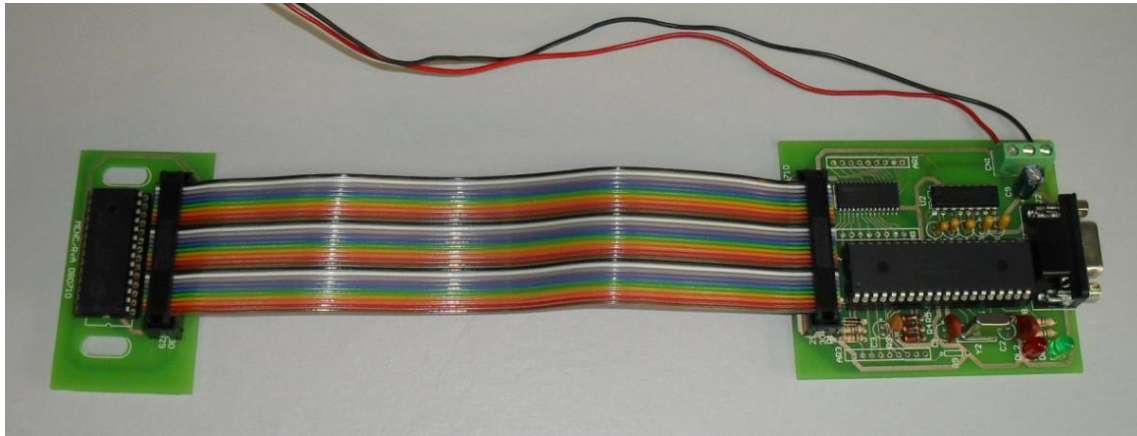


Fig. 3.6. Circuito de control para la comunicación de la memoria con el PC.

Una vez construido el circuito se programa dicho microcontrolador 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 transmitir al PC el resultado de la comparación. Esto es, el número de errores y, en caso de que los hubiera, la dirección de las celdas en que se hubieran producido y el error.

El circuito de control resultará muy útil para comprobar la funcionalidad de las memorias durante el proceso de desencapsulado, el cual es muy delicado tal y como se verá en el apartado siguiente.

3.4.2 Desencapsulado de las memorias SRAM a radiar.

Para poder irradiar mediante láser cualquier tipo de circuito integrado se requiere en todos los casos la iluminación directa del chip, por lo que será necesario abrir el encapsulado hasta conseguir el acceso visual de la superficie a radiar.

El proceso de desencapsulado es el procedimiento de eliminación de la tapa o del material encapsulador mediante procedimientos mecánicos, térmicos o químicos quedando el circuito integrado expuesto para su análisis posterior. Existen diferentes técnicas de

desencapsulado en función del empaquetado del circuito a fin de minimizar la introducción de sustancias extrañas o daños en el dispositivo. Algunas de estas técnicas son tan simples como forzar mecánicamente la ruptura de la tapa, en caso de un encapsulado cerámico. En caso de encapsulados plásticos de polímero, como el que presentan las memorias a examinar, la técnica más efectiva es mediante ataque químico [LO10].

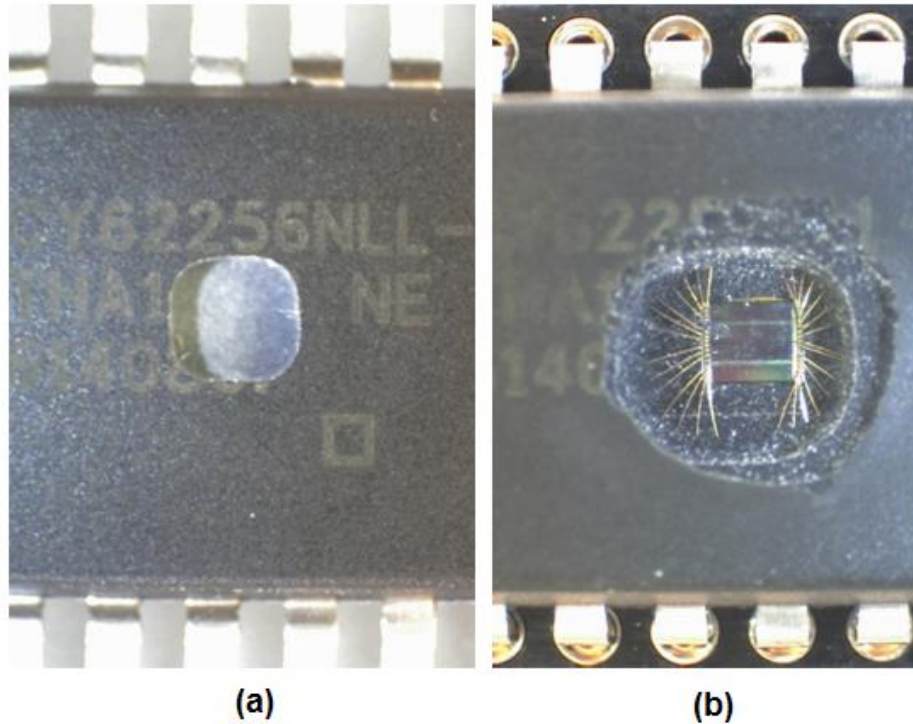


Fig. 3.7. (a) Memoria CY en la cual se ha realizado una cubeta mediante pulido mecánico. (b) Memoria CY desencapsulada por la parte superior del dispositivo. La superficie del circuito integrado ha quedado intacta y al descubierto después del ataque químico.

Antes del ataque químico es conveniente pulir parte del plástico mecánicamente para acelerar el proceso de corrosión. Así, mediante una fresa se realiza una cubeta en el encapsulado plástico (Fig. 3.7 (a)) donde posteriormente se deposita el ácido gota a gota. Para el tipo de polímero que se utiliza típicamente en los encapsulados comerciales, el ácido adecuado para realizar el ataque es el ácido nítrico a una temperatura de unos 65 - 75 °C [ES02]. Debido a que este ácido ataca al polímero y al metal, en los procesos de desencapsulado se alcanza un bajo porcentaje de supervivencia del integrado, ya que, los contactos metálicos, los pines e incluso las pistas del circuito también son afectados [LO10]. La figura 3.7 (b) muestra una memoria CY desencapsulada por la parte superior, quedando visible, operativa y por tanto preparada para irradiarla con láser.

Antes de proceder al desencapsulado se realiza una radiografía del dispositivo para conocer la posición del chip dentro del encapsulado y realizar el ataque químico en el sitio adecuado (Fig. 3.8 y 3.9).

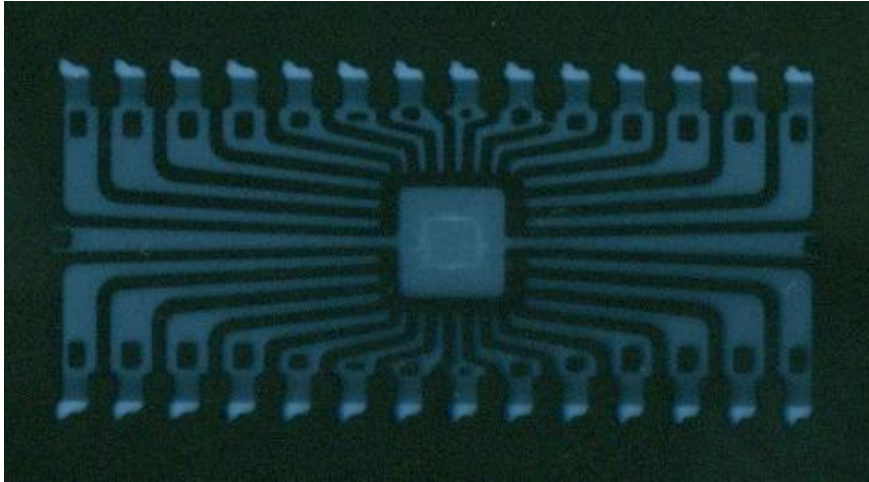


Fig. 3.8. Imagen de Rayos X del interior de la memoria CY. Imagen obtenida gracias la colaboración del CIEMAT.

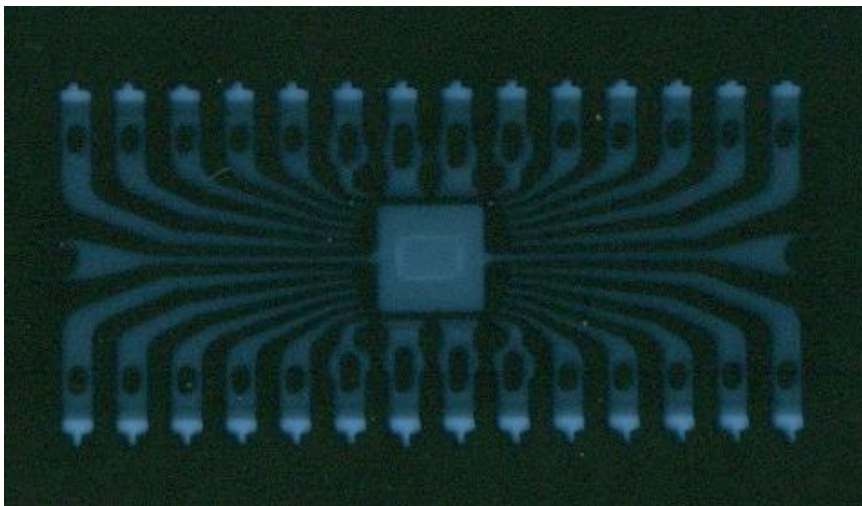


Fig. 3.9. Imagen de Rayos X del interior de la memoria AS. Imagen obtenida gracias la colaboración del CIEMAT.

3.4.3 Dimensionado de las memorias desencapsuladas.

El desencapsulado del dispositivo permite obtener el dimensionado necesario para definir las condiciones de barrido con el láser. Para ello, una vez desencapsuladas las memorias, se realiza una foto con el microscopio obteniendo 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.

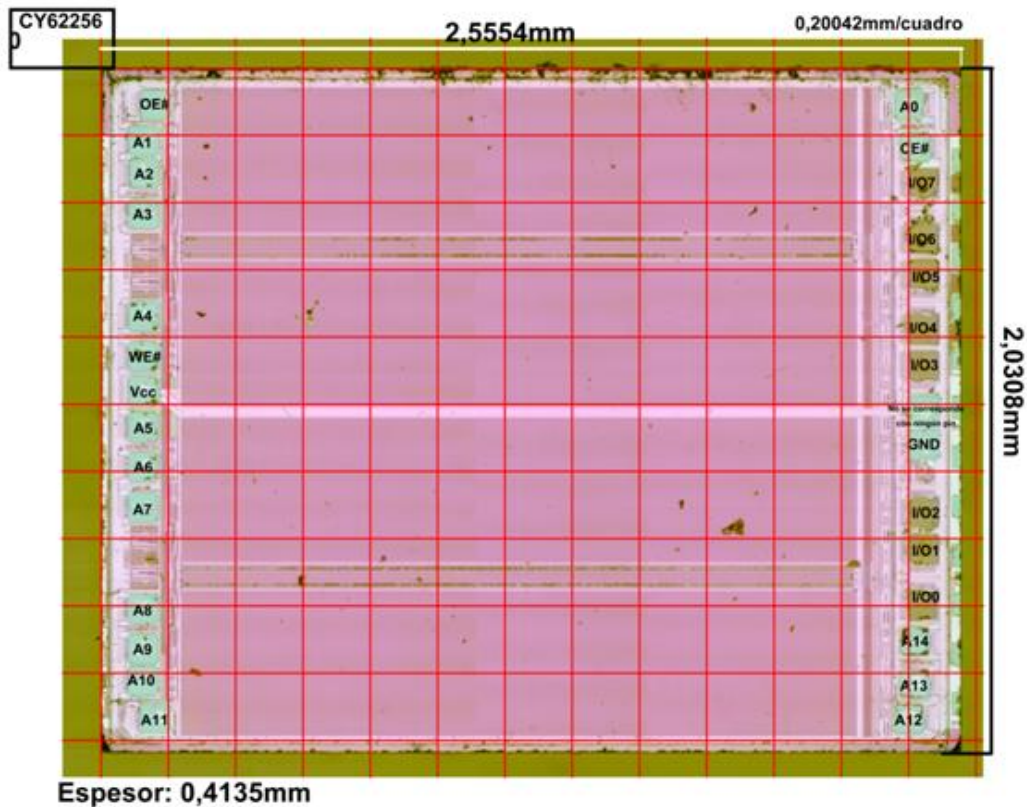


Fig. 3.10. Mapa dimensionado y con identificación de pines correspondiente a la memoria CY.

Además, 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 lay-out del dispositivo a irradiar. Esta información normalmente no está disponible, por lo que se suele 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 [LO10].

En las figuras 3.10 y 3.11 se observa el mapa dimensionado y con los pines identificados para las memorias CY y AS respectivamente.

La información obtenida del estudio del diseño también permitiría simplificar la secuencia de ensayo, centrando el barrido del láser directamente en las zonas más críticas o representativas del chip, reduciendo el tiempo de radiación.

3.4.4 Montaje experimental y sistema de adquisición de datos.

A continuación se detalla el montaje de todos los componentes del sistema de irradiación, así como la implementación del programa que los gobierna y permite la adquisición de los datos.

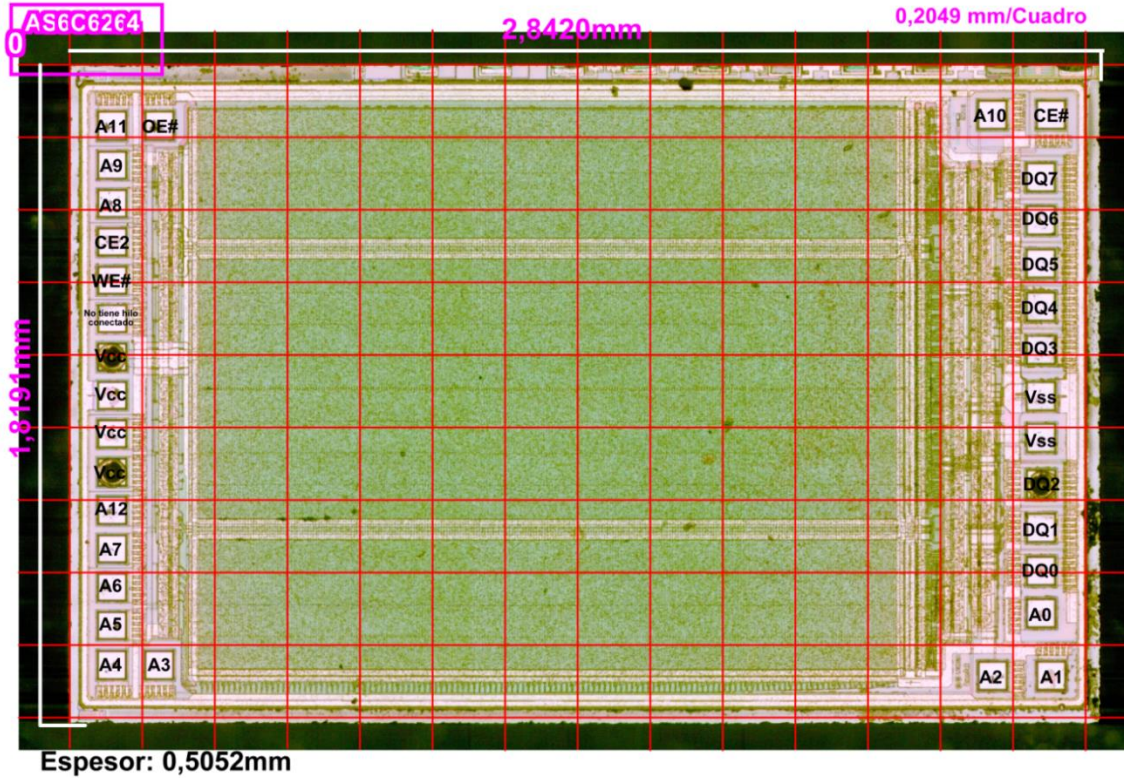


Fig. 3.11. Mapa dimensionado y con identificación de pines correspondiente a la memoria AS.

La figura 3.12 muestra una descripción esquemática del sistema. Toda la instrumentación que se ha utilizado viene descrita en la tabla 3.2 con sus características principales.

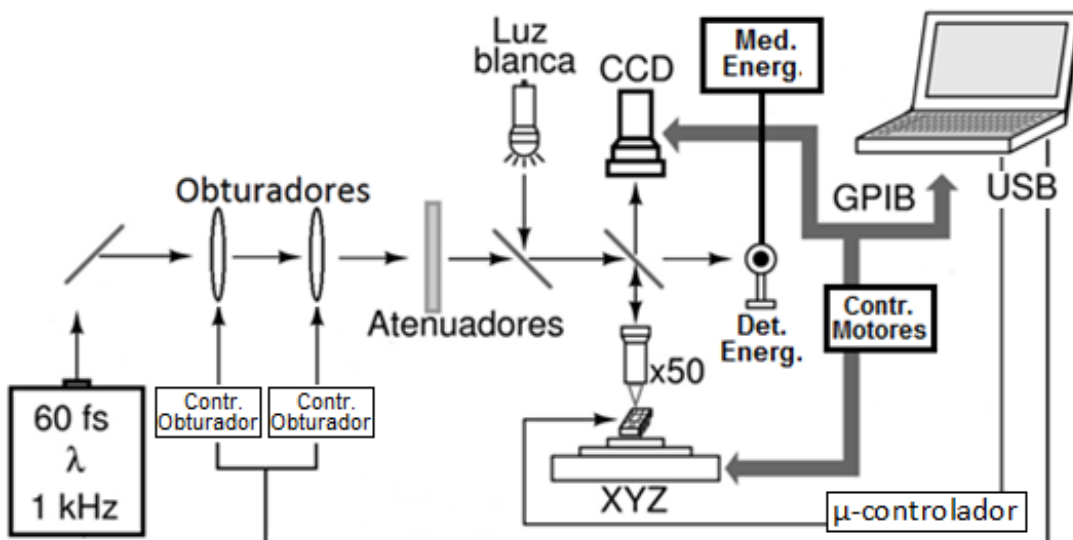


Fig. 3.12. Esquema del montaje experimental para la radiación de las memorias con láser.

Una vez desencapsulada la memoria y montada en la placa del circuito de control, ésta se coloca en el porta-muestras motorizado en los tres ejes de movimiento XYZ con una precisión de 0,1 μm (Fig. 3.13).

INSTRUMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	FABRICANTE	CARACTERÍSTICAS
Motores de Movimiento XYZ	Precision Motorized Actuators LTA-HS	Newport	Resolución: 0,035 μm Paso 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	Edmund Optics	Distancia de trabajo: 17 mm (Larga distancia de trabajo). AN: 0,42.
Detector Energía	Power Detector 918D-IR	Newport	Rango espectral: 0,78-1,8 μm
Medidor Energía	1918-C	Newport	Potencia: 11pW-20kW
Cámara CCD	XC-ST50	Sony	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	2 obturadores rápidos con tiempos de respuesta, apertura y cierre de 8 ms.

Tabla 3.2. Características principales de la instrumentación integrada en el montaje experimental. [Adaptada de LO10].

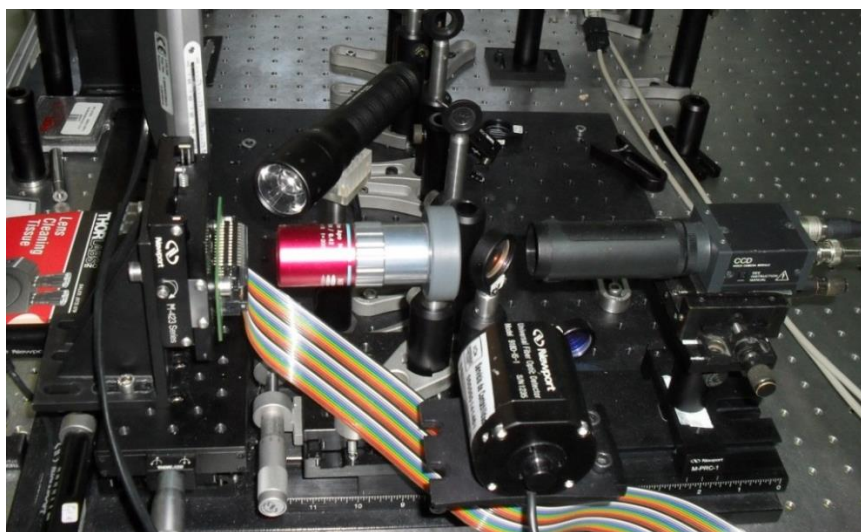


Fig. 3.13. Placa con la memoria montada en el porta-muestras motorizado.

El haz láser, con una anchura de pulso de unos 60 fs, 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 3 μm en función de la longitud de onda utilizada. Una cámara CCD permite observar el correcto emplazamiento del punto de disparo. La frecuencia de los pulsos láser es sintonizable desde 20 Hz a 1Khz [LO10].

La simultaneidad de experimentos en el CLUR impone una frecuencia de trabajo del láser a 1kHz. En principio, esta frecuencia de trabajo supone un serio problema, ya que, se debe asegurar que los errores generados en la memoria son contabilizados de manera correcta. Para ello, se necesita que incida un único pulso y no vuelva a incidir el siguiente hasta que se haya comprobado la memoria, almacenado el resultado de la acción de ese único pulso y, finalmente, desplazado la memoria al punto siguiente para ser irradiada. Además, mediante la incidencia de un único pulso se busca la analogía con la incidencia de una partícula.

Para asegurar que en todo el proceso de lectura y movimiento de la memoria sólo se recibe un único pulso del láser se utilizan dos obturadores accionados al efecto. Como estos tienen unos tiempos mínimos de respuesta, apertura y cierre de 8 ms, es necesario el empleo de dos de ellos, cada uno con su controlador independiente. El primer paso es configurar correctamente los tiempos para que ambos estén abiertos durante 1 ms, lo cual no es tarea fácil. Mediante el envío de una señal TTL, proporcionada por un módulo de entradas y salidas digitales USB-1024HLS controlado por el PC, se accionan ambos obturadores. Inicialmente uno de ellos se encuentra abierto y el otro cerrado. Al recibir la señal, el que está abierto se cierra y viceversa, de manera que ambos están abiertos una ventana de tiempo igual a 1ms gracias al ajuste correcto de los tiempos de retardo y de exposición. De esta forma, cuando se actúe sobre los obturadores mediante el envío de la señal TTL, éstos permitirán el paso de un único pulso que incidirá sobre la memoria, no activándose de nuevo hasta que no se envíe una nueva orden desde el programa general de control.

Para comprobar que la configuración de los tiempos es la adecuada, se emplea un fotodiodo cuya salida se conecta a un osciloscopio. La señal TTL de activación de los obturadores se utiliza como trigger del osciloscopio para un disparo único. Se incide con un láser continuo sobre el fotodiodo intercalando en su camino los dos obturadores. Cuando se accionan los obturadores la señal mostrada en el osciloscopio es la de un pulso cuya anchura corresponde al tiempo de exposición o tiempo en el que los dos obturadores están

abiertos simultáneamente. Como se muestra en la figura 3.14, la señal capturada en el osciloscopio es un pulso de una anchura de 1 ms.

Para verificar que únicamente pasa un único pulso se incide sobre el fotodiodo con la señal del láser pulsado de frecuencia 1 KHz. La señal de salida del fotodiodo actúa como señal de trigger del osciloscopio, utilizando convenientemente la función de pre-trigger. Al accionar los obturadores el osciloscopio muestra la salida del fotodiodo y así el pulso capturado (Fig. 3.15).

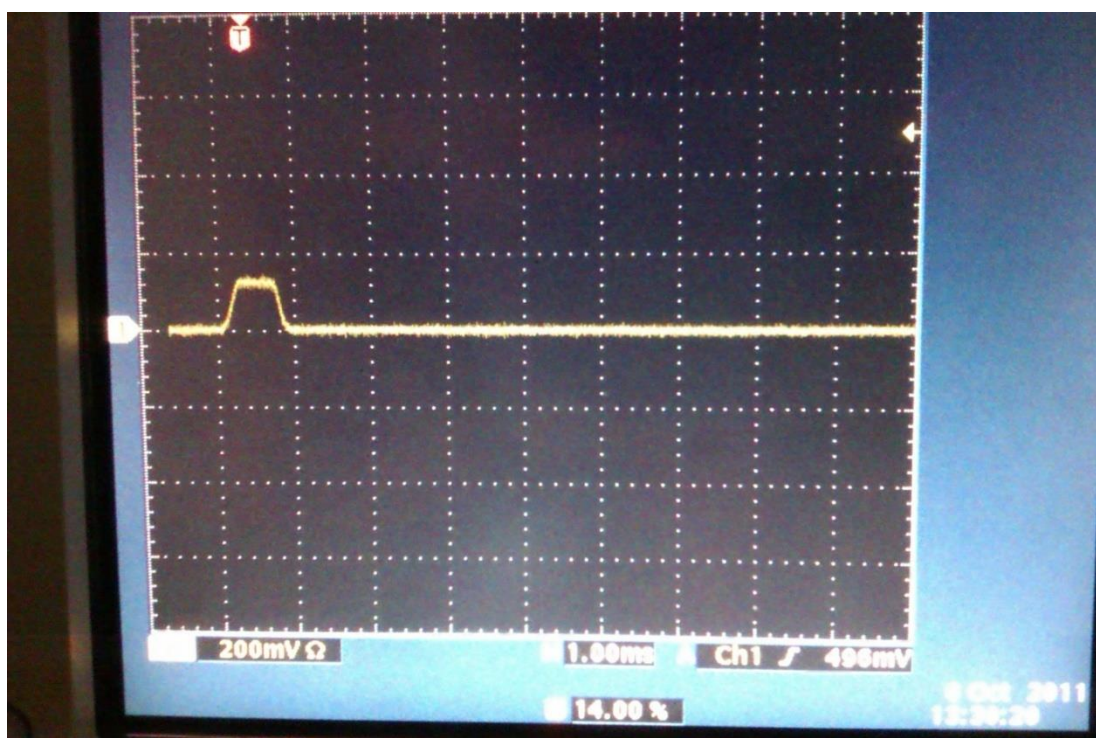


Fig 3.14. Tiempo de apertura de los obturadores de 1 ms.

En cuanto al diseño del programa de control y adquisición de datos, el objetivo es diseñar un sistema de sincronización que controle el movimiento de la muestra o movimiento del láser sobre el chip (motores), el disparo del láser (obturadores) y el sistema de medida o detección de errores (microcontrolador).

La toma de datos y el control de toda la instrumentación descrita anteriormente se realiza mediante una aplicación específica programada en LabView. Desarrollado por "National Instruments" en 1986, actualmente es el software de control de instrumentación más ampliamente utilizado en la industria y laboratorios de investigación.



Fig. 3.15. Captura de un único pulso del láser mediante el empleo de obturadores.

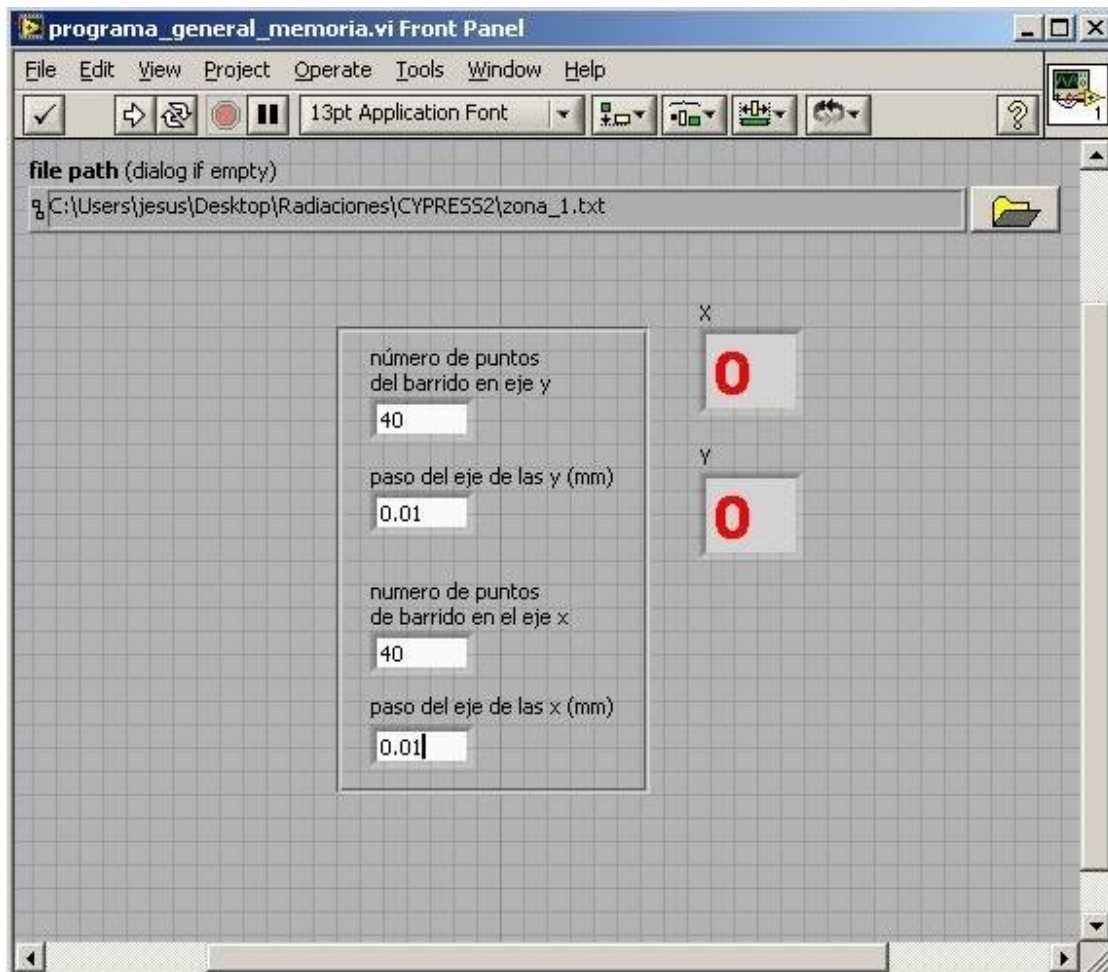


Fig. 3.16. Interfaz del programa de control durante el proceso de radiación láser.

La figura 3.16 muestra la interfaz de usuario de dicho programa. Esta pantalla está formada por tres módulos principales de configuración:

1. *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.
2. *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.
3. *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.

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, dependiendo del instrumento a controlar (Fig. 3.12).

3.4.5 Proceso de irradiación láser del dispositivo.

Una vez realizados todos los pasos anteriores, el barrido completo de toda la superficie se realiza siguiendo el diagrama de estados reflejado en la figura 3.17.

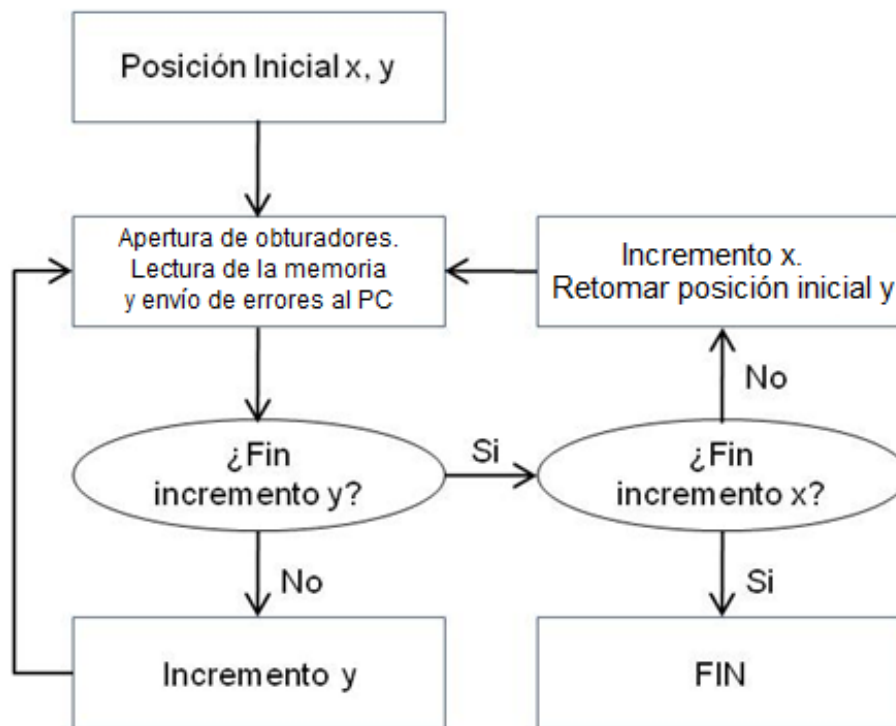


Fig. 3.17. Diagrama de estados programado en Labview para realizar el proceso de barrido del dispositivo.

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 los mapas obtenidos del chip debidamente calibrados. Los mapas reales utilizados de las memorias CY y AS se muestran en las figuras 3.19 y 3.21 respectivamente.
3. A partir del punto de referencia el movimiento del foco se realiza en pasos constantes en la dirección Y. Una vez realizado el barrido en toda esa fila se vuelve al comienzo de ella para avanzar un paso idéntico al anterior 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 leen todas las direcciones comparando su estado con el patrón grabado inicialmente. El resultado almacenado es el número total de errores y, en caso de que los hubiera, la dirección en la que ha ocurrido y el error. Además, se corrige el error volviendo a su estado original el contenido de las direcciones en las que ha ocurrido.
 - c. Se transmite al PC el resultado de la comparación y se almacena en un archivo.
 - d. 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.

Para garantizar que el haz siempre incide en foco sobre la superficie de la memoria, el análisis completo se divide en zonas. Se realizan una serie de pruebas previas y se comprueba que el área máxima de barrido es de $400 \mu\text{m}^2$. Para superficies mayores el haz del láser se desenfoca debido a la colocación del chip en el propio circuito integrado.

A modo de ejemplo, con la configuración que aparece en la figura 3.16 se analiza un área de $400 \mu\text{m}^2$, realizando un total de 1600 disparos. El tiempo de posicionado y captura de datos en cada punto de disparo en la coordenada Y es de unos 3,9 s. Cuando se recorre toda la fila, el tiempo que tarda en posicionarse en el nuevo punto de la coordenada X es de

unos 6s. Luego, la estimación de la duración del barrido de una zona de $400 \mu\text{m}^2$ es de 1 hora y 48 minutos aproximadamente. Teniendo en cuenta las dimensiones de las memorias, más de 2 mm^2 , durante el análisis de la superficie completa se obtiene una gran cantidad de datos.

3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE RADIACIÓN.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para las dos memorias estudiadas. Primeramente, tras realizar el barrido completo de la memoria, se muestra el mapa de sensibilidad, el cual permitirá centrar el análisis en puntos significativos del mismo, es decir, se radiarán diferentes puntos a diferentes energías estudiando la evolución en el tipo de error. Posteriormente se realiza un exhaustivo análisis de todos los errores generados, calculando la sección eficaz y obteniendo información acerca de la topología de la memoria.

3.5.1 Elección de los parámetros de radiación.

Antes de presentar los resultados se comentan los parámetros de radiación elegidos para el análisis de las memorias en función del objetivo que se pretende:

- **Elección de la longitud de onda y energía de radiación:** Tanto para la realización de los mapas de sensibilidad como para el posterior análisis de los errores obtenidos, la correcta elección de la longitud de onda y de la energía de radiación es un factor decisivo, ya que, de ello depende el número de errores producidos.

Se decide radiar por la parte superior del chip con una longitud de onda de 800 nm, trabajando en régimen de absorción lineal y teniendo una penetración de unos $12 \mu\text{m}$ [BU13]. La elección de esta longitud de onda se debe a que es la más estable para el láser disponible en el CLUR, siendo además la longitud de onda de trabajo típica a la que se realizan los ensayos con láser sobre dispositivos electrónicos en toda la comunidad científica de electrónica del Espacio.

Para elegir la energía a la que se van a radiar las memorias se realizan unas pruebas ejecutando varios disparos y barridos en diversos puntos y zonas. Se comienza inicialmente a una energía relativamente baja (48 pJ), aumentando poco a poco, con el fin de establecer una energía de radiación adecuada para cada memoria. Las energías de radiación determinadas son 132 pJ y 153,6 pJ para las memorias AS y CY respectivamente.

- **Elección del paso en los ejes X e Y:** Teniendo en cuenta que lo que se pretende es identificar las zonas más sensibles de la memoria, la elección del paso en los ejes X e Y se basa principalmente en las dimensiones de la memoria, y en consecuencia, la duración del barrido. El paso elegido es de 10 μm en ambos ejes, para el cual y tal y como se vio en el apartado anterior, el tiempo de radiación para una zona de 400 μm^2 es de 1 hora y 48 minutos aproximadamente. Además, siendo la tecnología de construcción de las memorias elegidas de 350 nm, se asegura que no hay solape entre celdas.
- **Diámetro del spot en el foco:** Con la instrumentación óptica utilizada, y trabajando a 800 nm, el diámetro del spot en el foco está en torno a 1 μm .
- **Patrón escrito:** Para realizar el barrido completo de las memorias se decide escribir todas las direcciones con el dato "01010101" o también conocido como *Checker Board Pattern* (CBP), con el fin de tener toda la memoria escrita alternativamente con unos y ceros. De esta forma, en la información que se almacena para cada error se podrá analizar qué bit ha cambiado y por tanto cuál es más susceptible de cambio o más sensible. Para pruebas posteriores, además del patrón CBP, se escribirá la memoria con todo ceros o patrón "0" y con todo unos o patrón "1".

3.5.2 Mapa de sensibilidad. Energías umbral.

Como ya se comentó anteriormente en el apartado 3.4.5 *Proceso de irradiación láser del dispositivo*, la radiación de las memorias se ha de realizar por zonas y siguiendo el proceso indicado en dicho apartado.

Las figuras 3.18 y 3.21 muestran una imagen real del lay-out de las memorias una vez desencapsuladas. En comparación con los mostrados en las figuras 3.10 y 3.11, se observa que la superficie de la memoria no ha quedado completamente limpia. Ello se debe a que aquéllos no son operativos, pues muestran una foto del chip de la memoria sin contactos y totalmente limpio con el objetivo de identificar los pines, dimensionar el chip y conocer más profundamente el lay-out. Como se explicó en el apartado 3.4.2 *Desencapsulado de las memorias SRAM a radiar*, durante el proceso de desencapsulado los contactos metálicos, las pistas y los pines también se ven afectados por el ácido, por lo que resulta muy complejo obtener el chip totalmente limpio y funcional. Esto hace que no se pueda radiar completamente toda la superficie de la memoria, radiando únicamente aquellas zonas relativamente limpias, pues durante las pruebas realizadas para la elección de la energía de barrido se comprobó que disparos sobre zonas con restos de encapsulado no provocan

errores. Además, se han señalado las zonas en las que se han dividido las memorias para realizar el barrido completo, mostrando entre paréntesis el número de disparos realizados por eje (n° disparos eje X, n° disparos eje Y) en cada zona.

Una vez realizado el barrido de cada zona, y mediante la realización de un programa en LabView, se combinan los datos obtenidos formando una matriz de radiación completa de la memoria. Dicha matriz contiene el número de errores obtenido en cada punto donde se ha realizado un disparo con el láser. Para obtener el mapa de sensibilidad de la memoria se representa la matriz de radiación en 3D. Dicho mapa da una idea con un simple golpe de vista de la sensibilidad del dispositivo, mostrando qué zonas son más susceptibles de generación de fallos.

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, se han realizado diferentes pruebas para llegar a un valor de compromiso de la energía a la cual se obtiene la sensibilidad de toda la memoria. Los valores umbrales para la energía en diferentes puntos se calculan posteriormente.

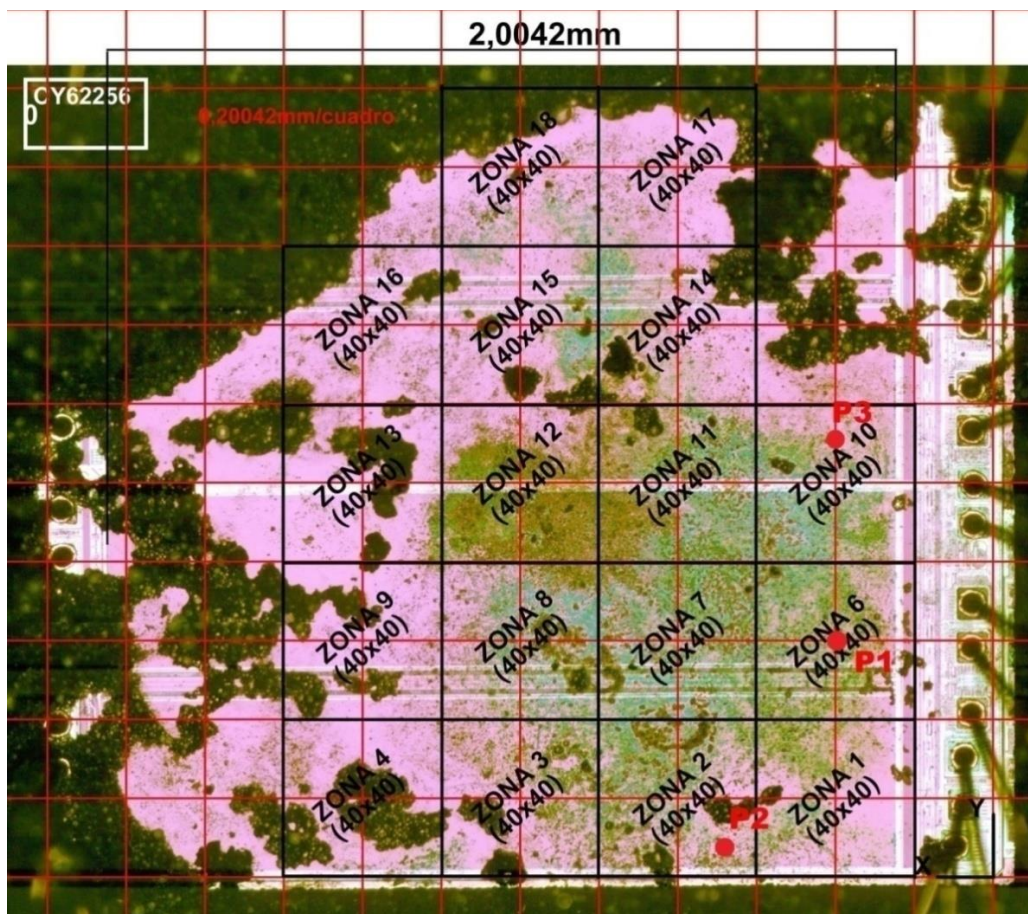


Fig. 3.18. Lay-out real de la memoria CY con las zonas de barrido. Dichas zonas no son correlativas por el hecho de que cuando un barrido no finalizaba correctamente se volvía a numerar la zona para que correspondiera el número de barrido correcto con el número de la zona.

3.5.2.1 Memoria CY.

El mapa de sensibilidad para la memoria CY obtenido con láser a una longitud de onda de 800 nm, una energía de 153,6 pJ, un diámetro del spot de aproximadamente 1 μm y escrita con el patrón CBP se muestra en las figuras 3.19 y 3.20.

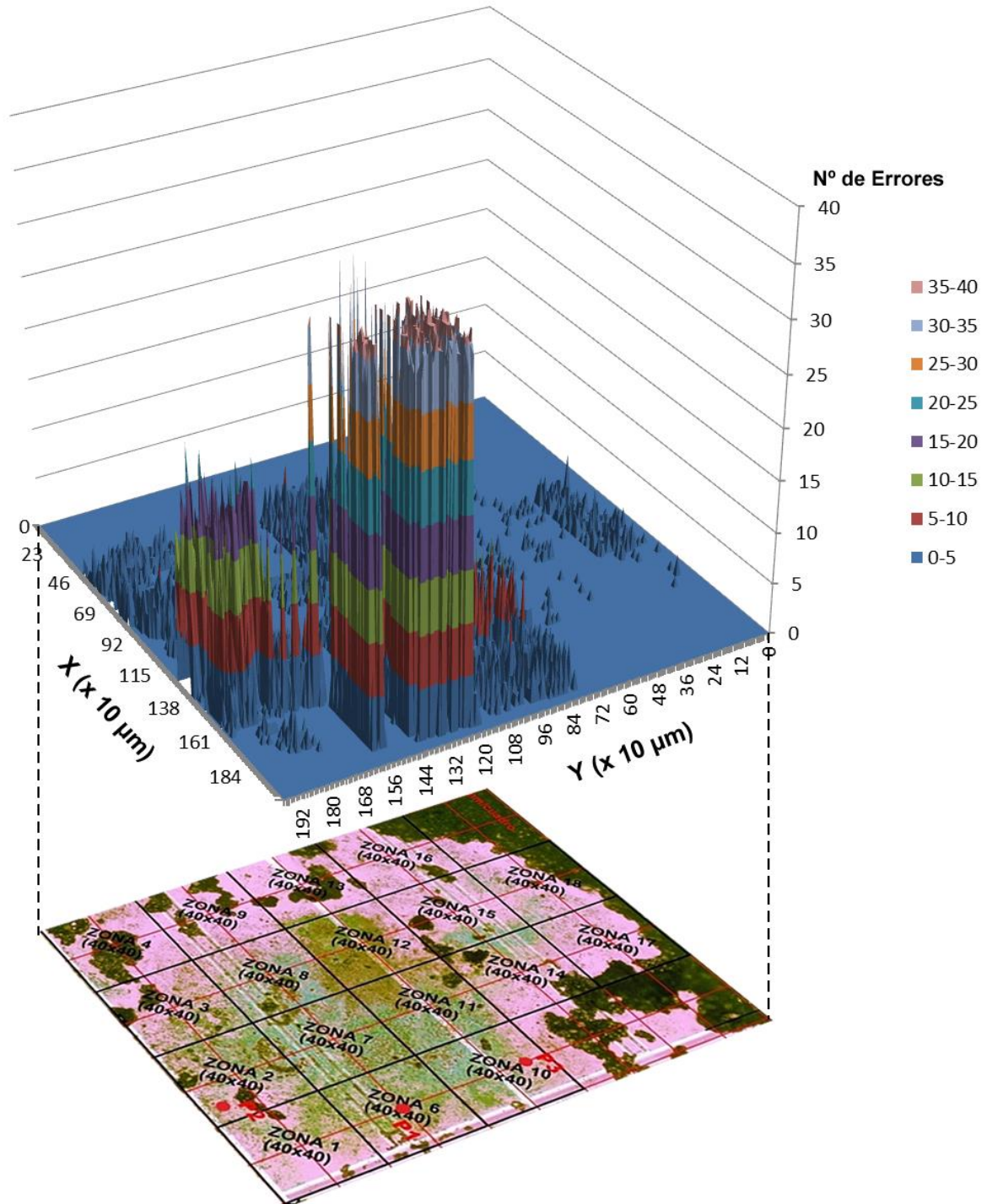


Fig. 3.19. Mapa de sensibilidad de la memoria CY. Se ha superpuesto sobre las zonas radiadas (figura 3.18) para una mayor claridad en cuanto a la relación de las zonas sensibles con el lay-out.

