

## EVALUACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN DE CELDAS SOLARES DE DISTINTOS MATERIALES CON PROTONES DE 10MeV

M. Alurralde<sup>1</sup>, M.J.L. Tamasi<sup>2</sup>, M.G. Martínez Bogado<sup>2\*</sup>, J. Plá<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Materiales – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

<sup>2</sup>Departamento de Física – Centro Atómico Constituyentes – CNEA

Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina

Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, [www.tandar.cnea.gov.ar](http://www.tandar.cnea.gov.ar), [alurrald@cnea.gov.ar](mailto:alurrald@cnea.gov.ar)

### RESUMEN

Se presentan los resultados correspondientes a experiencias de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de distintos materiales. Se utilizaron celdas de doble juntura de GaAs sobre sustrato de Ge, heterojunturas de silicio amorfo o silicio cristalino epitaxial sobre silicio cristalino, y celdas de silicio cristalino con juntura obtenida por difusión. En el caso de las celdas de GaAs se irradiaron dispositivos con y sin vidrio protector con dosis de hasta  $10^{11}$  p/cm<sup>2</sup>, equivalente a la que recibiría en la misión SAOCOM, mientras que en el caso de las celdas heterojuntura se utilizaron dosis de hasta  $10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>, y en aquellas de silicio cristalino se consideraron dosis intermedias que posibilitaron la medición de la vida media efectiva de los portadores minoritarios del dispositivo.

Daño por radiación - celdas solares - usos espaciales

### INTRODUCCIÓN

Es sabido que las celdas solares son utilizadas en el espacio como fuente de alimentación eléctrica de satélites artificiales. Las mismas se encuentran sometidas al bombardeo de partículas cargadas de diversas energías que introducen defectos en los materiales que constituyen las celdas, deteriorando, en consecuencia, sus propiedades tanto eléctricas como electrónicas. A partir de ensayos de daño por radiación realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, es posible estudiar la variación de los parámetros característicos de la celda: tensión a circuito abierto ( $V_{ca}$ ), corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ ) y vida media efectiva de los portadores minoritarios ( $\tau_{ef}$ ) con la dosis de irradiación. Estos parámetros son los que comúnmente se utilizan para caracterizar el daño por radiación.

Dado que las celdas fotovoltaicas pueden ser fabricadas con distintos materiales y tecnologías, es de interés estudiar la resistencia de diversos dispositivos fotovoltaicos al ambiente espacial y predecir el comportamiento de los mismos al final de la misión.

Otro punto fundamental que justifica la realización de estas experiencias radica en el hecho que es necesario garantizar y verificar los datos suministrados por el fabricante en lo que respecta a la resistencia al daño por radiación.

En este trabajo se continuaron los ensayos presentados en el año anterior (Alurralde et al. 2001) en celdas de silicio cristalino y los primeros estudios de daño por radiación sobre dispositivos de heterojunturas (GaAs y a-Si).

### DESARROLLO Y DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se irradiaron celdas solares de distintos materiales y tecnologías de fabricación. Como continuación de experiencias anteriores presentadas en Alurralde et al. (2001) para la determinación del coeficiente de daño por radiación con protones, se irradiaron tres celdas de silicio cristalino sin el vidrio de protección. Las dosis fueron  $10^8$ ,  $10^9$  y  $10^{10}$  p/cm<sup>2</sup>, midiéndose el tiempo de vida media efectivo de los portadores minoritarios ( $\tau_{ef}$ ) antes y después de las dosis recibidas.

A partir de un convenio bilateral con un grupo del LAMEL-CNR Bologna, Italia, se irradiaron dos muestras de heterojuntura Si amorfo sobre Si cristalino cuyo objetivo fue estudiar la resistencia al daño de este tipo de dispositivos.

En el marco del proyecto de cooperación CNEA-CONAE (Bolzi et al., 2001) se ensayaron seis muestras tipo tandem de GaAs, con y sin vidrio, con dosis similares a las que recibiría en la misión SAOCOM.