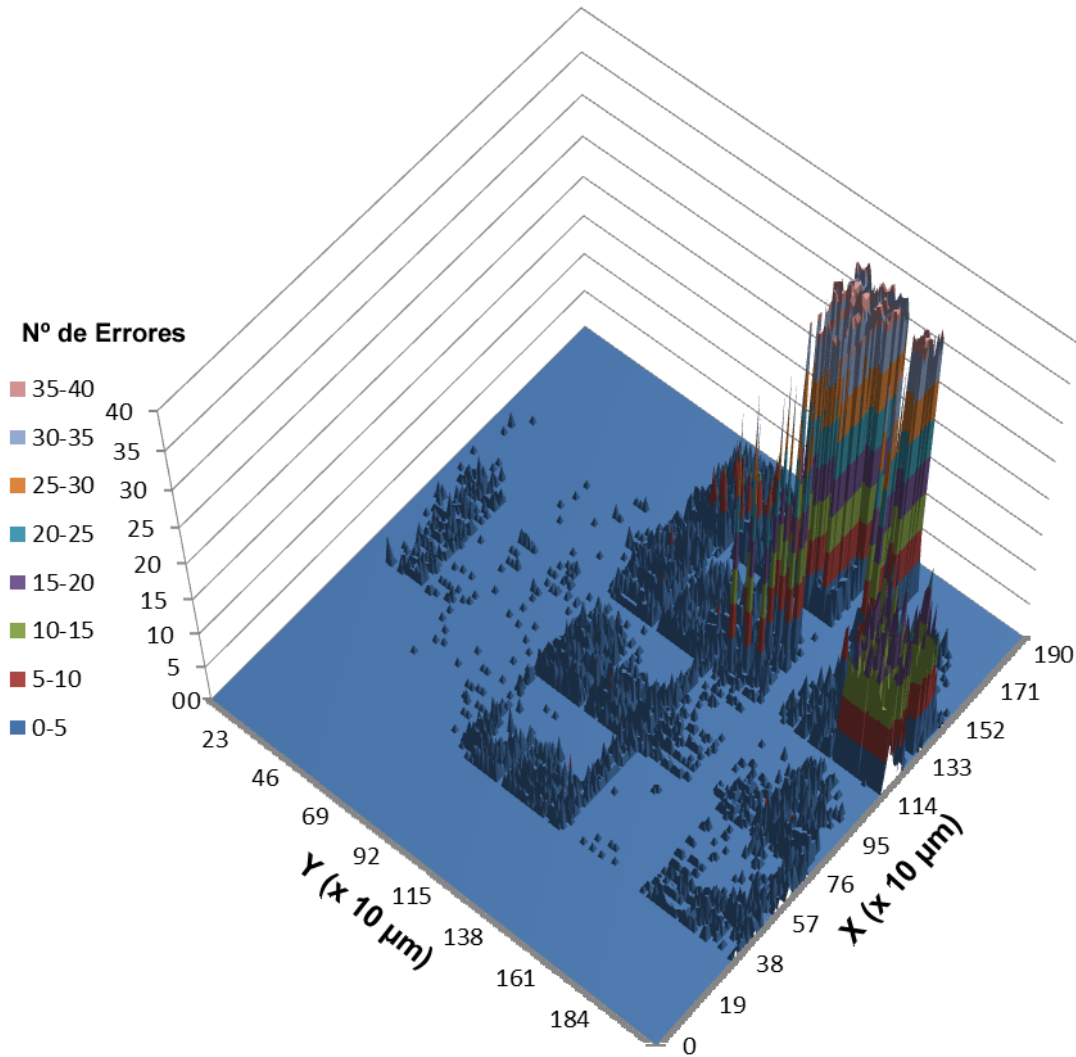


Fig. 3.20. Mapa de sensibilidad de la memoria CY desde otra perspectiva diferente a la mostrada en la figura 3.19.

Se observan diferencias claras en cuanto a la sensibilidad presentando zonas no sensibles, zonas de sensibilidad media (predominantes) y alguna zona muy sensible. En la figura 3.20 se aprecian dos canales o hendiduras sin errores que se corresponden con las dos líneas horizontales que recorren el lay-out del chip (Fig. 3.18), situadas arriba y abajo y equidistantes de la línea central. Probablemente son líneas metálicas o zonas donde se implementa lógica de control.

En relación con los interesantes fenómenos descritos en los siguientes párrafos es necesario resaltar que en los barridos realizados para obtener el mapa de sensibilidad de la memoria no se detectó ningún problema en su funcionamiento, en otras palabras, la memoria comenzó y terminó el barrido funcionando correctamente.

Una vez determinado el mapa de sensibilidad, el experimento se centra en radiar las zonas más sensibles con el objetivo de estudiar la evolución de los errores y la dependencia de la sensibilidad con respecto al patrón escrito. Concretamente se realizan varios disparos con valores crecientes de la energía del láser sobre un punto del área de máxima sensibilidad (P1, indicado en figura 3.18 y 3.19) escribiéndola con diferentes patrones. A diferencia de cuando se realiza el barrido de una zona, el proceso de control y comprobación de la memoria se ejecuta manualmente.

Los resultados se resumen en la tabla 3.3, mostrando, para una determinada energía del láser, los errores causados en la memoria y el número de disparos necesarios para causarlos, estando la memoria escrita con patrón "0", patrón "1" y CBP. También se indica el consumo de corriente del sistema cuando se ejecuta la acción de comprobar y corregir la memoria, pues se recuerda que durante la comprobación se corrigen los errores en caso de que los hubiera. Cabe destacar la presencia de una doble categoría de micro latch-up (MLU), recuperable (MLUR) y clásico (MLUC).

Energía (pJ)	Número de errores / Número de disparos			Consumo corriente (mA)
	Patrón "0"	Patrón "1"	Patrón CBP	
108	0 / 5	0 / 5	0 / 5	29,4
120	0 / 5	1 / 1	0 / 5	29,4
127,2	1 / 3	3 / 1	1 / 3	29,4
144	6 / 1	11 / 1	8 / 1	29,4
153,6	8 / 1	15 / 1	12 / 1	29,4
168	11 / 1	MLUR	16 / 1	29,4 (39,3 en MLUR)
180	MLUR	MLUR	MLUR	39,3
185	MLUR	MLUR	MLUR	47,8
≥ 192	MLUC	MLUC	MLUC	86,20

Tabla 3.3. Resultados para los disparos láser realizados en un punto del área de máxima sensibilidad de la memoria CY (P1, indicado en las figuras 3.18 y 3.19). El consumo de corriente en reposo es de 25,80 mA.

La memoria presentó un funcionamiento normal, generando SEUs (*Single Event Upset*) que se convierten en MCUs (*Multiple Cell Upset*) a medida que aumenta la energía, hasta que aparece MLUR. En este caso el microcontrolador necesitó una media de tres comprobaciones para corregir el error, funcionando correctamente después. Además se observó un aumento en el consumo de corriente, el cual no puede ser atribuido a un calentamiento local ya que permaneció hasta que se retiró la tensión de alimentación, incluso cuando los errores se habían corregido. Por tanto, se piensa que los MCUs originales se han convertido en MLURs, siendo importante recalcar que no es necesario desconectar la tensión de alimentación para eliminar los errores pero sí para que el

consumo de corriente volviera a su valor original. Este fenómeno podría ser debido a la acción de un MLU en una zona muy localizada y que no afecta a otros bits.

De esta forma se podría explicar la aparición de las regiones extremadamente sensibles en el mapa de sensibilidad (Figs. 3.19 y 3.20). Durante su realización no se monitorizaba la corriente porque la memoria funcionaba correctamente. Algunos de los fallos mostrados pueden ser debidos a MLUs que se recuperaron pero quedando un número excesivo de bits erróneos. Este efecto puede verse intensificado por factores como que en esa zona el desencapsulado haya quedado más limpio, y/o por la proximidad de la lógica de control, la cual se cree que está implementada en la parte exterior del lay-out. Que a la energía de radiación (153,6 pJ) no haya ocurrido MLUR en el punto P1 no quiere decir que a esa energía no aparezca en otros puntos. El centrar el experimento en la zona más sensible, realizando disparos únicos, ha resultado clave para la detección de este error.

Sin embargo, esta característica ya no es válida cuando se fija la energía del láser a 192 pJ. Por un lado, el consumo de corriente alcanza un valor mucho más alto que los valores previos. Por otro, el gran número de errores generado no puede corregirse comprobando la memoria repetidamente, siendo necesario desconectar y conectar la tensión de alimentación. Tras restaurar la tensión de alimentación, la memoria funciona de nuevo restableciéndose el consumo de corriente. Claramente este comportamiento corresponde a un micro latch-up clásico (MLUC). No se aumentó más la energía temiendo causar un latch-up destructivo.

Para asegurar que efectivamente el MLUC ocurre en la memoria y descartar la posibilidad de que el microcontrolador se quede colgado, ante la detección y transmisión de tal cantidad de errores, se lanza un barrido donde, por las pruebas realizadas anteriormente, se sabe que ocurrirá MLUC. Cuando ocurre, se desconecta el bus quedando la memoria sin alimentación. Se vuelve a conectar, realizando por tanto un reinicio en la alimentación de la memoria, comprobando que todo vuelve a funcionar correctamente.

En la monitorización del consumo de corriente es en lo que se basan los detectores de latch-up, protegiendo a los circuitos ante tales eventos realizando un reset de la alimentación cuando se supera el valor umbral configurado. Por tanto, conocer los valores de consumo de corriente del sistema permitirá configurar el detector de latch-up usado durante los test de iones.

Se realizan experimentos similares en un punto (P2) de la segunda zona más sensible y sobre un punto (P3) de sensibilidad media (indicados en las figuras 3.18 y 3.19). En estos casos se observa la misma tendencia en el comportamiento de la memoria, siendo la energía necesaria para provocar un error mayor cuanto menor es la sensibilidad de la zona, sin llegar a provocar MLUC. Por tanto, sólo se ha conseguido provocar MLUC en la zona de mayor sensibilidad. Los resultados se recogen en la tabla 3.4.

Punto	Energía (pJ)	Número de errores / Número de disparos			Consumo corriente (mA)
		Patrón "0"	Patrón "1"	Patrón CBP	
P2	108	0 / 5	0 / 5	0 / 5	29,4
P2	120	0 / 5	0 / 5	0 / 5	29,4
P2	127,2	1 / 5	3 / 3	1 / 5	29,4
P2	144	3 / 1	7 / 1	5 / 1	29,4
P2	153,6	7 / 1	12 / 1	9 / 1	29,4
P2	168	8 / 1	15 / 1	11 / 1	29,4
P2	180	9 / 1	17 / 1	13 / 1	29,4
P2	≥ 240	MLUR	MLUR	MLUR	41,3
P3	108	0 / 5	0 / 5	0 / 5	29,4
P3	120	0 / 5	0 / 5	0 / 5	29,4
P3	127,2	0 / 5	0 / 5	0 / 5	29,4
P3	144	2 / 2	3 / 1	2 / 1	29,4
P3	153,6	3 / 1	5 / 1	4 / 1	29,4
P3	168	5 / 1	7 / 1	7 / 1	29,4
P3	180	7 / 1	9 / 1	8 / 1	29,4
P3	240	11 / 1	12 / 1	11 / 1	29,4
P3	≥ 360	MLUR	MLUR	MLUR	40,7

Tabla 3.4. Resultados para los disparos láser realizados en los puntos P2 y P3 (indicados en las figuras 3.18 y 3.19) de la memoria CY. La corriente consumida en reposo es de 25,80 mA.

De esta forma se establecen las dos energías umbral inferior, o mínima energía con la que se provoca error, y superior, a esta energía y superiores se provoca MLUR. La energía umbral determinada depende del punto donde se radie, pues no todos tienen la misma sensibilidad. Si se quiere dar unas energías límite inferior y superior para toda la memoria éstas se determinarían en la zona más sensible. En nuestro caso, a partir de la tabla 3.3, se observa que la energía umbral inferior está en torno a unos 120 pJ y la superior a unos 180 pJ.

Del proceso también se deriva una diferencia de sensibilidad de la memoria en función del patrón con la que se escribe, generando un mayor número de errores cuando está escrita con el patrón todo "1", seguida de CBP y por último con patrón "0". Por tanto, aparentemente las probabilidades de cambio de estado en los bits no son simétricas.

3.5.2.2 Memoria AS.

La figuras 3.22 y 3.23 muestran dos perspectivas diferentes para del mapa de sensibilidad para la memoria AS, obtenido con láser a una longitud de onda de 800 nm, una energía de 132 pJ, un diámetro del spot de aproximadamente 1 μm y escrita con el patrón CBP.



Fig. 3.21. Lay-out real de la memoria AS con las zonas de barrido. Éstas comienzan a numerarse a partir de 4 porque los tres primeros barridos no finalizaron correctamente, por lo que se volvió a numerar la zona para que correspondiera el número de barrido correcto con el número de zona.

A pesar de presentar una sensibilidad más uniforme que la memoria anterior, también es posible distinguir zonas más sensibles que otras así como toda una región donde no se ha generado ningún error. Dicha región corresponde con zonas deshabilitadas en este modelo de memoria y pone de manifiesto que aunque su capacidad es pequeña en realidad corresponde a una capacidad mucho mayor. Para nuestro propósito es más interesante este caso, pues podemos controlar el dispositivo con menores recursos.

En efecto, la memoria AS es de 8k x 8bits, lo que significa que se puede controlar con un microcontrolador de pequeña capacidad de memoria, aunque es como si se analizara una memoria de 32k x 8bits (256kb). También se observan esa especie de dos canales o hendiduras sin errores en la franja de errores (Fig. 3.23). Se corresponden con las dos

líneas horizontales que se observan en el lay-out del chip (Fig. 3.21) y probablemente son líneas metálicas o zonas donde se implementa lógica de control.

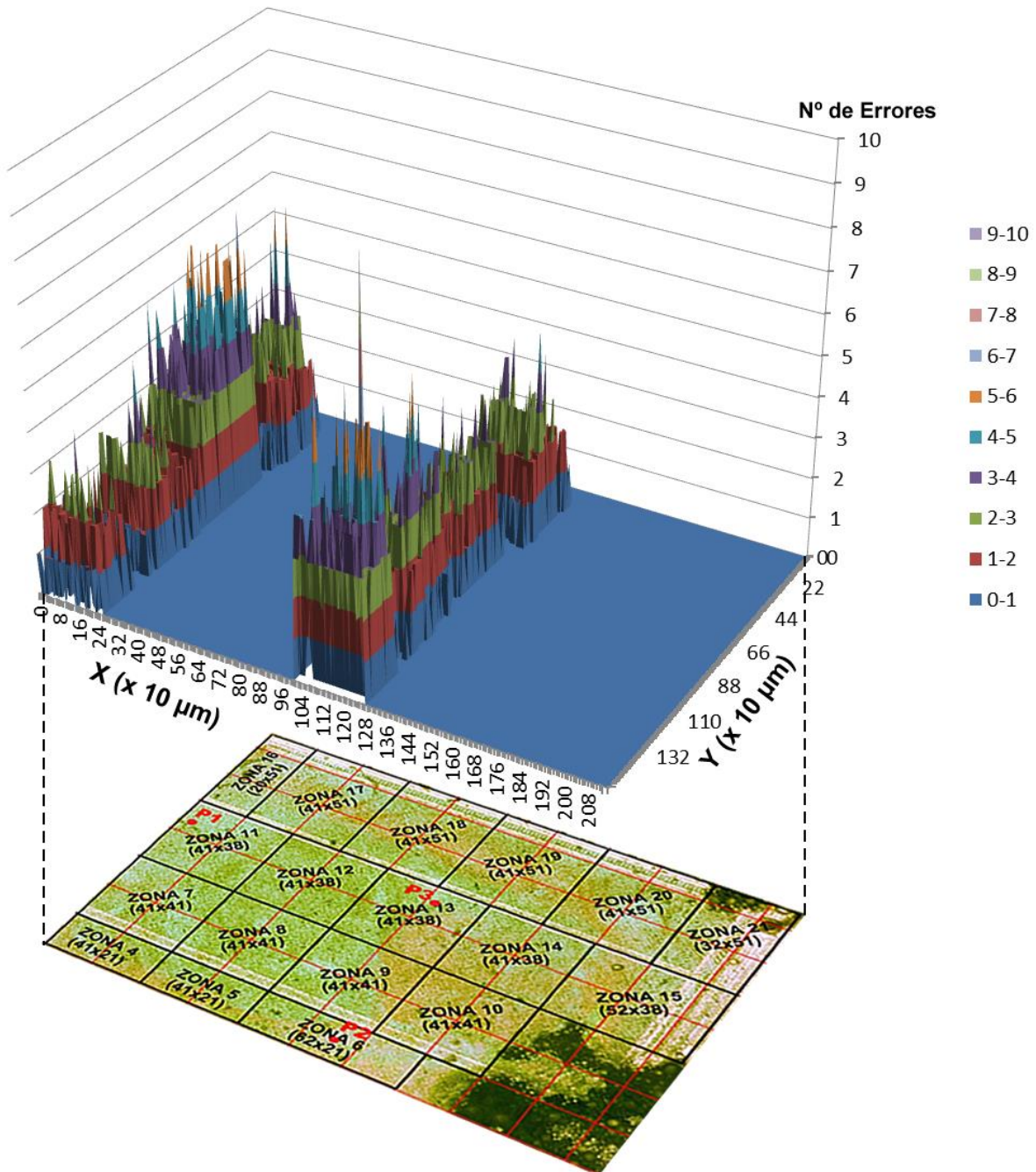


Fig. 3.22. Mapa de sensibilidad de la memoria AS. Se ha superpuesto sobre las zonas radiadas (Fig. 3.21) para una mayor claridad en cuanto a la relación de las zonas sensibles con el lay-out. La zona 22 no se representa porque no se obtuvo ningún error.

Al igual que para la memoria CY, se sitúa el láser en un punto de la zona de mayor sensibilidad de la memoria (P1, indicado en las figuras figura 3.21 y 3.22) y se sigue el mismo proceso. Los resultados se muestran en la tabla 3.5. La corriente consumida en reposo es 26,54 mA, ligeramente superior a la memoria anterior debido a que ésta utiliza dos resistencias en la implementación de su celda (Fig. 2.1 (b)). En este caso no se

consigue inducir MLUC incluso aumentando la energía hasta 480 pJ. Por temor a causar ablación y un daño irreparable, no se incrementó más la energía.

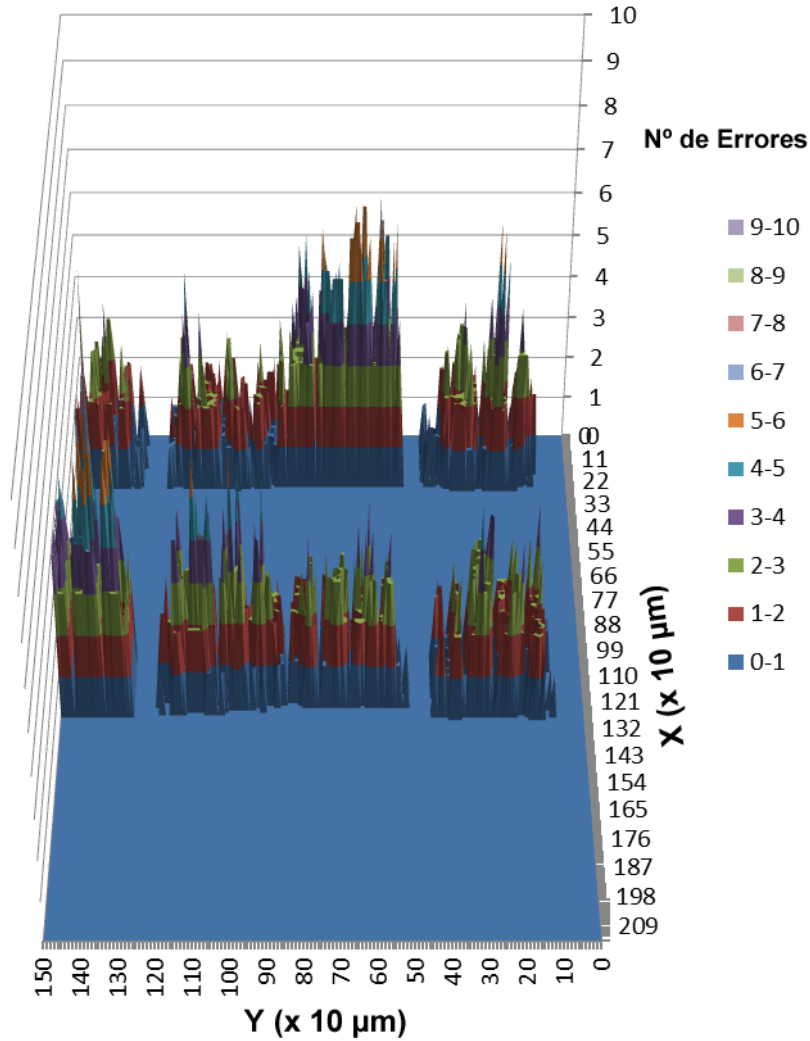


Fig. 3.23. Mapa de sensibilidad de la memoria AS desde otra perspectiva diferente a la mostrada en la figura 3.22.

Energía (pJ)	Número de errores / Número de disparos			Consumo corriente (mA)
	Patrón "0"	Patrón "1"	Patrón CBP	
48	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
60	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
67.2	1 / 2	1 / 1	0 / 3	28,7
72	1 / 1	1 / 1	1 / 2	28,7
132	3 / 1	3 / 1	2 / 1	28,7
192	6 / 1	6 / 1	6 / 1	28,7
≥ 360	MLUR	MLUR	MLUR	40,2

Tabla 3.5. Resultados para los disparos láser realizados en un punto del área de máxima sensibilidad de la memoria AS (P1, indicado en las figuras 3.21 y 3.22).

Con el objetivo de observar MLUR, e incluso intentar generar MLUC, se realiza el mismo test en los puntos P2 y P3 (indicados en las figuras figura 3.21 y 3.22)

correspondientes a zonas de alta y media sensibilidad respectivamente. Los resultados (Tabla 3.6) siguen la misma tendencia que los anteriores (Tabla 3.5). Lógicamente, cuanto menos sensible es el punto más energía se necesita para provocar errores. En esta memoria no se ha conseguido provocar MLUC.

Punto	Energía (pJ)	Número de errores / Número de disparos			Consumo corriente (mA)
		Patrón "0"	Patrón "1"	Patrón CBP	
P2	48	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
P2	60	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
P2	67,2	0 / 3	1 / 2	0 / 3	28,7
P2	72	1 / 3	1 / 1	1 / 2	28,7
P2	132	1 / 1	3 / 1	2 / 1	28,7
P2	192	4 / 1	7 / 1	5 / 1	28,7
P2	≥ 360	MLUR	MLUR	MLUR	40,2
P3	48	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
P3	60	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
P3	67,2	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
P3	72	0 / 3	0 / 3	0 / 3	28,7
P3	93,6	1 / 3	1 / 1	0 / 3	28,7
P3	112,8	1 / 1	1 / 3	1 / 3	28,7
P3	132	1 / 1	2 / 1	2 / 1	28,7
P3	144	2 / 1	2 / 1	2 / 1	28,7
P3	192	2 / 1	3 / 1	3 / 1	28,7
P3	≥ 480	MLUR	MLUR	MLUR	40,2

Tabla 3.6. Resultados para los disparos láser realizados en los puntos P2 y P3 (indicados en las figuras 3.21 y 3.22) de la memoria AS.

De las tablas 3.5 y 3.6 se pueden extraer las energías umbral para los puntos estudiados. Sin embargo, aunque parece que la memoria es ligeramente más sensible cuando está escrita con patrón "1", este hecho no es tan evidente como en la memoria CY.

3.5.3 Sección eficaz.

La sección eficaz, denotada por σ , es una medida de la probabilidad de que un suceso (evento) ocurra. Tiene unidades de área midiéndose normalmente en cm^2 , o también en "barn", siendo $1\text{b} = 10^{-24} \text{cm}^2$, y viene dada por la siguiente expresión [N111]:

$$\text{Sección Eficaz } (\sigma) = \frac{N^{\circ} \text{ de Eventos}}{\text{Flujo del experimento}} \quad [3.8]$$

Donde el N° de eventos es el número total de cambios de estado generados durante el experimento, y el *Flujo del experimento*, para el caso de irradiación láser, es el número total de disparos realizados por unidad de área.

Para realizar el recuento del total de errores inducidos en las memorias primeramente se analizarán los tipos de errores generados (Tabla 3.7). En las dos primeras columnas se indica el tipo de error cometido en hexadecimal y en binario, destacando el bit que ha cambiado con respecto al patrón escrito (CBP). Tal y como se indica en la columna *Observaciones*, en ambas memorias se han generado tanto las cuatro posibles transiciones donde un bit ha pasado de “1” a “0” como las cuatro donde un bit ha pasado de “0” a “1”. Si cualquiera de estos tipos de errores es generado por un disparo tendremos un SEU, mientras que si un disparo genera más de un error tendremos un MCU del tamaño de errores generado. En la memoria CY, todos los disparos que han generado error han producido o bien SEUs o bien MCUs. En la memoria AS también ha sido así, excepto en un único caso donde se detectó la generación de un MBU (*Multiple Bit Upset*) en el que variaron dos bits, uno pasando de “1” a “0” y otro de “0” a “1”, con respecto al patrón escrito. Este MBU se encontró en la zona_11 dentro de un MCU de 2 errores. Al ocurrir sólo una vez, su presencia no es significativa en comparación con el número de errores provocados.

ERROR (Hexadecimal)	ERROR (Binario)	Observaciones
15	0001 0101	Generados en ambas memorias
45	0100 0101	
51	0101 0001	
54	0101 0100	
57	0101 0111	Generados en ambas memorias
75	0111 0101	
5D	0101 1101	
D5	1101 0101	
56	0101 0110	MBU (Sólo 1 y en memoria AS)

Tabla 3.7. Tipos de errores inducidos en ambas memorias mediante irradiación láser.

3.5.3.1 Memoria CY.

La tabla 3.8 recoge el resultado del recuento del total de errores inducidos en la memoria CY durante la irradiación láser. A continuación se comenta más detalladamente su contenido:

- El número total de disparos realizado en la memoria CY ha sido de 27200. 1600 disparos en cada zona (Fig. 3.19).
- Para cada columna *zona_nº*, se muestra el número de disparos realizados en esa zona que han producido un cierto número de errores. 0 indica que ese disparo no provocó error, 1 indicaría que se ha producido un SEU y otro número distinto de 0 y 1 indicaría que con un disparo se ha provocado un MCU con ese número de errores.

Nº de errores	Disparos realizados																SUMA	Porcentaje con respecto al total de disparos ó 27200		
	zona_1	zona_2	zona_3	zona_4	zona_6	zona_7	zona_8	zona_9	zona_10	zona_11	zona_12	zona_13	zona_14	zona_15	zona_16	zona_17			zona_18	
0	1561	594	1169	1124	759	1206	1310	1459	689	795	877	1182	1515	1517	1533	1529	1380	20199		
1	28	111	194	270	45	193	205	83	304	298	291	170	72	67	53	48	169	2601	9,56%	
2	9	109	111	135	59	88	57	37	270	290	235	161	10	16	13	21	43	1664	6,12%	
3	0	86	49	30	18	40	11	11	79	75	77	41	3	0	1	1	5	527	1,94%	
4	2	113	71	40	172	58	15	9	206	140	117	45	0	0	0	1	3	992	3,65%	
5	0	42	4	1	35	1	2	1	14	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0,37%	
6	0	31	1	0	46	0	0	0	10	1	3	0	0	0	0	0	0	92	0,34%	
7	0	31	1	0	17	1	0	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	54	0,20%	
8	0	31	0	0	16	2	0	0	11	1	0	0	0	0	0	0	0	61	0,22%	
9	0	50	0	0	10	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0,23%	
10	0	84	0	0	8	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	96	0,35%	
11	0	59	0	0	7	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	69	0,25%	
12	0	69	0	0	8	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0,30%	
13	0	33	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0,13%	
14	0	37	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0,15%	
15	0	27	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0,11%	
16	0	25	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0,10%	
17	0	8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,03%	
18	0	14	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0,06%	
19	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0,07%	
20	0	17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0,07%	
21	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,01%	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
23	0	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,02%	
24	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,01%	
25	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
26	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
29	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,00%	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
31	0	0	0	0	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0,03%	
32	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0,04%	
33	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0,13%	
34	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0,22%	
35	0	1	0	0	109	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	0,41%	
36	0	1	0	0	151	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	160	0,59%	
37	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0,04%	
Total disparos en la zona	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	Total de disparos que provocaron errores (con respecto a 27200) es 25,74 % luego el 74,26% de disparos no produjeron error	
Nº total de cambios de estado	54	7758	880	795	15628	1138	422	231	2292	1677	1478	802	101	99	82	97	282	33816 (100%)		
Transición de "1" a "0"	54	6731	783	667	12686	738	156	12	1087	948	881	312	86	65	63	0	16	25285 (74,77%)		
Transición de "0" a "1"	0	1027	97	128	2942	400	266	219	1205	729	597	490	15	34	19	97	266	8531 (25,23%)		

Tabla 3.8. Recuento del total de errores y cambios de estado inducidos en la memoria CY mediante irradiación láser (800 nm, 153,6 pJ). Las zonas se corresponden con las de la figura 3.18.

- Un 25,74% del total de disparos realizados han provocado errores, independientemente del tipo de error (SEU o MCU). Luego un porcentaje considerable de disparos (74,26%) no provocaron error.
- Un 9,56% del total de disparos (2601) han provocado un error. Un 6,12% del total de disparos (1664) han provocado 2 errores...
- El número total de eventos, es decir, el número total de cambios de estado provocados, independientemente de cómo estén distribuidos (SEUs o agrupados en MCUs) es de 33816. De los cuales el 74,77% han sido transiciones de "1" a "0" y el 25,23% han sido transiciones de "0" a "1".

Con el anterior recuento de errores se calcula la sección eficaz a partir de la expresión [3.8], considerando:

El *Nº de Eventos* como el número total de transiciones o cambios de estado generados en la memoria e igual a 33816. Y el *Flujo del experimento* como el número total de disparos realizados (27200) entre el área total radiada (0,02720 cm²) e igual a 1000000 disp / cm².

Por tanto, la sección eficaz obtenida con el láser para la memoria CY, a 800 nm y 153,6 pJ, es:

$$\sigma_{CY,LÁSER} = 3,38 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2.$$

3.5.3.2 Memoria AS.

De la misma forma que para la memoria anterior se realiza el recuento del total de errores inducidos en la memoria AS (Tabla 3.9) de cuyo contenido se extrae:

- El número total de disparos realizado en la memoria Alliance han sido 29792, teniendo en cuenta las zonas en las que no se produjo error (zonas 5, 8, 12, 15, 20 y 21) y que no se muestran en la tabla. También se indica el número de disparos realizado en cada zona.
- Para cada columna *zona_nº*, se muestra el número de disparos realizados en esa zona que han producido un cierto número de errores, desde 0, lo cual indica que el disparo no provocó error, hasta un máximo de 10 ocurrido en zona_6, lo que indica que un disparo provocó 10 errores, o lo que es lo mismo, un MCU de tamaño u orden 10.
- Un 14,94% del total de disparos realizados han provocado errores, independientemente del tipo. Luego un porcentaje elevado de disparos (85,06%) no provocaron error.

Disparos realizados Nº de errores	zona_4	zona_6	zona_7	zona_9	zona_10	zona_11	zona_13	zona_14	zona_16	zona_17	zona_19	SUMA	Porcentaje con respecto al total de disparos ó 29792
	zona_4	zona_6	zona_7	zona_9	zona_10	zona_11	zona_13	zona_14	zona_16	zona_17	zona_19		
0	583	801	1166	1117	1631	666	1028	1533	631	1977	1498	12631	
1	156	57	298	176	33	63	222	16	159	50	263	1493	5,01%
2	108	144	186	259	16	332	237	7	169	59	266	1783	5,98%
3	13	188	27	103	0	333	65	2	55	4	59	849	2,85%
4	1	82	3	19	1	109	6	0	3	1	4	229	0,77%
5	0	14	1	5	0	38	0	0	1	0	1	60	0,20%
6	0	13	0	2	0	16	0	0	2	0	0	33	0,11%
7	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	0,01%
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0036%
Total disparos en la zona 861 1302 1681 1681 1681 1681 1558 1558 1558 1020 2091 2091												El porcentaje total de disparos que provocaron errores (con respecto a 29792) es 14,94 % luego el 85,06% de disparos no produjeron error	
Nº total de cambios de estado 415 1409 768 1116 69 2456 915 36 691 184 993												9052 (100%)	
Transición de "1" a "0" 166 723 384 577 41 1209 442 24 296 72 494												4428 (48,92%)	
Transición de "0" a "1" 249 686 384 539 28 1247 473 12 395 112 499												4624 (51,08%)	

Tabla 3.9. Recuento del total de errores y cambios de estado inducidos en la memoria AS mediante irradiación láser (800 nm, 132 pJ). Las zonas se corresponden con las de la figura 3.2.1.

- Un 5,01% del total de disparos (1493) han provocado un error, Un 5,98% del total de disparos (1783) han provocado 2 errores...
- El número total de cambios de estado producidos, independientemente de cómo estén distribuidos (individuales o agrupados en MCUs) es de 9052, de los cuales prácticamente la mitad han sido transiciones de "1" a "0" (48,92%) y transiciones de "0" a "1" (51,08%). Recordar que dentro de un MCU de dos errores en la zona_11, uno de esos errores era un MBU de dos transiciones, las cuales se han tenido en cuenta para el cómputo total aún siendo algo poco significativo con respecto al total de cambios de estado.

A partir de la expresión [3.8] se calcula el valor de la sección eficaz, considerando:

El *Nº de Eventos* como el número total de transiciones o cambios de estado generados en la memoria e igual a 9052. Y el *Flujo del experimento* como el número total de disparos realizados (29792) entre el área total radiada ($0,03036 \text{ cm}^2$) e igual a $981291,17 \text{ disp / cm}^2$.

Por tanto, la sección eficaz obtenida con el láser para la memoria AS, a 800 nm y 132 pJ, es:

$$\sigma_{AS,LÁSER} = 9,23 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2.$$

3.5.4 Topología. Análisis de MCUs e Interleaving.

Con el objetivo de obtener una posible estructura de la topología con la que está construida la memoria, esto es, cómo están colocadas las celdas físicamente, se analizan exhaustivamente tanto los MCUs obtenidos como las direcciones repetidas en las que se ha causado error.

En cuanto a los MCUs, éstos se analizan en función de las direcciones afectadas y el error cometido. Se pretende clasificar los MCUs en una serie de patrones que indicarán si las direcciones que se ven afectadas en dichos MCUs son adyacentes, próximas... y así poder extraer unas relaciones entre las direcciones contenidas en los MCUs. Este análisis posibilitará el discernir, del total de errores cometidos durante los ensayos con iones, cuáles son SEUs y cuáles MCUs.

En lo que concierne a las direcciones repetidas, se analizan las direcciones en las que se ha provocado error más de una vez, con distintos disparos, y el error provocado, con el objetivo de averiguar si se ha empleado la técnica de interleaving a la hora de construir la memoria.

El interleaving es una técnica que consiste en que celdas pertenecientes a la misma palabra de datos no estén situadas físicamente una al lado de otra en la memoria (Fig. 3.24). De esta forma, los bits de una palabra de datos son, normalmente, alineados a lo largo de la dirección WL ya que se accede a ellos poniendo WL a "1". Los correspondientes bits de una palabra son seleccionados mediante BL. La elección de la distancia de interleaving depende del número de celdas de memoria y de factores de diseño tales como la complejidad en la decodificación, consumo de potencia, tiempos de acceso o área de implementación. Si es necesario, sin embargo, se pueden implementar otros patrones de interleaving como "zig-zag" o "diagonal", aunque conllevan, al igual que el aumento de la distancia entre celdas, un incremento de los factores anteriores (Fig. 3.25) [NA08].

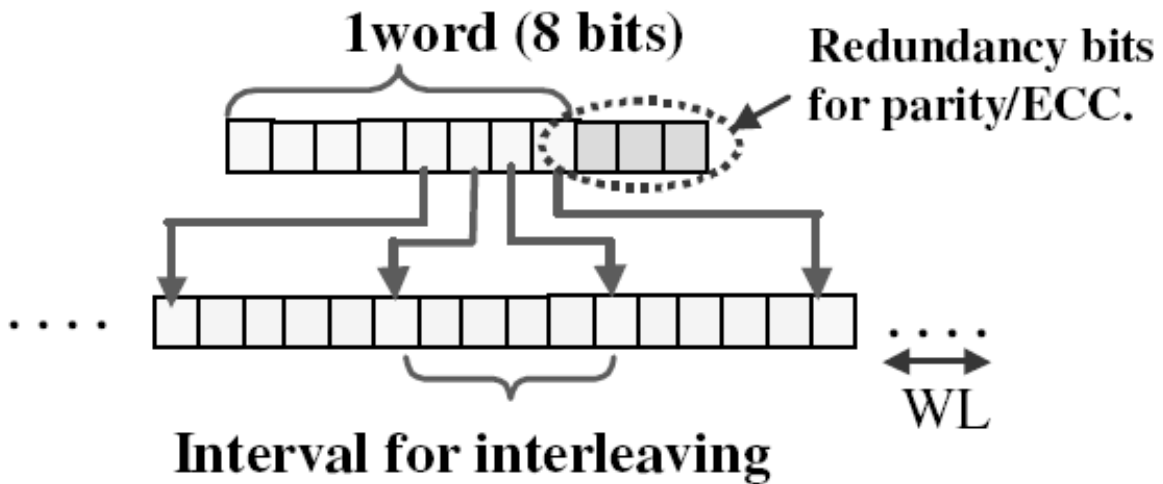


Fig. 3.24. Mitigación de MBUs mediante interleaving [NA08].

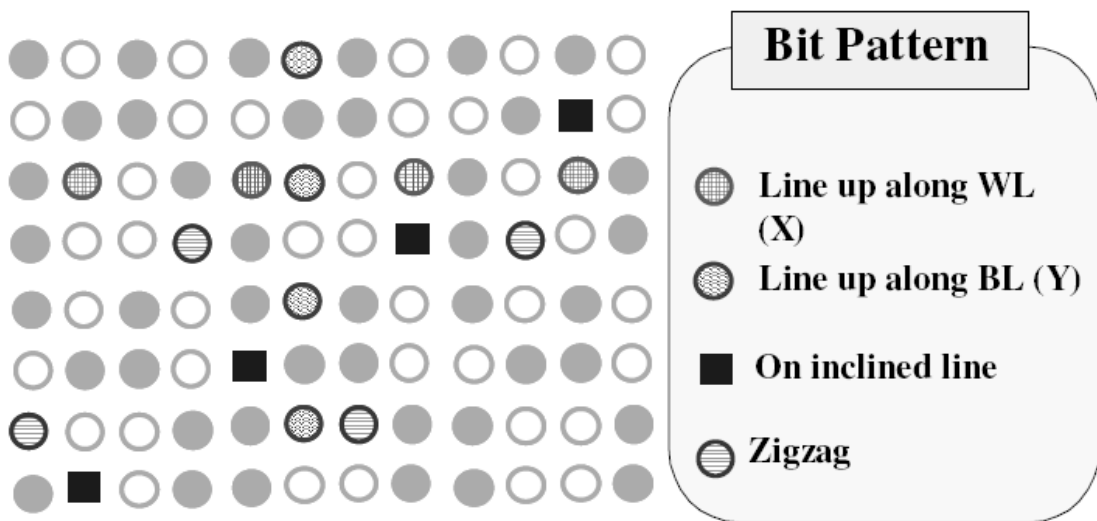


Fig 3.25. Diferentes patrones de interleaving para una misma palabra [NA08].

Mediante el empleo de esta técnica se consigue reducir el número de MBUs, a costa de aumentar la probabilidad de obtener MCUs. Este hecho es beneficioso en lo que respecta a los códigos de detección y corrección de errores, pues es preferible tener errores aislados en distintas palabras lógicas que juntos en la misma.

3.5.4.1 Memoria CY.

Para el análisis de los MCUs, se han clasificado las direcciones afectadas en éstos para cada zona (Fig. 3.18) de acuerdo a los siguientes tipos, y teniendo en cuenta que tanto la dirección como el error vienen dados en hexadecimal. En el caso de la dirección, ésta es de cuatro dígitos, donde los dos de la izquierda representan el byte alto y los dos de la derecha el byte bajo. En cuanto al error, éste viene representado por dos dígitos. La numeración de los tipos responde a la frecuencia con la que aparecen.

- TIPO 1: Dos direcciones son TIPO 1 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en una unidad en los dígitos 1º y 4º. Ejemplo: AAAA | BAA9.
- TIPO 2: Dos direcciones son TIPO 2 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en dos unidades en el dígito 1º. Ejemplo: AAAA | AAAC.
- TIPO 3: Dos direcciones son TIPO 3 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en una unidad en el dígito 1º. Ejemplo: AAAA | AAAB.
- TIPO 4: Dos direcciones son TIPO 4 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en seis unidades en el dígito 1º. Ejemplo: AAA9 | AAAF.
- TIPO 5: Dos direcciones son TIPO 5 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en una y tres unidades en los dígitos 1º y 4º respectivamente. Ejemplo: AAAA | DAA9.
- TIPO 6: Dos direcciones son TIPO 6 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en una y siete unidades en los dígitos 1º y 4º respectivamente. Ejemplo: 0000 | 7001.
- TIPO 7: Dos direcciones son TIPO 7 cuando de una dirección a otra el cambio se produce en diez y cuatro unidades en los dígitos 1º y 2º respectivamente. Ejemplo: 000A | 0040.
- RESTO: Aquí se engloban los MCUs cuyas direcciones afectadas no se pueden englobar en ninguno de los tipos anteriores.

Las tablas 1 y 2 del apéndice 1 muestran la clasificación exhaustiva, para cada zona, de los MCUs de acuerdo con los tipos definidos anteriormente. Sólo se muestran las zonas que contienen el tipo de MCU analizado.

Se han analizado los MCUs de hasta 8 errores, lo cual representa el 80% del total de MCUs. Se observa que conforme aumenta el número de errores éstos se cometen en menos zonas. Para MCUs de 9 errores en adelante éstos únicamente se encuentran en las zonas 2, 6, 7 y 10, encontrando MCUs de 13 errores o más únicamente en las zonas 2 y 6. Teniendo en cuenta lo anterior, y que los MCUs de orden 9 o superior también se pueden clasificar de forma análoga a como se ha hecho para los MCUs de hasta orden 8, el análisis realizado es suficiente para extraer las siguientes conclusiones acerca de cómo varían los dígitos de una dirección a otra de celdas físicamente cercanas en la memoria:

- Se han analizado un total de 3490 MCUs, de los cuales en 3345 (95,85%) los cambios en las direcciones se han producido en los dígitos primero y/o cuarto.
- Se ha observado durante el análisis que disparos consecutivos causan error en direcciones cercanas, desde el punto de vista lógico.
- En cada MCU, en el 93 % de los casos, cada MCU contiene en cada celda implicada el mismo error en los datos. Lo que quiere decir que los bits implicados se encuentran en celdas cercanas físicamente.

Luego, la memoria está configurada de manera que si en un determinado lugar hay una celda correspondiente a una determinada dirección, las celdas cercanas corresponderán a la misma posición de otra palabra de datos distinta. A su vez, estas celdas corresponderán a direcciones en las que cambia el primer o cuarto dígito con respecto a la primera, según los tipos vistos.

Del análisis realizado hasta el momento es posible deducir que en la topología de construcción de la memoria se ha empleado la técnica de interleaving, pues cuando se causa error en dos o más celdas con un único disparo estos errores son siempre MCUs. Luego celdas que están físicamente una al lado de otra en la memoria pertenecen a palabras de datos de direcciones diferentes.

A continuación se llevará a cabo un estudio sobre los errores provocados en las mismas direcciones. De esta forma, se analiza cómo están distribuidas físicamente las direcciones pertenecientes a la misma palabra de datos determinando la distancia de interleaving.

La tabla 3.10 muestra el número de direcciones que aparecen más de una vez y el porcentaje que representan con respecto al total. Entre paréntesis se indica la separación entre las direcciones en número de disparos, siendo un disparo equivalente a 10 μm en el eje Y. Una distancia de separación 0 indica que se ha cometido el mismo error en el mismo

bit de la palabra de datos, debido a disparos contiguos o cercanos. Por ejemplo: 2210 direcciones han aparecido dos veces, siendo la separación entre las direcciones que forman cada par de 5 disparos. O en el caso de direcciones cuadruplicadas, 220 han aparecido 4 veces, en dos de ellas se ha cometido el mismo error, y cada una las otras dos está separada 5 disparos con respecto a cualquiera de las otras. La tabla 3.11 muestra el número de direcciones que han aparecido repetidas seis o más veces y el porcentaje que representan con respecto al total de direcciones. El número total de direcciones en las que sólo se ha causado un error es 7726.

TOTAL DIRECCIONES DUPLICADAS: 3719 (22 %)					
(5)	(6)	(11)	(16)	(21)	(0)
2110	49	995	40	2	523
TOTAL DIRECCIONES TRIPLICADAS: 1648 (14,62 %)					
(5, 5, 5)			(5, 5, 11)		
1489			159		
TOTAL DIRECCIONES CUADRPLICADAS: 882 (9,72 %)					
(5, 5, 5, 5)			(0, 0, 5, 5)		
662			220		
TOTAL DIRECCIONES QUINTUPLICADAS: 196 (2,90 %)					
(0, 0, 5, 5, 5)			(0, 0, 0, 0, 5) o (0 ₁ , 0 ₁ , 0 ₂ , 0 ₂ , 5)**		
137			59		

* La separación entre las direcciones se expresa en disparos. 1 disparo \equiv 10 μ m en el eje Y.

** El mismo subíndice indica que se ha causado el mismo error. La separación entre los dos pares de direcciones en las que se ha causado el mismo error es de 5.

Tabla 3.10. Estudio de las direcciones repetidas en las que se ha causado error en la memoria CY.

Nº DE REPETICIÓN	Nº DE DIRECCIONES (% CON RESPECTO AL TOTAL)
6	152 (2,69)
7	108 (2,24)
8	303 (7,17)
9	368 (9,79)
10	152 (4,49)
12	43 (1,52)

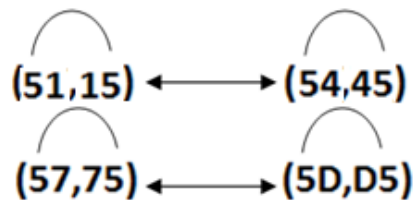
Tabla 3.11. Número de direcciones que han aparecido desde 6 hasta 12 veces y porcentaje que representan con respecto al total de direcciones.

A medida que las direcciones aparecen más veces repetidas éstas se encuentran en las zonas 2 ó 6 (zonas más sensibles) mayoritariamente. Por ejemplo, del total de direcciones cuadruplicadas o quintuplicadas, todas ellas aparecen en las zonas 2 ó 6, excepto 20 y 1

respectivamente. Todas las direcciones mostradas en la tabla 3.11 han aparecido en las zonas 2 ó 6.

Se observa que un porcentaje elevado de las direcciones repetidas están separadas 5 disparos, estando el resto una distancia muy similar (6 disparos) o pudiéndose considerar múltiplo de 5 (11, 16 ó 21 disparos). Las direcciones que se han repetido 6 veces o más únicamente se han dado en las zonas 2 y 6 perteneciendo éstas a la región más sensible. Cuando una dirección aparece repetida un gran número de veces, es frecuente que aparezca el mismo error, pues únicamente se han encontrado hasta 4 errores diferentes para la misma dirección.