El objetivo de esta experiencia fue observar y comparar el comportamiento de las características eléctricas de celdas de distintos materiales y continuar con la puesta a punto de la técnica.

Se utilizaron protones de 10MeV de energía para los experimentos de evaluación del daño por radiación, en la Figura 1 se muestra esquemáticamente y una fotografía del montaje del equipo construido frente de la línea del haz de protones.

\* Becaria de Doctorado, subsidio BID 1201/OC-AR, PICT N° 10-06981.

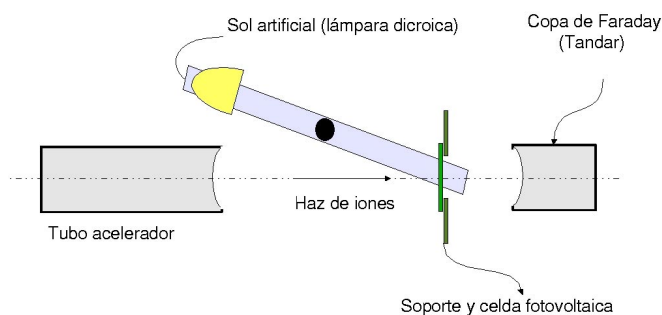


Figura 1. Esquema y foto del equipo utilizado en la irradiación en la línea externa del acelerador Tandar del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA.

Se midió la curva corriente-tensión (I-V) de las celdas previamente a la irradiación, luego se repitió la medición entre cada irradiación. Una de las mejoras realizadas respecto al experimento anterior consistió en el montaje de un radiómetro frente a la fuente luminosa con una pantalla que lo protege del haz directo de protones. Este tipo de sensor de irradiancia fue desarrollado en el laboratorio del GES (Bruno et al, 2001) para obtener una mayor repetitividad de la irradiancia de la luz utilizada para la medición de la curva I-V.

### IRRADIACIÓN DE CELDAS DE ARSENIURO DE GALIO

Los dispositivos de GaAs utilizados en esta experiencia fueron adquiridos en la empresa Spectrolab Inc. Se emplearon celdas de doble juntura de GaAs sobre sustrato de germanio sin vidrio ni interconectores (celdas 1 y 2) y celdas con interconectores frontales, vidrio de protección y diodo integrado en la parte posterior de la celda (celdas 3 y 4).

Algunas de las características de las celdas provistas por el fabricante se muestran en la Tabla 1. En la Figura 2 se muestra esquemáticamente y fuera de escala la estructura de dichas celdas.

Sustrato	Germanio
Método de crecimiento de GaAs	Crecimiento epitaxial de metal orgánico en fase vapor
Dispositivo	Monolítico, dos terminales. Celda n/p GaInP <sub>2</sub> y GaAs interconectadas por una juntura túnel.
Tamaño	31,49 mm x 69,49 mm
Diodo	diodo de Si integrado en la parte posterior de la celda (sólo en celdas con vidrio), CICs.

Tabla 1. Características de las celdas de GaAs proporcionadas por el fabricante (ref. 1).

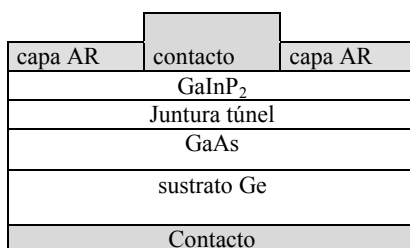


Figura 2. Esquema de las celdas de GaAs sobre sustrato de Ge con doble juntura. El esquema se encuentran fuera de escala.

En la referencia 1 se pueden encontrar los parámetros eléctricos típicos, propiedades térmicas, coeficientes de temperatura y datos de daño por radiación.

Se realizaron irradiaciones con protones de 10 Mev en celdas de estas características con fluencias entre  $10^8$  y  $10^{11}$  p/cm<sup>2</sup>.

### Resultados

Como en las anteriores experiencias se midió la curva I-V *in situ* de los dispositivos entre irradiaciones. En la Figura 3 se muestra la degradación de la curva característica de una de las celdas a modo de ejemplo, siendo las demás muy similares a ésta.