Además, los errores que aparecen en las direcciones repetidas vienen dados por la siguiente combinación:



Cuando una dirección está duplicada, los errores son los que aparecen entre paréntesis. Si la repetición es mayor (pero hasta cuatro errores diferentes) se relacionan según las flechas.

Se puede afirmar que la memoria presenta la técnica de interleaving como mecanismo de protección de errores, lo cual es algo habitual por los fabricantes. Las celdas están distribuidas de forma lineal a lo largo del eje Y con una periodicidad o distancia de interleaving, medida experimentalmente, de 50 μm .

A partir de todos los errores provocados en la memoria se puede conocer la situación sobre el mapa de las direcciones en las cuales se ha cometido error. La tabla 3 del apéndice 1 muestra el rango de direcciones en las que se ha causado error para las diferentes zonas. Entre paréntesis se muestra el número de disparo que causó un error en esa dirección.

Conociendo la dirección, zona y disparo se puede localizar perfectamente sobre el layout de la memoria una celda de la palabra de datos perteneciente a dicha dirección. Conociendo el error provocado se sabe qué celda exactamente se encuentra físicamente en ese punto.

El hecho de que en las zonas 2 y 6 se hayan causado MCUs de gran tamaño y que se haya tocado un amplio rango del total de direcciones, siendo éstas coincidentes con la región extremadamente sensible, refuerza la posibilidad de que haya podido ocurrir MLUR durante el barrido con láser de esas zonas. Además esto dificulta la clasificación en patrones de las direcciones englobadas en los MCUs y se tiene mucha información redundante en el análisis del interleaving. Como se verá, este análisis resulta mucho más sencillo para la memoria AS.

3.5.4.2 Memoria AS.

De forma análoga a la memoria anterior se han clasificado todas las direcciones afectadas en los MCUs para cada zona (Fig. 3.21) de acuerdo a los siguientes tipos definidos abajo. Tanto la dirección como el error vienen dados en hexadecimal. La primera está formada por cuatro dígitos, donde los dos de la izquierda representan el byte alto y los dos de la derecha el byte bajo. En cuanto al error, éste viene representado por dos dígitos.

- ADYACENTES BYTE BAJO: Dos direcciones son adyacentes byte bajo cuando son consecutivas en el primer dígito. Ejemplo: AAAA | AAAB.
- ADYACENTES BYTE ALTO: Dos direcciones son adyacentes byte alto cuando son consecutivas en el byte alto de la dirección o tercer dígito. Ejemplo: AAAA | ABAA.
- RESTO: Aquí se engloban los MCUs cuyas direcciones afectadas no responden con ninguno de los dos casos anteriores.

La tabla 4 del apéndice 1 muestra la clasificación de los MCUs en función de su tamaño y para cada zona. Sólo se muestran las zonas que contienen el tipo de MCU analizado. Entre medias de la tabla se explica y aclara con un ejemplo el significado de la clasificación realizada. Del recuento realizado se extrae que:

- En el 99,08% de todos los MCUs provocados en la memoria AS, los cambios de una dirección a otra dentro del MCU se han producido en los dígitos primero (adyacentes byte bajo) y tercero (adyacentes byte alto). Luego, un porcentaje poco significativo de MCUS han sido englobados en “resto”.
- Disparos consecutivos causan error en direcciones consecutivas o cercanas, desde el punto de vista lógico.
- En cada MCU, las direcciones que son adyacentes byte bajo el error producido es el mismo, mientras que en las que son adyacentes byte alto, el error producido es diferente. En cada MCU de los englobados en “resto”, cuando el cambio de una dirección a otra se produce en los dígitos segundo o cuarto, o cuando son

adyacentes byte alto en el que el cambio producido es en más de una unidad, el error es diferente. Mientras que cuando son direcciones adyacentes byte bajo en el que el cambio producido es en más de una unidad el error es el mismo.

- En cada MCU, cuando el error provocado en las direcciones es diferente, éstos siempre van asociados en los pares: (15, D5), (45, 75), (51, 5D) y (54, 57).

Por tanto, la memoria está configurada de forma que si en un determinado lugar hay una celda perteneciente a una determinada dirección, las celdas cercanas pertenecerán a direcciones en las que cambia el primer o tercer dígito con respecto en una unidad. Afirmando que, si cambia el primer dígito, siendo adyacentes byte bajo, las celdas pertenecen a la misma posición dentro de la palabra de datos. Mientras que si cambia el tercer dígito, siendo adyacentes byte alto, las celdas pertenecen a una posición diferente en la palabra de datos, pero siempre de acuerdo a los pares indicados anteriormente.

Al igual que para la memoria CY, se ha utilizado la técnica de interleaving en la construcción de la memoria, pues cuando se causa error en dos o más celdas con un único disparo estos errores son siempre MCUs (excepto un único caso en el que se causó un MBU dentro de un MCU de dos errores).

TOTAL DIRECCIONES DUPLICADAS: 2063 (45,58%)					
(9)	(8)	(10)	(26)	(17)	(M)
1638	32	30	227	118	18
TOTAL DIRECCIONES TRIPLICADAS: 573 (18,99%)					
(9, 9, 9)		(0, 0, 9)		(17, 17, 9)	
331		21		221	
TOTAL DIRECCIONES CUADRUPLICADAS: 111 (4,91%)					
(9, 9, 9, 9)			(0, 0, 9, 9)		
102			9		
TOTAL DIRECCIONES QUINTUPLICADAS: 8 (0,44%)					
(0, 0, 0, 0, 9) o (0 ₁ , 0 ₁ , 0 ₂ , 0 ₂ , 9)**					
8					
TOTAL DIRECCIONES SEXTUPLICADAS: 4 (0,27%)					
(0, 0, 0, 0, 0, 0) o (0 ₁ , 0 ₁ , 0 ₂ , 0 ₂ , 0 ₃ , 0 ₃)**				(0, 0, 0, 0, 9, 9)	
3				1	

* La separación entre las direcciones se expresa en disparos. 1 disparo \equiv 10 μ m en el eje Y.

** El mismo subíndice indica que se ha causado el mismo error. La separación entre los pares de direcciones en las que se ha causado el mismo error es de 9.

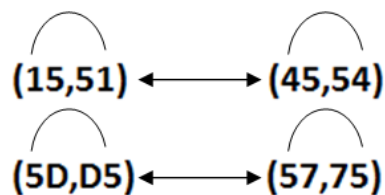
Tabla 3.12. Estudio de las direcciones repetidas en las que se ha causado error en la memoria AS.

Con el objetivo de analizar cómo están distribuidas físicamente las direcciones pertenecientes a la misma palabra de datos y hallar la distancia de interleaving, a continuación se llevará a cabo un estudio sobre los errores provocados en las mismas direcciones.

La tabla 3.12 muestra el número de direcciones que aparecen repetidas y el porcentaje que representan con respecto al total. Entre paréntesis se indica la separación entre las direcciones en número de disparos, siendo un disparo equivalente a 10 μm en el eje Y. Una distancia de separación de 0 indica que se ha cometido el mismo error en el mismo bit de la palabra de datos, debido a disparos contiguos o cercanos. Por ejemplo: 1638 direcciones han aparecido dos veces, siendo la separación entre las direcciones que forman cada par de 9 disparos. O en el caso de direcciones triplicadas, 21 han aparecido 3 veces, en dos de ellas se ha cometido el mismo error, estando la otra separada 9 disparos con respecto a cualquiera de las otras. El máximo número de veces que se ha causado error en una misma dirección ha sido de 6. En 2699 direcciones únicamente se ha causado error una vez.

Del análisis anterior se extrae que un porcentaje muy elevado de las direcciones repetidas están separadas 9 disparos, estando el resto separadas una distancia muy similar (8 ó 10 disparos) o pudiéndose considerar múltiplo de 9 (17 ó 26 disparos). Se concluye que la memoria presenta la técnica de interleaving, estando las celdas distribuidas de forma lineal a lo largo del eje Y con una periodicidad, o distancia de interleaving, medida experimentalmente de 90 μm .

Además, los errores que aparecen en las direcciones repetidas vienen dados por la siguiente combinación:



Cuando una dirección está duplicada, los errores son los que aparecen entre paréntesis. Si aparecen más (habiéndose encontrado hasta cuatro errores diferentes) se relacionan según las flechas.

A partir de todos los errores provocados en la memoria se puede conocer la situación sobre el mapa de las direcciones en las cuales se ha cometido error. La tabla 5 del apéndice 1 muestra el rango de direcciones en las que se ha causado error para las diferentes zonas.

Entre paréntesis se muestra el número de disparo que causó un error en esa dirección. Con toda esta información es posible posicionar físicamente sobre el lay-out de la memoria una celda perteneciente a una palabra de datos de una determinada dirección.

3.5.4.3 Topología.

A partir del análisis anterior, las memorias que nos ocupan siguen, aparentemente, una estructura de acuerdo con la mostrada en la figura 3.26.

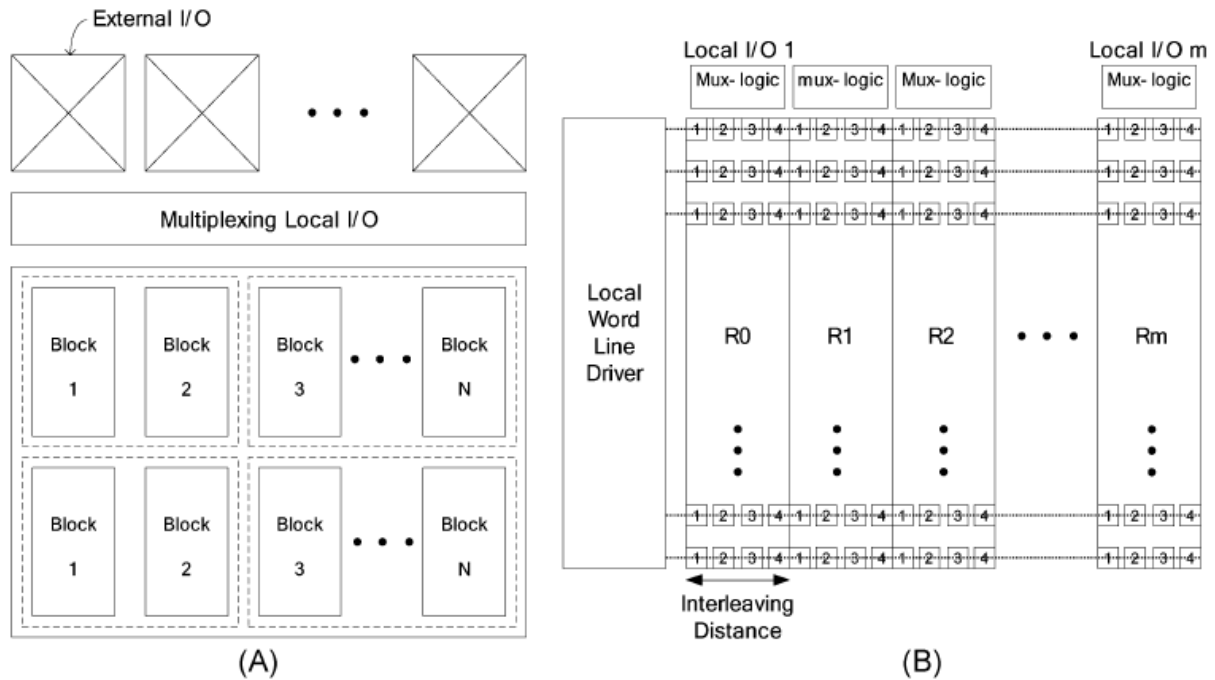


Figura 3.26. Estructura interna de las memorias [BA09].

Es habitual dividir la estructura en bloques, mediante los cuales se construye la estructura jerárquica de la memoria (Fig. 3.26. (A)). La figura 3.26 (B) muestra un bloque o nivel más bajo de hardware, el cual usa una línea de palabra para cada fila y dos líneas de bits por columna. Típicamente se usa un controlador de línea de palabra local para accionar filas. La línea de palabra sólo acciona los bits en la misma palabra cuando la distancia de interleaving es 1, pues todas las celdas de la misma palabra de datos están físicamente una al lado de otra. La distancia de interleaving es la separación física entre los bits de una misma palabra de datos. El grupo de celdas entre la distancia de interleaving, por ejemplo las celdas de la región R0, pertenecen al mismo bit o posición de palabras de datos distintas. El ejemplo que muestra la figura 3.26 (B) es para una distancia de interleaving de 4, siendo la de las memorias estudiadas la que se determinó en los respectivos análisis. Al ser determinada experimentalmente, averiguando la distancia entre disparos que causan un error distinto en la misma palabra de datos, ésta se da en μm .

3.6 CONCLUSIÓN.

A lo largo del presente capítulo se ha detallado todo el proceso necesario para testear las memorias CY y AS mediante láser con el objetivo de obtener su mapa de sensibilidad y otras características como energías umbral, sección eficaz o topología.

A partir de los mapas de sensibilidad realizados para las dos memorias se determinan las zonas más sensibles o aquellas más susceptibles a la generación de fallos. Una vez identificadas éstas, el experimento se centra en la realización de disparos a diferentes energías escribiendo la memoria con diferentes patrones para estudiar la evolución de los errores y la dependencia con respecto al patrón. Este análisis permite definir unas energías umbral, dependientes de la localización y patrón escrito, que caracterizan las transiciones desde SEU a MCU pero también a MLUR y MLUC. Hasta hoy, esta es la primera vez que se detecta la transición entre tipos de errores leves en puntos específicos y se relacionan con la energía del pulso láser, y por tanto, con el número de bits afectado.

Fenómenos muy similares a estos dos últimos tipos de error han sido puestos de manifiesto en la literatura [HA12, PU06] para una memoria SRAM de 90 nm, del fabricante Cypress, sometida a radiación de neutrones en aceleradores de partículas. También para memorias SRAM de 130 nm [TA07]. En estos artículos únicamente se habla de SEUs, MCUs y MLUs sin una clara comprensión del fenómeno. Sin embargo, nuestros resultados pueden ayudar a explicar la física de estos tipos de errores leves en SRAMs con tecnología CMOS. Ser capaces de inducirlos mediante láser tiene varias ventajas. En primer lugar, el hecho de poder reproducirlos tantas veces como se quiera y saber exactamente el punto del lay-out donde se producen, ayuda a tanto a caracterizar sus efectos más profundamente como a determinar las causas que lo producen. Y en segundo lugar, en lo relativo al coste económico y de tiempo.

La transición entre MLUR y MLUC también puede ser una manifestación del “efecto dominó”, estudiado en SOI SRAMS [DO12] pero aplicable a cualquier circuito integrado (CI). Los latch-ups aparecen cuando la carga se deposita en nodos específicos del CI activándose un tiristor parásito. Por efectos de calentamiento o superpoblación de portadores, las celdas adyacentes también pueden ser activadas conduciendo a un latch-up destructivo. Sin embargo, es posible que en nuestras memorias, sea necesario activar un determinado número umbral de celdas para que ocurra MLUC.

Estos hechos son muy importantes ya que manifiestan que se ha conseguido emular mediante láser fenómenos que aparecen en los test de radiación de iones y nos alienta a

seguir trabajando para intentar conseguir la equivalencia entre la energía del láser y el ion que causa los mismos efectos.

Aunque este análisis da indicios de que la transición de "1" a "0" es más favorable que la contraria, esta dependencia se estudiará más profundamente en el capítulo 6.

A partir de todos los errores generados en el barrido de las memorias se calcula la sección eficaz de las mismas para la energía de radiación. Además, se demuestra la utilidad del láser en ingeniería inversa, ya que, del análisis de los MCUs generados y de las direcciones repetidas se obtiene una aproximación de la topología de la memoria. La clasificación de los MCUs, en función de las direcciones que los componen, permitirá identificar el número de MCUs causado cuando se somete a estas memorias a radiación con iones.

Es de destacar que, tanto para la realización de los mapas de sensibilidad como para el posterior análisis de los errores obtenidos, la correcta elección de la energía de radiación es un factor muy importante, pues sólo se tiene información cuando se causa error. Con una energía de radiación baja se causarían pocos errores no pudiéndose obtener mapas de sensibilidad completos y fiables. También resultaría imposible realizar el posterior análisis de los MCUs e interleaving que conduce a la obtención de la topología de la memoria. Por el contrario, irradiando con una energía demasiado alta se dificultaría considerablemente la tarea de análisis de los errores. Se obtendrían MCUs de gran tamaño, y por tanto, muchos cambios en sus direcciones e información redundante. Esto último se observa en la memoria CY con las zonas extremadamente sensibles, donde por ejemplo, los cambios en las direcciones dentro de los MCUs son mayores que en la memoria AS. O en el análisis del interleaving realizado, donde se han encontrado direcciones que aparecían hasta 12 veces, sin embargo, no se encuentran más de 4 errores diferentes para la misma dirección. Como posible solución a esto se podría haber bajado la energía, pero en el resto de zonas no se provocarían los errores suficientes como para realizar el mapa de sensibilidad, identificar el patrón de construcción de la memoria o dar un rango de direcciones.

CAPÍTULO 4

EFFECTO DE LA RADIACIÓN NATURAL

INTRODUCCIÓN.

Aunque nuestra atmósfera sirve de filtro para las radiaciones cósmicas evitando que la mayoría de ellas llegue hasta la superficie terrestre, hay algunas partículas que logran alcanzarla pudiendo, y de hecho lo hacen, afectar al funcionamiento de distintos tipos de dispositivos electrónicos.

La primera observación documentada de SEUs (*Single Event Upset*) en la atmósfera fue realizada a principios de los 90, aproximadamente 20 años más tarde que la primera observación en el Espacio. Desde entonces se han realizado varios trabajos en los que se demuestra que los neutrones son los principales responsables de los SEUs en ambientes atmosféricos.

Los casos mencionados en la introducción son sólo algunos ejemplos de problemas encontrados y demostrados en misiones espaciales, sin embargo, estos fenómenos no sólo ocurren fuera de nuestra atmósfera. El flujo de neutrones a 12.000 m de altitud es unas 300 veces superior que al nivel del mar, en consecuencia, al operar dispositivos electrónicos a las altitudes típicas de vuelo, se generan y se pueden detectar más errores que en la superficie. Esta tendencia va en aumento debido, por una parte, a la sustitución en los aviones modernos de muchos de los sistemas de medición e información por aviónica de mucha complejidad electrónica. Por otra, a medida que los dispositivos MOS van reduciendo su tamaño, la sensibilidad de los dispositivos electrónicos a las radiaciones naturales (principalmente los neutrones de la atmósfera) o las impurezas radioactivas inducidas en el interior del chip (fuentes de partículas alfa) se ha visto enormemente incrementada. Por lo menos lo suficiente para ser considerado el mayor problema de fiabilidad por distintos fabricantes de semiconductores.

Hasta hace relativamente poco tiempo, con tecnologías superiores a 90 nm, los problemas se debían principalmente a SEUs. Sin embargo, al crear circuitos por debajo de

la cota de los 90 nm, dichos eventos pasaron a convertirse en un problema mayor, agravándose considerablemente a partir de tecnologías de 45 nm, ya que, empezaron a detectarse MBUs (*Multiple Bit Upset*). Las memorias integradas actuales, cada vez más pequeñas, se vuelven más sensibles a SEUs debido a la reducción de la carga crítica empleada para almacenar la información lógica. Por ejemplo, en tecnologías de 65 nm, se puede conseguir un cambio de bit o bit-flip con una tensión de aproximadamente 1,1 V. En tecnologías de 45 nm dicha tensión es de 0,9 V.

En estos momentos, debido a los niveles de integración actuales, los errores no sólo ocurren a nivel de bits o de celdas independientes, si no que empiezan a surgir errores a nivel lógico. Éstos afectan al correcto funcionamiento de una puerta lógica completa y no sólo a una celda circuital en la que se almacena información. Por tanto, no sólo afectan a la integridad de los datos almacenados en un sistema, como por ejemplo el código ejecutable de una FPGA, si no que afectan directamente al sistema en sí. Es decir, al funcionamiento de las puertas lógicas con las que se realiza el control de los módulos, funcionamiento de las ALUs, memorias, etc.

Actualmente los SEUs se producen en múltiples campos de la tecnología [AM12]:

- Aviónica: Los SEUs se experimentan en la electrónica de los aviones debido al mayor flujo de radiaciones a las que están sometidos. La mayor parte del esfuerzo se centra en monitorizar el ambiente y analizar los sistemas operacionales por SEUs. Se han medido tasas de error de 1 por cada 200 horas de funcionamiento en pilotos automáticos. Este es un valor muy superior a las tolerancias requeridas a los fabricantes de aviones (10^{-6} por hora) y pueden tener importantes consecuencias si el vuelo dura varias horas.
- Trenes: los componentes electrónicos de los trenes son mucho mayores debido a que tienen que soportar altas cargas, tanto de corriente como de tensión. Por ello, tienen una alta sensibilidad a efectos inducidos por neutrones, incluso a nivel del mar, donde los flujos son menores. La experiencia demuestra que cada vez es más difícil mantener la tasa de errores por debajo de los 10^{-8} - 10^{-7} por hora de operación, para poder cumplir los requisitos de seguridad y funcionamiento de toda la red ferroviaria.
- Automóviles: debido al alto número de dispositivos electrónicos vitales funcionando al mismo tiempo los requisitos de SEU por dispositivo se tienen que mantener muy bajos: 10^{-6} - 10^{-8} por hora se requieren para la dirección y el sistema de freno. Los

análisis muestran una respuesta crítica a los efectos debidos a neutrones tal y como se mencionó antes para los trenes.

- **Terapia médica e instrumentación:** El uso de hadrones (protones, neutrones e iones pesados) es un área de estudio importante para terapias contra el cáncer, debido a que estas partículas son más eficientes comparadas con los rayos X y los rayos γ . Los sistemas electrónicos empleados en los centros en los que se pueden llevar a cabo estas terapias tienen que soportar los efectos de estas partículas. El problema a solventar es de la misma naturaleza que para el caso de las partículas atmosféricas y es necesario encontrar una solución para un uso seguro de estas terapias. También se ha visto que los marcapasos se ven afectados por estos efectos.
- **Aplicaciones de seguridad:** La mayor parte de las aplicaciones, desde la gestión del tráfico aéreo hasta el control de plantas nucleares, requieren dispositivos electrónicos para su regulación, los cuales deben cumplir unos requisitos de errores muy bajos debido al alto riesgo de su operación. En muchos casos es necesario que los dispositivos utilizados estén certificados como tolerantes a la radiación.

Algunos datos que demuestran la importancia de estos sistemas son los siguientes: en la Unión Europea más de 400 millones de personas se desplazan en más de 200 millones de coches, autobuses y camiones, siendo de 300 millones en el continente americano, incluyendo 221 millones en los Estados Unidos. De media unas 100.000 personas se están desplazando en avión en cualquier momento del día en todo el mundo, etc.

A continuación se presentan algunos casos relevantes en la actualidad, detectados a nivel del suelo o en aviones:

1. En 1992 el sistema de despegue de ciertos modelos de aviones militares tuvo que ser sustituido debido a problemas con SEUs en sus memorias SRAM [IN2].
2. En el año 2000, la caída de varios servidores Unix de Sun alrededor de los EEUU fue debida a SEUs en sus memorias caché. El coste fue de varios millones de dólares, afectando al correcto funcionamiento de páginas tan importantes como Amazon y eBay a nivel mundial [FOR].
3. En 2003, durante las elecciones belgas, un SEU afectó al decimotercer bit de una memoria de un centro de voto, indicando que se habían realizado 4096 votos más a un candidato. El error fue detectado porque el número total de votos excedía la población total [LIN] y [WIKb].

4. En 2005, después de 102 días de funcionamiento, el ASC Q Cluster Supercomputer mostró 7170 errores en sus 81 GB de memoria caché, de los que 243 supusieron el bloqueo de programas o del sistema operativo [LIN].
5. En 2005, varios hospitales a nivel mundial detectaron errores y problemas en las memorias internas de marcapasos instalados en pacientes con problemas de corazón. Dichos errores, se demostró posteriormente, fueron debidos a SEUs. Este estudio es independiente del anterior mencionado en (2), pero demuestra la amplia preocupación de la comunidad médica con respecto al correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos implantados en pacientes [LIN].
6. En 2007, durante la realización de unos experimentos en el CERN relativos al proyecto Opera que realizaba experimentaciones con neutrinos, tuvieron que suspender el funcionamiento del centro debido a problemas con la electrónica de los sistemas de control. Dichos problemas fueron inducidos por neutrones que provocaron SEUs [LIN] y [INF].
7. Qantas 72 [ATS]. El 7 de octubre de 2008, un vuelo de la compañía australiana Qantas despegó desde Singapur hacia Perth (Australia). El avión era un Airbus 330-200 con matrícula VH-QPA. Durante el transcurso del vuelo en crucero, a una altitud de unos 11.200 m, uno de los ADIRUs (*Air Data Inertial Reference Unit*, instrumentos electrónicos que facilitan todas las lecturas de los sensores del avión a las pantallas de la cabina de vuelo) comenzó a fallar intermitentemente. Durante el transcurso del vuelo, repentinamente, el piloto automático, que antes había dado algunos fallos, realizó una picada en vuelo, debido a las lecturas incorrectas del indicador AOA (*Angle Of Attack*), que da la posición relativa del avión con respecto al horizonte. La orden del piloto automático duró algo menos de 2 segundos, pero fue suficiente para que 110 de los 303 pasajeros y 9 de los 12 tripulantes sufrieran lesiones de mayor o menor consideración. 12 de los heridos fueron de gravedad y otros 39 recibieron algún tratamiento en el hospital. El avión aterrizó sin problemas tras declarar emergencia en el aeropuerto de Learmonth, en el oeste de Australia. La investigación concluye que, entre otras posibles causas, los problemas electrónicos pueden haber sido producidos por errores SEU.
8. Problemas de Aceleración Repentina (SUA – *Sudden Unintended Acceleration*) en vehículos Toyota [USA, WIKa]: en febrero de 2010, el fabricante de vehículos japonés Toyota realizó una revisión en varios de sus modelos por problemas detectados de aceleración repentina no intencionada. Dichos problemas fueron causantes de al menos 52 muertes en varios accidentes y resultaron en costes de

varios cientos de millones de dólares a la compañía, además de una caída considerable (de hasta casi un 10%) en sus ventas. El problema fue detectado en el sistema que controlaba la aceleración del vehículo, que era sensible a SEUs, de forma que se producían aceleraciones descontroladas.

9. Durante las terapias de tratamiento para enfermos de cáncer, principalmente radioterapia, se han observado errores en los instrumentos, tanto de medición como de control de los medicamentos, debidos a SEUs. Durante un tratamiento con radioterapia la fluencia de neutrones a los que se ve sometido el paciente van desde los $7 \cdot 10^7$ hasta los $4,3 \cdot 10^9$ n/(cm²·h), teniendo el espectro una energía de entre 10 y 20 MeV. La fluencia ambiental, sin embargo, aunque sea muy variable suele ser de valores próximos a los 4 n/(cm²·h). Los errores documentados son de lo más variado, como por ejemplo, reinicios del equipamiento médico, problemas con las fuentes de alimentación, reinicios en las bombas de abastecimiento, errores en dispositivos implantados... [LIN].

Como se puede ver, el problema en la actualidad no es meramente teórico sino que es algo real y de una importancia vital. Está demostrado que los dispositivos electrónicos, tales como las memorias de acceso aleatorio (RAMs), son sensibles a partículas de alta energía existentes en la atmósfera. Los circuitos de memoria almacenan información de muy diversas formas, pero el objetivo final es siempre el mismo: poder recuperar dichos datos transcurrido cierto tiempo (a veces son apenas milisegundos, otras veces pueden pasar años). Es, por tanto, crucial la realización de estudios de integridad de datos en memorias, su fiabilidad, durabilidad, tasas de errores, etc.

El objetivo de este capítulo es el estudio de cómo pueden afectar las radiaciones cósmicas al correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos, intentando caracterizar el comportamiento de las memorias SRAM cuando se ven sometidas a dichas radiaciones. Para ello se llevarán a cabo experimentos en vuelo, construyendo un banco de memorias portátil formado por 32 memorias SRAM controladas por un PIC. La idea es que, al conectarse el banco a una fuente de alimentación, el microcontrolador escriba un patrón en las memorias SRAM y, cada cierto tiempo, compruebe que la información leída en dichas memorias SRAM es la misma que se había escrito. En caso de encontrarse un error, se almacena la información asociada al mismo, es decir, hora a la que se ha producido, memoria en la que se ha detectado, dirección de memoria y valor leído, para posteriormente corregirlo escribiendo en la dirección el valor que se debería haber leído y continuar haciendo comprobaciones.

Con estos tests se calcula la tasa de error en un dispositivo sometido a los rayos cósmicos naturales mientras se monitoriza de forma continua. La mayor desventaja consiste en el pequeño flujo de partículas, que obliga a aumentar el número de componentes bajo prueba y la duración del experimento. Sin embargo, tienen la ventaja de que son los tests con los resultados más realistas. Asimismo, ayudan a comprender estos fenómenos así como los parámetros y circunstancias de las que dependen: tensiones de alimentación, temperatura, patrones de escritura, etc. Y, sobre todo, a descubrir la tasa de sucesos múltiples a medida que aparecen nuevas generaciones de memorias SRAM.

4.1 NUESTRA ATMÓSFERA.

La atmósfera es la capa de gas que rodea a la Tierra absorbiendo en la capa de ozono parte de la radiación solar y reduciendo las diferencias de temperatura entre el día y la noche. Los gases son atraídos por la gravedad del planeta manteniéndose en ella debido a que ésta es suficiente y la temperatura de la atmósfera es baja. La altura de la atmósfera de la Tierra es de más de 100 km, aunque más de la mitad de su masa se concentra en los seis primeros km y el 75% en los primeros 11 km de altura desde la superficie planetaria. Casi la totalidad del aire, un 97 %, se encuentra a menos de 30 km de altura, teniendo más del 75% en la troposfera, en los primeros 11 km, donde el aire forma una mezcla de gases bastante homogénea.

Los principales componentes de la atmósfera son [AM12]:

- *Nitrógeno*: constituye el 78% del volumen del aire. Está formado por moléculas que tienen dos átomos de nitrógeno. Es un gas inerte, es decir, que no suele reaccionar con otras sustancias.
- *Oxígeno*: representa el 21% del volumen del aire. Está formado por moléculas de dos átomos de oxígeno.
- *Dióxido de carbono*: está constituido por moléculas de un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno. Representa el 0,03% del volumen del aire y participa en procesos muy importantes. Las plantas lo necesitan para realizar la fotosíntesis y es el residuo de la respiración y de las reacciones de combustión. Este gas, muy por detrás del vapor de agua, ayuda a retener el calor de los rayos solares y contribuye a mantener la temperatura atmosférica dentro de unos valores que permiten la vida.
- *Ozono*: es un gas minoritario que se encuentra en la estratosfera. Sus moléculas tienen tres átomos de oxígeno. Es de gran importancia para la vida en nuestro planeta, ya que, su producción a partir del oxígeno atmosférico absorbe la mayor parte de los rayos ultravioleta procedentes del Sol.

- *Vapor de agua*: se encuentra en cantidad muy variable y participa en la formación de nubes. Actúa como regulador térmico del planeta.
- *Partículas sólidas y líquidas*: en el aire se encuentran muchas partículas sólidas en suspensión, como por ejemplo, el polvo que levanta el viento o el polen. Estos materiales tienen una distribución muy variable, dependiendo de los vientos y de la actividad humana. Entre los líquidos, la sustancia más importante es el agua en suspensión que se encuentra en las nubes.
- *Otros gases*: del resto de los gases de la atmósfera, el más abundante es el argón (Ar), que contribuye en 0,9% al volumen del aire. Es un gas noble que no reacciona con ninguna sustancia.

La capa más cercana a la superficie terrestre es la troposfera siendo ésta donde se desarrolla la vida y ocurren la mayoría de los fenómenos meteorológicos, de ahí que su estudio tenga un gran interés. Tiene unos 8 km de espesor en los polos y alrededor de 15 km en el ecuador. En esta capa la temperatura disminuye con la altura alrededor de 6,5 °C por kilómetro. Contiene alrededor del 75% de la masa gaseosa de la atmósfera y casi todo el vapor de agua.

La variación con la altura de la presión atmosférica es lo que se conoce como Ley barométrica [AM12]. No es lo mismo la variación de la presión con la altura en un líquido como el océano que en un gas como la atmósfera, y la razón estriba en que un líquido no es compresible y por tanto su densidad permanece constante.

Así, en el océano rige la fórmula:

$$P = \rho * g * h \quad [4.1]$$

Siendo g el campo gravitatorio terrestre y ρ y h la densidad y altura del líquido respectivamente. Por lo que si la profundidad h se hace doble la presión se duplica.

Para los gases ideales, la ecuación que describe la relación entre la presión (P), el volumen (V), la temperatura (T) y la cantidad en moles (n) del gas es:

$$P * V = n * R * T = \frac{m}{M} * R * T \quad [4.2]$$

Donde R la constante universal de los gases ideales. Expresando n como la relación entre la masa de gas (m) y su unidad de masa molecular (M), se puede obtener la densidad del gas como:

$$\rho = \frac{P * M}{R * T} \quad [4.3]$$

En una atmósfera isoterma la presión varía con la altura siguiendo la ley:

$$P = P_0 * e^{-\frac{M * g * (h - h_0)}{R * T}} \quad [4.4]$$

Donde M es la masa molecular, g el campo gravitatorio terrestre, $h - h_0$ es la diferencia de alturas entre los niveles con presiones P y P_0 , T es la temperatura absoluta media entre los dos niveles y R la constante universal de los gases ideales.

Llegados a este punto, puede verse perfectamente que la variación de la presión atmosférica para un fluido compresible como es la atmósfera varía de forma exponencial negativa. Esto mismo ocurre con la densidad, de forma que la mayor parte de la capa atmosférica se concentra en la región más próxima a la Tierra. Esto quiere decir que al aumentar la altura a la que nos encontramos, como ocurre en el caso de estar a bordo de un avión, estaremos en un medio con una atmósfera a menor presión y de menor densidad, lo que hará que dicha capa atmosférica absorba una menor cantidad de radiaciones cósmicas. Por tanto, tanto nosotros como todos los dispositivos electrónicos que tengamos, estarán sometidos a una mayor cantidad de radiaciones cósmicas que la que sufrirían si se encontraran en la superficie.

4.1.1 Radiación ambiental a 10.000 m de altitud.

El principal componente de los rayos cósmicos son los protones, pudiéndose encontrar también partículas alfa e iones pesados. Los neutrones apenas están presentes en las radiaciones cósmicas debido a su pequeño tiempo de vida, siendo un producto secundario de la interacción de las radiaciones cósmicas con la atmósfera terrestre, principalmente con las partículas de nitrógeno y oxígeno.

Sin embargo, y debido a que el cuerpo de los aviones modernos está hecho de aluminio con un grosor mayor que 1 mm y el rango de penetración de los protones es menor para energías de hasta 10 MeV, es de esperar que los protones apenas generen SEUs. Los iones pesados también pueden contribuir a los eventos. Pero, además de que su presencia en los rayos cósmicos no es muy significativa, tienen una vida media corta, luego es de esperar que a 10.000 m de altitud la importancia de los iones pesados en la generación de eventos sea mínima.

Por tanto, lo previsible es que los neutrones sean los principales responsables de los SEUs observables. De hecho, los neutrones han sido considerados en los últimos 15 años como los principales causantes de incidentes en los dispositivos electrónicos instalados tanto en aviones como trenes.

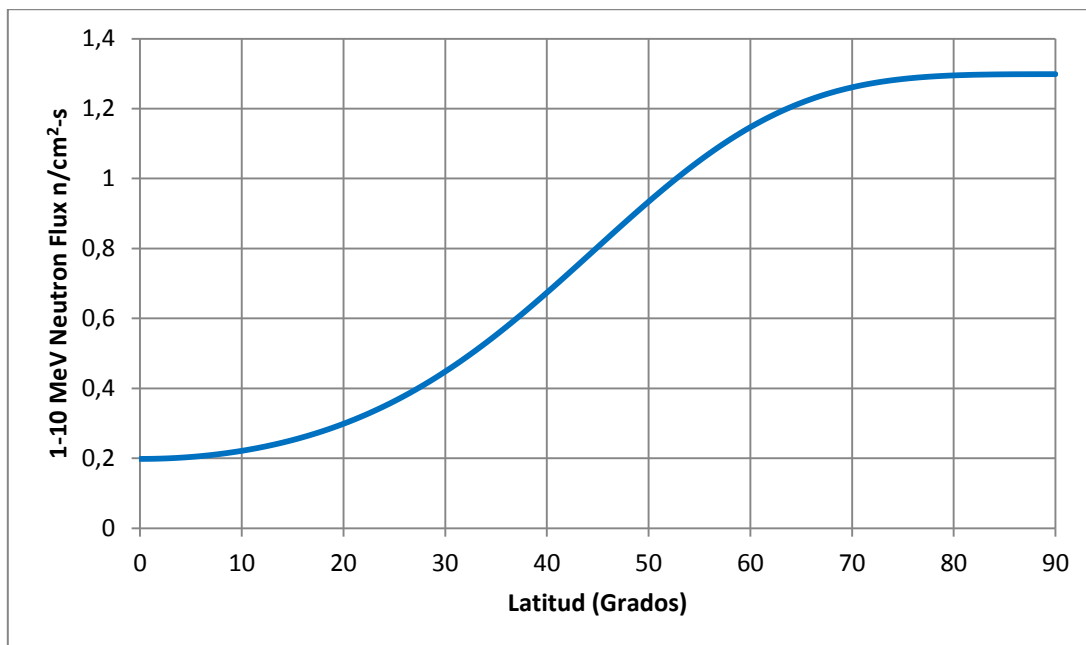


Fig. 4.1. Flujo de neutrones (energías 1-10 MeV) como función de la latitud basado en medidas experimentales con aviones.

Varios estudios sobre las radiaciones atmosféricas [OL93] a distintas altitudes demuestran que el flujo de neutrones a nivel del mar es varios cientos de veces inferior que el flujo a las altitudes típicas de vuelo de los aviones (unos 10.000 m). En los estudios realizados se analiza el flujo de neutrones para un espectro entre 1 y 10 MeV. Sin embargo, estudios complementarios [NO93] y [NO96], demuestran que este espectro analizado es significativo y extrapolable al espectro 10-100 MeV, lo que cubriría la mayor parte del espectro de interés.

También se demuestra que la forma del espectro de energía del flujo de neutrones en la atmósfera no cambia con la altitud ni con la latitud, al contrario de lo que ocurre con la magnitud absoluta, que sí que depende de dichos parámetros. Las variaciones del flujo de neutrones de 1-10 MeV con la latitud han sido obtenidas experimentalmente con anterioridad (Fig. 4.1). El vuelo de aviones sobre rutas polares se ve más afectado por las partículas energéticas y los secundarios que éstas crean en la atmósfera de la Tierra, ya que, la atmósfera polar se encuentra menos protegida por el campo magnético de la Tierra.

En cualquier caso, como regla para obtener una aproximación, se puede decir que el flujo se ve incrementado en un factor 10 por cada 3000 m que aumenta la altitud, hasta que dicho flujo se satura, aproximadamente a unos 15.000-20.000 m de altitud.

4.2 BANCO DE MEMORIAS DE 350 nm.

Como ya se adelantó anteriormente en la introducción del presente capítulo, el principal objetivo es la creación de un banco de memorias portátil sobre el que se puedan hacer estudios y pruebas variadas de forma automática y recurrente.

4.2.1 Preparación del experimento.

El principio de funcionamiento que se persigue es el siguiente: al encender el banco se almacena un patrón de datos en los módulos de memoria. Cada cierto tiempo y de forma automática, se lee el contenido de cada memoria comparando el valor con el inicial. Si se detecta algún error, se almacena toda la información relativa a éste (número de chequeo, módulo, dirección de memoria y error detectado) en una memoria persistente, que posteriormente se podrá leer desde un ordenador una vez finalizado el experimento.

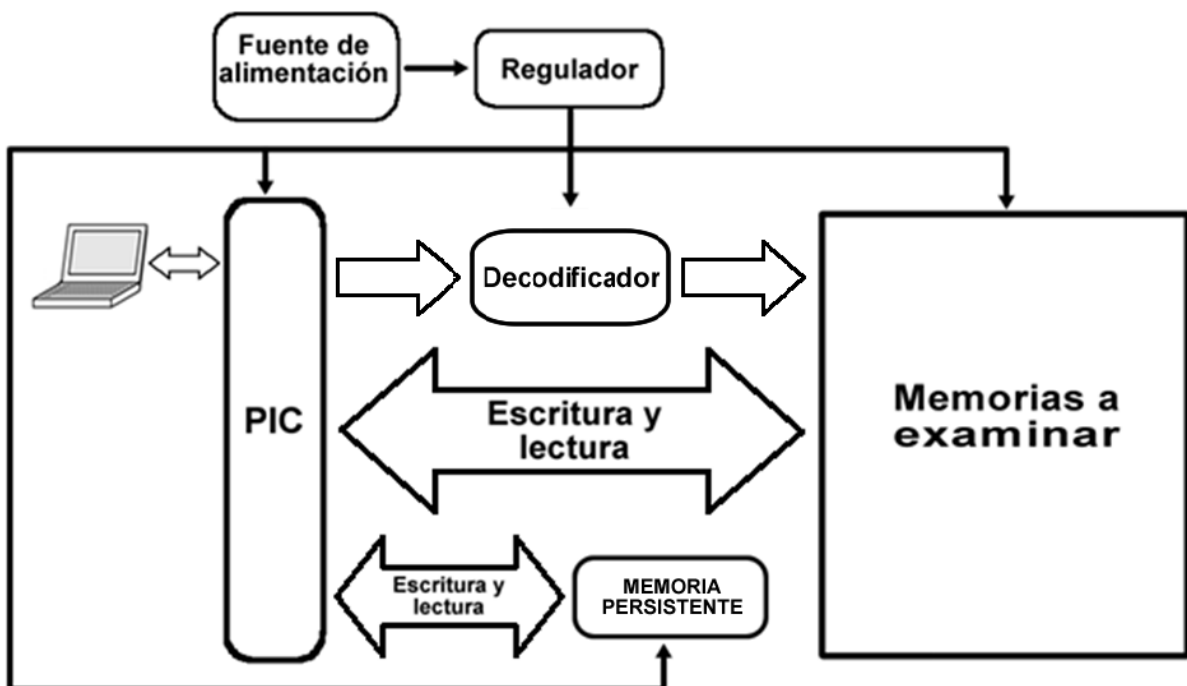


Fig. 4.2 Esquema de los diferentes bloques que componen el banco de memorias.

En los siguientes apartados se describen con detalle los diferentes bloques que componen el sistema (Fig. 4.2), el flujo de programa, que cumple con el funcionamiento descrito anteriormente, y los resultados obtenidos.

4.2.1.1 Bloque de alimentación.

Se optó por alimentar el sistema con un regulador lineal de tensión LM78M05CDT, del fabricante National Semiconductor. Este regulador proporciona una tensión estable de alimentación de 5 V, siendo ésta la tensión nominal de funcionamiento de las memorias. El módulo de alimentación puede ir conectado tanto a una batería como a una fuente de alimentación externa alternativa. Utilizando una batería de NiMH con una tensión de salida de 7.2 V y una carga de 4000 mAh, se consigue una autonomía de más de una semana de funcionamiento ininterrumpido a temperatura ambiente. Asimismo, se incluye una entrada adicional para añadir una tensión de alimentación distinta y, de este modo, investigar la tasa de errores a distintas tensiones de alimentación. La tensión de alimentación es un parámetro crítico, como se ha descubierto en dispositivos parecidos, y es conveniente introducir este grado de libertad. Se sabe que cuanto menor sea la tensión de alimentación mayor es la posibilidad de que se produzca un suceso aislado.

4.2.1.2 Módulo principal.

El almacenamiento principal a probar está compuesto por 32 módulos de la memoria CY que se eligió inicialmente para el proyecto. Pese a que las dos memorias que en su día se eligieron están fabricadas en tecnología CMOS de 350 nm, se opta por implementar el banco de memorias con la memoria del fabricante Cypress puesto que tiene mayor capacidad de almacenamiento. Son módulos de 32 Kbyte, frente a los 8 Kbyte de la memoria AS, por lo que la capacidad de memoria total de la placa es de 1024 Kbyte. Con objeto de reducir dimensiones se emplean las memorias en su encapsulado tipo SNC.

La lectura y escritura del banco de memorias se realiza con el PIC 18F6520, fabricado por Microchip. Se selecciona este dispositivo por la experiencia del grupo en microcontroladores de este tipo. Asimismo, es compatible con las tensiones de alimentación típicas de las memorias y, por otra parte, ofrece una gran cantidad de puertos de entrada y salida necesarios para este sistema. Se emplea un cristal de 20 MHz.

La selección de la memoria que debe ser escrita o leída en cada instante se lleva a cabo por medio de dos decodificadores 74HC154D, de Philips. La elección de decodificadores se realizó por dos claros motivos: en primer lugar, se evita tener que reservar 32 pines del PIC para habilitar y deshabilitar memorias. De esta forma únicamente son necesarios 6. Por otro lado, se facilita el rutado de la placa pues es más sencillo dividir las memorias en subconjuntos y llevar el decodificador y sus cuatro bits de control cerca de éstas, evitando tener que llevar un bus de 32 pistas.

El almacenamiento de la información correspondiente a cada error detectado era un punto crítico por varios motivos. En primer lugar, sería un hecho terrible que, tras realizar un experimento, los datos se perdieran al cesar la alimentación por una manipulación descuidada o por agotamiento de las baterías. Por otra parte, sería insensato almacenar datos en una memoria que fuera sensible a errores. Por ello, se decidió utilizar la memoria RAM ferroeléctrica (FRAM) FM1808, de Ramtron, con una capacidad de 256 Kbits organizada en 32768 (15 bits para la dirección) por 8 bits (1 byte de datos). Como para cada error detectado se almacenan 5 bytes de información asociada, la capacidad de almacenamiento de la memoria es más que suficiente, permitiendo almacenar la información correspondiente a más de 6500 errores sin reinicializar la memoria, un valor muy superior a lo que se espera detectar. La información almacenada por cada error detectado es la siguiente. En el primer byte se almacena el número de chequeo en el que se ha detectado el error, lo cual nos da una referencia de la hora a la que se ha producido. El siguiente almacena el número de memoria donde se ha observado el evento. Los dos siguientes se reservan para la dirección donde ha ocurrido el error y el último se emplea para guardar el error detectado. Asimismo, se reservaron las 3 primeras direcciones de la memoria para indicar datos generales como el número de ciclos de lectura y un índice que indica la dirección de la FRAM en la que hay que seguir almacenando la información asociada a los errores. De esta forma, si ocurre un reinicio en la alimentación no se sobrescribirán los datos. Finalmente, debe señalarse que esta memoria compartía el bus de direcciones y de datos con las memorias investigadas. Solamente la entrada de habilitación era específica de esta memoria.

4.2.1.3 Comunicación con el usuario.

La comunicación con el ordenador se requería para realizar alguna modificación de la configuración (cambiar el patrón almacenado, intervalo de comprobación...) y para comprobar la existencia de errores. Es una comunicación serie a través del protocolo RS-232. Tanto para transmitir órdenes como para recuperar los datos bastaba la utilización del programa *Hyperterminal*. No fue necesario crear un programa específico con lenguajes de programación orientados a la instrumentación.

Por otra parte, se incorpora al diseño un juego de diodos emisores de luz (LEDs) con propósitos diversos. En primer lugar, indicar a cualquier usuario que la placa se encuentra en funcionamiento y que no está inactiva por cualquier motivo. Asimismo, indica en qué proceso se encuentra la placa, bien la escritura inicial, bien los ciclos de lectura o bien situación de espera. Para terminar, y como puede parecer lógico, se incorpora un LED que se activaba en caso de encontrarse al menos un error. La figura 4.3 muestra una fotografía

del banco de memorias fabricado. A pesar de la gran complejidad del diseño y de los duros requerimientos topológicos, la placa pudo ser diseñada y fabricada utilizando únicamente cuatro capas, con el consiguiente abaratamiento en la fabricación.

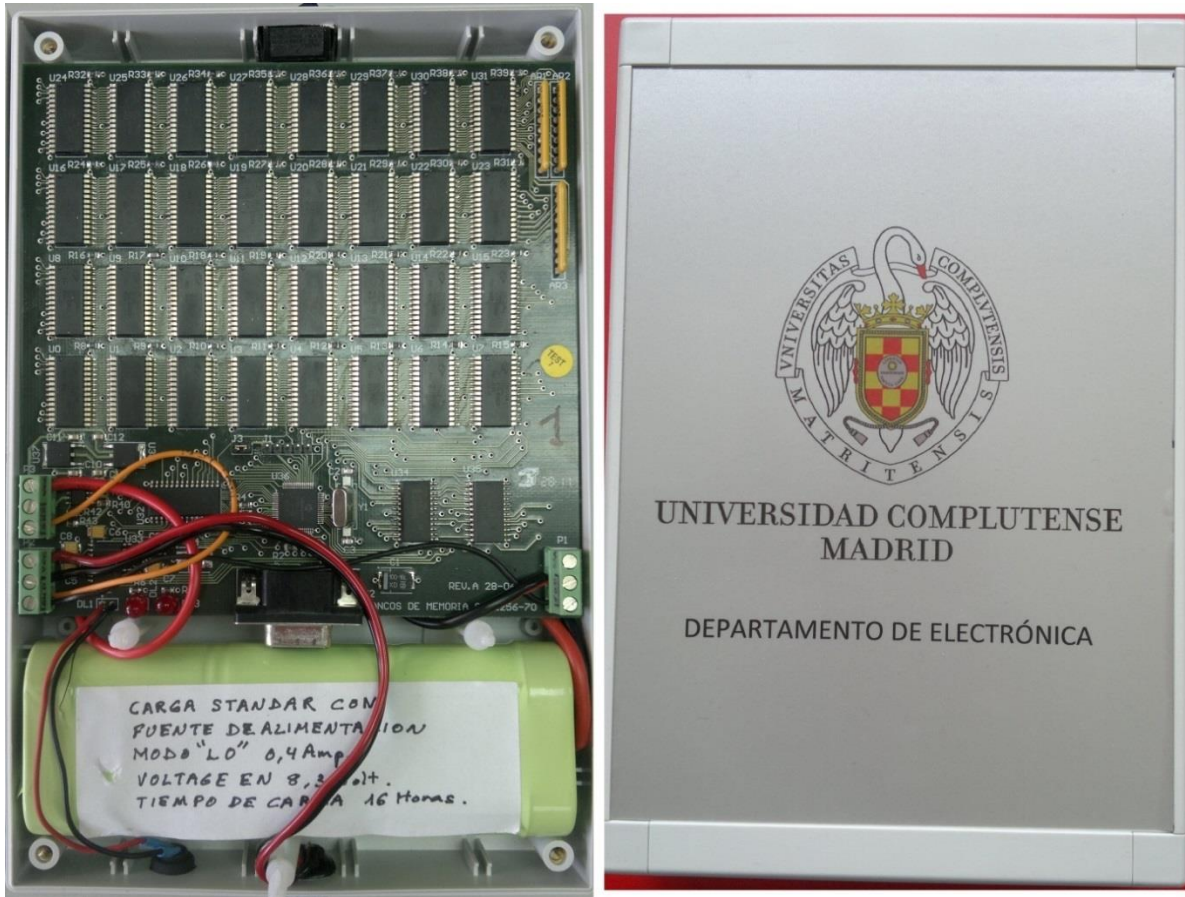


Fig. 4.3. Fotografía del banco de memorias de 350 nm fabricado.

4.2.1.4 Flujo del programa.

Tal y como se había explicado anteriormente, el funcionamiento de la placa es muy sencillo. El diagrama de flujo del algoritmo principal es el mostrado en la figura 4.4. La descripción del funcionamiento es la siguiente:

1) Al encender el banco de memorias se inicializan todos los puertos, para definirlos como entrada, salida o entrada/salida.

2) Se inicializan los 32 módulos de memoria con el patrón seleccionado. Por defecto, el banco está programado para escribir el patrón "0" en las direcciones pares y el patrón "1" en las impares. Dichos patrones se pueden modificar desde el PC por medio de un cable serie conectado al banco de memorias.

3) Se leen las tres primeras direcciones de la memoria FRAM y se inicializan las variables internas de funcionamiento del banco.

- 4) Se activa un temporizador y se entra en un bucle infinito.
- 5) Cuando el temporizador cumple el tiempo para el que estaba armado (por defecto configurado a 30 minutos), se realiza una comprobación de la información almacenada en las memorias.
- 6) Como se conoce el patrón escrito inicialmente, si los datos leídos no coinciden con los esperados, se almacena la información de interés correspondiente al error en la memoria FRAM. Posteriormente, se corrige el error, almacenando el patrón correcto en dicha dirección de memoria.
- 7) Una vez comprobados todos los módulos de memoria, almacenado y corregido todos los errores detectados, se vuelve a armar el temporizador, de forma que el sistema se encuentra de nuevo en el punto 4.

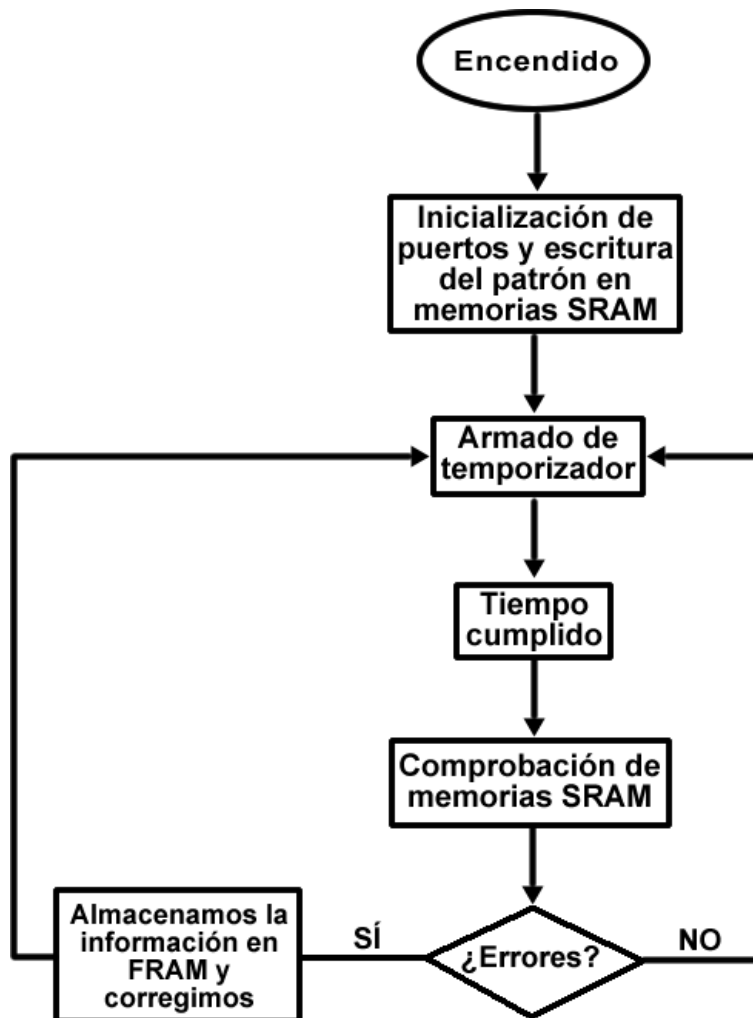


Fig. 4.4. Flujo del programa para inicialización y detección de errores.

Otras funcionalidades que se incorporaran al programa y que tienen como objeto la depuración del código y verificación del sistema fueron las siguientes. En primer lugar, se añadió un sistema de LOG, de forma que si se activaba, la placa informaba por medio de la

conexión RS-232 de cada una de las funciones que estaba realizando. Esto resultó muy útil principalmente para las pruebas en laboratorio y para poder comprobar el estado de las memorias y funcionamiento del banco desde una ubicación remota, ya que sólo resulta necesario tener un portátil y un cable serie. Por otra parte, se añadieron rutinas para inyección de errores en posiciones conocidas del banco de memoria con el objeto de verificar el sistema de detección, almacenamiento y envío. Asimismo, se incluyeron rutinas que permitían el volcado completo de la memoria FRAM y su borrado.

4.2.2 Resultados.

Tras el diseño y construcción de la placa llega el momento de transportar el banco de memorias en distintos vuelos. Concretamente, se ha transportado en un total de 92 vuelos acumulando un tiempo total de funcionamiento de 249 horas y 35 minutos, del cual, un total de 214 horas y 44 minutos ha sido de vuelo.

En la tabla 4.1 se recogen una serie de vuelos realizados que sirven como ejemplo de algunos de los datos que se registran:

TRAYECTO	TIEMPO ON	TIEMPO VUELO	ALTITUD (METROS)
MADRID/LONDRES	05:15	01:47	10.363
MADRID/P. MALLORCA	03:40	00:53	9.144
MADRID/MILÁN	06:20	01:40	11.582
MADRID/TENERIFE	05:45	02:28	11.278
MADRID/AMSTERDAM	07:15	02:26	11.887

Tabla 4.1. Ejemplo de vuelos realizados con la placa y datos registrados.

En todos los vuelos el procedimiento es el mismo y consiste en:

1. Al llegar al avión, antes de despegar, la placa se enciende y se anota la hora. Permanece encendida durante todo el vuelo.
2. Tras el despegue, se anota la hora del mismo, de forma que se pueda controlar el tiempo que la placa permanece en vuelo y el tiempo que permanece en funcionamiento en tierra.
3. Durante el vuelo se realizan chequeos periódicos de tiempo y posición, de forma que si se detecta un error se pueda aproximar la zona en la que ocurre.
4. Después del aterrizaje, se anota la hora del mismo. Si hay más vuelos, la placa sigue encendida durante la escala en tierra.

5. Si ha sido en último vuelo de ese periodo, la placa se apaga después de que el avión llegue al parking. Se anota la hora de apagado de la placa.

Debido a que en el avión no se transporta ningún medidor de radiaciones cósmicas, las radiaciones de dichos vuelos han tenido que ser estimadas. Para las estimaciones se ha empleado la página web www.seutest.com, que dispone de un calculador de flujo. A partir de las coordenadas geográficas, altura y actividad solar, proporciona un valor o “flujo relativo” por el cual hay que multiplicar la radiación de neutrones existente a nivel del mar en la ciudad de Nueva York ($14 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hora})$). Así se obtiene la radiación media ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hora})$) en la posición introducida.

Se calcula la radiación media para todos los puntos de la ruta de vuelo, pues se dispone de las hojas de vuelo, y se multiplica por el tiempo que se permanece en ese punto. Sumando todas las contribuciones anteriores, se obtiene la tabla 4.2 que muestra, para los mismos vuelos de la tabla 4.1 y que sirven como ejemplo, la radiación total que ha recibido la placa durante el vuelo. Como para el cálculo de dicha radiación depende la actividad solar, la cual es desconocida, pudiendo variar de 0 a 100, se da el valor de la radiación total recibida por la placa durante el vuelo para ambos valores, acotando el valor real de radiación recibida entre estos límites.

TRAYECTO	RADIACIÓN TOTAL VUELO (n/cm^2)	
	ACTIVIDAD SOLAR = 0	ACTIVIDAD SOLAR = 100
MADRID/LONDRES	4368,52	5734,99
MADRID/P. MALLORCA	1138,9	1336,43
MADRID/MILÁN	3575,25	4503,28
MADRID/TENERIFE	4092,88	4745,16
MADRID/AMSTERDAM	5703	7532,12

Tabla 4.2. Valores calculados de la radiación recibida por la placa durante los vuelos mostrados como ejemplo.

La radiación total que ha recibido la placa durante todas las horas de vuelo acumuladas está comprendida entre 299094,43 y 373235,86 n/cm^2 considerando una actividad solar de 0 y 100 respectivamente. Dicha radiación recibida equivale a unos dos años y medio de radiación en tierra.

No se ha conseguido detectar ningún error.

4.2.3 Conclusión.

Hasta este punto se ha demostrado la viabilidad de fabricación de un banco portátil de memorias SRAM para deducir la tasa de error asociada a partículas radiactivas y se ha demostrado experimentalmente su correcto funcionamiento. Debido a la tecnología de fabricación de las memorias (350 nm) no se ha detectado ningún error, resultando imposible obtener una estadística.

En el apartado siguiente se detalla la construcción de un sistema análogo con memorias SRAM fabricadas en tecnología CMOS pero con un mayor nivel de integración. Con ello se pretende estudiar cómo aumenta la probabilidad de obtener errores con la reducción de tamaño y disminución de la tensión de alimentación.

4.3 BANCO DE MEMORIAS DE 90 nm.

En tecnología CMOS, la carga crítica tiende a reducir su valor con el área de la celda (A), considerando la siguiente aproximación para su cálculo [LE04]:

$$Q_{crit} \sim C \cdot V \sim \frac{\epsilon_{SiO_2}}{t_{SiO_2}} \cdot A \cdot V \sim L^2 \quad [4.5]$$

Donde C es la capacidad del óxido de puerta, V es la tensión de alimentación, t y ϵ la anchura y permitividad del óxido de puerta y L la longitud tecnológica sobre la que se está aplicando el método.

Lógicamente, la carga recolectada (Q_{coll}) también se verá reducida. Si ésta lo hace en una menor proporción que Q_{crit} , entonces aumentará la probabilidad de obtener un error y por tanto la sensibilidad de los dispositivos electrónicos.

Con la construcción de un nuevo banco de memorias, siendo éstas de tecnología de fabricación más avanzada, se pretende poner lo anterior de manifiesto realizando experimentos en vuelo y comparando los resultados con los obtenidos para el anterior.

4.3.1 Preparación del experimento.

Para la construcción de este banco de memorias se parte del construido inicialmente, manteniendo la misma estructura y funcionamiento (Figs. 4.2 y 4.4 respectivamente), presentando las diferencias que se exponen a continuación y relativas a los dos siguientes bloques:

A. Bloque de alimentación.

En cuanto al bloque de alimentación, la diferencia radica en el empleo del regulador lineal de tensión TPS76633, de Texas Instruments. Este regulador proporciona una tensión estable de alimentación de 3.3 V, que es la tensión nominal de funcionamiento de las memorias y por tanto a la que se alimentará el sistema.

B. Cuerpo principal.

Las diferencias en cuanto al banco de memorias inicial se encuentran tanto en las memorias a estudiar, como en el tipo de memoria no volátil en la que se almacena la información relativa a los errores detectados. Además este sistema es controlado por un PIC de mejores prestaciones debido a las características de las nuevas memorias a estudiar.

El almacenamiento principal a probar está compuesto por 32 módulos de memoria del fabricante Cypress, modelo CY62167EV30. Son módulos de 16 MBits, por lo que la capacidad total de memoria de la placa es de 512 MBits. Dicha capacidad se puede estructurar como 1M de palabras de 16 bits o como 2M de palabras de 8 bits. En nuestro caso se opta por la segunda opción. El motivo de esta elección es, simplemente, simplificar la construcción de la placa a expensas de doblar la duración del ciclo de lectura y escritura. Otro punto especialmente interesante es que, en el momento de construcción del sistema, Cypress es el único fabricante que ofrecía memorias SRAM con buses de datos y direcciones en paralelo y contruidos en tecnología CMOS de 90 nm. Otra ventaja adicional consistía en que estas memorias se proporcionan con un encapsulado TSOP-I, muy manejable en un laboratorio en comparación con otros formatos como el tipo VFBGA.

La lectura y escritura del banco de memorias se realiza con el PIC18F85J90, fabricado por Microchip. Se selecciona este dispositivo por ser compatible con las tensiones de alimentación típicas de las memorias, y porque ofrece una gran cantidad de puertos de entrada y salida, necesarios para este sistema puesto que se necesitan 3 bytes para direccionar toda la memoria.

Para el almacenamiento de la información correspondiente a los errores detectados se decide utilizar la memoria RAM magnetorresistiva (MRAM) MR256A08B, de Everspin. Al pertenecer a la familia de las MRAMs los datos se guardan sin recurrir al almacenamiento de carga eléctrica por lo que, a priori, son insensibles a errores asociados a la radiactividad natural. Con una capacidad de 32768 palabras (15 bits de dirección) de 8 bits (un byte de datos) permite almacenar la información asociada de más de 5400 errores (al tener un byte

más de dirección que las memorias iniciales se necesitan 6 bytes de información por error), un valor muy superior al que se espera detectar.

En la figura 4.5 se puede ver el nuevo banco de memorias fabricado. Se ha colocado una moneda de dos euros para dar una clara idea del tamaño. El LED encendido muestra que se encuentra en proceso de escritura del patrón tras el encendido inicial. El espacio vacío de la parte izquierda se reserva para colocar la batería y, a continuación, colocar y atornillar la tapa.

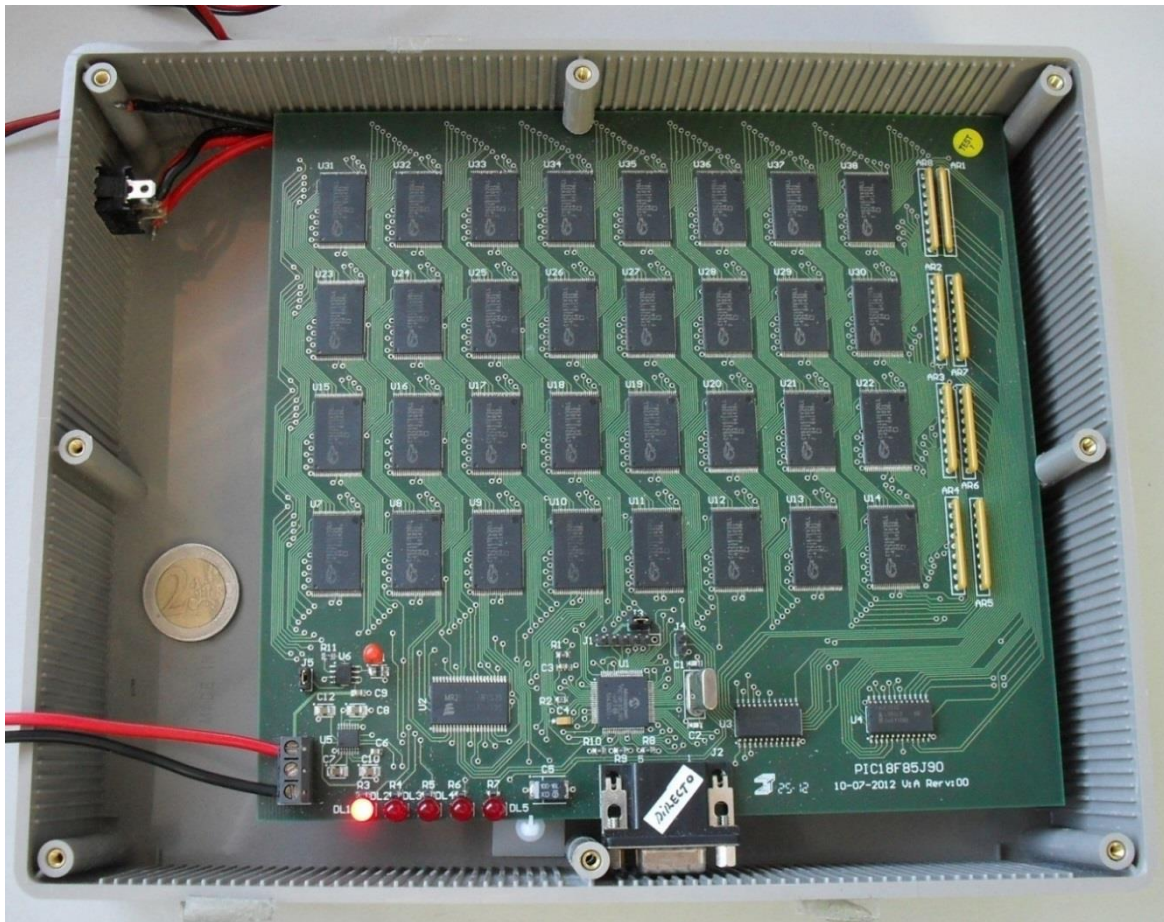


Fig. 4.5. Fotografía del banco de memorias de 90 nm fabricado.

4.3.2 Resultados.

Este banco se transportó en 27 vuelos comerciales, acumulando un total de 90 horas de funcionamiento de las cuales 55 fueron horas de vuelo.

La radiación total que ha recibido la placa ha sido de $100378,79 \text{ n/cm}^2$ y $123504,2 \text{ n/cm}^2$ para una actividad solar de 0 y 100 respectivamente, siendo equivalente a casi un año de radiación en tierra (considerando Nueva York).

Durante el experimento se detectó un error en un vuelo desde Ámsterdam a Madrid, a una altitud de 12.000 m aproximadamente. Los datos del error son los siguientes:

- Módulo de memoria: 19.
- Dirección: 0x066AB6.
- Patrón leído: 0x04 (0b00000100).
- Patrón esperado: 0x00 (0b00000000).

Por lo tanto, se detectó un SEU donde el cambio de estado se produce en el tercer bit, pasando de '0' a '1'.

Ciertamente, es muy difícil obtener información relevante de un único evento aunque nos permite acotar la tasa de error esperable en este tipo de memorias. La aparición de eventos es un fenómeno describible mediante una distribución de Poisson, en la que la probabilidad de que un evento ocurra n veces en un intervalo de tiempo es:

$$P(n) = e^{-\mu} \frac{\mu^n}{n!} \quad [4.6]$$

Donde μ es la media de eventos esperados. El hecho de que el evento haya ocurrido una única vez implica que la probabilidad de que n sea igual a 1 no es despreciable. Por convenio, supondremos que $P(1) \geq 0.05$ con lo que $0.053 \leq \mu \leq 4.45$. En este tipo de problemas, es común utilizar una unidad llamada FIT (*Failures In Time*), que es el número medio de eventos esperables en la ciudad de Nueva York al cabo de 10^9 horas de funcionamiento y por 1 Mbit de datos. Aplicando factores de conversión sencillos, se puede concluir que la tasa de errores está entre 11 y 1020 FIT. A pesar de la amplitud del rango de valores, la tasa de error está en el orden de magnitud esperado en tecnologías de este orden.

Posteriormente, se examinaron las memorias durante aproximadamente un año en el laboratorio del grupo de investigación. Realizando los cálculos de la radiación recibida por la placa para las coordenadas del laboratorio, se obtiene que, durante este tiempo, la radiación recibida está entre 159432 y 175375 n/cm², considerando una actividad solar de 0 y 100 respectivamente. Además, a los dos meses y medio de comenzar el experimento se realizan pruebas para determinar la mínima tensión de alimentación a la que puede trabajar el sistema. Siendo el componente más restrictivo la MRAM, se fija una tensión de alimentación de 2,8 V. Con ello se pretende aumentar la probabilidad de generación de errores.

Durante todo este tiempo no se observó ningún evento, pese a estar en niveles de radiación superiores a los que fue sometido el banco de memorias durante los vuelos. Este

hecho permite deducir que el fenómeno detectado en el banco de memorias durante los vuelos fue probablemente debido a un rayo cósmico y no a una impureza radiactiva. El motivo es que, en este último escenario, la tasa de errores no depende de la altitud.

4.3.3 Conclusión.

El obtener un error con este nuevo banco, habiendo recibido aproximadamente una tercera parte de radiación que el banco inicial, confirma el hecho de que en tecnología CMOS la carga recolectada (Q_{coll}) disminuye en menor proporción que la crítica (Q_{crit}) a medida que aumenta el nivel de integración. Así, la probabilidad de obtener un error es mayor, aumentando la sensibilidad de los dispositivos.

Aparentemente, nuestro resultado entra en contradicción con otros trabajos [HA12, HU13]. Concretamente en éste último, memorias de las mismas características (capacidad, tecnología de 90 nm y fabricante) que las estudiadas en nuestro banco son sometidas a radiación natural de neutrones. Para ello, y con un proceso similar al nuestro, se sitúan dichas memorias en dos puntos de altitud considerable como son el “Pic-du-Midi”, situado en los Altos Pirineos Franceses y que alcanza una altura de 2885 metros, y un punto a una altura de 3889 metros, situado en la ciudad de Puno en Perú. En la figura 4.6 se resume la tasa de error medida en FIT para dichas memorias durante el período de Julio de 2011 hasta Agosto de 2012, estando en torno a 6000 FIT y siendo superior a la estimada por nosotros.

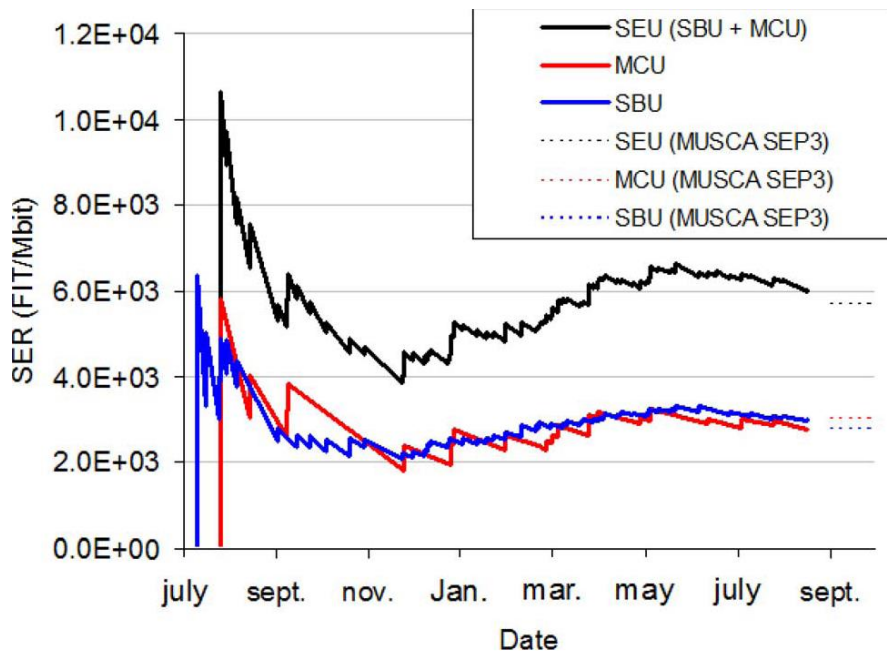


Fig. 4.6. Tasa de error medida para las memorias Cypress de 90 nm sometidas a radiación natural de neutrones [HU13].

Sin embargo, los autores nos aclaran que ellos adquirieron las memorias en 2007 y de entonces a acá se ha modificado el diseño del circuito (incorporando interleaving y códigos de detección y corrección de errores) para hacerlo más tolerante a la radiación. Las memorias que nosotros adquirimos en 2012 ya presentan estas modificaciones y de ahí que hayamos conseguido una tasa de error menor.

4.4 EXPERIMENTOS EN GENEPI-2.

Del contacto anterior se consigue entablar una colaboración para realizar medidas con neutrones. Se pretende examinar dos memorias SRAM de tecnología CMOS de 130 y 90 nm en la fuente de neutrones GENEPI-2 (*GENérateur de NEutrons Pulsé Intense*), situada en el *Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie* (LPSC), en Grenoble (Francia).

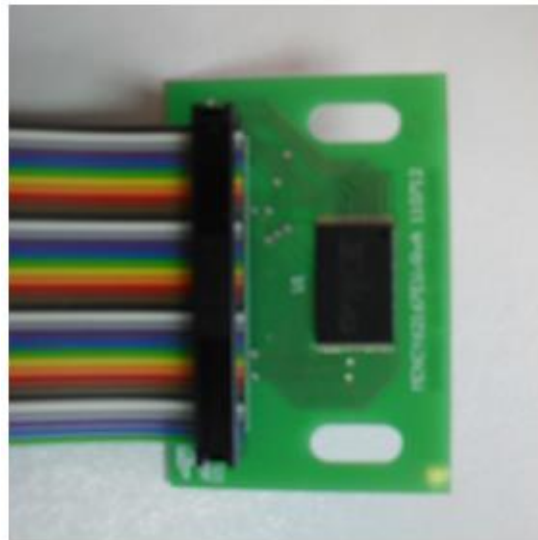
El hecho de tener la posibilidad de realizar ensayos de radiación con neutrones en GENEPI-2 permite estudiar la evolución del número de errores, provocados por estas partículas, a medida que aumenta el nivel de integración en las memorias, de forma más rápida que cuando se somete a los dispositivos a radiación natural. Todo ello presenta una serie de ventajas e inconvenientes que, junto con los resultados obtenidos, serán analizados en lo que resta de capítulo.

A continuación se describe con más detalle todo lo relativo a la preparación del experimento así como las instalaciones donde se realiza.

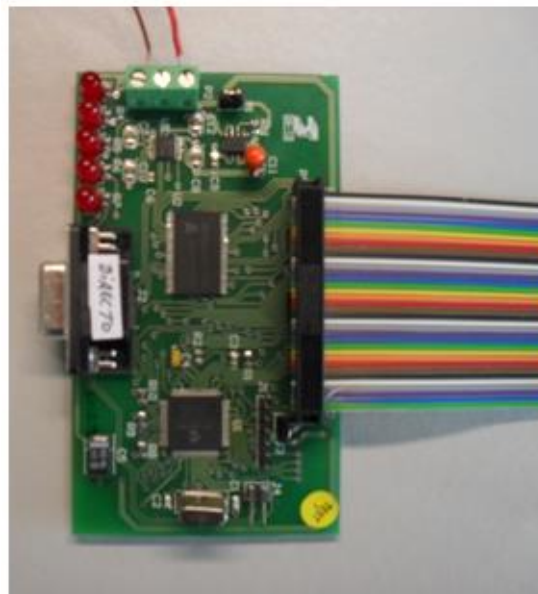
4.4.1 Preparación del experimento.

De acuerdo con nuestra experiencia anterior se utiliza el mismo sistema de escritura y adquisición de datos.

El paso inicial es diseñar una placa de circuito impreso que permita el control de las memorias y la comunicación, serie a través del protocolo RS-232, con un PC para la toma de datos. La memoria de 90 nm a examinar es la misma que se estudió con el banco de memorias de 90 nm, es decir, la memoria modelo CY62167EV30 del fabricante Cypress. Como memoria de 130 nm, se escoge la misma memoria con el fin de simplificar el diseño. Concretamente el modelo es el CY62167DV30, que varía con respecto al anterior en una única letra, la cual indica el tipo de tecnología de fabricación (E para 90 nm y D para 130 nm). Por tanto, ambas memorias se alimentan a 3,3 V y tienen 16 MBits de capacidad, pudiéndose estructurar como 1M de palabras de 16 bits o como 2M de palabras de 8 bits. En nuestro caso se opta por la segunda opción.



(a)



(b)

Fig. 4.7. El circuito fabricado para la comunicación de la memoria con el PC durante la radiación con neutrones se estructura en dos placas comunicadas a través de un bus. Una donde se encuentra la memoria a radiar (a) y otra donde se encuentra el PIC y el resto de componentes del sistema (b).

Para el control de las memorias se emplea el mismo microcontrolador que el utilizado en el banco de memorias de 90 nm (PIC18F85J90 fabricado por Microchip).

Como la tensión de alimentación del sistema es de 3,3 V, se emplea el regulador lineal de tensión modelo TPS76633, de Texas Instruments.

Además se incorpora un juego de LEDs indicadores del proceso que se encuentra en ejecución en cada momento.

Teniendo en cuenta que lo que se quiere es radiar la memoria tratando de proteger de la radiación, en la medida de lo posible, al resto de dispositivos, se diseña el circuito en dos placas. De esta forma se tiene una plaquita donde se suelda la memoria a radiar (Fig. 4.7 (a)) y otra donde está el PIC y el resto de componentes del circuito (Fig. 4.7 (b)). La comunicación entre el PIC y la memoria se hace a través de un bus de direcciones y datos que conecta ambas placas.

Una vez construido el circuito se programa el microcontrolador para poder ejecutar las siguientes acciones:

- Escribir la memoria con el patrón deseado. El programa ofrece la posibilidad de escribir la memoria con los patrones: todo ceros o patrón "0", todo unos o patrón "1", o bien alternadamente ceros y unos o patrón CBP (*Checker Board Pattern*), el cual escribe todas las direcciones con el dato "01010101".

- 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 transmitir al PC el resultado de la comparación. Esto es, el número de errores y, en caso de que los hubiera, la dirección de las celdas en que se hubieran producido y el error.

En el apartado siguiente se describe con detalle la instalación donde se llevan a cabo los ensayos de radiación.

4.4.2 Características de la fuente de neutrones GENEPI-2 [LPS].

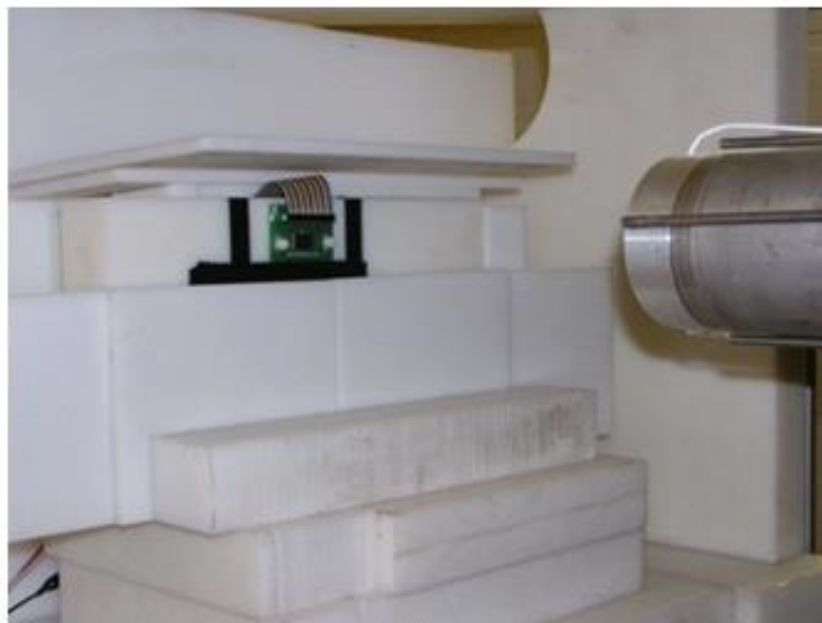
Las máquinas GENEPI (*GE*nératEur de *NE*utrons *P*ulsé *I*ntense) son aceleradores de deuterón ((d), núcleo del átomo de deuterio)) dedicados a la producción de neutrones. Debido a las reacciones de fusión derivadas del impacto del haz de deuterones sobre tritio ((T), isótopo natural del hidrógeno) o deuterio ((D), isótopo estable del hidrógeno) se producen neutrones de alta energía.

- $d + T \rightarrow n (14 \text{ MeV}) + \alpha$
- $d + D \rightarrow n (2.5 \text{ MeV}) + {}^3\text{He}$

Desde finales de los 90, el *Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie* (LPSC) ha desarrollado 3 tipos de aceleradores GENEPI destinados a la conducción de los neutrones creados por el generador. La segunda máquina, GENEPI-2, se encuentra en el LPSC, en Grenoble, Francia.



(a)



(b)

Fig. 4.8. Fuente de neutrones GENEPI-2: Sección del acelerador que transporta el haz de deuterones hacia el blanco (a); Memoria a radiar situada a una determinada distancia del final de la línea del haz de deuterones donde se encuentra el blanco (b).

GENEPI-2 es un acelerador electrostático simple y robusto. Los átomos de deuterio se ionizan en un plasma por una descarga de electrones inducida por un filamento caliente en la fuente de iones. Esta fuente de tipo duoplasmatron (tipo de fuente de iones inventada por Manfred von Ardenne) se encuentra dentro de una plataforma de alto voltaje, 250 kV, rodeada por una jaula de Faraday. Los iones se extraen y se concentran por una serie de electrodos que conforman el haz de deuterones. Este haz se acelera hasta 250 keV en un

tubo acelerador (Fig. 4.8 (a)) donde se transporta en condiciones de vacío ($\sim 10^{-7}$ mbar) para minimizar las interacciones con el gas residual.

En primer lugar, el haz se desvía 45° por un electroimán realizando la selección magnética del haz para transportar únicamente iones D^+ . A continuación, el haz de D^+ se transporta durante 5 m y se concentra por cuadrupolos electrostáticos. Los haces de alta intensidad se concentran constantemente a lo largo de la línea del haz cada 0,5 m. Tubos de dirección magnéticos asociados a los diagnósticos permiten un posicionamiento de rayo en el objetivo. Las dimensiones del haz se hacen coincidir con el depósito activo (T o D) del blanco situado en el extremo de la línea del haz. El blanco es un disco de cobre expuesto a una capa delgada de T (o D) de más de 30 mm de diámetro. La temperatura se monitoriza y se enfría para minimizar la desorción de T (o D). Los neutrones se emiten desde el blanco a toda la habitación experimental, siendo la fuente de neutrones isotrópica. Toda la instalación está protegida por un bunker de hormigón. El acelerador se controla de forma remota. La intensidad del haz se mide en el blanco continuamente. La producción de neutrones se monitoriza en línea por un detector de silicio situado dentro del tubo del haz, a ~ 1 m del blanco. El detector recoge α partículas (de $d + T$) y protones (emitidos con tasas iguales como los neutrones de $d + D$) producidas hacia atrás durante las reacciones de fusión.

Originalmente, la máquina GENEPI-2 se construyó para realizar mediciones de la sección eficaz apoyando futuros conceptos de reactor nuclear. Esto requería producir neutrones en grupos pequeños, que pueden ser etiquetados con una referencia temporal. La fuente duoplasmatron se elige para proporcionar la estructura de tiempo apropiada: se genera el plasma de deuterio y los iones se extraen de la fuente en grupos cortos e intensos ($\text{FWHM} < 1 \mu\text{s}$, pico de ~ 40 mA). Estos grupos que forman el haz se producen con una frecuencia de repetición entre 10 Hz y 4 kHz. La intensidad media de deuterones, y por lo tanto la tasa de producción de neutrones, se ajusta cambiando la frecuencia de repetición. La tasa de producción de neutrones actual a partir de un blanco de T es $\sim 2 \cdot 10^5$ n / grupo (pudiéndose alcanzar 10^6 n / grupo a partir de un blanco nuevo) a una energía de 14 MeV. Esto corresponde con una tasa media de $\sim 6 \cdot 10^8$ n/s a una frecuencia de repetición de 3000 Hz. La memoria a irradiar se coloca en la línea del haz de deuterones a una determinada distancia del final de ésta en función de la fluencia de neutrones deseada (Fig. 4.8 (b)). Típicamente se ajusta una distancia de 40 cm desde el blanco para irradiar memorias con una fluencia media de $3 \cdot 10^4$ n/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$). En estas condiciones el chip es expuesto a un flujo de $\sim 1.1 \cdot 10^8$ n/ cm^2 durante una hora de experimento. Como los neutrones se propagan en toda la sala experimental, la electrónica correspondiente a la comprobación

de la memoria también se ve afectada por el flujo de neutrones, por lo que se protege con un escudo de polietileno.

Esta instalación ha resultado muy eficiente en el estudio del impacto de neutrones sobre circuitos integrados a las dosis que pueden alcanzarse durante una hora de irradiación. Actualmente, se están llevando a cabo las siguientes mejoras:

- La fuente de iones se actualizará a una fuente de ECR para generar una fluencia de neutrones continua más intensa y pura. La fluencia está prevista que alcance un nivel de $10^{10} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.
- Se construirá un escudo resistente para proteger la plataforma electrónica, junto con el desarrollo de un soporte modular que permita una configuración rápida y fácil de la memoria a irradiar.

4.4.3 Resultados.

Los resultados obtenidos para las memorias de 130 y 90 nm se presentan en las tablas 4.3 y 4.4 respectivamente.

Patrón	Fluencia ($\text{n}/[\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$)	Duración Experimento (s)	Flujo (n/cm^2)	Nº de Errores	$\sigma_{\text{dev}} (\text{cm}^2)$	$\sigma_{\text{bit}} (\text{cm}^2 / \text{bit})$
0x00	$3 \cdot 10^4$	3513	$1,05 \cdot 10^8$	115	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$6,82 \cdot 10^{-14}$
0x55	$3 \cdot 10^4$	3571	$1,07 \cdot 10^8$	147	$1,37 \cdot 10^{-6}$	$8,58 \cdot 10^{-14}$
0xFF	$3 \cdot 10^4$	3571	$1,07 \cdot 10^8$	129	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$7,53 \cdot 10^{-14}$

Tabla 4.3 Resultados obtenidos para la memoria de 130 nm (CY62167DV30) en los ensayos con neutrones.

Patrón	Fluencia ($\text{n}/[\text{cm}^2 \cdot \text{s}]$)	Duración Experimento (s)	Flujo (n/cm^2)	Nº de Errores	$\sigma_{\text{dev}} (\text{cm}^2)$	$\sigma_{\text{bit}} (\text{cm}^2 / \text{bit})$
0x00	$3 \cdot 10^4$	2496	$7,49 \cdot 10^7$	141	$1,88 \cdot 10^{-6}$	$1,18 \cdot 10^{-13}$
0x55	$3 \cdot 10^4$	2409	$7,23 \cdot 10^7$	127	$1,76 \cdot 10^{-6}$	$1,10 \cdot 10^{-13}$
0xFF	$3 \cdot 10^4$	1451	$4,35 \cdot 10^7$	61	$1,40 \cdot 10^{-6}$	$8,76 \cdot 10^{-14}$

Tabla 4.4 Resultados obtenidos para la memoria de 90 nm (CY62167EV30) en los ensayos con neutrones.

Los experimentos se han realizado escribiendo las memorias el patrón “0”, CBP y patrón “1”, y con la misma fluencia de neutrones a una energía de 14 MeV. En función de la duración del experimento, se obtiene el flujo, o número total de neutrones por unidad de superficie, al que han estado sometidas las memorias. Dividiendo el número total de errores (número total de cambios de estado) detectado en las memorias, para las condiciones anteriores, entre el flujo del experimento se obtiene la sección eficaz por dispositivo (σ_{dev}).

Normalmente, cuando se trata de realizar una comparación de la sensibilidad de memorias con distinta capacidad sometidas a radiación, la sección eficaz se da en sección eficaz por bit (σ_{bit}). Ésta se obtiene simplemente dividiendo σ_{dev} entre la capacidad en bits de las memorias. Como en este caso ambas memorias tienen la misma capacidad, 16 Mbits, ambas magnitudes anteriores aportan la misma información.

Centrando el análisis en los datos obtenidos para la sección eficaz, se observa que la memoria de 90 nm presenta una sección eficaz mayor que la memoria de 130 nm en todos los casos. Estos resultados eran los esperables tras el estudio realizado mediante el banco de memorias. A medida que se reduce la longitud tecnológica de fabricación en las memorias disminuye tanto la carga recolectada (Q_{coll}) como la carga crítica o umbral necesaria para provocar un cambio de estado (Q_{crit}). En tecnología CMOS, Q_{coll} se reduce en menor proporción de la que lo hace Q_{crit} , de manera que existe una mayor probabilidad de provocar errores, lo cual se traduce en una mayor sensibilidad de la memoria.

4.5 CONCLUSIÓN.

A lo largo de este capítulo se explican todos los pasos necesarios para la construcción de un banco de memorias que permite estudiar la sensibilidad de dos memorias del fabricante Cypress en tecnología CMOS de 350 y 90 nm frente a la radiación natural.

Además se presenta la colaboración realizada para llevar a cabo el análisis de dos memorias en tecnología CMOS de 130 y 90 nm, del fabricante Cypress, en la fuente de neutrones GENEPI-2, situada en el *Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie* (LPSC), en Grenoble (Francia).

Los resultados obtenidos en ambos casos, banco de memorias y GENEPI-2, ponen de manifiesto el hecho de que aumentar el nivel de integración en tecnología CMOS implica un aumento de la probabilidad de provocar fallos, y por tanto un aumento de la sensibilidad de los dispositivos. Las memorias se vuelven cada vez más vulnerables a la radiación viéndose afectadas incluso a alturas a las que antes era impensable. Por tanto, existe un compromiso en el diseño de dispositivos electrónicos entre integración (tamaño) y sensibilidad, que dependerá de la aplicación.

Tener la posibilidad de examinar memorias en la fuente de neutrones GENEPI-2 tiene la ventaja de poder someter a las memorias a niveles considerables de radiación en cuestión de minutos. Esto hace ganar tiempo con respecto a los experimentos llevados a cabo en vuelos o situando los dispositivos a cierta altura en determinadas zonas geográficas. Sin

embargo, el obtener únicamente la sección eficaz a una energía (14 MeV), hace imposible el determinar la curva de Weibull, o curva típica resultado de la radiación de un dispositivo con partículas. En ella se representa el valor de la sección eficaz para dicho dispositivo en función de la energía (LET) de los neutrones (iones). Sobre estas curvas se profundizará en el próximo capítulo. Tampoco se puede obtener una tasa de error medida en FIT, pues no se obtienen resultados para un espectro de energías de los neutrones, como sí ocurre con los experimentos de radiación natural. Por el contrario, la realización de experimentos en la fuente de neutrones GENEPI-2 resulta muy útil para la implementación de software de predicción de errores (p.ej. MUSCA SEP3 [HU13]). A partir de los errores obtenidos en ensayos de radiación con neutrones, a una energía concreta, sobre una memoria de una tecnología determinada es posible extrapolar a otras energías y memorias de distinta tecnología, obteniendo una estimación o prediciendo los errores que se esperarían obtener.

Asimismo, en un futuro se pretende construir sistemas análogos a medida que vayan apareciendo en el mercado nuevos modelos de memorias SRAM en tecnología CMOS más avanzadas, como 65 nm, 45 nm, etc.

Cabe destacar que debido al aumento de la sensibilidad de los dispositivos a medida que avanza la tecnología, algunos diseñadores y fabricantes están trabajando desde hace décadas en la construcción de celdas de memoria “rad-hard”, las cuales presentan una mejor tolerancia a la radiación. Algunas de estas soluciones son construir celdas de memoria que contienen 10 ó más transistores [CA96, JA09], de esta forma la información se almacena por lo menos en 4 nodos de modo que la descarga de una sola capacitancia se recupera fácilmente. Otros añaden resistencias a las memorias CMOS para filtrar los cortos picos de corriente generados por la inyección de carga [RO92]. También, algunos dispositivos tienen bits redundantes con el fin de incorporar códigos de detección y corrección de errores [RE12]. De esta forma, la tolerancia a errores aumenta con el inconveniente de una penalización en el área de implementación y en la velocidad de respuesta de la celda. Como siempre en cualquier tipo de diseño, existirá un compromiso en el que primará un requisito u otro en función de la aplicación. En este caso, entre robustez a la radiación frente a integración (y tensión de alimentación) y velocidad de respuesta.