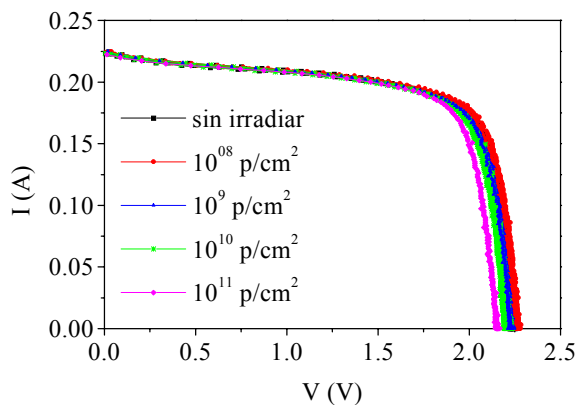


Figura 3. Degradación de la curva I-V de una celda multijuntura de GaAs con las distintas dosis de irradiación

En la Figura 4 se muestra la variación de  $V_{ca}$  y de  $I_{cc}$  normalizadas al valor inicial en función de las distintas dosis para las cuatro celdas irradiadas.

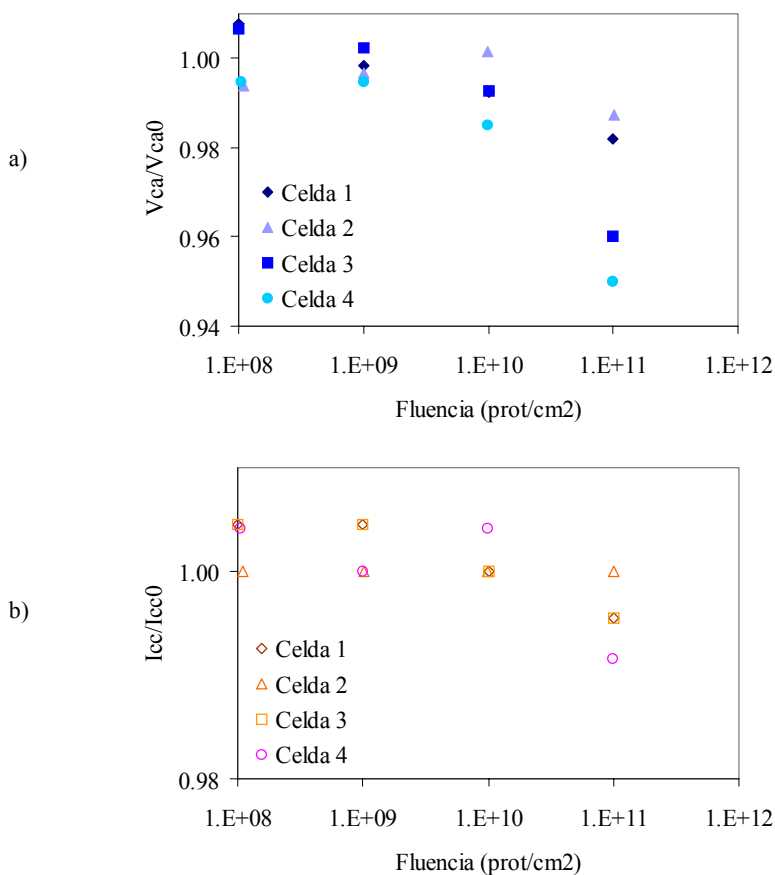


Figura 4. Variación de: a)  $V_{ca}$  y b)  $I_{cc}$  normalizadas al valor inicial en función de las distintas dosis (celdas 1 y 2 sin vidrio de protección, celdas 3 y 4 con vidrio y diodo integrado)

Como puede observarse en la Figura 3 la variación de la curva I-V con la dosis de radiación es poco apreciable. También este efecto se ve en la Figura 4-b en donde la variación de  $I_{cc}$  es comparable al error experimental, con lo cual en este parámetro no se observa una variación apreciable. En cuanto a la  $V_{ca}$  el cambio con la fluencia es más evidente (Figura 4-a).