CAPÍTULO 5

EFFECTO DE LA RADIACIÓN INDUCIDA POR PARTÍCULAS

INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, la constante evolución en la tecnología lleva consigo el uso de componentes cada vez más complejos. Muchos de estos circuitos integrados empleados en electrónica espacial experimentan SEP (*Single Event Phenomena*), tales como SEUs (*Single Event Upset*) o MLU (*Micro Latch-Up*), cuando se exponen a los rayos cósmicos. A medida que la tecnología se mueve hacia un nivel de integración más alto, el problema se vuelve más agudo, especialmente para memorias de semiconductores de alta integración. Por tanto, es esencial para obtener el conocimiento completo de su comportamiento en condiciones de radiación espacial predecir la tasa de SEP del sistema y garantizar así su fiabilidad en ambientes de radiación. La caracterización completa requiere la irradiación con haces de diferentes iones pesados y a diferentes energías (LETs) permitiendo modificar el ángulo de incidencia con respecto a la superficie del chip. El resultado final útil es un diagrama donde se representa la sección eficaz en función del LET del ion o también denominado curva de Weibull [EC92].

Los test de radiación en aceleradores de partículas se usan frecuentemente, tanto por centros de investigación como por empresas privadas, para la caracterización de los dispositivos y evaluación de la tasa de error o SER (*Single Event Rate*). Para la realización de este tipo de ensayos es necesario construir un equipo de test robusto mediante el cual se controle la memoria permitiendo leerla y escribirla a una velocidad razonable, que depende de la longitud del cable de conexión entre el chip y el circuito de control. Esta distancia depende a su vez de las condiciones del experimento. En algunas instalaciones, como por ejemplo en los aceleradores de partículas de alta energía situados en Los Álamos o Brookhaven, puede haber una intensa radiación hasta una distancia alrededor de un metro. Si el circuito de control está situado cerca del haz, puede ser necesario revestirlo con un material protector. En otras instalaciones, se sitúa detrás de bloques de hormigón que lo

protegen de cualquier inconveniente aunque éstos sean alcanzados por la acción del haz [ZI04]. Como se verá más adelante, en nuestro caso los dispositivos a evaluar se introducen dentro de una cámara de ensayo que sirve de protección a los dispositivos de control situados en el exterior.

Otras consideraciones a tener en cuenta para la caracterización de dispositivos electrónicos mediante radiación de partículas son, por una parte, la necesidad de conocer las características del haz en cuanto a uniformidad, contaminación y dosimetría. Es importante el que se garantice que el haz es uniforme sobre la memoria, que está compuesto únicamente por el ion con el que se pretende evaluar el dispositivo y que la fluencia se determina de forma precisa. Por otra, y relativo al protocolo de ensayo de radiación, se debe asegurar que los test no introducen resultados artificiales y que se evalúan todos los mecanismos que pueden ocasionar fallos en el chip.

En este capítulo se llevan a cabo, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, experimentos de radiación reales sobre las memorias estudiadas y se analizan profundamente los resultados obtenidos.

5.1 LET Y CARGA DEPOSITADA.

La transferencia lineal de energía (LET, *Linear Energy Transfer*) es la energía que deposita una partícula por unidad de masa, volumen y distancia recorrida. La unidad habitual del LET asociado a una partícula es $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$.

Para calcular el valor de la energía depositada por unidad de longitud ($\text{MeV}/\mu\text{m}$) en silicio se ha de multiplicar el LET ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$) por la densidad del silicio ($\rho = 2320 \text{ mg}/\text{cm}^3$). Si a su vez se multiplica por la carga del electrón (q_e) y se divide entre la energía media de creación de un par electrón-hueco por ionización en silicio ($E_{\text{par-ion}} = 3,6 \text{ eV}$), se obtiene la carga depositada por unidad de longitud en silicio expresada en $\text{pC}/\mu\text{m}$. De forma análoga se calcularía para otro material impactado. Esta unidad se suele utilizar más en el diseño electrónico, ya que, al expresar la carga depositada por el ion por unidad de longitud del material atravesado puede ser comparada con las dimensiones físicas del dispositivo y con la carga almacenada en los nodos críticos [NI11].

La carga total depositada por el ion en la región activa viene dada por:

$$Q_{\text{ion}} = (\text{LET} [\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}] \cdot 0,1031) [\text{pC}/\mu\text{m}] \cdot d \quad [5.1]$$

Donde d es el espesor de la capa activa o zona sensible y considerando que en ésta la variación de la energía del ion es despreciable.

Tal y como se observa en la figura 5.1, el LET está perfectamente definido en función de la energía incidente de cada partícula.

En la figura 5.2 se representa el LET en función de la distancia de penetración en el silicio para un ion de Xe con una energía incidente de 5 GeV. Inicialmente, cuando el ion incide sobre el material tiene un LET relativamente bajo debido a que tiene poco tiempo para interactuar con los electrones externos. Posteriormente, la partícula pierde energía y su LET se incrementa gradualmente debido a que el tiempo de interacción aumenta. Por último, el LET alcanza un valor máximo y disminuye drásticamente debido a la transferencia máxima de energía al material. La energía máxima transferida ocurre cerca del final de la trayectoria y se conoce con el nombre de *Pico de Bragg* [LO10].

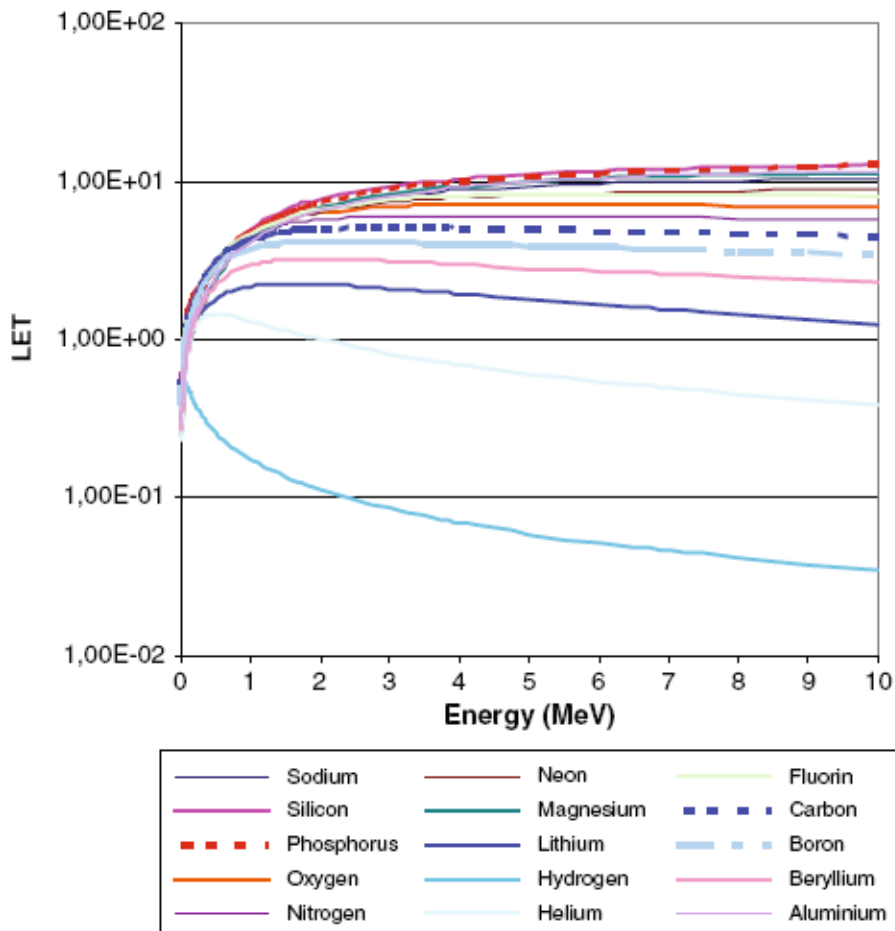


Fig. 5.1. LET (MeV·cm²/mg) en función de la energía incidente del ion ($E < 10$ MeV) para diferentes iones en Si [NI11].

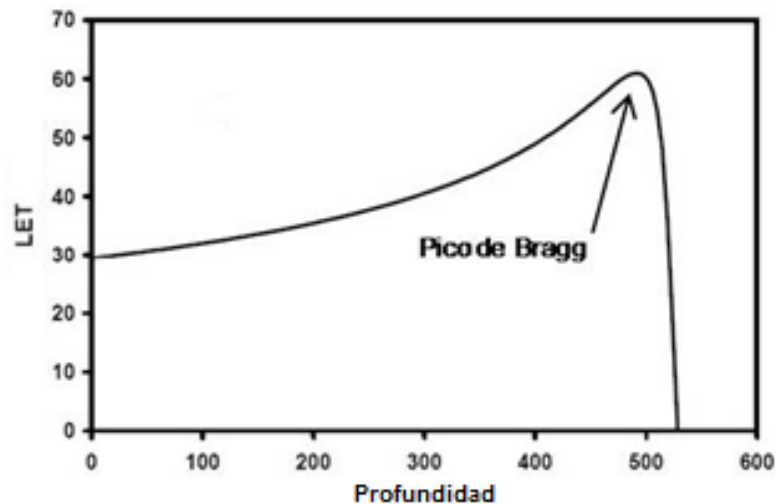


Fig. 5.2. Representación del LET ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$) en función de la profundidad de penetración (μm) en el Si de un ion ^{132}Xe a una energía de 5 GeV [Z185].

5.2 PREPARACIÓN DEL EXPERIMENTO.

Los test de radiación con iones se realizan en el Ciclotrón de la Universidad Católica de Lovaina, en Lovaina la Nueva (Bélgica), cuya instalación se llevó a cabo con la colaboración de la Agencia Espacial Europea (ESA). A continuación se describe con más detalle tanto las instalaciones como las características que deben cumplir la placa y circuitos fabricados para poder ser radiados.

5.2.1 El ciclotrón. Descripción.

El ciclotrón de Lovaina la Nueva es un ciclotrón multipartícula de energía variable capaz de acelerar protones (hasta 85 MeV), partículas alfa e iones pesados. En el caso de iones pesados el rango de energía cubierto está entre 0,6 MeV/AMU y 27,5 MeV/AMU. Para estos iones, la máxima energía puede ser determinada mediante la fórmula $110 Q^2/M$, donde Q es la carga del ion y M la masa expresada en unidades de masa atómica. Dichos iones se generan, en una sola etapa (6,4 GHz), a través de una fuente de resonancia ciclotrónica de electrones (RCE). Posteriormente se extraen a baja energía ($\sim 10\cdot Q$ KeV) y mediante un campo magnético discriminador se seleccionan aquellos que cumplen la relación M/Q deseada para ser acelerados. El uso de la fuente RCE permite generar iones altamente cargados y cocktails de iones. Estos están compuestos de iones con la misma o muy cercana relación M/Q. El cocktail de iones se inyecta, y tras ser acelerado en el ciclotrón, se extrae de forma separada por medio de un campo magnético de ajuste fino o un ligero cambio en la frecuencia RF. Una de las principales ventajas de la combinación entre fuente RCE y ciclotrón es la rapidez en el cambio entre los tipos de iones. Con el mismo cocktail sólo se necesitan unos pocos minutos para cambiar de un ion a otro [CYC].

Las tablas 5.1 y 5.2 muestran las características de los diferentes tipos de cocktails disponibles en el ciclotrón. Para experimentos con un carácter más específico también se dispone de un haz de bajo LET (Tabla 5.3). Entre las características indicadas se encuentran la energía del ion, la longitud de penetración (*range*) en μm en el silicio y el LET.

Cocktail nº 1: Baja penetración			
M/Q=5	Energy [MeV]	Range [μm Si]	LET [MeV·cm²/mg]
⁴⁰ Ar ⁸⁺	151	40	15.11
²⁰ Ne ⁴⁺	78	45	6.4
¹⁵ N ³⁺	60	59	3.3
M/Q=4.96			
Energy [MeV]	Range [μm Si]	LET [MeV·cm²/mg]	
¹²⁴ Xe ²⁵⁺	420	37	67.7
M/Q=4.94			
Energy [MeV]	Range [μm Si]	LET [MeV·cm²/mg]	
⁸⁴ Kr ¹⁷⁺	305	39	40.4

Tabla 5.1. Características del cocktail de iones pesados de baja penetración.

Cocktail nº 2: Alta penetración			
Ion	Energy [MeV]	Range [μm Si]	LET [MeV·cm²/mg]
¹³ C ⁴⁺	131	292	1.1
²² Ne ⁷⁺	235	216	3
⁴⁰ Ar ¹²⁺	372	117	10.2
⁵⁸ Ni ¹⁸⁺	567	100	20.4
⁸³ Kr ²⁵⁺	756	92	32.6

Tabla 5.2. Características del cocktail de iones pesados de alta penetración.

Ion	Energy [MeV]	Range [μm Si]	LET [MeV·cm²/mg]
Alpha	9.2	63	0.4

Tabla 5.3. Características del haz de bajo LET.

Las características principales del ciclotrón se describen a continuación:

Parámetros del haz: La fluencia del haz es variable entre unas pocas partículas y $1 \cdot 10^4$ n/(cm²·s). Mediante una petición especial, los usuarios tienen la posibilidad de incrementar la fluencia hasta un valor de $1 \cdot 10^6$ n/(cm²·s). La homogeneidad es de ± 10 % en un diámetro de 25 mm [CYC].



Fig. 5.3. Cámara de ensayo del ciclotrón.

Cámara de ensayo: Tiene la forma de un cilindro de 71 cm de diámetro y 76 cm de alto. Se abre por uno de sus lados, el cual está situado sobre un sistema de carril que permite separarlo de la cámara hasta un metro de distancia, facilitando el trabajo del usuario en cuanto a la preparación del experimento (Fig. 5.3). En la cara externa del lado que permite la apertura de la cámara se sitúa el tablero de conectores, que comunica con la cara interna. Los conectores de los que se dispone son: 6 D25, 10 BNC, 4 SHV y 4 3M de 40 pines. En el interior de la cámara se encuentra el marco en el que se acopla la placa con los dispositivos a radiar. Éste tiene unas dimensiones de 25 x 25 cm pudiendo desplazarse tanto en vertical como en horizontal permitiendo radiar todos los dispositivos de la placa. Además incorpora un movimiento de rotación desde -90 a 90 grados que permite la inclinación de la muestra frente al haz. Tanto el tablero de conectores como el marco se pueden ver en la figura 5.4. Una cámara de vídeo situada en el interior de la cámara de ensayo permite posicionar el dispositivo. Para evitar la radiación de los dispositivos adyacentes se sitúa un iris, cuya apertura se puede fijar entre 6 y 60 mm, controlado por el técnico a través de un mando. La

cámara está equipada con un rápido sistema capaz de realizar el vacío en unos 10 minutos [CYC].

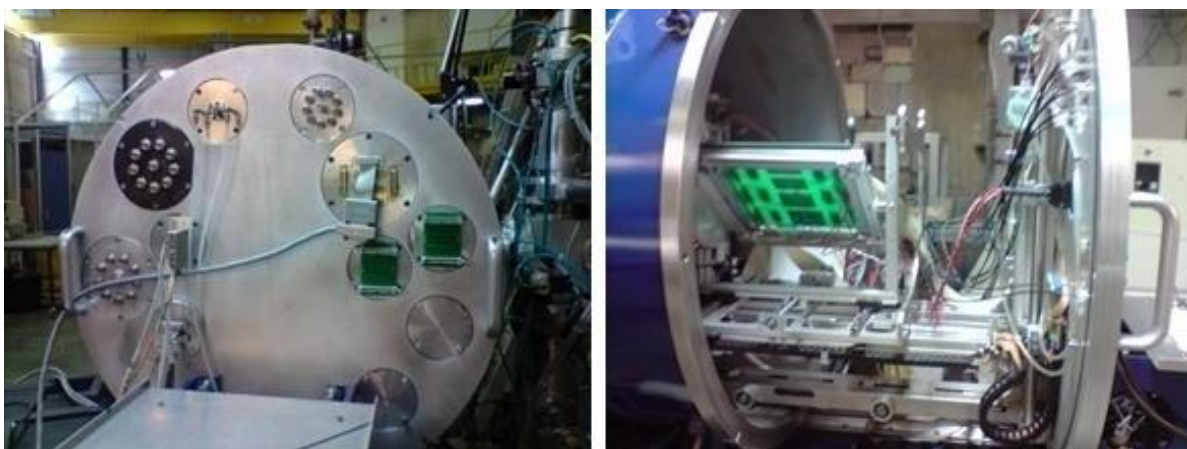


Fig. 5.4. Tablero de conectores (izquierda). Marco donde se acopla la placa con los dispositivos a radiar (derecha).

Dosimetría: Para controlar y monitorizar todos los parámetros del haz se sitúa una caja de dosimetría delante de la cámara de ensayo (Fig. 5.5). Dicha cámara contiene una jaula de Faraday, usada durante la preparación del haz a alta intensidad, y dos contadores de avalancha de placas paralelas (PPAC). Cuando el haz está listo, desenfocado y el flujo rebajado, se procede a una medición de la uniformidad del haz con un detector de barrera superficial colimado. Este detector se coloca de manera que permite un movimiento en X e Y. Los análisis pueden realizarse automáticamente por la interfaz de usuario, el perfil final se dibuja en la pantalla del usuario y se calcula el ancho de $\pm 10\%$. Si el perfil cumple con los criterios del usuario se realiza una calibración PPAC. Durante la irradiación, el flujo PPAC se integra con el fin de dar la fluencia total suministrada en el dispositivo. Este detector también se puede utilizar para apagar el haz cuando se alcanza una fluencia preestablecida. El segundo PPAC se mantiene en “stand by” en caso de fallo del primero [CYC].

Interfaz de usuario: Se dispone de una completa interfaz en LabView cuya pantalla principal (Fig. 5.6) muestra la mayoría de la información útil para los usuarios. Esto es, toda la información en cuanto al flujo del haz y las características relativas a la dosimetría, posicionamiento del dispositivo y vacío. El flujo y la fluencia se muestran en tiempo real así como el tipo de ion. Un gráfico muestra la variación del flujo en función del tiempo durante la radiación. El personal técnico del acelerador usa otras pantallas útiles para realizar procedimientos de escaneo automático, calibración, selección de haz y comunicaciones PLC [CYC].

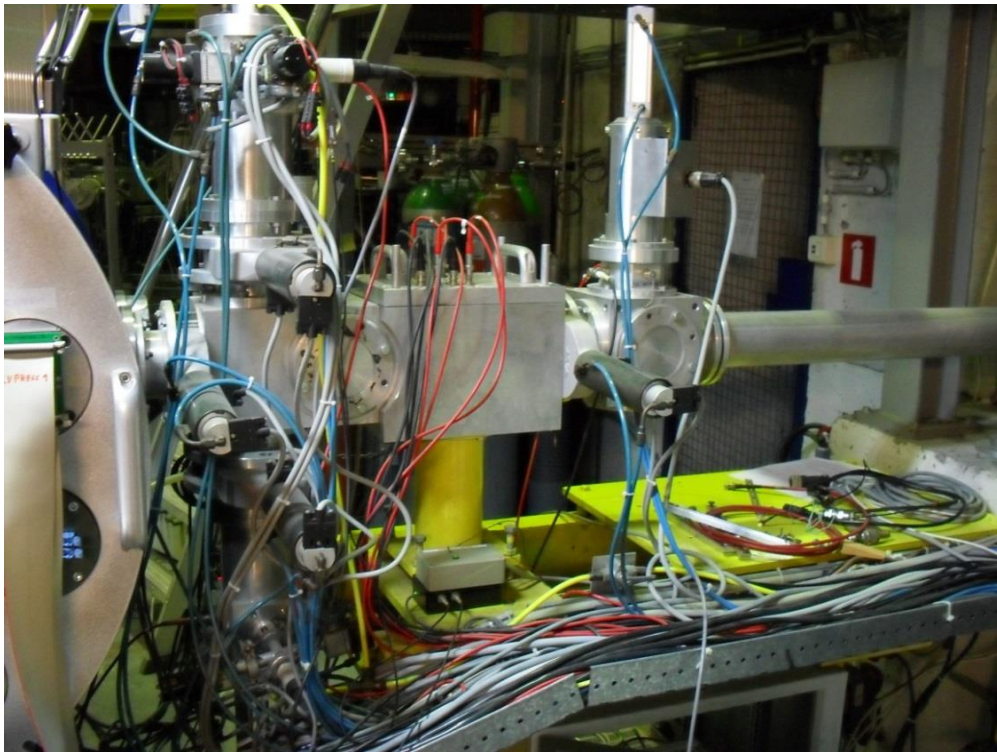


Fig. 5.5. Caja de dosimetría.

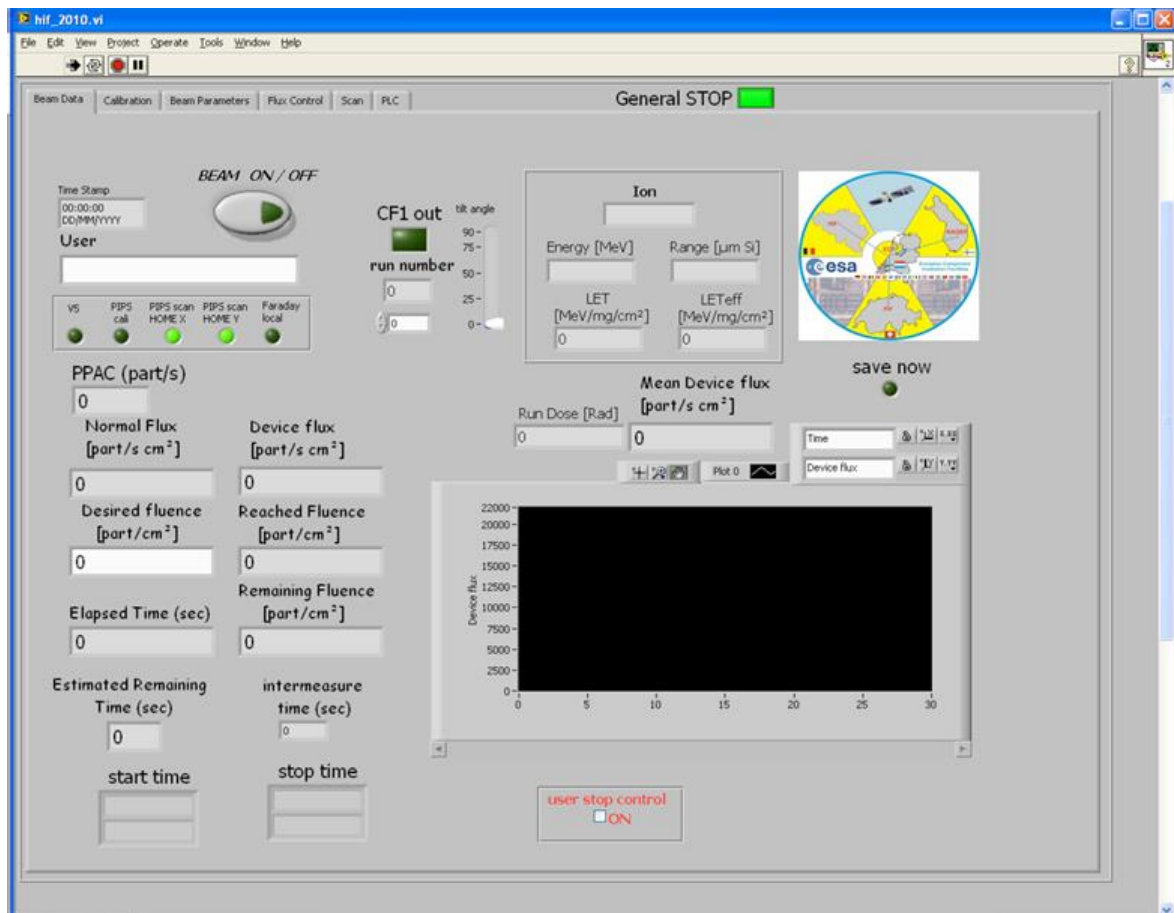


Fig. 5.6. Pantalla principal de la interfaz de usuario.

5.2.2 Circuitos de control y placa con las memorias a radiar.

Por una parte se han diseñado y fabricado los circuitos que permiten el control de las memorias a radiar. Por otra, se ha diseñado y fabricado la placa donde estarán situadas las memorias siguiendo las características específicas que permitirán acoplarla al marco interior de la cámara de ensayo.

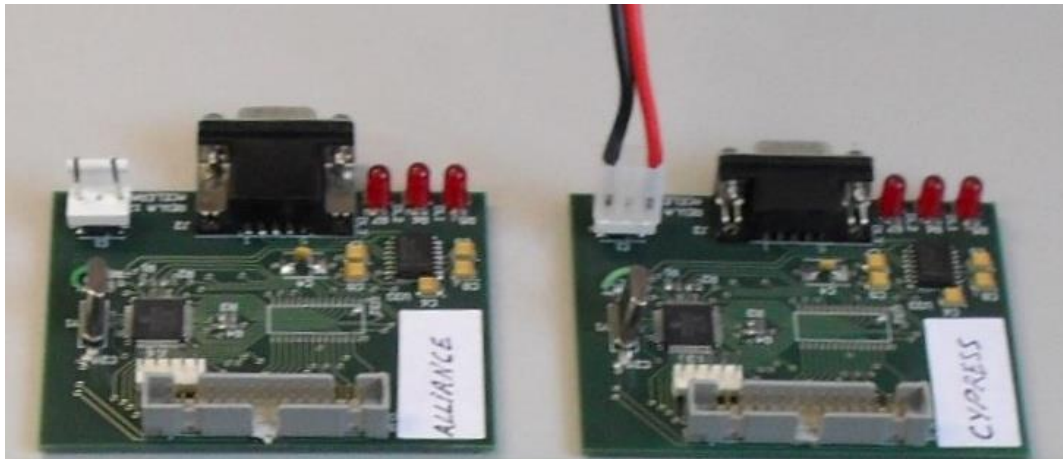


Fig. 5.7. Circuitos de control de las memorias durante los ensayos de radiación.

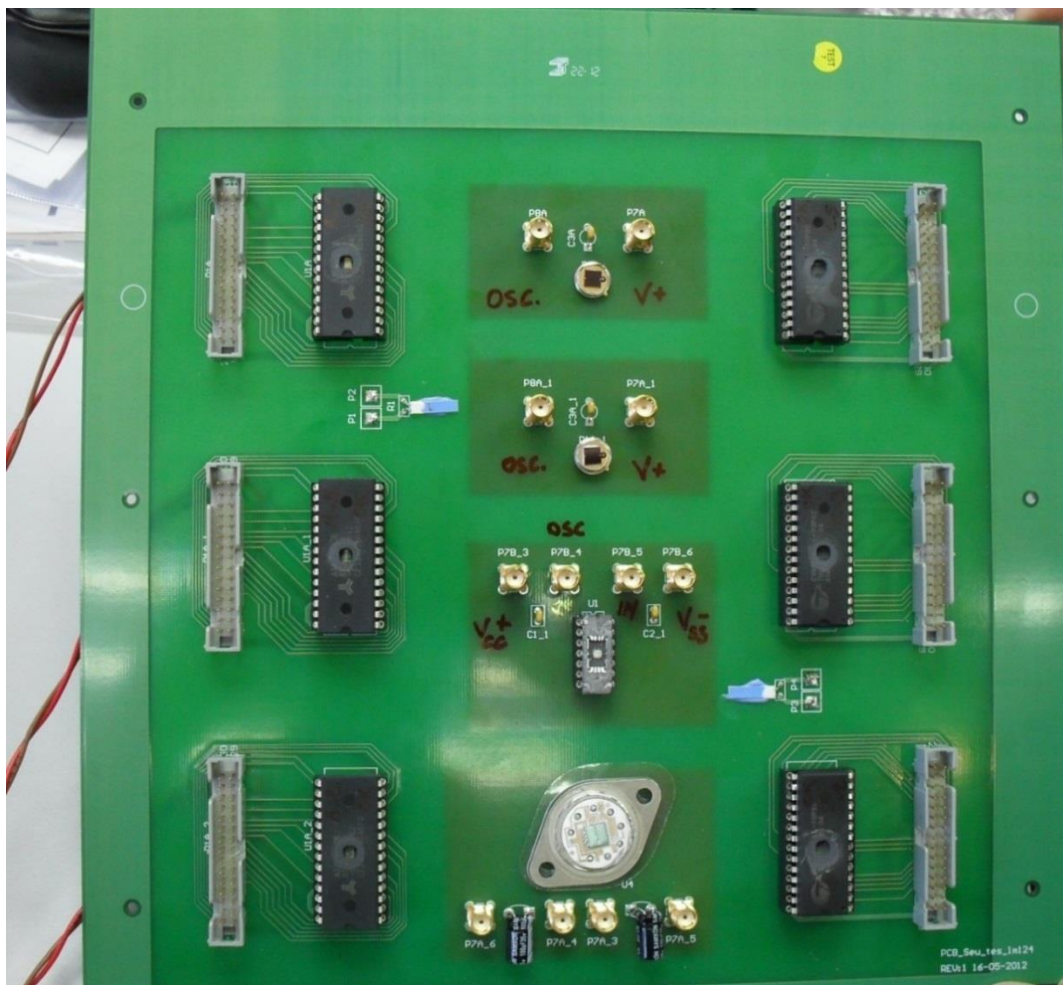


Figura 5.8. Placa con las memorias a radiar en el ciclotrón.

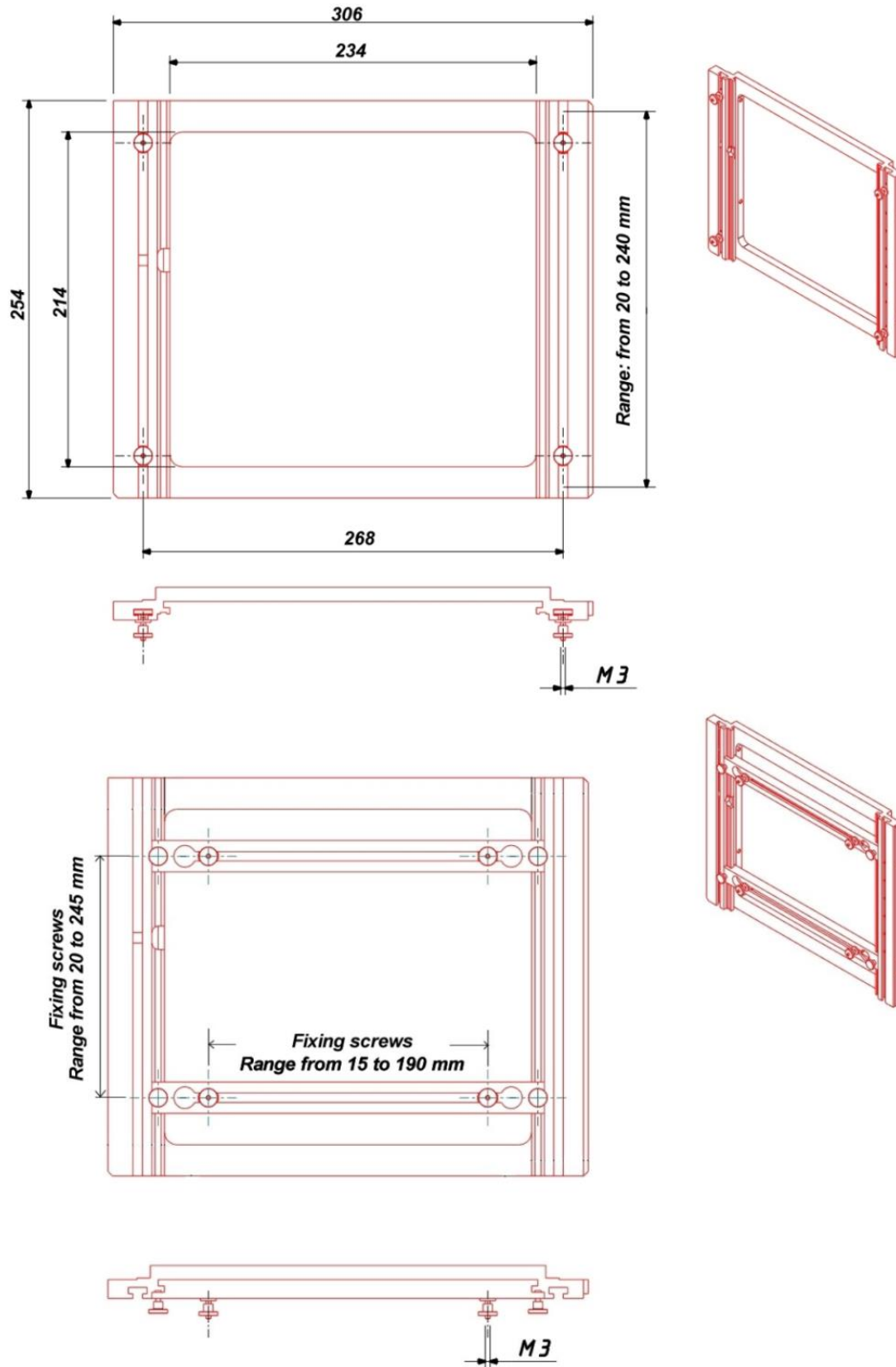


Fig. 5.9. Dimensiones del marco interior de la cámara de ensayo al que se acopla la placa con los dispositivos a radiar.

En cuanto a los circuitos de control (Fig. 5.7), permiten la escritura y posterior comprobación de las memorias en tiempo real mientras están siendo radiadas en el interior

de la cámara de ensayo. Su construcción se basa en el ya realizado para la radiación de las memorias mediante láser (Fig. 3.6), con la única diferencia de que se usa un PIC de menor tamaño y mejores prestaciones con el objetivo de reducir el tiempo de comprobación de las memorias, pues como se explicará más adelante, éste es un aspecto muy importante a tener en cuenta.

En la figura 5.8 se muestra la placa construida donde se sitúan las memorias CY y AS desencapsuladas a radiar. Además, se aprovecha para realizar ensayos con otros dispositivos como son un amplificador operacional de potencia OPA541, un amplificador operacional LM124 y fotodiodos OSD15-5T. Cabe mencionar que las alimentaciones y tierras de los dispositivos son independientes. La placa se coloca atornillada al marco situado en el interior de la cámara de ensayo, y por tanto debe cumplir con una serie de especificaciones en cuanto a dimensiones para que se adapte perfectamente. Las dimensiones del marco se muestran en la figura 5.9.

La alimentación de los circuitos de control y de las memorias es independiente. Mientras los primeros se alimentan directamente de las fuentes, la alimentación de las memorias se realiza a través del tablero de conectores situado en el lado de la cámara que permite su apertura. En dicho tablero también se conectan los buses que permiten la comunicación de las memorias con el microcontrolador.

Para la comunicación con las memorias se ha preparado un programa en LabView, cuya interfaz se muestra en la figura 5.10, que permite escribir las memorias con el patrón deseado, comprobarlas tantas veces como se desee eligiendo el intervalo de tiempo entre las comprobaciones y almacenar el resultado en un archivo. En el archivo se almacena información relativa al número total de errores, dirección y error.

Uno de los puntos críticos en el diseño de estos circuitos ha sido el tiempo de comprobación de las memorias. Este tiempo interesa que sea el mínimo posible para evitar una gran acumulación de errores que dificulte su análisis. Además, la comunicación con el PC se hace a través del puerto serie. Esto último presenta el inconveniente de que LabView abre este puerto un tiempo configurable (*Delay before read* en Fig. 5.10), hasta un valor máximo determinado que no se puede modificar. Si se intenta transmitir al PC mucha información, y el puerto serie no está abierto el suficiente tiempo, se perderán datos. Por tanto, y como a priori no se conoce el número de errores que se pueden generar en las memorias, hay que garantizar que durante el tiempo que dura la comprobación se transmita toda la información asociada a los errores. Este problema no se tiene con el láser, ya que, la

radiación no es continua y con un disparo no se produce una cantidad de errores tan grande como para que no dé tiempo a transmitirse toda la información asociada.

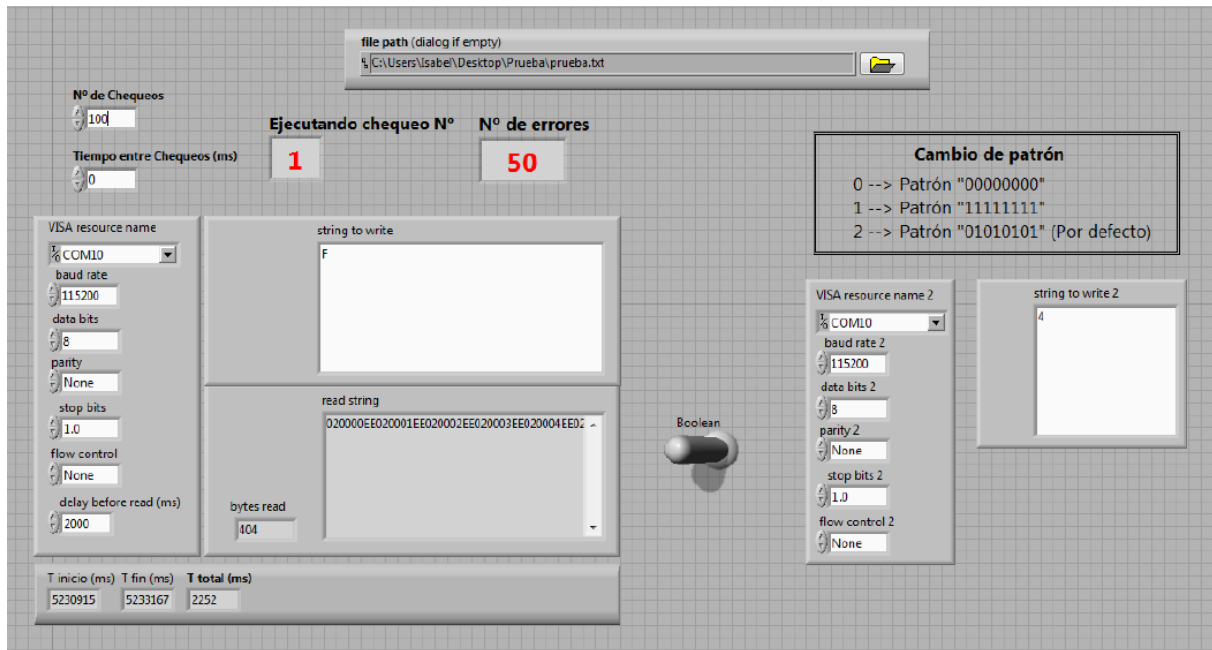


Fig. 5.10. Interfaz del programa realizado en LabView para la comunicación con las memorias durante los ensayos con iones.

Para solucionarlo, se depura el programa cargado en el PIC para que las rutinas destinadas a la comprobación de las memorias se ejecuten lo más rápidamente. También se incrementa la velocidad de transmisión de la información por el puerto serie a 115200 baudios. De esta forma se consigue que se pueda transmitir la información asociada a 500 errores en un tiempo máximo de 1 s (tiempo configurado en *Delay before read* y que se mantendrá abierto el puerto serie para cada comprobación durante la radiación). Como no se espera tener tantos errores en cada comprobación el problema queda solucionado. Si por el contrario el número de errores fuera superior al indicado, como el programa permite configurar el tiempo entre cada comprobación, el problema quedaría solventado al reducirse el número de errores acumulado al comprobar en un intervalo de tiempo menor.

Cabe destacar que durante los ensayos se emplea un detector de latch-up intercalado entre la fuente de alimentación y las memorias. El detector tiene una serie de parámetros configurables como son:

- *Valor máximo del pico de corriente y su duración*: Es el nivel de corriente por encima del cual se considera que ha habido latch-up, siempre que dicho valor se mantenga durante un tiempo igual o superior al tiempo configurado.

- *Tiempo en el que se desconecta la memoria de la alimentación*: Para restablecer el funcionamiento de la memoria cuando se ha detectado latch-up ésta debe ser desconectada de la alimentación durante un tiempo que puede ser configurado.

Luego, el detector monitoriza el consumo de corriente de la memoria durante su radiación considerando que ha habido latch-up si se supera el valor máximo durante más tiempo que el establecido. En este caso, se desconecta la alimentación de la memoria volviéndola a conectar una vez transcurrido el tiempo configurado. De ahí la importancia de que la alimentación de las memorias sea independiente de la de los circuitos de control, pues éstos no deben ser reinicializados si ocurre latch-up.

El estudio de la evolución de los errores realizados mediante láser sobre las memorias, en el que se obtuvieron los valores del consumo de corriente cuando ocurre MLUR (*Micro Latch Up Recuperable*) y MLUC (*Micro Latch Up Clásico*), permiten conocer los valores correctos de configuración del detector. De esta manera, se configura con un valor máximo del pico de corriente intermedio entre el consumo cuando ocurre MLUR y MLUC, evitando así la ocurrencia de un latch-up destructivo que dañe las memorias de forma irreversible.

5.2.3 Procedimiento.

Los ensayos de radiación sobre las memorias han sido realizados escribiéndolas con los tres patrones estándar (patrón "0", patrón "1" y CBP). Con todos ellos el protocolo de evaluación ha sido siempre el mismo, es decir, se escribe la memoria con el patrón deseado y se inicia la radiación. Posteriormente se comprueba el contenido de la memoria tantas veces y cada cierto tiempo como se estime adecuado. Durante la comprobación se recorren todas las posiciones de memoria comparando el valor leído con el patrón escrito. Cuando se detecta un error, se almacena la información (dirección y error) en un archivo y se corrige el error reescribiendo en esa posición de memoria el patrón inicial. Cuando se han realizado todas las comprobaciones se finaliza la radiación y se procede a radiar otra memoria. Una vez radiados todos los dispositivos con el mismo ion se solicita el cambio de ion.

El tiempo que se tarda en realizar una comprobación y almacenar el resultado en el archivo es de unos 1250 ms (incluyendo el tiempo que está abierto el puerto serie). Tras unas pruebas previas, en las que se varía la fluencia del experimento y se evalúa el número de errores obtenido, se decide fijar la fluencia de trabajo en $500 \text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$, ejecutando un total de 21 comprobaciones de forma continua (tiempo de 0 s entre cada comprobación) para minimizar la acumulación de errores, y para cada ion.

Con todos los iones se incidió de forma normal sobre las memorias, excepto con el ion Xe, con el que también se incidió de forma oblicua.

5.3 RESULTADOS.

Los resultados obtenidos durante los ensayos de radiación con iones para dos memorias CY (C y C1) y para dos memorias AS (A y A1), escritas con el patrón "0", patrón "1" y CBP se presentan en las tablas 5.4 y 5.5 respectivamente.

Estas tablas recogen el valor obtenido en cm^2 para la sección eficaz (σ) calculada a través de la expresión [3.8]. Donde el N° de eventos es el total de cambios de estado generados durante el experimento y el *Flujo del experimento* es, para el caso de ensayos con iones, el total de partículas por unidad de área (se toma durante la radiación de la pantalla disponible para los usuarios de la instalación (Fig. 5.6)). Ambos datos pueden extraerse de las tablas 1 y 2 del apéndice 2.

ION	TILT (°)	Range (µm)	LET (MeV·cm ² /mg)	C			C1		
				Patrón "0"	Patrón "1"	CBP	Patrón "0"	Patrón "1"	CBP
Xe	50	37	105,3	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$
	30		78,1	$4,75 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-3}$
	0		67,7	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$8,17 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$
Kr	0	92	32,6	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up
Ni	0	100	20,4	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	Micro latch-up	$8,94 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
Ar	0	117	10,2	$5,87 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-3}$	$5,86 \cdot 10^{-3}$

Tabla 5.4. Valores de la sección eficaz (σ), expresados en cm^2 , para dos memorias CY (C y C1) sometidas a radiación con varios tipos de iones y escritas con diferentes patrones.

ION	TILT (°)	Range (µm)	LET (MeV·cm ² /mg)	A			A1		
				Patrón "0"	Patrón "1"	CBP	Patrón "0"	Patrón "1"	CBP
Xe	50	37	105,3	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$4,89 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$2,91 \cdot 10^{-3}$
	30		78,1	$4,14 \cdot 10^{-3}$	$8,50 \cdot 10^{-3}$	$7,46 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$
	0		67,7	$1,39 \cdot 10^{-2}$	$3,11 \cdot 10^{-2}$	$9,59 \cdot 10^{-3}$	$6,92 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$7,58 \cdot 10^{-3}$
Kr	0	92	32,6	Micro latch-up	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$3,97 \cdot 10^{-2}$	$2,97 \cdot 10^{-2}$	$8,72 \cdot 10^{-2}$	$3,83 \cdot 10^{-2}$
Ni	0	100	20,4	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$4,64 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$
Ar	0	117	10,2	$3,40 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$3,79 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$9,76 \cdot 10^{-3}$	$6,16 \cdot 10^{-3}$

Tabla 5.5. Valores de la sección eficaz (σ), expresados en cm^2 , para dos memorias AS (A y A1) sometidas a radiación con varios tipos de iones y escritas con diferentes patrones.

También se indican los casos en los que ha ocurrido micro latch-up durante la radiación de la memoria. Para certificarlo, se repitió la radiación varias veces.

Las memorias han sido evaluadas con los iones pesados Xe, Kr, Ni y Ar, para los cuales se indica tanto su rango de penetración, en μm , en el silicio y su LET. La energía correspondiente del ion se puede extraer de las tablas 5.1 y 5.2. Con todos los iones se incide sobre la muestra de forma perpendicular (0°), realizando además pruebas relativas a la inclinación del haz con respecto a la muestra para el ion Xe.

La influencia del ángulo de incidencia, junto con otros aspectos relevantes, se analiza más profundamente en los apartados siguientes.

5.3.1 Curva de Weibull. Influencia del ángulo de incidencia.

Para caracterizar la sensibilidad de un determinado dispositivo destinado a una aplicación espacial se requiere relacionar la sección eficaz obtenida de los ensayos con el LET de los iones empleados en la radiación. El resultado es la curva $\sigma = f(\text{LET})$ o, también conocida como, curva de Weibull. Así, la sensibilidad del dispositivo a un tipo particular de radiación puede ser caracterizada en términos de sección eficaz, siendo función del LET del ión incidente. De esta manera se expresa la probabilidad de que ocurra un fenómeno transitorio o SEE por partícula incidente y por superficie, en función de LET asociado [LO10].

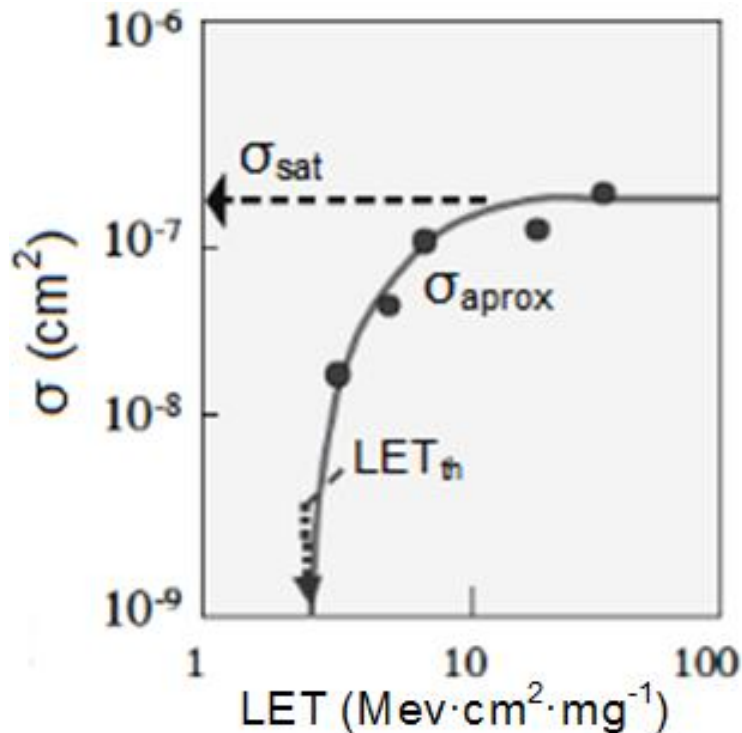


Fig. 5.11. Apariencia de la curva de Weibull [adaptado de NA08].

La figura 5.11 muestra la apariencia de la curva de Weibull y la información relevante que proporciona, es decir, el valor umbral para el LET (LET_{th}) a partir del cual comienzan a aparecer errores en el dispositivo y la sección eficaz de saturación (σ_{sat}) o valor constante para la sección eficaz a partir de un cierto valor de LET. La existencia de un umbral en el valor de LET se justifica debido a la necesidad de alcanzar una carga crítica para que se produzca un suceso aislado. La partícula cargada libera carga en una zona sensible del dispositivo en donde el volumen es constante y, por tanto, cuanto mayor sea la capacidad ionizadora de la partícula viajera, más carga se generará. Llega un punto, para niveles de LET elevados, en el que la carga liberada en esa región sensible y finita es máxima, no pudiendo generar más pares electrón – hueco, alcanzando un nivel de saturación en la generación de errores. Es decir, se alcanza el valor de sección eficaz de saturación manteniéndose la sección eficaz constante [LO10].

Los umbrales de sensibilidad a los iones pesados descienden a medida que aumenta la capacidad de integración de las tecnologías, pues el nivel de carga crítica desciende con el escalado.

Experimentalmente el LET se varía cambiando el tipo de ion y la energía. Otra forma adecuada, y usada a menudo, consiste en cambiar el ángulo de incidencia del haz. En este caso, comúnmente se asume la ley del $\cos(\theta)$ o que el ion incidente con un ángulo θ es equivalente a un ion incidente con un ángulo de incidencia de 0° (incidencia normal) con un LET efectivo que viene dado por la siguiente expresión:

$$LET(\theta) = \frac{LET(0^\circ)}{\cos(\theta)} \quad [5.2]$$

A partir de la expresión anterior es como se ha calculado el LET en las tablas 5.4 y 5.5 para el ion Xe con una inclinación de 30 y 50 grados. Para el cálculo de σ a través de la expresión [3.8] también hay que aplicar un factor de corrección al flujo del experimento, en el caso de que no se incida de forma perpendicular con el haz sobre la muestra, el cual vendría dado por la expresión:

$$\phi(\theta) = \phi(0^\circ) \cdot \cos(\theta) \quad [5.3]$$

Ya que, el haz fluye a través de una superficie de $a^2 \cdot \cos(\theta)$ en vez de a^2 [EC92].

Las figuras 5.12 y 5.13 muestran las curvas de Weibull, obtenidas a partir de las tablas 5.4 y 5.5 respectivamente, para las memorias CY y AS estudiadas. Lógicamente, para la representación de las curvas no se tiene en cuenta los casos en los que ha ocurrido micro latch-up pues no se tiene un valor para la sección eficaz. Además, la información relativa a los errores almacenada en el archivo resultado de la radiación no es fiable cuando ocurre micro latch-up. Esto es así debido a que, tal y como se verificó en el estudio de la memoria mediante láser, cuando ocurre micro latch-up la memoria no funciona correctamente resultando imposible corregir los errores hasta que se desconecta de la alimentación durante un tiempo. Además, antes de llegar a tener el micro latch-up clásico (MLUC) ocurre micro latch-up recuperable (MLUR), donde la memoria necesita de una media de dos a tres chequeos, aún cuando ésta no se está radiando, siendo el efecto acumulativo, para que vuelva a funcionar correctamente. Todo ello hace que la información almacenada en estos casos no sea válida para el cálculo de una sección eficaz.

Centrando el análisis para las memorias del mismo fabricante, se observa que los valores de la sección eficaz de una memoria a otra no son exactamente los mismos (tabla 5.4 para las memorias AS y tabla 5.5 para las memorias CY). Ello se debe principalmente, aparte de que dos memorias no se comportan igual, a que no quedan igual de limpias tras el desencapsulado. Sin embargo, se observa en la forma de las gráficas que la tendencia es la misma presentando el mismo comportamiento frente a los iones, el cual se analiza a continuación.

La sección eficaz aumenta con el LET hasta que éste alcanza un valor de $32,6 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, teniendo el comportamiento que se espera para la curva de Weibull.

No obstante, para valores de LET superiores el valor de la sección eficaz ha disminuido, en contra de lo que cabría esperar. En principio, el hecho de realizar incidencia normal con el ion Xe, el cual tiene el mayor valor de LET, debería producir el mayor número de errores y en consecuencia el mayor valor de la sección eficaz. Esto no es así debido al valor del rango de penetración para el ion Xe, el cual es el más bajo de todos los evaluados. El Xe tiene una longitud de penetración de $37 \mu\text{m}$ por lo que se podría pensar que no es capaz de llegar a la región sensible del chip. Pero como se vio durante el análisis con láser, esto no debería ser un problema, pues con el láser se han causado errores en estas memorias aún cuando a la longitud de onda de 800 nm la longitud de penetración en el silicio es de $12 \mu\text{m}$.

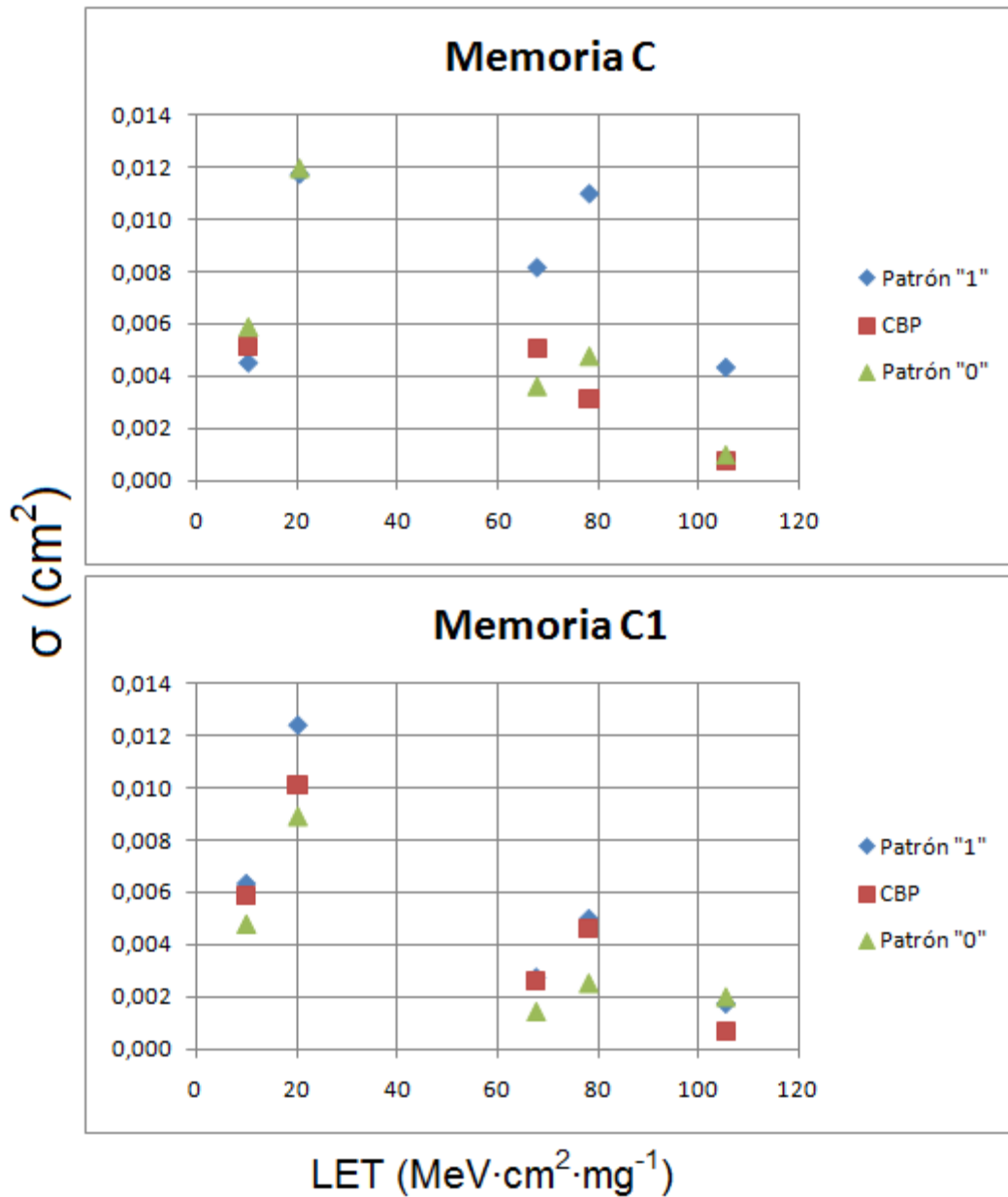


Fig. 5.12. Curva de Weibull para las memorias CY (C y C1) correspondiente a la tabla 5.4.

Más bien el motivo radica en que el desencapsulado no es perfecto, pues hay que tener en cuenta que con el láser se barrían únicamente las zonas que habían quedado bastante limpias mientras que con los iones esto no es así. La figura 5.14 muestra una foto de las memorias radiadas con iones donde se observa los restos que han quedado tras el desencapsulado. Concretamente, en los puntos marcados en rojo sobre las memorias A y C se mide un espesor de encapsulado de 47,8 y 68,4 μm respectivamente, siendo el rango de penetración del Xe en polietileno es de 51,51 μm (calculado mediante el programa SRIM, *Stopping and Range of Ions in Matter* [SRI]). Luego, si además de que no tiene un rango de penetración alto tiene que atravesar una capa de polímero, en la cual pierde energía, puede que no llegue al silicio, o si lo hace no sea capaz de transferir la suficiente energía como

para provocar errores, reduciéndose la proporción de superficie de la memoria en la que el ion Xe es capaz de generar errores. Con los otros iones no se presenta este problema porque tienen un valor para el rango de penetración bastante más alto.

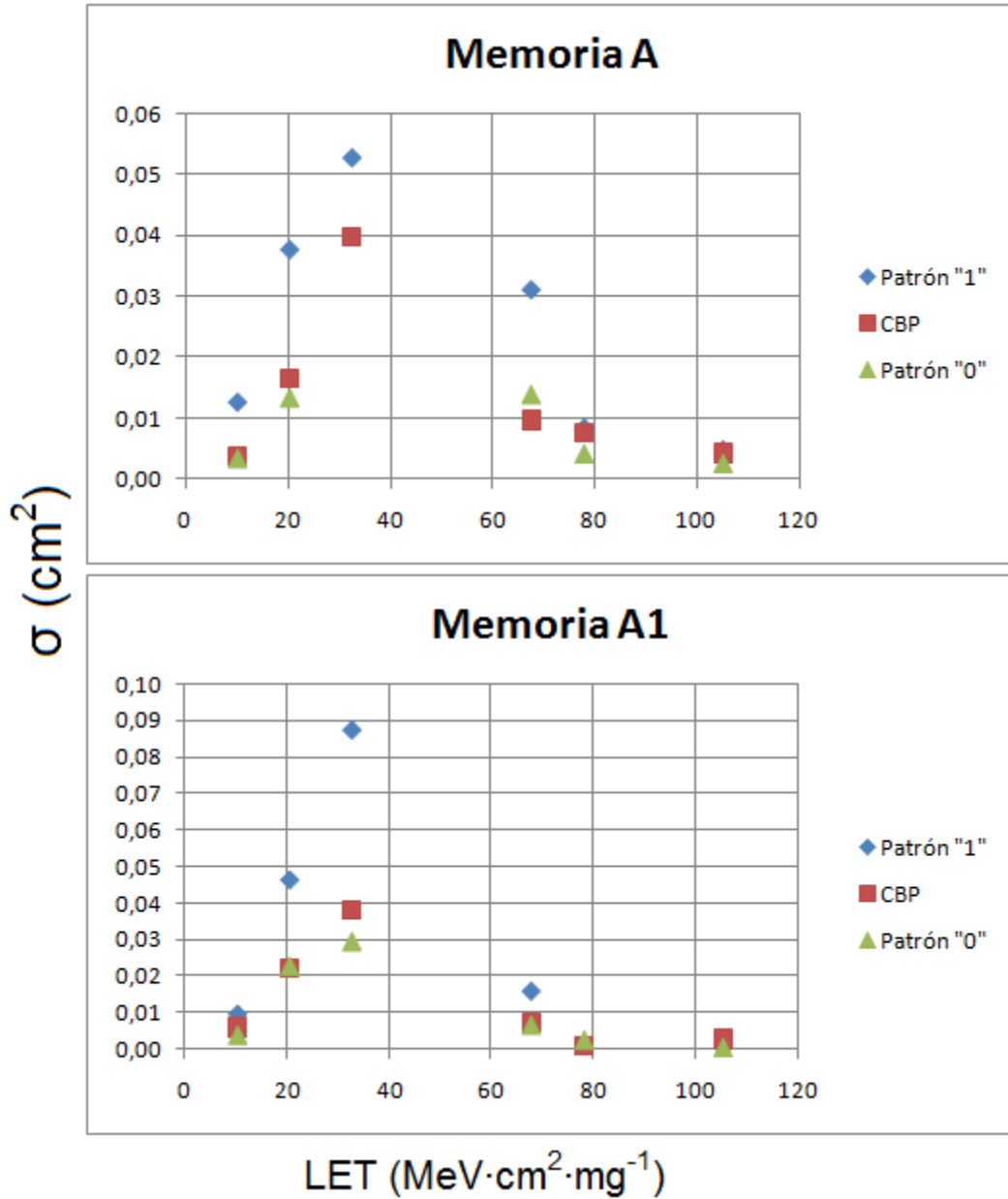


Fig. 5.13. Curva de Weibull para las memorias AS (A y A1) correspondiente a la tabla 5.5.

Con el ion Xe también se realizan ensayos inclinando el haz un ángulo θ con respecto a la muestra. Según lo visto, de esta manera se consigue variar el LET el cual vendría dado a partir de la expresión [5.2], teniendo un LET mayor y esperando obtener un mayor valor para la sección eficaz. Pero ¿se cumple la ley del $\cos(\theta)$ en cualquier caso?

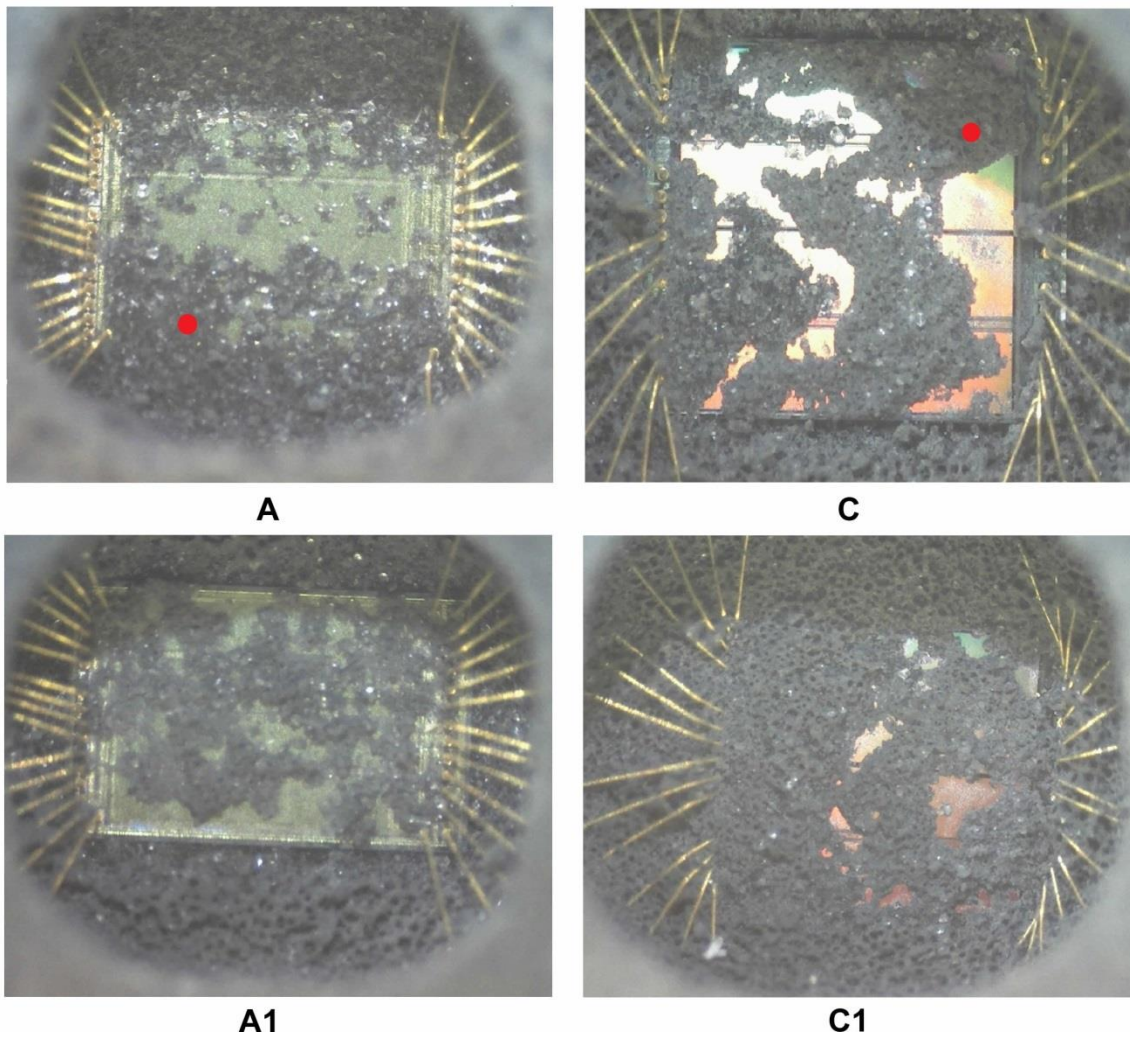


Fig. 5.14. Memorias AS (A y A1) y CY (C y C1) radiadas en el acelerador de partículas. Los puntos rojos en las memorias A y C indican el lugar donde se ha medido el espesor del encapsulado restante y de valor 47,8 y 68,4 μm respectivamente.

Cabe destacar que durante la determinación experimental de la curva Weibull de un dispositivo es común asumir que lo anterior es así, pero puede que al realizar el experimento el resultado obtenido no se corresponda con lo teóricamente esperado. Esto se debe a que la expresión [5.2] es un caso particular del modelo de volumen sensible [EC92]. Según este modelo, se debe definir un volumen sensible en forma de paralelepípedo (Fig. 5.15) determinando la curva de Weibull basándose en los siguientes argumentos:

- El volumen sensible del paralelepípedo viene dado por la superficie a , b y por la profundidad c , considerando un paralelepípedo delgado con $a \gg c$.
- El ion incidente tiene un LET constante para distancias mucho mayores que c .
- La energía depositada en el volumen sensible es proporcional a c en caso de una incidencia normal, y proporcional a $c/\cos(\theta)$ si el haz de iones incide con un ángulo θ con respecto a la muestra.

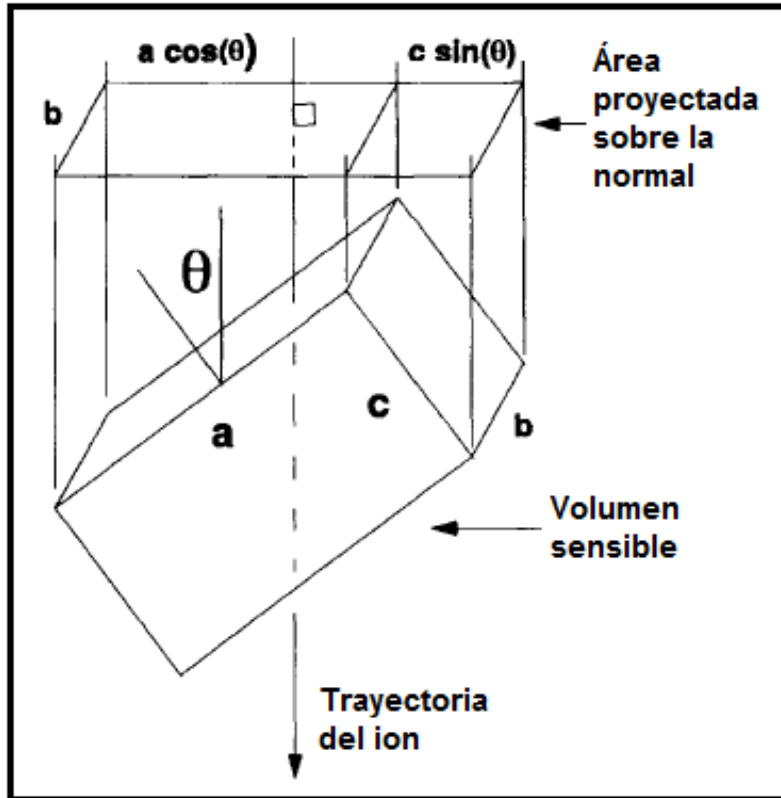


Fig. 5.15. Modelo de volumen sensible.

Entonces, se asume que el LET para un haz de iones que incide sobre la muestra con una inclinación θ se puede calcular a partir de la de la ley del $\cos(\theta)$ mostrada en la expresión [5.2]. Teniendo en cuenta la expresión [5.3] para el cálculo del flujo del experimento y así de la sección eficaz. De esta forma se ha calculado la sección eficaz para el ion Xe con incidencia de 30 y 50 grados en las tablas 5.4 y 5.5.

Pero, en el caso de que no se cumplan las condiciones anteriores, el $LET(\theta)$ debe calcularse a partir de la siguiente expresión general:

$$LET(\theta) = \frac{LET(0^\circ)}{F(\theta)} \quad [5.4]$$

Siendo el factor $F(\theta)$:

$$F(\theta) = \cos(\theta) + (c/a) \sin(\theta) \quad [5.5]$$

Este factor puede ser mayor que la unidad, con lo que $LET(\theta)$ sería menor que el $LET(0^\circ)$. El flujo del experimento también hay que multiplicarlo por este factor para obtener la sección

eficaz, la cual resultaría menor. La figura 5.16 representa $F(\theta)$ para diferentes valores de c/a . Si $c=a/2$ es importante hacer notar que $F(\theta)$ es casi constante de 0 a 60°.

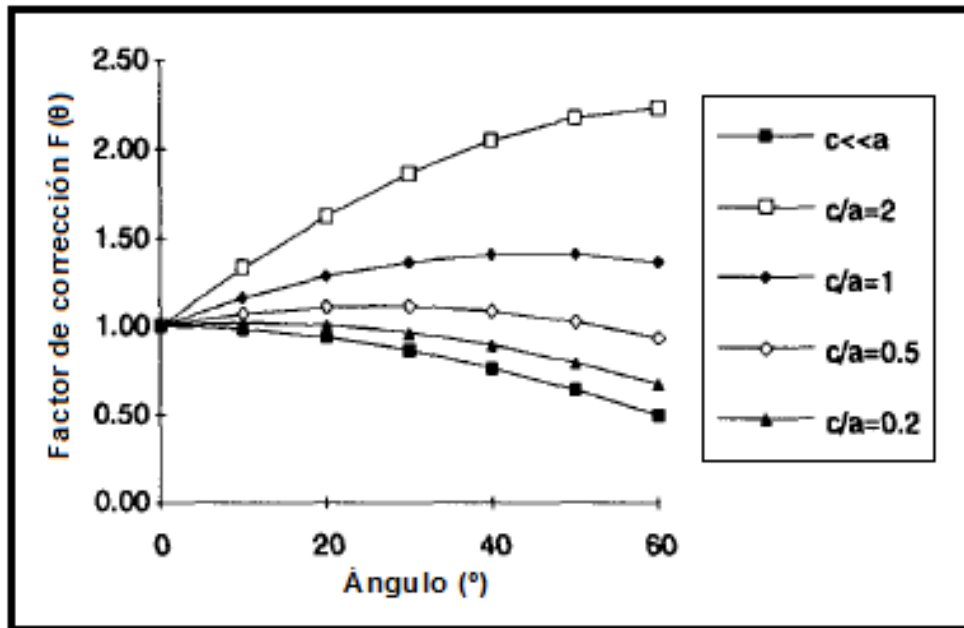


Fig. 5.16. Factor de corrección $F(\theta)$ en función del ángulo.

Por tanto, no siempre que se incide inclinando el haz un cierto ángulo con respecto a la muestra se obtiene una sección eficaz mayor que cuando se incide de forma normal.

En nuestro caso se debe tener en cuenta que el hecho de no tener un desencapsulado perfecto, combinado con el bajo valor de la longitud de penetración para el Xe, puede provocar que no se cumpla la condición de que “los rangos tienen que ser lo suficientemente grandes para asumir un LET constante a través de la región activa del circuito”. En consecuencia puede resultar un $LET(\theta)$ menor que el correspondiente al $LET(0^\circ)$, y por tanto una sección eficaz menor [EC92].

Por otra parte, otro factor que hace que no se obtenga una mayor sección eficaz inclinando el haz es que el chip se encuentra enterrado en el encapsulado, de manera que cuando se inclina éste un ángulo θ con respecto al haz se produce un efecto de sombra sobre parte de la memoria en la que no inciden iones (Fig. 5.17). Dicho efecto es más pronunciado cuanto mayor es θ [EC92].

En definitiva, y suponiendo que en nuestro caso se cumplan las condiciones para asumir la ley del $\cos(\theta)$, existen otros factores, como el hecho de tener un mal desencapsulado (junto con que el ion inclinado tenga bajo rango de penetración) y que el

lay-out se encuentre enterrado en el encapsulado, que pueden hacer que pese a incidir sobre la muestra inclinando el haz de iones un cierto ángulo no se obtenga un mayor número de errores o una mayor sección eficaz. Lo ideal es tener la posibilidad de realizar los ensayos en condiciones de encapsulado perfecto y lay-out sin enterrar, tratando de eliminar la contribución de los factores anteriores en el análisis de los resultados para ensayos con inclinación del haz con respecto a la muestra.

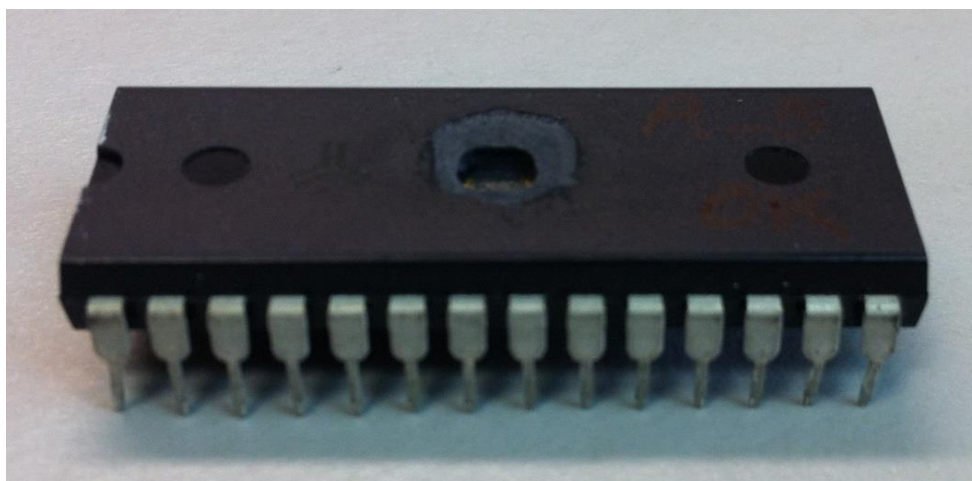


Fig. 5.17. Efecto sombra debido a la inclinación de la memoria con respecto a la normal.

En cuanto a los valores para LET_{th} y σ_{sat} , y tal y como muestran las curvas (Figs. 5.12 y 5.13), es el primero de ellos el que se puede hallar de forma más clara, estando en unos $10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ para la memoria AS y siendo algo inferior para la memoria CY. Con los resultados obtenidos es imposible determinar el valor correspondiente a σ_{sat} . Para ello habría que realizar ensayos con un mayor número de iones para tener más valores de LET con el fin de obtener una curva de Weibull más completa, tal y como la que se muestra en la figura 5.11.

5.3.2 Dependencia del patrón escrito.

Siguiendo con el análisis para las curvas de Weibull, se observa que la mayor sección eficaz se obtiene cuando la memoria está escrita con el patrón “1”, después con el patrón CBP y por último para el patrón “0”. Luego ocurren más errores, y por tanto la memoria presenta una mayor sensibilidad, cuando los datos que almacena son unos. Esta dependencia de la sección eficaz con el respecto al patrón escrito no es de extrañar, tal y como se ha demostrado en la literatura [EC92, NA08, NI11].

Estas memorias SRAM están construidas con celdas de transistores en tecnología CMOS. Cada celda se implementa con una pareja de inversores cruzados (Fig. 5.18).

Cuando la memoria está escrita con “0” ($BL = 0$) es el inversor 1 el sensible y en el que hay que depositar carga para invertir su estado. En el caso de estar escrita con “1” ($BL = 1$) es el inversor 2 el sensible. La asimetría existente en la implementación de ambos inversores hace que la tensión umbral necesaria para provocar el cambio de estado no sea la misma, y en consecuencia, exista una diferencia en la sensibilidad de la memoria en función del patrón escrito.

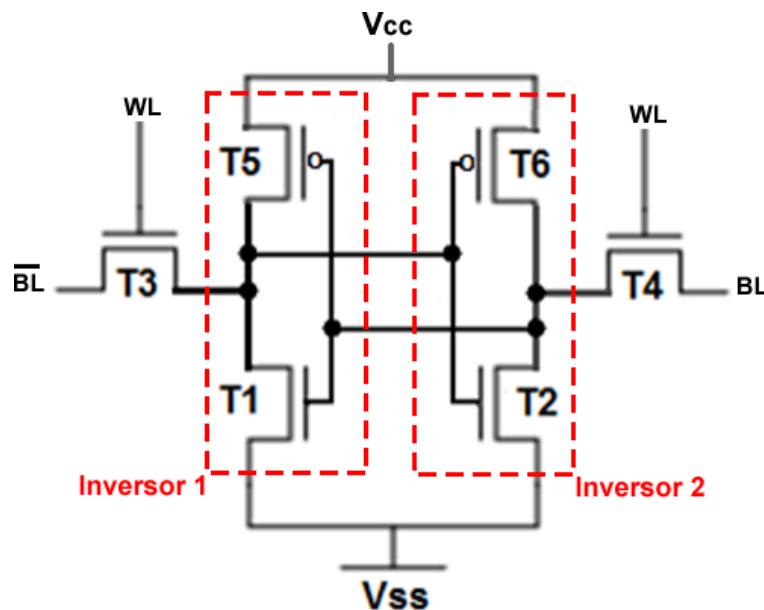


Fig. 5.18. Implementación con 6T de la celda de memoria.

La estructura representada en la figura 5.18 corresponde con la celda con la que se implementa la memoria CY. En la memoria AS se sustituyen los transistores T5 y T6 por dos resistencias, presentando un comportamiento equivalente, exceptuando el hecho de que el consumo de corriente en reposo es mayor. La memoria CY consume 25,80 mA por los 26,54 mA de la memoria AS, debido a que los transistores no consumen corriente en reposo.

5.3.3 Identificación de errores.

Una de las dificultades del análisis de los datos obtenidos durante los test con iones es discernir el número de MBUs (*Multiple Bit Upset*) y MCUs (*Multiple Cell Upset*) causados. Durante los ensayos, puede que algunos de los errores acumulados en la memoria ocurran en celdas pertenecientes a la misma palabra de datos y ser interpretados como un MBU. También, errores que ocurren en direcciones “cercanas” o “parecidas”, a juicio del analista, pueden ser interpretados como un MCU. Esta forma de identificar los MBUs y MCUs es la que se emplea y se asume como válida cuando únicamente se dispone de la información obtenida a partir de los ensayos. Sin embargo, esto no quiere decir que sea correcto pues nunca se puede estar totalmente seguro de que esto sea así. Existen técnicas basadas en

métodos estadísticos que estiman la distribución que siguen los MBUs y MCUs durante los ensayos con iones [MA09, BO13]. Con ello tratan de resolver el problema debido a la acumulación de errores y ser capaces de identificar qué tipos de errores exactamente han ocurrido en el sistema.

El conocimiento previo que se tiene de las memorias, gracias al estudio realizado con el láser, contribuye a caracterizar la distribución de eventos generados.

En primer lugar, se sabe que las memorias presentan interleaving en su topología, luego es más que probable que no se causen MBUs durante los ensayos con partículas.

Por otra parte, la clasificación de los MCUs realizada con láser en función de las direcciones englobadas en éstos (apartado 3.5.4.1 *Memoria CY* y apartado 3.5.4.2 *Memoria AS*) posibilita una mejor identificación de los MCUs que ocurren durante la radiación con iones. La tabla 5.6 muestra un pequeño extracto de direcciones en las que se ha provocado error en las memorias C1 Y A durante los ensayos con iones. Tanto la dirección como el error detectado se expresan en hexadecimal. En el caso 1, las direcciones en las que ha ocurrido el error son consecutivas formando un MCU de 2 errores e identificado como *tipo 3*. Un problema mayor en la identificación vendría mostrado en el caso 2, donde las direcciones no son consecutivas. Los errores podrían interpretarse como dos SEUs, sin embargo se corresponden con un MCU de dos errores (*tipo 1*). En el caso 3, los errores en las direcciones mostradas podrían identificarse como un MCU de dos errores (las direcciones 1 y 2 son *adyacentes byte alto*) y un SEU. No obstante, se identifica como un MCU de 3 errores, pues la dirección 3 es *adyacente byte bajo* con respecto a la 1.

Caso	Memoria	Dirección 1	Error	Dirección 2	Error	Dirección 3	Error
1	C1	6D2E	45	6D2F	45		
2	C1	5C0F	45	6C0E	45		
3	A	1EB2	54	1EB3	54	1FB2	57

Tabla 5.6. Extracto de direcciones y errores provocados durante los ensayos con iones.

En las tablas 1 y 2 del apéndice 2 se recoge el número y tamaño de los MCUs provocados durante los ensayos con iones en las memorias CY y AS respectivamente.

Cabe destacar que en las direcciones afectadas en los MCUs identificados no se encuentran exactamente todos los patrones obtenidos en los MCUs generados con láser. En

el caso de la memoria CY, el 80 % de las direcciones englobadas en los MCUs eran *tipo 1* (véase apartado 3.5.4.1 *Memoria CY*). Para la memoria AS, el 90 % de las direcciones englobadas en los MCUs eran direcciones consecutivas o *adyacentes byte bajo* (véase apartado 3.5.4.2 *Memoria AS*). Tampoco se generan MCUs de orden tan alto como los generados con láser. Todo ello es debido a que el fenómeno de generación de errores es distinto, pues el área de deposición de carga es mucho más amplia en el láser que con los iones.

5.4 CONCLUSIÓN.

En el presente capítulo se han explicado todos los pasos necesarios para llevar a cabo ensayos con partículas sobre las memorias. Se han realizado radiaciones con diferentes tipos de iones (LETs) escribiendo las memorias con tres patrones diferentes (patrón “0”, patrón “1” y CBP). También se realizan pruebas cambiando la inclinación del haz con respecto a la muestra. Con ellos se consigue variar el LET, y en memorias de considerable integración, aumentar la probabilidad de generar errores múltiples.

Con los resultados obtenidos se han calculado los valores para la sección eficaz en aquellos casos en los que no ha ocurrido latch up. A partir de éstos se han representado las curvas de Weibull. Éstas revelan la diferencia de sensibilidad de las memorias con respecto al patrón escrito debida a la asimetría en la implementación de los transistores que constituyen la celda de memoria. A partir de dichas curvas también ha sido posible obtener LET_{th} , pero no σ_{sat} . Pues con los experimentos realizados no se ha podido representar completamente la curva de Weibull y obtener la sección eficaz de saturación. Ésta se alcanza cuando el uso dos especies distintas de iones con LET creciente y con incidencia normal resulta en una sección eficaz constante [EC92].

Para una mejor caracterización de las memorias a partir de ensayos con partículas, éstas deberían estar perfectamente desencapsuladas (sin restos de plástico) y sin enterrar en el encapsulado. Con ello se evitan problemas relativos a que los iones no penetren hasta alcanzar la zona activa del chip, o efectos de sombra cuando se inclina la muestra con respecto al haz.

El conocimiento de las memorias que se extrae del láser ayuda a la hora de analizar los resultados obtenidos durante los ensayos con iones en cuanto al tipo de eventos ocurrido. Si una memoria es radiada durante suficiente tiempo, los errores pueden acumularse, resultando muy complicado determinar los tipos de eventos producidos. Con el conocimiento que de la memoria se tiene a partir del análisis con el láser (empleo de interleaving en su

construcción y direcciones que intervienen en los MCUs) se evita, en gran parte, este problema, pues siempre existe la posibilidad de que más de una partícula golpee en celdas adyacentes.

CAPÍTULO 6

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

INTRODUCCIÓN.

Llegados a este punto ya se han analizado las memorias desde los tres puntos de vista como son: radiación láser, radiación natural y radiación inducida por partículas. Como se ha demostrado a lo largo del presente trabajo, los resultados obtenidos y su profundo análisis son interesantes en sí mismos, permitiendo ver, dada una fuente de radiación, el efecto que causa en memorias de distintos fabricantes y extrapolar conclusiones.

En este capítulo, tal y como se avanzó en la introducción, se pretende asociar la radiación correspondiente al láser de estas características con el ion que causa los mismos efectos ionizantes. Al tratarse de dos fenómenos físicos distintos la correlación entre ambos experimentos es complicada.

La sección eficaz es el parámetro que permitirá realizar dicha comparación. Inicialmente, se partirá de los valores que hasta este punto se disponen de la sección eficaz de las memorias, puesto que se ha calculado tanto con láser como con iones. En primer lugar, se comparará el valor obtenido mediante los experimentos con láser (apartado 3.5.3 *Sección eficaz*), con los valores obtenidos de los ensayos con iones (apartado 5.3 *Resultados*). A continuación, se calcularán nuevos valores de la sección eficaz con láser con el fin de obtener valores con diferentes patrones y a diferentes energías, pues únicamente se calculó para el patrón CBP y para la energía de radiación. Para ello, se realizarán nuevas radiaciones con láser sobre las memorias teniendo en cuenta el resultado de la comparación inicial. Es decir, si se ha de radiar a una energía mayor o menor que la energía de radiación a la cual se obtuvo el primer valor para la sección eficaz con láser. Los nuevos valores serán más cercanos a los obtenidos con iones, teniendo de esta forma, una mayor aproximación.

Los resultados de estas nuevas radiaciones, junto con los ya obtenidos en capítulos anteriores, permitirán analizar, desde un punto de vista general, si con la radiación mediante láser en memorias se consiguen los mismos efectos que los observados en la radiación con

iones. Esto debe hacerse así, ya que, la caracterización completa de un dispositivo para aplicaciones de Espacio se realiza radiando y estudiando su comportamiento para diferentes energías o LETs.

Posteriormente se calculará la carga depositada por el láser e iones a las diferentes energías y LETs respectivamente, discutiendo los resultados.

6.1 APROXIMACIÓN DE LA SECCIÓN EFICAZ.

En este apartado se realiza la comparación inicial de los valores disponibles para la sección eficaz de las memorias, cuyo resultado permitirá ajustar la energía para las nuevas radiaciones con láser. Para facilitar la comparación de todos los datos obtenidos con láser e iones para las memorias CY y AS, todos ellos se mostrarán combinados en las tablas 6.1 y 6.2 respectivamente. Tanto en este apartado como en los sucesivos, se analizarán los aspectos más relevantes de dicha comparación haciendo referencia a estas tablas.

6.1.1 Memoria CY.

La sección eficaz obtenida mediante láser para la memoria CY (apartado 3.5.3.1 Memoria CY), a 800 nm, 153,6 pJ y patrón CBP fue: $\sigma_{CY,LÁSER} = 3,38 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ (en negrita en la tabla 6.1).

MEMORIA CY									
Partícula	Range (μm)	LET ($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$)	Q_{dep} (pC)	C			C1		
		Energía Láser (pJ)		Patrón "0"	Patrón "1"	CBP	Patrón "0"	Patrón "1"	CBP
Xe (50°)	37	105,3	21,71	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$
LÁSER	12	117,6	9,30	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-3}$
Xe	37	67,7	13,96	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$8,17 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$
Xe (30°)	37	78,1	16,10	$4,75 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$	$4,61 \cdot 10^{-3}$
Ar	117	10,2	2,10	$5,87 \cdot 10^{-3}$	$4,54 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^{-3}$	$6,36 \cdot 10^{-3}$	$5,86 \cdot 10^{-3}$
LÁSER	12	126	9,96	$8,75 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$9,40 \cdot 10^{-3}$	$8,75 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$9,40 \cdot 10^{-3}$
Ni	100	20,4	4,21	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	Micro latch-up	$8,94 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
LÁSER	12	133,2	10,53	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$
LÁSER	12	153,6	12,14		$4,06 \cdot 10^{-2}$	$3,38 \cdot 10^{-2}$		$4,06 \cdot 10^{-2}$	$3,38 \cdot 10^{-2}$
Kr	92	32,6	6,72	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up	Micro latch-up

Tabla 6.1. Valores de la sección eficaz (σ), expresados en cm^2 , para la memoria CY bajo radiación de iones y láser a diferentes energías y diferentes patrones. En los iones en los que no se indica ángulo la incidencia es perpendicular (0°).

Comparando este valor con los obtenidos durante los ensayos con iones (valores sin sombrear en la tabla 6.1) se observa que éstos son inferiores. Por tanto, se tendrán que llevar a cabo nuevas radiaciones con láser en la memoria CY a una menor energía con el objetivo de conseguir una mayor aproximación.

Los nuevos valores obtenidos para la sección eficaz tras las radiaciones con láser se muestran sombreados en azul en la tabla 6.1. La sección eficaz se obtiene de forma análoga a la explicada en el apartado 3.5.3.1 *Memoria CY*. El número de errores obtenidos en cada zona para las diferentes energías se puede encontrar en la tabla 1 del apéndice 3. Se han radiado las zonas más sensibles y por tanto las más significativas para el cálculo de la sección eficaz, pues a medida que se baja la energía de radiación apenas se obtendrían errores en las zonas no radiadas.

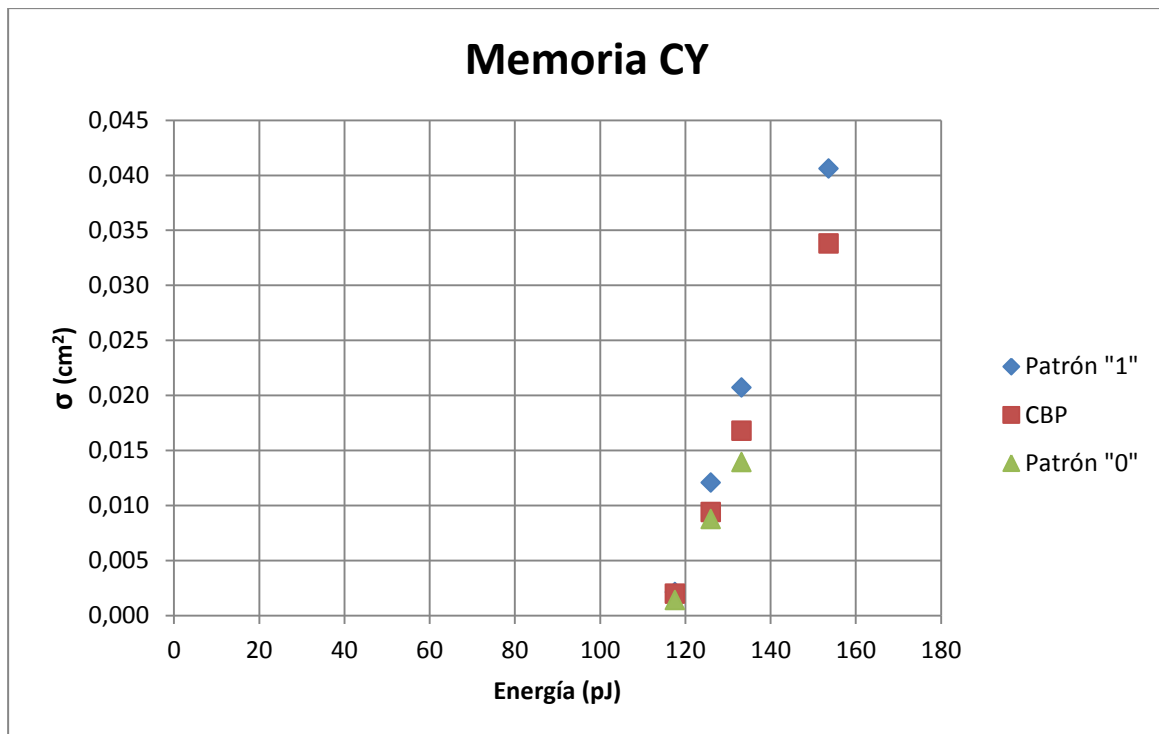


Fig. 6.1. Curva de Weibull obtenida con láser para la memoria CY.

A partir de los valores mostrados en la tabla 6.1 se representa la curva de Weibull para la memoria CY obtenida mediante el láser (Fig. 6.1). En el caso de ensayos con láser la curva de Weibull representa el valor de la sección eficaz con respecto a la energía de radiación, teniendo el aspecto mostrado en la figura 5.11. El valor umbral de energía a partir de cual se obtendrían errores en el dispositivo está en torno a los 115 pJ. Lógicamente, a medida que aumenta la energía la sección eficaz se hace mayor. El valor de saturación de la sección eficaz se encontraría para energías superiores a los 150 pJ.

Tanto de la tabla 6.1 como de la curva de Weibull (Fig. 6.1) es posible extraer una dependencia de la sensibilidad de la memoria con respecto al patrón escrito. La memoria, tal y como cabía esperar a partir del análisis realizado con iones, es más sensible cuando está escrita con unos que con ceros. Este aspecto se tratará con mayor profundidad en el apartado 6.2.2 *Sensibilidad con respecto al patrón*.

En la figura 6.2 se muestran de forma conjunta las curvas de Weibull obtenidas con láser e iones para la memoria CY a partir de los valores mostrados en la tabla 6.1. Los valores obtenidos para la sección eficaz con láser a una energía de 117,6 y 126 pJ estarían muy próximos a los obtenidos con iones para el ion Xe (0^0 y $67,7 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$) y Ni ($20,4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$) respectivamente (enmarcados en naranja y morado en tabla 6.1). Aunque de forma experimental se acepta un error de hasta el 10 %, la posibilidad de realizar un ajuste fino de la energía del láser permite una aproximación mucho mayor. Estos serían los valores más próximos, pero según lo mostrado tanto en la tabla 6.1 como en la figura 6.2, y de forma general, se puede decir que los valores obtenidos para la sección eficaz con láser a estas energías son muy similares a los obtenidos con iones de esos LETs.