### IRRADIACIÓN DE CELDAS CON HETEROJUNTURA DE SILICIO

Las muestras irradiadas fueron elaboradas en el laboratorio LAMEL, del CNR (Area di Ricerca di Bologna). La descripción del proceso de elaboración puede encontrarse en Plá et al., 2002. Básicamente consiste en la elaboración de junturas depositando un emisor tipo  $p-i$  de silicio amorfo o cristalino sobre una oblea tipo  $n$  de silicio cristalino mediante la técnica PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) a baja temperatura (menor a 200°C), la deposición de

un emisor  $n^+$  en la cara posterior usando la misma técnica, la deposición de un contacto frontal transparente de ITO (*Indium Tin Oxide*), y finalmente la evaporación de una grilla de contactos frontal y un contacto completo posterior de aluminio. La estructura de las celdas heterojuntura se muestra esquemáticamente en la Figura 5.

Se irradiaron dos celdas de diferente estructura. Una de ellas, la CS67, tiene un emisor formado por una primera capa de 30 nm de material intrínseco (*i*) de silicio cristalino epitaxial con un 30% de silicio amorfo y un 10% de vacío. La segunda capa del emisor está formada por silicio cristalino epitaxial con un 10% de vacío. Los porcentajes de vacío representan cierto daño estructural presente en el material. El emisor de la segunda celda analizada, la CS75, consiste de una primera capa de silicio amorfo intrínseco y una segunda capa de silicio microcristalino crecida sobre la anterior con un espesor total de 60 nm. El rol de la capa intrínseca es esencialmente el de pasivar la superficie de la base de silicio cristalino. La estructura de estos emisores fue determinada a través de la medición de la reflectividad espectral y el posterior ajuste de la misma usando la aproximación BEMA (*Brüggemann Effective Medium Approximation*) (Rizzoli et al., 2001).

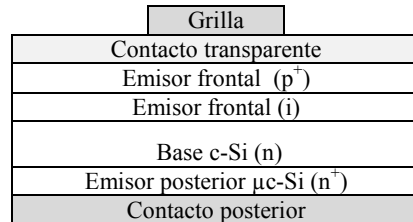


Figura 5 Esquema de las celdas heterojuntura. El esquema se encuentra fuera de escala.

### Resultados

A continuación, en la Figura 6, se pueden observar los resultados correspondientes a las irradiaciones de las dos celdas heterojuntura referidos a los valores iniciales antes de la irradiación.

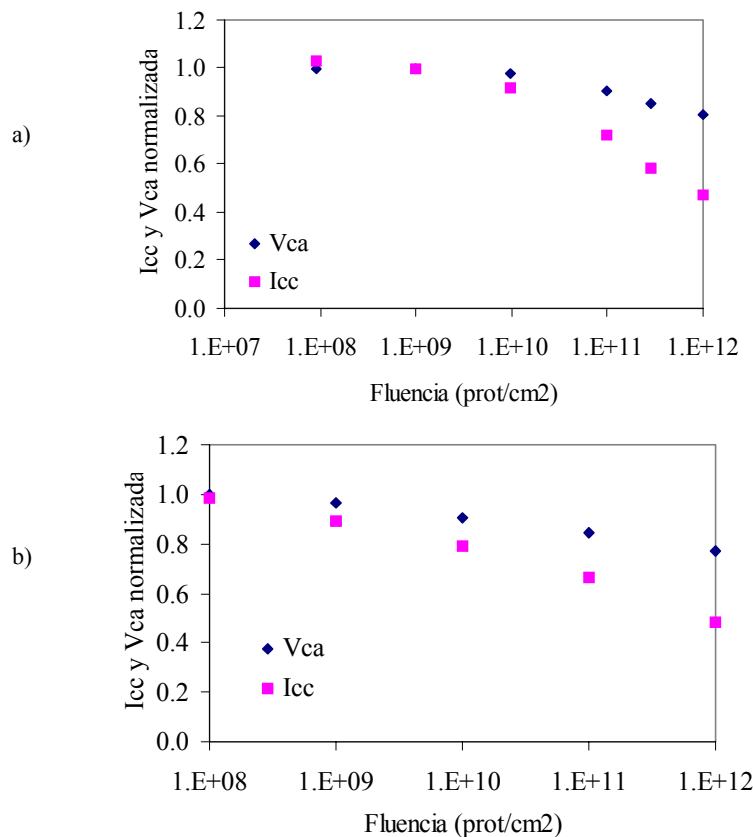


Figura 6. Variación de:  $V_{ca}$  e  $I_{cc}$  normalizadas al valor inicial en función de las distintas dosis protones de 10 MeV correspondientes a las heterojunturas sobre silicio a) CS67 y b) CS75 (ver texto).

Se utilizaron protones de 10 MeV con fluencias entre  $10^8$  y  $10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>. Para la obtención de los parámetros eléctricos se utilizó el mismo dispositivo experimental que en las experiencias anteriores.

### IRRADIACIÓN DE CELDAS DE SILICIO CRISTALINO

Las celdas solares de silicio cristalino utilizadas en esta experiencia son similares a las correspondientes a experiencias anteriores (Alurralde et al., 2001) al provenir dichas celdas del mismo proceso de elaboración. En este caso se utilizaron

dosis intermedias respecto a la primer experiencia:  $10^8$ ,  $10^9$  y  $10^{10}$  p/cm<sup>2</sup>. Esto permitió la medición de la vida media efectiva  $\tau_{ef}$  utilizando la técnica OCVD (Bruno et al., 1999).

Se realizaron simulaciones numéricas de dispositivos que permitieron correlacionar los resultados experimentales con la degradación de la vida media de los portadores minoritarios en la base. El análisis detallado de los resultados puede verse en Tamasi et al., 2002.

### Resultados

En la Tabla 2 se muestran los valores de vida media efectiva medidos, los de vida media en la base inferidos en base a la simulación numérica del método OCVD, y los calculados utilizando el modelo de degradación según el cual la variación de la inversa de la vida media de portadores minoritarios de la base en celdas solares de silicio cristalino ( $\tau_{base}^{-1}$ ) es proporcional a la fluencia ( $\Phi$ ) (ver por ejemplo Alurralde et al., 2001) y la constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de daño ( $k_\tau$ ).

El coeficiente de daño usado para calcular el  $\tau_{base}$  fue  $k_\tau = 1,5 \times 10^{-11} \mu\text{seg}^{-1} \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$ , el cual resultó del análisis del daño producido en celdas similares a las irradiadas en esta experiencia.

Celda	Dosis (p/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{ef}$ medido ( $\mu\text{seg}$ )	$\tau_{base}$ simulación ( $\mu\text{seg}$ )	$\tau_{base}$ calculado ( $\mu\text{seg}$ )
271-08	s/ irradiar	7,0	14	
	$0,94 \times 10^8$	6,9	13,9	13,72
271-20	s/ irradiar	6,0	13,0	
	$9,94 \times 10^8$	5,9	11,2	10,9
271-04	s/ irradiar	5,9	13,0	
	$9,94 \times 10^{10}$	3,1	6,8	4,4

Tabla 2. Valores de los tiempo de vida medio de portadores minoritarios efectivo y de la base (simulado y calculado).

Las mediciones de respuesta espectral para altas dosis de irradiación ( $10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>) muestran la disminución de la misma para longitudes de onda mayores que 700 nm, hecho consistente con una fuerte disminución de la longitud de difusión en la base del dispositivo asociada al daño estructural producido en el volumen del material debido a la irradiación.

### CONCLUSIONES

Para una mejor caracterización eléctrica de las celdas tipo tandem de GaAs es necesario iluminarlas con un espectro apropiado dado que cada una de las celdas que forman este tipo de dispositivos aprovecha una región distinta del espectro. Por esta razón, los resultados obtenidos deben considerarse como preliminares. Si bien se observa una disminución en la  $V_{ca}$ , la misma no puede considerarse cuantitativamente confiable.