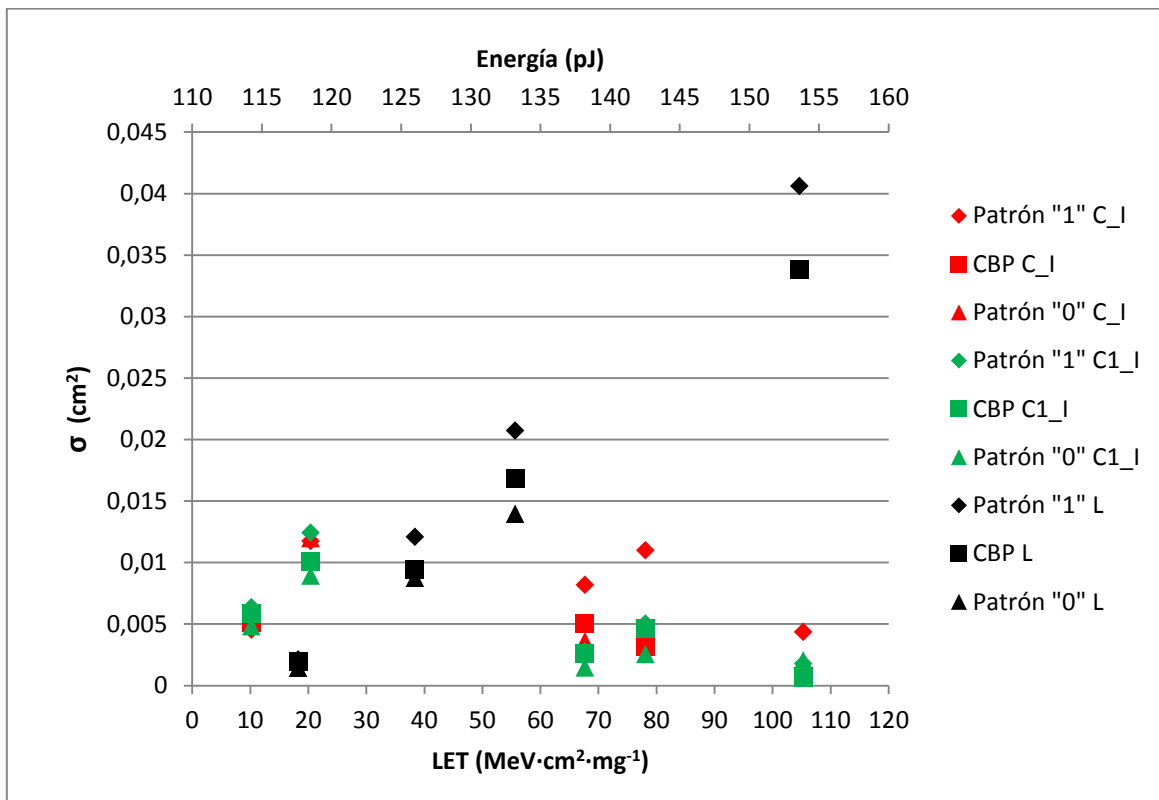


Fig. 6.2. Curvas de Weibull obtenidas con láser e iones para la memoria CY. Los datos mostrados en negro corresponden al láser, mientras que los mostrados en rojo y verde corresponden a los obtenidos con iones para las memorias C y C1 respectivamente.

6.1.2 Memoria AS.

La sección eficaz obtenida con el láser para la memoria AS (apartado 3.5.3.2 *Memoria AS*), a 800 nm, 132 pJ y patrón CBP fue: $\sigma_{AS,LÁSER} = 9,23 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ (en negrita en la tabla 6.2).

MEMORIA AS									
Partícula	Range (μm)	LET (MeV·cm ² /mg)	Q _{dep} (pC)	A			A1		
		Energía Láser (pJ)		Patrón "0"	Patrón "1"	CBP	Patrón "0"	Patrón "1"	CBP
Xe (50°)	37	105,3	21,71	2,55·10 ⁻³	4,89·10 ⁻³	4,19·10 ⁻³	7,2·10 ⁻⁴	7,0·10 ⁻⁴	2,91·10 ⁻³
Xe (30°)	37	78,1	16,10	4,14·10 ⁻³	8,50·10 ⁻³	7,46·10 ⁻³	2,84·10 ⁻³	1,1·10 ⁻³	1,14·10 ⁻³
LÁSER	12	132	10,43		1,13·10 ⁻²	9,23·10⁻³		1,13·10 ⁻²	9,23·10⁻³
Ar	117	10,2	2,10	3,40·10 ⁻³	1,27·10 ⁻²	3,79·10 ⁻³	4,16·10 ⁻³	9,76·10 ⁻³	6,16·10 ⁻³
LÁSER	12	144	11,38	1,31·10 ⁻²	1,88·10 ⁻²	1,43·10 ⁻²	1,31·10 ⁻²	1,88·10 ⁻²	1,43·10 ⁻²
Xe	37	67,7	13,96	1,39·10 ⁻²	3,11·10 ⁻²	9,59·10 ⁻³	6,92·10 ⁻³	1,61·10 ⁻²	7,58·10 ⁻³
LÁSER	12	156	12,33	2,06·10 ⁻²	3,39·10 ⁻²	2,23·10 ⁻²	2,06·10 ⁻²	3,39·10 ⁻²	2,23·10 ⁻²
Ni	100	20,4	4,21	1,33·10 ⁻²	3,76·10 ⁻²	1,65·10 ⁻²	2,3·10 ⁻²	4,64·10 ⁻²	2,25·10 ⁻²
LÁSER	12	192	15,18	2,91·10 ⁻²	4,58·10 ⁻²	3,13·10 ⁻²	2,91·10 ⁻²	4,58·10 ⁻²	3,13·10 ⁻²
Kr	92	32,6	6,72	Micro latch-up	5,26·10 ⁻²	3,97·10 ⁻²	2,97·10 ⁻²	8,72·10 ⁻²	3,83·10 ⁻²

Tabla 6.2. Valores de la sección eficaz (σ), expresados en cm^2 , para la memoria AS bajo radiación de iones y láser a diferentes energías y diferentes patrones. En los iones en los que no se indica ángulo la incidencia es perpendicular (0°).

Este valor es muy próximo al obtenido para la memoria A con el ion Xe (0°) (Tabla 6.2). Con el objetivo de ver si para el patrón "1" el valor de la sección eficaz que se obtendría con láser también es cercano, se radia de nuevo la memoria AS manteniendo la energía y escribiéndola con el patrón "1". El resultado que se obtiene es $1,13 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ (Tabla 6.2), no tan próximo como nos gustaría al obtenido para el Xe (0°) con patrón "1".

Con el fin de obtener con láser valores similares para la sección eficaz a los que en su día se obtuvieron con iones, se realizan radiaciones en la memoria AS a mayor energía y con diferentes patrones. Además de los valores ya citados, todos los resultados obtenidos se recogen en la tabla 6.2. La sección eficaz se obtiene de forma análoga a la explicada en el apartado 3.5.3.2 *Memoria AS*. En la tabla 2 del apéndice 3 se muestran las zonas que han sido radiadas con láser y el número de errores obtenidos. Para calcular la sección eficaz se obtiene el número de errores en toda la memoria interpolando los resultados obtenidos en las zonas radiadas al total de la memoria. Para ello se tiene en cuenta la contribución que

las zonas radiadas tienen con respecto al total, pues la tendencia en la obtención de errores es la misma. Aunque se podría pensar en calcular una sección eficaz para una determinada zona y compararla a la obtenida con los iones, pese a que con éstos se evalúa la memoria en su totalidad, esto sería válido únicamente si la sensibilidad de la memoria fuera uniforme. Pero el mapa de sensibilidad obtenido demuestra que esto no es así, poniendo de manifiesto la necesidad de tener en cuenta todas las zonas posibles.

En la figura 6.3 se muestra la curva de Weibull obtenida con láser para la memoria AS. Se observa la dependencia de la sensibilidad con respecto al patrón escrito. Como cabe esperar, la sección eficaz aumenta con la energía. El valor umbral de energía a partir de cual se obtendrían errores en el dispositivo sería inferior a 132 pJ (mínimo valor de la energía para el que se muestra dato de la sección eficaz). El valor de saturación de la sección eficaz se encontraría para energías algo superiores a los 192 pJ (máximo valor de energía para el que se muestra dato de la sección eficaz y para el que la figura 6.2 revela una ligera tendencia hacia la saturación).

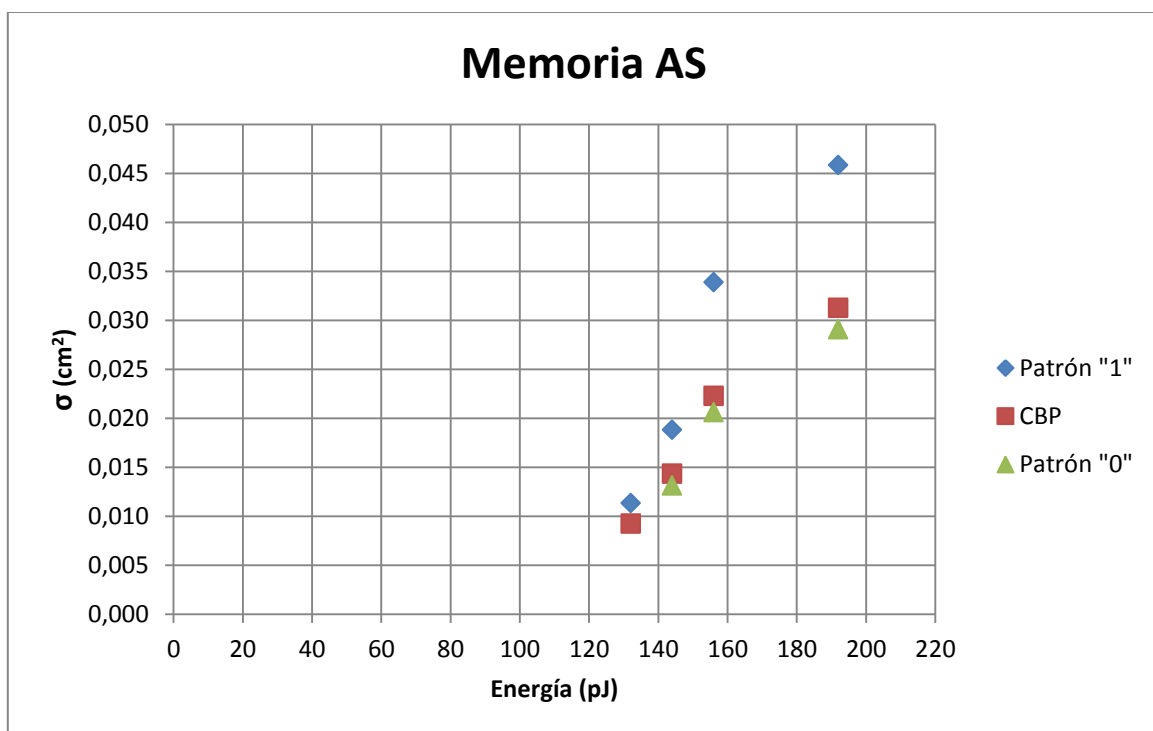


Fig. 6.3. Curva de Weibull obtenida con láser para la memoria AS.

La figura 6.4 muestra de forma conjunta las curvas de Weibull obtenidas con láser e iones para la memoria AS a partir de los valores mostrados en la tabla 6.2. Los valores enmarcados con el mismo color en la tabla 6.2 serían los más próximos. En este caso se observa que los valores para los patrones "0" y CBP son los más cercanos, no siéndolo

tanto para el patrón "1". Este hecho, consecuencia de la dependencia de la sensibilidad de la memoria con respecto al patrón escrito, se tratará en el apartado siguiente.

De forma general, y al igual que para la memoria anterior, se puede decir que los valores obtenidos para la sección eficaz con láser a estas energías son muy similares a los obtenidos con iones de esos LETs.

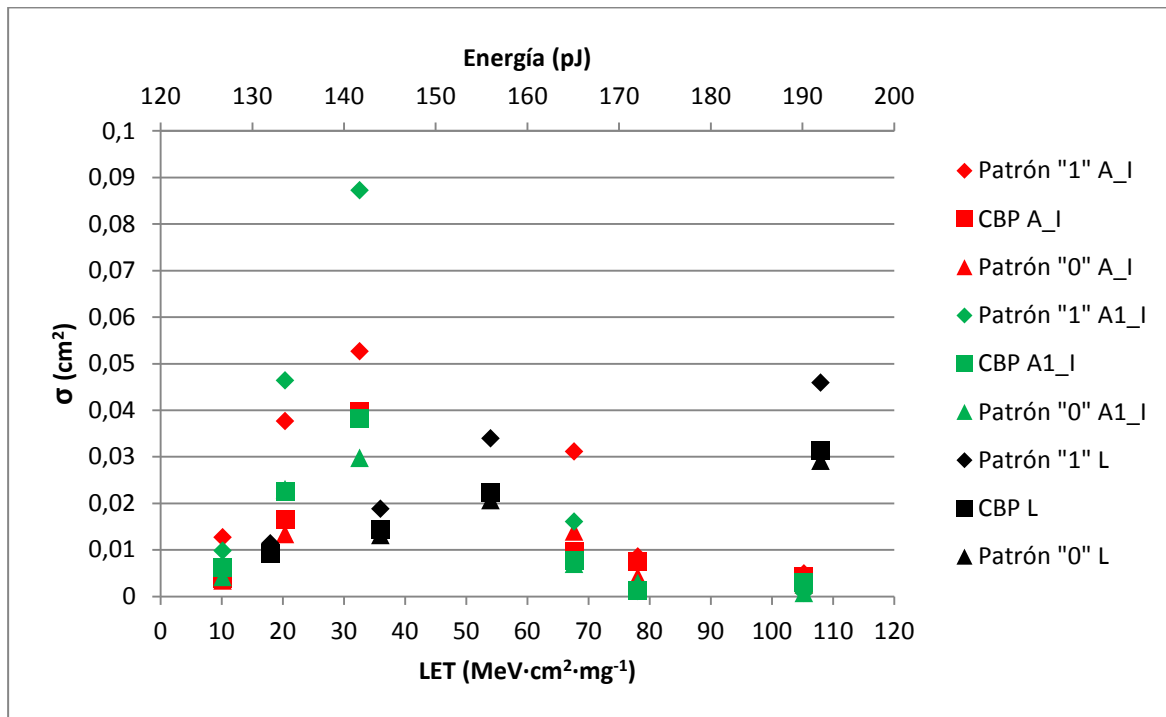


Fig. 6.4. Curvas de Weibull obtenidas con láser e iones para la memoria AS. Los datos mostrados en negro corresponden al láser, mientras que los mostrados en rojo y verde corresponden a los obtenidos con iones para las memorias A y A1 respectivamente.

6.2 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN CON LÁSER E IONES.

Una vez que se tiene un análisis de las memorias, mediante láser a diferentes energías y con iones a diferentes LETs, es posible analizar si los efectos producidos con ambos experimentos son los mismos. De los valores mostrados en el apartado anterior para la sección eficaz se puede extraer que esto es así. Pero cabe la posibilidad de profundizar en los siguientes aspectos:

6.2.1. Micro latch-up.

Tanto en el estudio de las memorias con láser como en los experimentos realizados con iones se ha detectado la ocurrencia de micro latch-up. En ambos ensayos este fenómeno tuvo una mayor presencia en la memoria CY. En ésta se causó MLUR (Micro Latch-Up Recuperable) y MLUC (Micro Latch-Up Clásico) con láser, en las zonas más sensibles, y con iones se llegó a generar micro latch-up en ambas memorias (C y C1) para todos los

patrones. En la memoria AS, con láser sólo se generó MLUR, mientras que con iones únicamente se generó micro latch-up en un caso y en la memoria A.

La explicación de que la memoria AS sea menos propensa a la ocurrencia de este fenómeno podría extraerse de los mapas de sensibilidad. El de la memoria AS (Figs. 3.22 y 3.23) se muestra más uniforme en las zonas sensibles, en las que había que incrementar considerablemente la energía del láser para poder causar MLUR. Sin embargo, el mapa de la memoria CY (Figs. 3.19 y 3.20) mostró unas zonas extremadamente sensibles más proclives a la generación de MLUR y MLUC.

La ventaja que proporciona el láser frente a los ensayos con iones es que, y una vez que se tienen los mapas de sensibilidad, permite conocer exactamente dónde se produce (cerca de zonas destinadas a la lógica de control...) y relacionarlo con un cierto valor de energía, dependiente de la sensibilidad de ese punto. Esto permite reproducir el fenómeno tantas veces como se quiera estudiando características de sus efectos. Por ejemplo, el aumento del consumo de corriente o la generación de un MLUR, donde no es necesario la desconexión de la alimentación para que la memoria funcione correctamente, como paso previo al MLUC, tras el cual sí es necesario un reinicio de la alimentación para que la memoria vuelva a funcionar correctamente.

Conocer el consumo de corriente permite la configuración del detector de latch-up usado durante los ensayos con iones. Éste detectará si ocurre latch-up o no, reiniciando la alimentación en caso de ocurrencia, pero resultando imposible extraer ninguna otra información.

6.2.2 Sensibilidad con respecto al patrón.

En el apartado 5.3.2 *Dependencia del patrón escrito*, relativo a los ensayos con iones, se concluyó que las memorias presentan una dependencia de la sensibilidad en función del patrón escrito, explicando la causa de ésta.

A partir del estudio de las memorias realizado con el láser sobre las zonas más sensibles fue posible intuir esta dependencia, que pareció algo más evidente en la memoria CY. Otra posibilidad de extraer alguna conclusión relevante en relación con este aspecto, es a partir del análisis de los cambios de estado producidos durante las radiaciones realizadas para la obtención del mapa de sensibilidad. Concretamente, en estas radiaciones, del total de cambios de estado producidos en la memoria CY, aproximadamente el 75 % fueron de

“1” a “0”. Sin embargo, en la memoria AS ambas transiciones resultaron con una probabilidad de aproximadamente el 50 %.

La figura 6.5 muestra el número de MCUs que se causaron en la memoria CY con láser en las tres zonas más sensibles (zona 6, 2 y 10). También se indica el número de cambios de estado de “1” a “0” y su porcentaje con respecto al total. Se observa que cuantos más MCUs se causan la proporción de ellos que es de “1” a “0” es mayor. Sin embargo, si no se tuvieran en cuenta estas zonas ambas transiciones resultarían con una probabilidad de entorno al 50 %, siendo algo superior la correspondiente de pasar de “1” a “0”.

Al ser estas zonas las que decantan la diferencia en la sensibilidad de la memoria según el patrón escrito no se podía asegurar la existencia de esta dependencia. Por un lado, en estas zonas ocurrieron MCUs de gran tamaño, y como se comprobó posteriormente, son zonas propensas a la ocurrencia de MLUR, el cual fue posible que ocurriera durante las radiaciones. Por otro lado, en la memoria AS, no se obtuvieron zonas extremadamente sensibles resultando el porcentaje de transiciones de aproximadamente el 50 % en ambos sentidos. Además, para obtener el mapa de sensibilidad únicamente se radió la memoria con el patrón CBP y a una única energía.

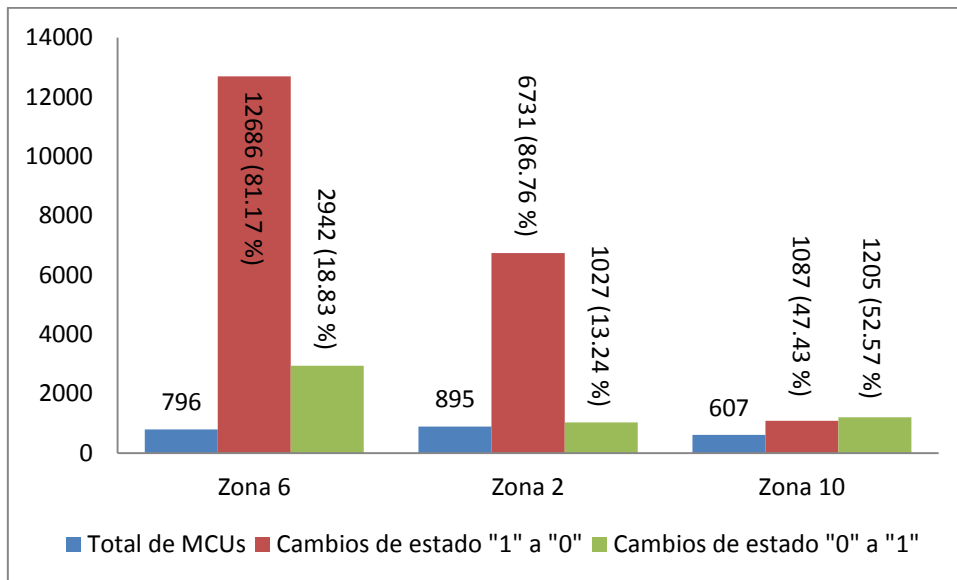


Fig. 6.5. Número de MCUs causados en las zonas 6, 2 y 10 de la memoria CY (Fig. 3.18), indicando el número, y porcentaje que representan, de los cambios de estado provocados. Estos MCUs fueron generados durante la radiación de la memoria CY con láser para la obtención del mapa de sensibilidad escribiéndola con el patrón CBP.

Por todo ello, es obvia la necesidad de hacer más radiaciones a diferentes energías y patrones antes de asegurar que los ensayos con láser también ponen de manifiesto una dependencia de la sensibilidad de la memoria con respecto al patrón escrito. De ahí que no

sea hasta este momento cuando esta dependencia queda demostrada, tal y como se observa tanto en los valores calculados para la sección eficaz (Tabla 6.1 y 6.2) como en las curvas de Weibull (Fig. 6.1 y 6.3).

6.3 CARGA DEPOSITADA.

La carga depositada (Q_{dep}) por el láser y los iones a las diferentes energías y LETs a las que han sido analizadas las memorias se muestran en las tablas 6.1 y 6.2.

En un principio, resulta lógico pensar que si los efectos conseguidos irradiando con láser e iones son similares, es que se ha depositado la misma carga en la región activa del dispositivo. Y aunque los valores muestran que las cargas depositadas se encuentran en el mismo orden de magnitud, estos valores no son exactamente los mismos. Para valores similares de la sección eficaz obtenidos con láser e iones el valor de la carga depositada es mayor para el láser, exceptuando los casos en los que interviene el ion Xe. Esto se debe a los siguientes factores:

- Aproximaciones en el cálculo de la carga depositada: Los valores mostrados en las tablas 6.1 y 6.2 para láser e iones se calculan tal y como se avanzó en los apartados 3.2 y 5.1 respectivamente. En el caso del láser se tiene en cuenta que se trabaja en régimen de absorción lineal, considerando como volumen de generación de carga ideal el de un cilindro con una superficie definida por el tamaño del foco y una altura igual a la profundidad de penetración del láser. Luego la carga calculada se deposita desde la superficie del chip y a lo largo del cilindro considerado, y no únicamente en la región activa. Además, y debido al perfil gaussiano de la intensidad del haz láser [OL12], el volumen de deposición de carga real es más bien un cono, y no un cilindro como se considera en los cálculos. Para el caso de los iones se considera (pues no se conoce con exactitud) un espesor de la capa activa (d) de unos 2 μm [PA09], siendo el valor calculado el de la carga depositada en esta región.
- Partes metálicas: En zonas en las que la parte activa del chip esté cubierta por las metalizaciones (Fig. 6.6) será imposible acceder con el láser, pues la radiación electromagnética no atraviesa el metal. Luego una parte del total de la carga calculada para el láser no se deposita en el interior del chip. Por el contrario los iones son capaces de atravesar estas capas, llegando a depositar carga en el óxido de puerta. Esta zona es crítica para la variación de V_G y así para la generación de un cambio de estado. Por tanto, los iones son más efectivos.

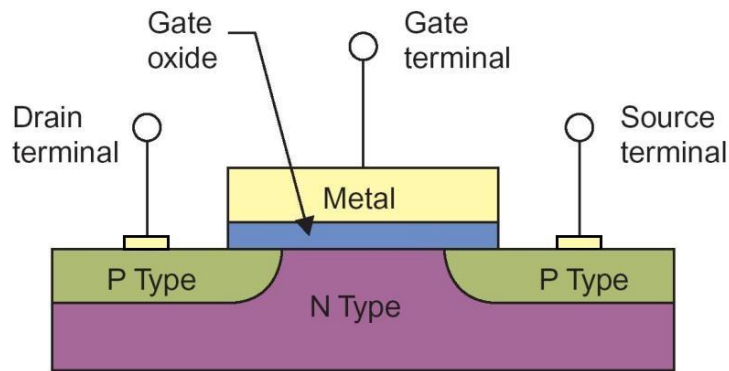


Fig. 6.6. Estructura física de un transistor MOS.

- Generación de errores: Los efectos producidos por el láser sobre un dispositivo son debidos a la ionización. También es la principal causa de los efectos producidos por los iones, pero éstos también podrían causar daños por desplazamiento.
- Restos de encapsulado: En las radiaciones con láser este problema se ha minimizado ya que únicamente se han radiado las zonas limpias (Fig. 3.18 y 3.21). En el caso de los iones el problema ha afectado únicamente al ion Xe, por tener un bajo rango de penetración. Su rango de penetración en el polietileno es similar al espesor de la capa restante tras desencapsular (Fig. 5.14), por lo que el área del chip donde este ion puede penetrar hasta la región activa se reduce considerablemente. Además para este ion se realizan pruebas inclinando el haz, 30 y 50°, con respecto a la muestra, con el inconveniente añadido del efecto de sombra debido al encontrarse el chip enterrado en el encapsulado. Por ello, pese a ser el ion de mayor LET y el que más carga deposita, no es el ion con el que se consiguen los valores más altos para la sección eficaz, necesitando depositar más carga que el láser para conseguir efectos similares.

Estos factores son muy importantes y hay que tenerlos en cuenta tanto al realizar los experimentos como al analizar los resultados obtenidos.

6.4 CONCLUSIÓN.

En este capítulo se ha llevado a cabo la comparación de las radiaciones realizadas sobre las memorias tanto con láser como con iones, siendo la sección eficaz el parámetro clave en dicha comparación.

Con el objetivo de conseguir con láser e iones valores similares para la sección eficaz, resulta necesario realizar nuevas radiaciones con láser a diferentes energías y patrones.

Con ello, y finalmente, se han evaluado las memorias tanto con láser como con iones a diferentes energías y LETs respectivamente, y escribiéndolas con diferentes patrones.

Podría decirse que, cuando con una determinada configuración del láser (energía, longitud de onda...) los valores obtenidos para la sección eficaz son similares a los obtenidos a partir de ensayos con un ion, existe una equivalencia entre esa configuración del láser y el ion de ese LET. Pero, teniendo en cuenta que la caracterización de un dispositivo para aplicaciones de Espacio debe realizarse a diferentes energías y LETs, es importante analizar todas las radiaciones efectuadas sobre la memoria en su conjunto. Tras este análisis es de gran relevancia el poder concluir que los efectos producidos son los mismos (tendencia en las curvas de Weibull, tipos de errores producidos o sensibilidad con respecto al patrón).

En lo relativo a los valores obtenidos de la carga depositada por el láser y por los iones con los que se causan los mismos efectos éstos pueden diferir, en contra de lo que cabría esperar. Ello se debe fundamentalmente a las aproximaciones adoptadas para su cálculo y a la mayor efectividad de los iones para depositar carga en la región activa.

CONCLUSIONES

El uso del láser pulsado para radiar dispositivos electrónicos, y en particular memorias, permite analizarlas punto a punto incidiendo con un único pulso. Con ello se extrae el mapa de sensibilidad de la memoria y características relativas a su topología interna, como por ejemplo el empleo de interleaving. Esta información es de gran utilidad para el fabricante pudiendo mejorar su tolerancia a la radiación (modificando el lay-out o incorporando algoritmos de protección).

Centrar el análisis en las zonas más sensibles posibilita obtener las energías umbral a partir de las cuales se pueden generar SEUs (*Single Event Upset*) y MCUs (*Multiple Cell Upset*).

El estudio de la evolución de los errores en función de la energía pone de manifiesto una doble categoría de MLU (*Micro Latch-Up*): MLUR (*Micro Latch-Up Recuperable*) y MLUC (*Micro Latch-Up Clásico*). Hasta ahora estos errores eran clasificados como MLU, pero nosotros hemos detectado que en realidad existe una fase previa al MLUC en la que la memoria sigue funcionando sin necesidad de realizar un reset en la alimentación. Este análisis de los errores en puntos concretos y su relación con diferentes valores de energía es un hecho novedoso de gran interés.

Los experimentos realizados sobre las memorias SRAM mediante pruebas en altura y radiación con neutrones evidencian un aumento de la sensibilidad a medida que aumenta el nivel de integración en tecnología CMOS.

Los resultados obtenidos de la radiación de las memorias con iones muestran una dependencia de la sensibilidad con respecto al patrón escrito consecuencia del diseño y topología de la propia celda. El conocimiento previo que se tiene de la memoria, gracias al análisis de los errores provocados con láser, posibilita la correcta identificación de los eventos generados durante los ensayos con iones.

La correlación de los resultados obtenidos de la radiación de las memorias con iones de diferentes LETs y con láser a diferentes energías se realiza comparando los valores de la sección eficaz. Se han asociado los valores de la energía del láser y del LET del ion cuando sus correspondientes valores de la sección eficaz son iguales o cercanos. La equivalencia entre láser e ion dependerá del dispositivo a analizar debido a una serie de factores tales como la profundidad de penetración del láser e ion o la presencia de partes metálicas, por ejemplo.

Este hecho es de gran relevancia convirtiendo al sistema láser de emulación de entorno espacial en una herramienta de generación de fallos sobre dispositivos electrónicos de alto interés en la tecnología electrónica. Este método es capaz de producir los mismos efectos con las ventajas de que es más sencillo y eficaz, aportando mucha más información. Además, es mucho más barato contribuyendo a bajar los costes asociados a los ensayos de radiación.

Aunque puede que este método alternativo como es el láser no reemplace a los ensayos realizados en un acelerador de partículas, sí que constituye una poderosa herramienta complementaria. En efecto, puede ser un filtro inicial para determinar qué dispositivos son susceptibles de ser radiados en tales instalaciones, donde el coste de los ensayos es muy elevado. Asimismo, y debido a la gran información que aporta acerca del dispositivo analizado, puede contribuir a preparar el experimento (configuración del detector de latch-up...) y a complementar el análisis de los resultados obtenidos (ocurrencia y localización de fenómenos, identificación de MCUs...).

De forma general, el procedimiento a seguir para analizar cualquier dispositivo mediante láser es el siguiente:

- En primer lugar, realizar una serie de barridos y disparos en diferentes zonas y puntos del dispositivo variando la energía. De esta forma se obtiene un intervalo de energías comprendido entre un valor mínimo, a partir del cual se generan errores, y máximo, a partir del cual se producen errores graves (MLU en el caso de memorias).
- A continuación, radiar toda la superficie del dispositivo punto a punto para un valor de la energía intermedio del rango anterior y así obtener su mapa de sensibilidad. A partir del análisis de los errores provocados es posible conocer la topología interna del dispositivo.
- Posteriormente, realizar disparos a diferentes energías en aquellos puntos más susceptibles de generación de errores para estudiar y caracterizar su evolución.

- Finalmente, realizar barridos completos de la superficie del dispositivo a diferentes energías y con diferentes patrones, en caso de memorias, para caracterizar su tolerancia frente a la radiación.

Los experimentos con láser aquí expuestos se han realizado trabajando con una longitud de onda de 800 nm. Pensando en caracterizar dispositivos con un mayor nivel de integración podría resultar conveniente trabajar con longitudes de onda mayores, llegando incluso a técnicas de doble fotón, para que la profundidad de penetración sea mayor.

APÉNDICE 1

TABLAS CORRESPONDIENTES AL ANÁLISIS DE LAS
DIRECCIONES DE LAS MEMORIAS CY Y AS

Memoria CY.

ANÁLISIS DE MCUs DE 2 ERRORES									
ZONA	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3	TIPO 4	TIPO 5	TIPO 6	TIPO 7	RESTO	TOTAL
1	7	0	0	0	0	2	0	0	9
2	6	52	0	9	9	1	1	31	109
3	52	18	6	19	0	5	10	1	111
4	79	13	5	19	1	15	3	0	135
6	7	39	0	3	0	0	1	9	59
7	27	25	11	4	0	0	2	19	88
8	28	22	2	4	0	0	0	1	57
9	29	0	0	4	0	1	2	3	37
10	164	9	22	45	0	20	9	1	270
11	205	11	16	33	0	19	6	0	290
12	157	15	15	21	0	17	10	0	235
13	126	1	4	17	0	6	4	3	161
14	2	0	0	5	0	3	0	0	10
15	12	2	0	1	0	0	0	1	16
16	9	0	0	2	0	0	2	0	13
17	19	0	0	2	0	0	0	0	21
18	34	0	0	6	0	0	2	1	43
ANÁLISIS DE MCUs DE 3 ERRORES									
ZONA	2 TIPO 2, 1 TIPO 1	2 TIPO 1, 1 TIPO 4	2 TIPO 1, 1 TIPO 2	2 TIPO 2, 1 TIPO 5	2 TIPO 4, 1 TIPO 6	RESTO	TOTAL		
2	24	18	0	26	0	18	86		
3	5	34	0	0	4	6	49		
4	2	19	0	0	2	7	30		
6	7	9	0	0	0	2	18		
7	0	21	10	0	0	9	40		
8	0	11	0	0	0	0	11		
9	0	7	0	0	0	4	11		
10	0	53	9	0	0	17	79		
11	0	53	7	0	0	15	75		
12	0	55	5	0	0	17	77		
13	0	37	0	0	0	4	41		
14	0	2	1	0	0	0	3		
16	0	1	0	0	0	0	1		
17	0	0	0	0	0	1	1		
18	0	5	0	0	0	0	5		

* 2 TIPO 2, 1 TIPO 1: Dos direcciones son del tipo 2 y la otra es de tipo 1 con respecto a alguna de las otras dos:

Ejemplo: AAAA | AAAC | BAA9.

* 2 TIPO 1, 1 TIPO 4: Dos direcciones son del tipo 1 y la otra es de tipo 4 con respecto a alguna de las otras dos:

Ejemplo: AAAA | BAA9 | BAAF.

* 2 TIPO 1, 1 TIPO 2: Dos direcciones son del tipo 1 y la otra es de tipo 2 con respecto a alguna de las otras dos:

Ejemplo: AAAA | BAA9 | AAAC.

* 2 TIPO 2, 1 TIPO 5: Dos direcciones son del tipo 2 y la otra es de tipo 5 con respecto a alguna de las otras dos:

Ejemplo: AAAA | AAAC | DAA9.

* 2 TIPO 4, 1 TIPO 6: Dos direcciones son del tipo 4 y la otra es de tipo 6 con respecto a alguna de las otras dos:

Ejemplo: OAA0 | OAA6 | 7AA1.

* RESTO: Las direcciones no cumplen con ninguno de los siete tipos y no se pueden englobar en ningún caso.

Tabla 1. Clasificación de las direcciones según los patrones definidos para los MCUs de 2 y 3 errores causados en la memoria CY.

Para los MCUs de 4 ó más errores mostrados en la tabla 1, la clasificación se realiza de forma análoga a la de los MCUs de 3 errores, esto es, separando las direcciones en función de los diferentes tipos de error definidos inicialmente. Las direcciones de los diferentes grupos son cercanas entre sí. Que una dirección “no casa” quiere decir que, junto a cualquiera de las otras, no se puede clasificar en ninguno de los tipos definidos.

ANÁLISIS DE MCUs DE 4 ERRORES									
ZONA	2 TIPO 1, 2 TIPO 1	2 TIPO 2, 2 TIPO 2	2 TIPO 1, 2 TIPO 4	2 TIPO 4, 2 TIPO 4	2 TIPO 3, 2 TIPO 3	2 TIPO 6, 2 TIPO 6	RESTO	TOTAL	
1	2	0	0	0	0	0	0	2	
2	40	70	1	2	0	0	0	113	
3	64	0	0	0	7	0	0	71	
4	31	0	0	0	0	9	0	40	
6	10	148	0	0	13	0	1	172	
7	33	22	0	0	3	0	0	58	
8	15	0	0	0	0	0	0	15	
9	9	0	0	0	0	0	0	9	
10	136	11	0	0	36	23	0	206	
11	126	0	0	0	0	14	0	140	
12	99	0	0	0	0	18	0	117	
13	42	0	0	0	0	2	1	45	
17	1	0	0	0	0	0	0	1	
18	3	0	0	0	0	0	0	3	
ANÁLISIS DE MCUs DE 5 ERRORES									
ZONA	2 TIPO 2, 2 TIPO 2, 1 NO CASA	4 TIPO 1, 1 TIPO 2	2 TIPO 4, 3 TIPO 2	4 TIPO 2, 1 TIPO 6	4 TIPO 1, 1 TIPO 3	2 TIPO 6, 2 TIPO 6, 1 TIPO 1	5 TIPO 3	5 TIPO 2	TOTAL
2	25	17	0	0	0	0	0	0	42
3	0	0	2	1	1	0	0	0	4
4	0	0	0	0	0	1	0	0	1
6	29	0	0	0	0	0	3	3	35
ANÁLISIS DE MCUs DE 5 ERRORES									
ZONA	4 TIPO 3, 1 NO CASA	4 TIPO 3, 1 TIPO 2	4 TIPO 3, 1 TIPO 1	4 TIPO 1, 1 NO CASA	4 TIPO 1, 1 TIPO 4	4 TIPO 4, 1 TIPO 3	4 TIPO 3, 1 NO CASA	TOTAL	
7	1	0	0	0	0	0	0	1	
8	0	1	1	0	0	0	0	2	
9	0	0	0	1	0	0	0	1	
10	0	0	0	2	2	5	5	14	
ANÁLISIS DE MCUs DE 6 ERRORES									
ZONA	6 TIPO 2	6 TIPO 4	5 TIPO 2, 1 NO CASA	4 TIPO 3, 1 TIPO 4	6 TIPO 1	4 TIPO 3, 2 TIPO 2	6 TIPO 3	4 TIPO 3, 1 TIPO 1	TOTAL
2	13	4	4	10	0	0	0	0	31
3	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	26	0	0	0	0	10	10	0	46
10	0	0	0	0	0	8	0	2	10
11	0	0	0	0	0	1	0	0	1
12	0	3	0	0	0	0	0	0	3

ANÁLISIS DE MCUs DE 7 ERRORES									
ZONA	6 TIPO 1, 1 TIPO 4	6 TIPO 2, 1 NO CASA	6 TIPO 3, 1 TIPO 4	4 TIPO 3, 2 TIPO 2, 1 TIPO 4	6 TIPO 4, 1 TIPO 1	TOTAL			
2	5	15	5	6	0	31			
3	0	0	0	0	1	1			
ANÁLISIS DE MCUs DE 7 ERRORES									
ZONA	4 TIPO 3, 3 TIPO 1	7 TIPO 3	5 TIPO 3, 2 TIPO 2	7 TIPO 2	4 TIPO 3, 4 TIPO 2	TOTAL			
6	8	3	2	2	2	17			
ANÁLISIS DE MCUs DE 7 ERRORES									
ZONA	6 TIPO 3, 1 TIPO 2	4 TIPO 3, 1 TIPO 1, 2 TIPO 4	7 TIPO 3	7 TIPO 1	TOTAL				
7	1	0	0	0	1				
10	1	1	1	0	3				
13	0	0	0	1	1				
ANÁLISIS DE MCUs DE 8 ERRORES									
ZONA	8 TIPO 3	4 TIPO 3, 2 TIPO 2, 2 TIPO 1	5 TIPO 3, 2 TIPO 2	4 TIPO 3, 4 TIPO 2	6 TIPO 2, 2 TIPO 3	6 TIPO 3, 2 NO CASAN	6 TIPO 3, 2 TIPO 6	4 TIPO 4, 4 TIPO 3	TOTAL
2	20	5	6	0	0	0	0	0	31
6	3	0	0	10	3	0	0	0	16
7	2	0	0	0	0	0	0	0	2
10	8	0	0	0	0	1	2	0	11
11	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Tabla 2. Clasificación de las direcciones según los patrones definidos para los MCUs, desde 4 hasta 8 errores, causados en la memoria CY.

ZONA	RANGO DE DIRECCIONES (DISPARO)	ZONA	RANGO DE DIRECCIONES (DISPARO)
1	71CB (1180) - 7104 (785)	2	75C6 (1565) - 7304 (173)
	6282 (1493) - 61C3 (1099)		65C6 (1565) - 6300 (143)
	5287 (1533) - 5144 (898)		55C7 (1564) - 5303 (154)
	4201 (1258) - 4148 (943)		45C6 (1563) - 4301 (154)
	3282 (1491) - 3182 (982)		35C1 (1563) - 3304 (166)
	2249 (1451) - 2145 (902)		25C1 (1528) - 2300 (124)
	120A (1290) - 1148 (941)		1CC6 (756) - 1304 (169)
	0249 (1455) - 018C (1100)		08C6 (545) - 0000 (654)
	3		7906 (1569) - 764D (266)
6907 (1569) - 6680 (305)		6C08 (1542) - 6940 (22)	
5902 (1600) - 5603 (8)		5C0D (1582) - 594C (152)	
4907 (1568) - 4686 (298)		4C0D (1450) - 4945 (45)	
3907 (1567) - 36C0 (412)		3C0F (1597) - 3940 (9)	
2903 (1599) - 26C6 (422)		2C0D (1580) - 2941 (9)	
1907 (1566) - 1649 (222)		1C09 (1539) - 1945 (157)	
0906 (1564) - 0685 (296)		0C43 (1562) - 0940 (7)	
6	7FDF (551) - 7010 (592)	7	759A (1581) - 731D (316)
	6CD5 (496) - 6011 (672)		659B (1586) - 62D1 (77)
	5CDF (433) - 5015 (278)		559B (1592) - 52D4 (118)
	4FDE (239) - 4014 (275)		455C (1514) - 4397 (478)
	3FDF (240) - 3010 (619)		359B (1588) - 329D (39)

6	2FDE (379) - 2010 (824) 1FDF (739) - 1010 (756) 0FDD (741) - 0001 (723)	7	259B (1594) - 2318 (280) 159B (1584) - 12D5 (120) 059A (1591) - 0011 (1385)
8	7895 (1545) - 7598 (37) 6899 (1597) - 65D9 (157) 589A (1598) - 559F (38) 4894 (1548) - 459E (39) 3899 (1599) - 35D9 (159) 289A (1600) - 2599 (40) 1893 (1509) - 15D2 (65) 0895 (1539) - 05D5 (110)	9	7B9F (1556) - 78D3 (36) 6B1C (1317) - 689C (37) 5BD3 (1597) - 58D6 (78) 4BD2 (1598) - 489D (38) 3B9C (1543) - 38D7 (79) 2BD3 (1599) - 28D8 (120) 1BD2 (1600) - 189D (40) 0B5D (1433) - 0B55 (1339)
10	72A6 (1588) - 7025 (308) 62A7 (1587) - 6015 (289) 52A7 (1592) - 5023 (272) 42A4 (1591) - 4025 (307) 32A7 (1586) - 3022 (270) 22A4 (1584) - 201F (337) 12A4 (1584) - 101F (327) 02A7 (1588) - 0018 (339)	11	75A9 (1593) - 72A8 (33) 65A9 (1587) - 62EA (152) 55A9 (1597) - 5321 (232) 45A9 (1591) - 4299 (16) 35A9 (1585) - 32E1 (116) 25A9 (1584) - 22E7 (110) 15A9 (1589) - 1299 (18) 05A9 (1583) - 02A8 (28)
12	78A0 (1547) - 76A2 (467) 68AB (1587) - 65ED (198) 58AB (1586) - 562B (272) 48AB (1591) - 4669 (431) 38AA (1590) - 3669 (436) 28AB (1584) - 2620 (229) 18AB (1589) - 1669 (429) 08AB (1588) - 0658 (419)	13	7B9F (1376) - 7A2E (640) 6C21 (1589) - 69A9 (349) 5C16 (1572) - 5A9B (817) 4C21 (1593) - 4990 (242) 3C21 (1587) - 3A6F (747) 2C21 (1586) - 2AD3 (899) 1C21 (1591) - 1AD3 (900) 0BED (1545) - 09A9 (345)
14	75AB (1443) - 732B (123) 65E4 (1578) - 6321 (82) 556A (1321) - 52ED (41) 45A2 (1422) - 43BE (476) 3467 (766) - 3362 (216) 056A (1323) - 0362 (214)	15	7869 (13233) - 7620 (98) 68E7 (1522) - 6637 (159) 58E7 (1521) - 5620 (102) 46AC (456) - 4620 (96) 37A8 (941) - 3666 (261) 2763 (741) - 2633 (116) 187B (1357) - 1635 (157) 08A6 (1408) - 06A6 (368)
16	7BE6 (1482) - 7920 (42) 6BE3 (1442) - 692F (122) 5BE3 (1441) - 5925 (81) 4AAB (886) - 48F9 (40) 3A67 (736) - 3922 (50) 2A63 (690) - 28EE (4) 1AAA (894) - 19AE (414) 0BA6 (1368) - 09AA (368)	17	75F1 (1580) - 7578 (1386) 65F1 (1575) - 64BB (986) 55F1 (1576) - 5579 (1376) 45F1 (1582) - 4535 (1223) 35F1 (1583) - 3337 (148) 25F1 (1578) - 25B1 (1469) 15F1 (1584) - 1579 (1395) 05F1 (1585) - 0577 (1350)
18	78F3 (1540) - 767F (500) 68F3 (1535) - 6634 (141) 58F5 (1570) - 55FA (27) 48F3 (1542) - 4675 (262) 38F7 (1588) - 3631 (97) 28F3 (1538) - 2679 (314) 18F7 (1584) - 1635 (144) 08F3 (1528) - 05FA (25)		

Tabla 3. Rango de direcciones para cada zona, correspondientes a la figura 3.19, en las que se ha causado error en la memoria CY. Entre paréntesis se indica el número de disparo que causó un error en esa dirección.

Memoria AS.

ANÁLISIS DE MCUs DE 2 ERRORES				
ZONA	ADYACENTES BYTE BAJO	ADYACENTES BYTE ALTO	RESTO	TOTAL
4	69	35	4	108
6	74	57	13	144
7	140	38	8	186
9	141	99	19	259
10	16	0	0	16
11	165	108	59	332
13	157	66	14	237
14	4	3	0	7
16	89	74	6	169
17	45	10	4	59
19	141	106	19	266
ANÁLISIS DE MCUs DE 3 ERRORES				
ZONA	ADYACENTES 2 A 1	LAS 3 DIRECCIONES ADYACENTES	RESTO	TOTAL
4	0	13	0	13
6	20	166	2	188
7	3	24	0	27
9	20	82	1	103
11	72	261	0	333
13	6	59	0	65
14	0	2	0	2
16	6	49	0	55
17	0	4	0	4
19	10	48	1	59

* ADYACENTES 2 A 1: Dos direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y la otra que no es adyacente (ni byte bajo ni alto) con respecto a ninguna de las otras dos: Ejemplo: AAAA | AAAB | AACA.

* LAS 3 DIRECCIONES ADYACENTES: Todas con una relación de adyacencia byte bajo o alto entre sí. Una siempre encuentra a otra con la que es adyacente byte bajo o alto. Ejemplo: AAAA | AAAB | ABAA.

* RESTO: No cumplen con ninguno de los casos anteriores.

ANÁLISIS DE MCUs DE 4 ERRORES				
ZONA	ADYACENTES 2 A 2	ADYACENTES 3 A 1	LAS 4 DIRECCIONES ADYACENTES	TOTAL
4	1	0	0	1
6	18	24	40	82
7	2	0	1	3
9	9	8	2	19
10	0	0	1	1
11	21	49	39	109
13	3	0	3	6
16	1	1	1	3
17	0	0	1	1
19	0	0	4	4

* ADYACENTES 2 A 2: Dos direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y otras dos direcciones adyacentes (byte bajo o alto) sin que haya relación de adyacencia entre ambos pares: Ejemplo: AAAA | AAAB | AABA | AABB.

* ADYACENTES 3 A 1: Tres direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y la otra que no es adyacente (ni byte bajo ni alto) con respecto a ninguna de las otras tres: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | AABA.

* LAS 4 DIRECCIONES ADYACENTES: Todas con una relación de adyacencia byte bajo o alto entre sí. Una siempre encuentra a otra con la que es adyacente byte bajo o alto. Ejemplo: AAAA | AAAB | ABAA | ABAB.

ANÁLISIS DE MCUs DE 5 ERRORES					
ZONA	ADYACENTES 3 A 2	4 DIRECCIONES ADYACENTES	LAS 5 DIRECCIONES ADYACENTES	RESTO	TOTAL
6	10	1	3	0	14
7	0	0	1	0	1
9	2	0	2	1	5
11	26	11	1	0	38
16	0	0	1	0	1
19	0	0	1	0	1

* ADYACENTES 3 A 2: Tres direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y otras dos direcciones adyacentes (byte bajo o alto) sin que haya relación de adyacencia entre ambos grupos: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | ACAA | ACAB.

* 4 DIRECCIONES ADYACENTES: Cuatro direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y la otra que no es adyacente (ni byte bajo ni alto) con respecto a ninguna de las otras cuatro: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | AAAD | AABA.

* LAS 5 DIRECCIONES ADYACENTES: Todas con una relación de adyacencia byte bajo o alto entre sí. Una siempre encuentra a otra con la que es adyacente byte bajo o alto. Ejemplo: AAAA | ABAA | AAAB | AAAC | ABAB.

* RESTO: No cumplen con ninguno de los casos anteriores.

ANÁLISIS DE MCUs DE 6 ERRORES					
ZONA	ADYACENTES 3 A 3	ADYACENTES 4 A 2	LAS 6 DIRECCIONES ADYACENTES	RESTO	TOTAL
6	4	8	1	0	13
9	1	0	1	0	2
11	3	11	1	1	16
16	0	0	2	0	2

* ADYACENTES 3 A 3: Tres direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y otras tres direcciones adyacentes (byte bajo o alto) sin que haya relación de adyacencia entre ambos grupos: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | ACAA | ACAB | ACAC.

* ADYACENTES 4 A 2: Cuatro direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y otras dos direcciones adyacentes (byte bajo o alto) sin que haya relación de adyacencia entre ambos grupos: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | AAAD | AABA | AABB.

* LAS 6 DIRECCIONES ADYACENTES: Todas con una relación de adyacencia byte bajo o alto entre sí. Una siempre encuentra a otra con la que es adyacente byte bajo o alto. Ejemplo: AAAA | ABAA | AAAB | AAAC | ABAB | AAAD.

* RESTO: No cumplen con ninguno de los casos anteriores.

ANÁLISIS DE MCUs DE 7 ERRORES		
ZONA	ADYACENTES 4 A 3	TOTAL
6	2	2
11	1	1

* ADYACENTES 4 A 3: Cuatro direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y otras tres direcciones adyacentes (byte bajo o alto) sin que haya relación de adyacencia entre ambos grupos: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | AAAD | AABA | AABB | AABC.

ANÁLISIS DE MCUs DE 10 ERRORES		
ZONA	ADYACENTES 6 A 4	TOTAL
6	1	1

* ADYACENTES 6 A 4: Seis direcciones adyacentes (byte bajo o alto) y otras tres direcciones adyacentes (byte bajo o alto) sin que haya relación de adyacencia entre ambos grupos: Ejemplo: AAAA | AAAB | AAAC | AAAD | AAAE | AAAF | AABA | AABB | AABC | AABD.

Tabla 4. Clasificación de las direcciones según los patrones definidos para todos los MCUs causados en la memoria AS.

ZONA	RANGO DE DIRECCIONES (DISPARO)	ZONA	RANGO DE DIRECCIONES (DISPARO)
4	1FFE (12) - 1E00 (257) 0FF6 (281) - 0E00 (539)	6	17FF (433) - 1600 (686) 07FF (697) - 0601 (951)
7	1DFF (16) - 1C02 (547) 0DF6 (545) - 0C01 (1041)	9	15FF (837) - 1401 (1345) 05FE (1338) - 0452 (1664)
10	053D (18) - 0501 (147) 043F (8) - 0410 (98)	11	1DD3 (39) - 1A00 (448) 0DE0 (497) - 0A00 (942)
13	15F3 (686) - 1531 (1029) 14C4 (761) - 1411 (1105) 13FC (695) - 1312 (1134) 12FD (713) - 1210 (1124) 05F5 (1141) - 0200 (31)	16	19FA (78) - 1800 (678) 09FE (739) - 0890 (993)
17	097F (16) - 090B (341) 087F (33) - 0801 (338)	19	11FF (85) - 1000 (687) 01F8 (734) - 0010 (1317)

Tabla 5. Rango de direcciones para cada zona, correspondientes a la figura 3.21, en las que se ha causado error en la memoria AS. Entre paréntesis se indica el número de disparo que causó un error en esa dirección.

APÉNDICE 2

ERRORES GENERADOS EN LAS MEMORIAS CY Y AS DURANTE LOS ENSAYOS CON IONES

Memoria CY.

MEMORIA C							
PATRÓN	ION	FLUJO (n/cm ²)	SEUs	TAMAÑO DE LOS MCUs			
				2	3	4	5
Patrón "0"	Xe (50°)	16099	4	3	0	0	0
	Xe (30°)	15289	25	14	3	1	0
	Xe (0°)	15247	22	15	1	0	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	15115	151	15	0	0	0
	Ar (0°)	18040	104	1	0	0	0
Patrón "1"	Xe (50°)	16400	12	7	4	2	0
	Xe (30°)	14181	41	39	4	1	0
	Xe (0°)	16389	64	28	2	2	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	17991	151	30	0	0	0
	Ar (0°)	15400	70	0	0	0	0
CBP	Xe (50°)	16604	8	0	0	0	0
	Xe (30°)	15891	19	6	4	0	0
	Xe (0°)	17907	40	22	2	0	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	Micro latch-up					
	Ar (0°)	15672	80	0	0	0	0
MEMORIA C1							
PATRÓN	ION	FLUJO (n/cm ²)	SEUs	TAMAÑO DE LOS MCUs			
				2	3	4	5
Patrón "0"	Xe (50°)	17636	4	4	1	2	0
	Xe (30°)	20823	13	10	3	1	0
	Xe (0°)	17824	10	5	2	0	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	16546	126	11	0	0	0
	Ar (0°)	16397	69	5	0	0	0
Patrón "1"	Xe (50°)	17626	9	2	1	1	0
	Xe (30°)	16532	36	15	2	0	0
	Xe (0°)	18060	25	11	1	0	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	16100	184	8	0	0	0
	Ar (0°)	17130	103	3	0	0	0
CBP	Xe (50°)	16273	7	0	0	0	0
	Xe (30°)	17021	20	14	4	2	0
	Xe (0°)	16321	15	9	3	0	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	14661	124	12	0	0	0
	Ar (0°)	14845	79	4	0	0	0

Tabla 1. Errores generados en las memorias C y C1 durante los ensayos con iones, indicando los casos en los que ocurrió micro latch-up. Las memorias se han escrito con los patrones "0", "1" y CBP. Para el ion Xe, además de incidencia perpendicular (0°), se ha inclinado el haz 30° y 50° con respecto a la muestra. También se indica el flujo de iones durante el experimento.

Memoria AS.

MEMORIA A							
PATRÓN	ION	FLUJO (n/cm ²)	SEUs	TAMAÑO DE LOS MCUs			
				2	3	4	5
Patrón "0"	Xe (50°)	13433	9	1	1	2	0
	Xe (30°)	14783	23	2	2	5	0
	Xe (0°)	16300	89	9	17	17	0
	Kr (0°)	Micro latch-up					
	Ni (0°)	12298	72	21	15	0	1
	Ar (0°)	14677	28	11	0	0	0
Patrón "1"	Xe (50°)	13970	30	2	2	1	0
	Xe (30°)	13580	57	4	9	2	0
	Xe (0°)	13390	305	12	25	3	0
	Kr (0°)	16378	636	35	44	6	0
	Ni (0°)	20519	614	58	14	0	0
	Ar (0°)	15289	170	12	0	0	0
CBP	Xe (50°)	14103	5	4	3	4	0
	Xe (30°)	14851	22	12	10	5	0
	Xe (0°)	15006	16	17	10	11	4
	Kr (0°)	16106	323	55	32	10	14
	Ni (0°)	14447	26	55	19	10	1
	Ar (0°)	15034	33	12	0	0	0
MEMORIA A1							
PATRÓN	ION	FLUJO (n/cm ²)	SEUs	TAMAÑO DE LOS MCUs			
				2	3	4	5
Patrón "0"	Xe (50°)	12997	2	0	0	1	0
	Xe (30°)	15840	15	3	2	3	0
	Xe (0°)	16040	42	9	13	3	0
	Kr (0°)	13654	148	24	31	28	1
	Ni (0°)	16187	120	55	46	1	0
	Ar (0°)	14178	27	16	0	0	0
Patrón "1"	Xe (50°)	13519	3	0	1	0	0
	Xe (30°)	16121	5	1	0	2	0
	Xe (0°)	15376	181	9	12	3	0
	Kr (0°)	16478	1153	40	56	9	0
	Ni (0°)	15958	561	69	12	0	1
	Ar (0°)	16281	131	14	0	0	0
CBP	Xe (50°)	13908	2	2	4	2	0
	Xe (30°)	16106	0	1	2	2	0
	Xe (0°)	15021	15	10	10	6	5
	Kr (0°)	18239	269	63	59	19	10
	Ni (0°)	15102	41	84	25	14	0
	Ar (0°)	16874	42	31	0	0	0

Tabla 2. Errores generados en las memorias A y A1 durante los ensayos con iones, indicando el caso en el que ocurrió micro latch-up. Las memorias se han escrito con los patrones "0", "1" y CBP. Para el ion Xe, además de incidencia perpendicular (0°), se ha inclinado el haz 30° y 50° con respecto a la muestra. También se indica el flujo de iones durante el experimento.

APÉNDICE 3

NÚMERO DE ERRORES OBTENIDO CON LÁSER PARA
DIFERENTES ZONAS Y ENERGÍAS EN LAS MEMORIAS
CY Y AS

Memoria CY.

Energía (pJ)	Patrón	zona_1	zona_2	zona_3	zona_4	zona_6	zona_7	zona_8	zona_9	zona_10	zona_11	zona_12	zona_13	zona_14	zona_15	zona_16	zona_17	zona_18	Total errores zonas barridas
156	CBP					14867													
	Patrón "0"																		
	Patrón "1"																		
153,6	CBP	54	7758	880	795	15628	1138	422	231	2292	1677	1478	802	101	99	82	97	282	33816
	Patrón "0"		3418			8143	491			682	677	543							13954
	Patrón "1"		4122			12131	921			1356	1103	1083							20716
133,2	CBP		3741			9946	615			972	803	721							16798
	Patrón "0"		1496			5819	261			422	395	358							8751
	Patrón "1"		2171			7951	347			611	492	503							12075
126	CBP		1763			6128	258			497	381	370							9397
	Patrón "0"					1418													1418
	Patrón "1"					2116													2116
117,6	CBP					1974													1974
	Patrón "0"																		
	Patrón "1"																		

Tabla 1. Número de errores generados con láser en la memoria CY variando la energía y escribiéndola con los patrones "0", "1" y CBP. Únicamente se han radiado las zonas más significativas. Las zonas se corresponden con las de la figura 3.19. Se han sombreado los errores que se obtuvieron durante la radiación de la memoria completa en el capítulo 3.

Memoria AS.

Energía (pJ)	Patrón	zona_4	zona_6	zona_7	zona_9	zona_10	zona_11	zona_13	zona_14	zona_16	zona_17	zona_19	Total errores zonas barridas	Interpolación del total de errores zonas barridas a toda la memoria
132	CBP	415	1409	768	1116	69	2455	915	36	691	184	993	9051	9051
	Patrón "1"	537	1731	815	1318	78	3193	1173	42	812	211	1219	11129	11129
144	Patrón "0"		1862		1590		3625						7077	12866
	CBP		2125	1175	1822		3790	1492				1469	11873	14061
156	Patrón "1"		2674	1501	2424		5513	1708				1870	15690	18441
	Patrón "0"		2917		2598		5241						10756	20232
	CBP		3271	1961	2886		5468	2251				2331	18168	21867
	Patrón "1"		4513	2982	4091		8232	3369				3785	26972	33248
192	Patrón "0"		4078		3415		5792						13285	28524
	CBP		4261	2998	3857		6165	3415				3676	24372	30667
	Patrón "1"		6025	4356	5431		9374	4876				5134	35196	44980

Tabla 2. Número de errores generados con láser en la memoria AS variando la energía y escribiéndola con los patrones "0", "1" y CBP. Únicamente se han radiado las zonas en las que se muestra valor, interpolando a partir de éstas al total de la memoria. Las zonas se corresponden con las de la figura 3.21. Se han sombreado los errores que se obtuvieron durante la radiación de la memoria completa en el capítulo 3.

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.
- [AG02] J. A. Agapito, N. P. Barradas, F. M. Cardeira, J. Casas, A. P. Fernandes, F. J. Franco, P. Gomes, I. C. Goncalves, A. H. Cachero, J. Lozano, J. G. Marques, A. Paz, M. J. Prata, A. J. G. Ramalho, M. A. Rodriguez-Ruiz, J. P. Santos, and A. Vieira, "Radiation tests on commercial instrumentation amplifiers, analog switches & DAC's", *Proceedings of the 8th Conference on Electronics for LHC Experiments*. pp. 117 - 121. (Suiza): CERN Publishing Service, 25/02/2002.
- [AG06] J. A. Agapito, F. J. Franco, and Yi Zong, "DACs and ADCs under low neutron and gamma radiation", *Proceedings of the International Conference on Computers and Devices for Communication (CODEC06)*. 20/12/2006.
- [AL03a] M. Alderighi , F. Casini , S. D'Angelo , F. Faure , M. Mancini , S. Pastore , G. R. Sechi , R. Velazco, "Radiation test methodology for SRAM-based FPGAs by using THESIC+", *9th IEEE International On-Line Testing Symposium*, July 2003, pp 162.
- [AL03b] B. Alpat, R. Battiston, M. Bizzarri, D. Caraffini, E. Fiori, A. Papi, M. Petasecca, and A. Pontetti, "The radiation sensitivity mapping of ICs using an IR pulsed laser system," *Microelectronics Reliability*, vol. 43, pp. 981–984, June 2003.
- [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.
- [AM12] A. Amigo de la Huerga, "Análisis de memorias SRAM bajo radiación natural", *Proyecto Final de Carrera*, Universidad Complutense de Madrid, 2012.
- [AN00a] G. Anelli, "Conception et caracterisation de circuits integrés resistants aux radiations pour les detecteurs de particules du LHC en technologies CMOS submicroniques profondes", *Tesis doctoral*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [AN00b] F. Anghinolfi, "Radiation Hard Electronics", *CERN training course*, Ginebra (Suiza), 10-12 de Abril de 2000.
- [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.
- [BA09] S. Baeg, S. Wen, and R. Wong, "SRAM Interleaving Distance Selection with a Soft Error Failure Model", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 4, pp. 2111-2118, August 2009.
- [BE93] D. Bessot, R Velazco. "Design of SEU-Hardened CMOS memory cells: the HIT cell". *IEEE RADECS 93*.

- [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.
- [BE05] S. Bertazzoni, D. Di Giovenale, L. Mongiardo, M. Salmeri, A. Mencattini, A. Salsano, D. Bisello, A. Candelori, P. Giubilato, A. Kaminski, M. Nigro, R. Rando, J. Wyss, S. Lora, "TID and SEE characterization and damaging analysis of 256 Mbit COTS SDRAM for IEEM application", *RADECS 2005*. Page(s):PW11-1 - PW11-4.
- [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.
- [BO13] Anna B. Boruzdina, Anastasia V. Ulanova, Andrey G. Petrov, Vitaly A. Telets, Pedro Reviriego, and Juan Antonio Maestro, "Verification of SRAM MCUs calculation technique for experiment time optimization", *Proceedings of the 14th IEEE European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS13) Oxford (U.K)*. September 2013.
- [BU90] S. Buchner, K. Kang, W. J. Stapor, A. B. Campbell, A. R. Knudson, P. McDonald, and S. Rivet, "Pulsed laser-induced SEU in integrated circuits: a practical method for hardness assurance testing," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 37, pp. 1825–1831, December 1990.
- [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.
- [BU96a] S. Buchner, A. B. Campbell, T. Weatherford, A. Knudson, P. McDonald, D. McMorrow, B. Fischer, S. Metzger, and M. Schlog, "Charge collection in GaAs MESFET circuits using a high energy microbeam," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, pp. 2897–2903, December 1996.
- [BU96b] S. P. Buchner, A. B. Campbell, D. McMorrow, J. S. Melinger, M. Masti, and Y. J. Chen, "Modification of single event upset cross section of an SRAM at high frequencies," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, pp. 924–930, June 1996.
- [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.

- [BU02] S. Buchner, D. McMorrow, A. Sternberg, L. Massengill, R. L. Pease, and M. Maher, "Single-event transient (SET) characterization of an LM119 voltage comparator: an approach to set model validation using a pulsed laser," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, pp. 1502–1508, June 2002.
- [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.
- [BU05] S. Buchner, A. B. Campbell, A. Sternberg, L. Massengill, D. McMorrow, and C. Dyer, "Validity of using a fixed analog input for evaluating the SEU sensitivity of a flash analog-to-digital converter," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, pp. 462–467, February 2005.
- [BU13] Stephen P. Buchner, Florent Miller, Vincent Pouget, and Dale P. McMorrow, "Pulsed-Laser Testing for Single-Event Effects Investigations", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 3, June 2013.
- [CA96] T. Calin, M. Nicolaidis, and R. Velazco, "Upset hardened memory design for submicron CMOS technology," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 43, no. 6, pp. 2874–2878, December 1996.
- [CA01] C. Carmichael, J. Fabula, R. Padovani, R. Reis, "A fault injection analysis of Virtex FPGA TMR design methodology Lima", *Radiation and Its Effects on Components and Systems*, 2001.
- [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. Bakaloglu, K. Kiaei, K. E. Holbert, and P. Fouillat, "Radiation hardened by design rf circuits implemented in 0.13 μm CMOS technology," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 3449–3454, December 2006.
- [DA93] M. R. Darwish, M. A. Shibib, M. R. Pinto and J. L. Titus, "Single Event Rupture of Power DMOS Transistors", *Proceedings of the Electron Devices Meeting*, pp. 671-674, Washington (USA), December 1993.
- [DA02a] F. Darracq, H. Lapuyade, N. Buard, F. Mounsi, B. Foucher, P. Fouillat, M. C. Calvet, and R. Dufayel, "Backside SEU laser testing for commercial off-the-shelf SRAMs," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, pp. 2977–2983, December 2002.

- [DA02b] F. Darracq, T. Beauchene, V. Pouget, H. Lapuyade, D. Lewis, P. Fouillat, and A. Touboul, "Single-event sensitivity of a single SRAM cell," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, pp. 1486–1490, June 2002.
- [DA03] F. Darracq, H. Lapuyade, V. Pouget, and P. Fouillat, "A non-linear model to express laser-induced SRAM cross-sections versus an effective laser LET," in *Proceedings of the 7th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*, (Noordwijk Aan Zee (The Netherlands)), pp. 107–112, September 2003.
- [DE00] M. Dentan, "Radiation Effects on Electronics Components and Circuits", CERN training course, Ginebra (Suiza), 10-12 de Abril de 2000.
- [DI03] "Diseño de circuitos y sistemas integrados", Ediciones UPC, 2003.
- [DO05] A. Douin, V. Pouget, D. Lewis, P. Fouillat, and P. Perdu, "Electrical modeling for laser testing with different pulse durations," in *11th IEEE International On-Line Testing Symposium, 2005 (IOLTS 2005)*, (St. Raphael (France)), pp. 9–13, July, 6-8 2005.
- [DO06] A. Douin, V. Pouget, F. Darracq, D. Lewis, P. Fouillat, and P. Perdu, "Influence of laser pulse duration in single event upset testing," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 1799–1805, August 2006.
- [DO12] N. A. Dodds, N. C. Hooten, R. A. Reed, R. D. Schrimpf, J. H. Warner, N. J. Roche, D. McMorro, S. Wen, R. Wong, J. F. Salzman, S. Jordan, J. A. Pellish, C. J. Marshall, N. J. Gaspard, W. G. Bennett, E. X. Zhang, B. L. Bhuvu, "Effectiveness of SEL Hardening Strategies and the Lathup Domino Effect," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 59, no. 6, pp. 2642-2650, Dec. 2012.
- [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.
- [EC92] R. Ecoffet, M. Labrunee, S. Duzellier, and D. Falguere, "Heavy ion test results on memories", *IEEE Radiation Effects Data Workshop Rec.*, 1992, pp. 27-33.
- [ES02] European Space Components Coordination, "Decapsulation of plastic encapsulated semiconductor devices". ESCC Basic Specification No. 25300. Issue 1. October 2002.
- [FE06] V. Ferlet-Cavrois, P. Paillet, D. McMorro, J. S. Melinger, A. B. Campbell, M. Gaillardin, O. Faynot, O. Thomas, G. Barna, and B. Giffard, "Analysis of the transient response of high performance 50-nm partially depleted SOI transistors using a laser probing technique," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 53, pp. 1825–1833, August 2006.
- [FE09] Fernandez-Martinez, P. ; Lopez-Calle, I. ; Hidalgo, S. ; Franco, F.J. ; Flores, D. ; de Agapito, J.A., " Comparison between Heavy Ion and Pulsed Laser Simulation to reproduce SEE Tests ", *Proceedings of the IEEE 2009 Spanish Conference on Electron Devices*, Santiago de Compostela (Spain). February 2009.
- [FR01] F. J. Franco, J. P. Santos, J. Lozano, Antonio H. Cachero, Miguel A. Martín, A. Paz, and J. A. Agapito, "Test Results for Some Operational Amplifiers Subjected to

- Neutron Radiation", Actas de la 3ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE2001), pp. 409 - 412. Andalucía (España). February 2001.
- [FR02] F. J. Franco, J. Lozano, J. P. Santos, and J. A. Agapito, "Degradation of Different Families of Instrumentation Amplifiers due to the Not Ionizing Energy Loss Damage", Conference Proceedings of the Workshop on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS2002), pp. 155 - 158. 19/09/2002.
- [FR04a] F. J. Franco, J. A. Agapito, J. C. Cubillos, Miguel A. Rodríguez, and Yi Zong, "Neutron Effects on Short Circuit Currents of Bipolar Op Amps and Consequences" Proceedings of the 5th Workshop on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS04), pp. 213- 220. INTA, 24/09/2004.
- [FR04b] F. J. Franco, Yi Zong, J. A. Agapito, J. C. Cubillos, and Miguel A. Rodríguez, "Evolution of Lowest Supply Voltage and Hysteresis Phenomena in Irradiated Analog CMOS Switches", Proceedings of the 2004 IEEE Radiation Effects Data Workshop. pp. 91 - 95. (EEUU): Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 08/11/2004.
- [FR05] Franco, F. J., "El amplificador Operacional bajo radiación de neutrones rápidos y consecuencias en otros dispositivos", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 2005.
- [FR07] F.J. Franco, and R. Velazco, "A Portable Low-Cost SEU Evaluation Board for SRAMs", Proceedings of the IEEE 2007 Spanish Conference on Electron Devices, San Lorenzo del Escorial (Spain). February 2007.
- [FR10] F. J. Franco, I. López-Calle, J. G. Izquierdo, and J. A. Agapito, "Modification of the LM124 Single Event Transients by Load Resistors", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 57, pp: 358-365. February 2010.
- [FR11] F. J Franco, C. Palomar, S. F. Liu, I. Lopez-Calle, J. A. Maestro, and J. A. Agapito, "Defining a Strategy to Perform Life-Test with Analog Devices", Proceedings of the 12th IEEE European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS11) Sevilla (Spain). September 2011.
- [GA04] M. Gadlage , R. Schrimpf , J. Benedetto , P. Eaton , D. Mavis , M. Sibley , K. Avery and T. Turflinger "Single event transient pulsewidths in digital microcircuits," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, pp. 3285, Dec. 2004.
- [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.
- [GR03] T. Granlund et al., "Soft Error Rate Increase for New Generations of SRAMs," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 50, pp. 2065-2068, December 2003.
- [HAM] R. W. Hamming, "Error detecting and correcting codes," Bell Syst. Tech. J., vol. 29, pp. 147–160.
- [HA00] T.P. Haraszit, "CMOS Memory Circuits", Kluwer Academic Publishers, 2000.

- [HA05] N. Haddad, L. Rockett, S. Doyle, S. Ramaswamy, H. Tri, "Design Considerations for Next Generation Radiation Hardened SRAMs for Space Applications", IEEE Aerospace Conference, March 2005, pp1 – 6.
- [HA12] A. Hands, P. Morris, K. Ryden, and C. Dyer, "Large-Scale Multiple Cell Upsets in 90 nm Commercial SRAMs During Neutron Irradiation", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol.59, no. 6, pp. 2824-2830, December 2012.
- [HO87] J. H. Hohl and K. F. Galloway, "Analytical model for Single Event Burn Out of Power Mosfet", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 34, pp. 1275-1280, 1987.
- [HU13] G. Hubert, R. Velazco, C. Federico, A. Cheminet, C. Silva-Cardenas, L. V. E. Caldas, F. Pancher, V. Lacoste, F. Palumbo, W. Mansour, L. Artola, F. Pineda, and S. Duzellier, "Continuous High-Altitude Measurements of Cosmic Ray Neutrons and SEU/MCU at Various Locations: Correlation and Analyses Based-On MUSCA SEP", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 60, pp. 2418 - 2426, August 2013.
- [JA09] S. Jahinuzzaman, D. Rennie, and M. Sachdev, "A Soft Error Tolerant 10T SRAM Bit-Cell With Differential Read Capability," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 56, no. 6, pp. 3768–3773, December 2009.
- [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 beam testing with those obtained using a new picosecond pulsed laser facility", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 47, pp. 539–544, June 2000.
- [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.
- [KO97] R. Koga, S. H. Penzin, K. B. Crawford, W. R. Crain, S. C. Moss, S. D. Pinkerton, S.D. LaLumondiere and M. C. Maher, "Single event upset (SEU) sensitivity dependence of linear integrated circuits (ICs) on bias conditions" IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 44, pp. 2325-2332, December 1997.
- [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.
- [LA03] J. S. Laird, T. Hirao, S. Onoda, H. Mori, and H. Itoh, "A comparison of heavy ion and picosecond laser microbeams for investigating single event transients in InGaAs on InP photodetectors," Nuclear Instruments and Methods in Physics

- Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 210, pp. 243–249, September 2003.
- [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.
- [LA05a] J. S. Laird, T. Hirao, S. Onoda, and H. Itoh, “Heavy ion and pulsed laser set measurements in ultrahigh speed msm GaAs photodetectors,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 52, pp. 1504–1512, October 2005.
- [LA05b] J. S. Laird, T. Hirao, S. Onoda, T. Wakasa, T. Yamakawa, H. Abe, and T. Kamiya, “Investigating radiation effects on high-speed optoelectronic devices by combining time-resolved laser and ion microbeam studies,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 231, pp. 476–481, April 2005.
- [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.
- [LE04] Jean-Luc Leray, Jacques Baggio, Véronique Ferlet-Cavrois, and Olivier Flament, “Atmospheric Neutron Effects in Advanced Microelectronics, Standards and Applications”, IEEE International Conference on Integrated Circuit Design and Technology, pp. 311-321, 2004.
- [LI92] M.N. Liu, S. Whitaker, "Low power SEU immune CMOS memory circuits", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, no 6, pp. 1679-1684, December 1992.
- [LO09a] Lopez-Calle, I., Franco, F.J. , de Agapito, J.A., "Ion Hit Emulation by LASER Beam Model", Proceedings of the IEEE 2009 Spanish Conference on Electron Devices, Santiago de Compostela (Spain). February 2009.
- [LO09b] I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, and J. A. Agapito, “Two-Photon Absorption (TPA) backside pulsed laser tests in the LM324”, Proceedings of the 10th IEEE European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS09) Brujas (Belgium). September 2009.
- [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.
- [LO11a] I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, and J. A. Agapito, "Influence of the Bias Conditions on the Single Event Transients of the LM311 Voltage Comparator", Proceedings of the 11th IEEE European European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS10) Längenfeld (Austria). September 2010.
- [LO11b] I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. A. Agapito, and J. G. Izquierdo, " Load resistor as a worst-case parameter to investigate single-event transients in analog electronic devices", Proceedings of the IEEE 2011 Spanish Conference on Electron Devices, Palma de Mallorca (Spain). February 2011.

- [LO11c] I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. A. Agapito, and J. G. Izquierdo, "LASER system for space environment emulation", Proceedings of the IEEE 2011 Spanish Conference on Electron Devices, Palma de Mallorca (Spain). February 2011.
- [LO11d] I. Lopez-Calle, J. G. Izquierdo, F. J. Franco, and J. A. Agapito, "Sistema Automático de Inducción de Transitorios en Dispositivos Electrónicos por medio de un Láser Pulsado", 18º Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI2011), Badajoz (Spain). Julio 2011.
- [LO11e] I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. A. Agapito, J. G. Izquierdo, P. Reviriego, and J. A. Maestro, "TPA laser source for SEE test at UCM", Proceedings of the 12th IEEE European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS12) Sevilla (Spain). September 2011.
- [LO12] I. Lopez-Calle, C. Palomar, F. J. Franco, and J. A. Agapito, "A New Laser Source for SEE Test", Proceedings of the 4th International Workshop on Analogue and Mixed Signal Integrated Circuits for Space Applications (AMICSA2012) Noordwijk (The Netherlands). August 2012.
- [MA78] T. C. May and M. H. Wood, "A new physical mechanism for soft errors in dynamic memories," in Proc. 16th Annual Int. Reliability Physics Symp., 1978, pp. 33–40.
- [MA89] P. W. Marshall, C. J. Dale, G. P. Summers, E. A. Wolicki and E. A. Burke, "Proton, Neutron and Electron-Induced Displacement Damage in Germanium", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 36, n^o. 6, pp. 1882-1888, December 1989.
- [MA97] G C. Messenger and M. S. Ash, "Single Event Phenomena", International Thompson Publishing, U.S.A, 1997.
- [MA09] Juan Antonio Maestro and Pedro Reviriego, "A method to eliminate the event accumulation problem from a memory affected by multiple upsets", Microelectronics Reliability, vol. 49, pp. 707 – 715, May 2009.
- [ME94] S.Mellinger, S. Buchner, D. McMorrow, W. J. Stapor, T. R. Weatherford, and A. B. Campbell, "Critical Evaluation of the Pulsed Laser Method for Single Event Effects Testing and Fundamental Studies." IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-41, pages 2574–2584, 1994.
- [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.
- [MI04] F. Miller, N. Buard, T. Carriere, R. Dufayel, R. Gaillard, P. Poirot, J. M. Palau, B. Sagnes, and P. Fouillat, "Effects of beam spot size on the correlation between laser and heavy ion SEU testing," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 51, pp. 3708–3715, December 2004.
- [MI06a] F. Miller, A. Luu, F. Prud'homme, P. Poirot, R. Gaillard, N. Buard, and T. Carriere, "Characterization of single-event burnout in power mosfet using backside laser testing," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, pp. 3145–3152, December 2006.
- [MI06b] F. Miller, N. Buard, G. Hubert, S. Alestra, G. Baudrillard, T. Carriere, R. Gaillard, J. M. Palau, F. Saigne, and P. Fouillat, "Laser mapping of SRAM sensitive cells: A

- way to obtain input parameters for DASIE calculation code,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 53, pp. 1863–1870, August 2006.
- [MO90] D. McMorrow, A. R. Knudson, and A. B. Campbell, “Fast charge collection in GaAs MESFETs,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 37, pp. 1902–1908, December 1990.
- [MO93] D. McMorrow, T. Weatherford, A. R. Knudson, L. H. Tran, J. S. Melinger, and A. B. Campbell, “Single-event dynamics of high-performance HBTs and GaAs MESFETs,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 40, pp. 1585–1591, December 1993.
- [MO99] A. Moreno, R. Samson, J. Falquez, “Laser Injection of Soft Faults for the Validation of Dependability”, Design, Journal of Universal Computer Science, Vol. 5, no. 10 (1999), 712-729.
- [MO03a] P. Mongkolkachit, B. Bhuvu, “Design technique for mitigation of alpha-particle-induced single-event transients in combinational logic”. Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on, Volume: 3, Issue: 3, Sept. 2003 Pages: 89 – 92.
- [MO03b] D. McMorrow, W. T. Lotshaw, J. S. Melinger, S. Buchner, Y. Boulghassoul, L. W. Massengill, and R. L. Pease, “Three-dimensional mapping of single-event effects using two photon absorption,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 50, pp. 2199–2207, December 2003.
- [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.
- [MO05] D. McMorrow, S. Buchner, W. T. Lotshaw, J. S. Melinger, M. Maher, and M. W. Savage, “Demonstration of single-event effects induced by through-wafer two-photon absorption,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 51, pp. 3553–3557, December 2004.
- [MU00] O. Musseau, V. Ferlet-Cavrois, J. L. Pelloie, S. Buchner, D. McMorrow, and A. B. Campbell, “Laser probing of bipolar amplification in 0.25- μm MOS/SOI transistors,” IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 47, pp. 2196–2203, December 2000.
- [NA08] T. Nakamura, M. Baba, E. Ibe, Y. Yahagi, & H. Kameyama, “Terrestrial Neutron-Induced Soft Errors in Advanced Memory Devices”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2008.
- [NE13] Nelson E. Lourenco, Stanley D. Phillips, Troy D. England, Adilson S. Cardoso, Zachary E. Fleetwood, Kurt A. Moen, Dale McMorrow, Jeffrey H. Warner, Stephen P. Buchner, Pauline Paki-Amouzou, Jack Pekarik, David Hame, Ashok Raman, Marek Turowski, and John D. Cressler, “An Investigation of Single-Event Effects and Potential SEU Mitigation Strategies in Fourth-Generation, 90 nm SiGe BiCMOS”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 60, No. 6, pp. 4175–4183, December 2013.
- [NI05] M. Nicolaidis, “Design for Soft Error Mitigation”, IEEE Transactions On Device And Materials Reliability, Vol. 5, No. 3, September 2005.

- [NI11] M. Nicolaidis, "Soft Errors in Modern Electronic Systems", Springer Science, vol. 41, 2011.
- [NO93] E. Normand, T. J. Baker, "Altitude and Latitude Variations in Avionics SEU and Atmospheric Neutron Flux", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 40, pp. 1484 – 1490, December 1993.
- [NO96] E. Normand, "Single-Event Effects in Avionics", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, pp. 461 – 474, April 1996.
- [OL93] J. Olsen, P. E. Becher, P. B. Fynbo, P. Raaby, J. Schultz, "Neutron-Induced Single Event Upsets in Static RAMs Observed at 10 Km Flight Altitude," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 40, pp. 74 – 77, April 1993.
- [OL05] B. D. Olson, D. R. Ball, K. M. Warren, L. W. Massengill, N. F. Haddad, S. E. Doyle, and D. McMorrow, "Simultaneous single event charge sharing and parasitic bipolar conduction in a highly-scaled SRAM design," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 52, pp. 2132–2136, December 2005.
- [OL12] Timothy R. Oldham, M. R. Friendlich, E. P. Wilcox, K. A. Label, S. P. Buchner, D. G. Mavis, P. H. Eaton, and J. Castillo, "Correlation of Laser Test Results With Heavy Ion Results for NAND Flash Memory", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 59, No. 6, December 2012.
- [PA09] F. R. Palomo, P. Fernández-Martínez, J. M. Mogollón, S. Hidalgo, M. A. Aguirre, D. Flores, I. López-Calle, and J. A. de Agapito, "Simulation of femtosecond pulsed laser effects on MOS electronics using TCAD Sentaurus customized models", International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, pp: 1–19. 2009.
- [PA11] C. Palomar, I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, and J. A. Agapito, "Laser Test on a Power Operational Amplifier", Proceedings of the 12th IEEE European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS11) Sevilla (Spain). September 2011.
- [PA13] C. Palomar, F. J. Franco, I. Lopez-Calle, J. G. Izquierdo, & J. A. Agapito, "Peak Detector Effect in Low-Dropout Regulators", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 60, pp: 2666 – 2674. August 2013.
- [PA14] C. Palomar, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, I. López, and J. A. Agapito, "Characteristics of the Long Duration Pulses in a Shunt Linear Voltage Regulator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Vol. 737, pp: 273-280. February 2014.
- [PE02] R. L. Pease, A. L. Sternberg, Y. Boulghassoul, L. W. Massengill, S. Buchner, D. McMorrow, D. S. Walsh, G. L. Hash, S. D. LaLumondiere, and S. C. Moss, "Comparison of SETs in bipolar linear circuits generated with an ion microbeam, laser light, and circuit simulation," IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 49, pp. 3163–3170, December 2002.
- [PO00a] V. Pouget, P. Fouillat, D. Lewis, H. Lapuyade, L. Sarger, F. M. Roche, S. Duzellier, and R. Ecoffet, "An overview of the applications of a pulsed laser system for SEU testing," in 6th IEEE International On-Line Testing Workshop, (Palma de Mallorca (Spain)), pp. 52–57, July, 3-5th 2000.

- [PO00b] V. Pouget, P. Fouillat, D. Lewis, H. Lapuyade, F. Darracq, and A. Touboul, "Laser cross section measurement for the evaluation of single-event effects in integrated circuits," *Microelectronics Reliability*, vol. 40, pp. 1371–1375, August-October 2000.
- [PO01] C. Poivey, J. W. J. Howard, S. Buchner, K. A. LaBel, J. D. Forney, H. S. Kim, and A. Assad, "Development of a test methodology for single-event transients SETs in linear devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 48, pp. 2180–2186, December 2001.
- [PO02] C. Poivey, S. Buchner, J. Howard and K. LaBel, "A Space Weather Event on the Microwave Anisotropy Probe (MAP)", Presented at RADECS 2002, 2002.
- [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.
- [PU06] H. Puchner, R. Krape, S. Sharifzadeh, J. Majjiga, R. Chao, D. Radaelli, and S. Wong, "Elimination of single event latchup in 90 nm SRAM technologies," *Proc. 44th Annu. IEEE Int. Reliability Phys. Symp.*, 2009, pp. 721-722.
- [RA05] D. Radaelli, H. Puchner, S. Wong, and S. Daniel, "Investigation of multi-bit upsets in a 150 nm technology SRAM device", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Volume 52, Issue 6, December 2005.
- [RE90] Reddy and P. Banarjee "Algorithm-based fault detection for signal processing applications", *IEEE Transactions on Computers*, vol. 39, issue 10, Oct. 1990, pp 1304 – 1308.
- [RE12] P. Reviriego, M. Flanagan, S.-F. Liu, and J. Maestro, "Multiple Cell Upset Correction in Memories Using Difference Set Codes," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 11, pp. 2592–2599, November 2012.
- [RO92] L. J. Rockett, "Simulated SEU hardened scaled CMOS SRAM cell design using gated resistors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 39, no. 5, pp. 1532–1541, 1992.
- [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.
- [SC95] J. R. Schwank, F. W. Sexton, T. R. Weatherford, D. McMorrow, A. R. Knudson, and J. S. Melinger, "Charge collection in GaAs MESFETs fabricated in semi-insulating substrates," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 42, pp. 1585–1591, December 1995.
- [ST02] A. L. Sternberg, L. W. Massengill, R. D. Schrimpf, Y. Boulghassoul, H. J. Barnaby, S. Buchner, R. L. Pease, and J. W. Howard, "Effect of amplifier parameters on single-event transients in an inverting operational amplifier," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 49, pp. 1496–1501, June 2002.

- [SU87] G. P. Summers, E. A. Burke, C. J. Dale, E. A. Wolicki, P. W. Marshall and M.A. Gehlhausen, "Correlation of Particle Induced Displacement Damage in Silicon", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 34, pp. 1134-1139, December 1987.
- [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, nº 6, pp. 1121-1226, December 1988.
- [SU93] G. P. Summers, E. A. Burke, P. Shapiro, S. R. Messenger and R. J. Walters, "Damage Correlations in Semiconductors Exposed to Gamma, Electron and Proton Radiations", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 40, nº 6, pp. 1372-1379, December 1993.
- [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.
- [TA07] J. Tausch, D. Sleeter, D. Radaelli, and H. Puchner, "Neutron induced micro SEL events in COTS SRAM devices," IEEE Radiation Effects Data Workshop Rec., 2007, pp. 185-188.
- [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, pp. 774-779, June 1999.
- [VE94] R. Velazco, D. Bessot, S. Duzellier, R. Ecoffet, R. Koga, "Two CMOS memory cells suitable for the design of SEU-tolerant VLSI circuits", IEEE Transaction on Nuclear Science, Volume 41, Issue 6, Part 1, Dec. 1994, pp.: 2229 - 2234.
- [VE07] R. Velazco, and F.J. Franco, "Single Event Effects on Digital Integrated Circuits: Origins and Mitigation Techniques ", Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronic, Vigo (Spain). June 2007.
- [WE87] H.T.Weaver, et al "An SEU tolerant memory cell derived from fundamental studies of SEU mechanisms in SRAM", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-34. No.6, 1281-1286, December 1987.
- [WH94] C. F. Wheatley, J. L. Titus and D. I. Burton, "Single Event Gate Rupture in vertical power MosFets, an original empirical expression", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 41,nº 6, pp. 2152-2160, December 1994.
- [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.
- [ZI85] J. F. Ziegler, J. P. Biersack et U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Matter", vol. 1, Pergamon Press, (ISBN 0-08-021603-X), 1985.
- [ZI04] J.F. Ziegler, H. Puchner, "SER-History, Trends and Challenges: A Guide for Designing with Memory ICs", Cypress Semiconductor Corporation, 2004.

- [ZO04] Yi Zong, F. J. Franco, and J. A. Agapito, "Using Optimization Techniques to Characterize Irradiated CMOS Analog Switches", Proceedings of the 5th Workshop on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS04), pp. 279 - 285. INTA, 24/09/2004.
- [ZO05a] Yi Zong, F. J. Franco, J. A. Agapito, and Antonio H. Cachero, "Radiation Effects on XFET Voltage References", Proceedings of the 2005 IEEE Radiation Effects Data Workshop. pp. 138 - 143. (EEUU): Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 21/11/2005.
- [ZO05b] Yi Zong, F. J. Franco, Antonio H. Cachero, J. C. Cubillos, Miguel A. Rodríguez, Ana C. Fernandes, Jose G. Marques, and J. A. Agapito, "Supervisory Circuits in a neutron and gamma mixed environment", Proceedings of the 2005 IEEE Radiation Effects Data Workshop. pp. 132 - 137. (EEUU): Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 21/11/2005.

ENLACES WEB

- [ATS] <http://www.atsb.gov.au/media/3532398/ao2008070.pdf>
- [BIB] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/108/htm/sec_9.htm
- [CYC] <http://www.cyc.ucl.ac.be/HIF/HIF.html>
- [DOC] <http://www.docstoc.com/docs/53827613/Soft-Error-Impacts-on-Design-For-Reliability-Technologies>
- [FOR] <http://www.forbes.com/global/2000/1113/0323026a.html>
- [INF] <http://www.lnf.infn.it/rapatt/2008/02/opera.pdf>
- [IN2] <http://in2p3.fr/actions/formation/microelectronique11/Velazco%20%20SEU%20and%20Latchup.pdf>
- [LIN] http://www.linkedin.com/groups?home=&gid=915157&trk=anet_ug_hm
- [LPS] <http://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/activites-scientifiques/accelerateurs/genepi>
- [NMDa] <http://www.nmdb.eu/?q=node/376>
- [NMDb] <http://www.nmdb.eu/?q=node/378>
- [SPE] <http://spectrum.ieee.org/aerospace/space-flight/did-bad-memory-chips-down-russias-mars-probe/0>
- [SRI] <http://www.srim.org/>
- [UCM] <http://www.ucm.es/clur>
- [USA] http://www.usatoday.com/money/autos/2010-03-14-crashes-involving-toyotas-raise-questions-victim-profiles_N.htm
- [VIS] <http://visitantes.auger.org.ar/index.php/los-rayos-cosmicos.html>

[WIKa] http://en.wikipedia.org/wiki/2009%E2%80%932010_Toyota_vehicle_recalls

[WIKb] http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_voting_in_Belgium

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.
- I. Lopez-Calle, C. Palomar, F. J. Franco, & J. A. Agapito, "**A New Laser Source for SEE Test**", Proceedings of the 4th International Workshop on Analogue and Mixed Signal Integrated Circuits for Space Applications (AMICSA2012) Noordwijk (The Netherlands). August 2012.
- C. Palomar, F. J. Franco, I. Lopez-Calle, J. G. Izquierdo, & J. A. Agapito, "**Peak Detector Effect in Low-Dropout Regulators**", Proceedings of the 13th IEEE European European Conferences on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS12) Biarritz (France). September 2012.
- C. Palomar, I. Lopez-Calle, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, & J. A. Agapito, "**Laser Induced Single Events in SRAMs**", Proceedings of the IEEE 9th IEEE Spanish Conference on Electron Devices, Valladolid (Spain). February 2013.
- Ángel Amigo, C. Palomar, F. J. Franco, I. Lopez-Calle, María Fe Cervera, Antonio H. Cachero, & J. A. Agapito, "**Sistema Autónomo de Detección y Almacenamiento de Errores por Sucesos Aislados en SRAMs**", 20º Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI2013), Madrid (Spain). Julio 2013.
- C. Palomar, F. J. Franco, I. Lopez-Calle, J. G. Izquierdo, & J. A. Agapito, "**Peak Detector Effect in Low-Dropout Regulators**", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 60, pp: 2666 – 2674. August 2013.
- C. Palomar, F. J. Franco, J. G. Izquierdo, I. López, & J. A. Agapito, "**Characteristics of the Long Duration Pulses in a Shunt Linear Voltage Regulator**", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Vol. 737, pp: 273-280. February 2014.