Las celdas de GaAs con vidrio protector (celdas 3 y 4) tienen una disminución mayor en la  $V_{ca}$ , esto puede deberse a que el vidrio y el pegamento disminuyan la energía de los protones ocasionando más daño en el material debido al aumento de la sección eficaz de colisión. De las experiencias y en acuerdo con la bibliografía se observa que las celdas tipo tandem de GaAs son más resistentes al daño producido por la radiación.

La variación de los parámetros eléctricos ( $I_{cc}$  y  $V_{ca}$ ) correspondientes a las celdas heterojuntura de Si es comparable con los resultados obtenidos en las celdas de silicio cristalino en estudios anteriores (Alurralde et al. 2001). Como conclusión preliminar se podría pensar que el mayor daño se produce en el volumen del dispositivo (silicio cristalino), dado que los emisores son delgados comparados con el espesor de la base.

En lo que respecta a las celdas de silicio cristalino, se verificó la relación de la vida media de los portadores minoritarios en la base con la fluencia de irradiación a partir de la medición de la vida media efectiva con la técnica OCVD para dosis intermedias. La disminución del  $\tau_{ef}$  fue corroborada, además, por la caída en la curva de respuesta espectral de la celda irradiada respecto de la misma celda sin irradiar para longitudes de onda largas, mayores a 700 nm.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a C. Bruno y a J. Fernández Vázquez por su colaboración en el diseño y armado del equipo para la medición de la curva I-V en los experimentos. A J. Schuff, A. Burlon, P. Stoliar y A. Kreiner quienes aportaron el equipamiento correspondiente y realizaron la irradiación mediante la línea de haz externo del TANDAR. A R. Rizzoli, C. Summonte y E. Centurioni por la provisión de las celdas heterojuntura utilizadas. También a J. Durán por sus aportes y discusiones sobre el presente trabajo.

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, con el subsidio BID 802/OC-AR, PICT '97 No. 10-00000-00673.

## REFERENCIAS

1. Página de Internet <http://www.spectrolab.com/DstaSheets/DJCell/DjCells.html>
- Alurralde M., Tamasi M.J.L., Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J., Fernández Vázquez J. (2001) Estudio de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de silicio cristalino utilizando el acelerador TANDAR, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **5**, 8.43.
- Bolzi C.G., Bruno C.J., Godfrin E.M., Martínez Bogado M.G., Plá J., Rodríguez S.E., Tamasi M.J.L., Alurralde M., Cabot P., Carella E., Fernández Vázquez J., Franciulli C.D., Goldbeck V., Mezzabolta E., Antonuccio F., Nigro S.L. y Durán J.C. (2001). Convenio de cooperación CONAE-CNEA: Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **5**, 4.07.
- Bruno C.J., Martínez Bogado M.G., Plá J.C. and Durán J.C. (1999). Determination of minority carrier lifetime in solar cells: a novel biased OCVD technique. *Physica Status Solidi (a)* **174**, 231.
- Bruno C.J. et. al, 2001 documento interno Convenio CNEA-CONAE
- Plá J., Centurioni E., Summonte C., Rizzoli R., Migliori A., Desalvo A., Zignani F., (2002). Homojunction and heterojunction silicon solar cells deposited by low temperature-high frequency PECVD. *Thin Solid Films* **405**, 249.
- Rizzoli R., Summonte C., Plá J., Centurioni E., Ruani G., Desalvo A., Zignani F., (2001). Ultrathin  $\mu\text{-Si}$  films deposited by PECVD. *Thin Solid Films* **383**, 7.
- Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Alurralde M.A., Plá J.C. (2002). Estudio teórico-experimental de daño por radiación con protones de 10 MeV en celdas solares de silicio cristalino. Enviado a *Energías Renovables y Medio Ambiente*.

## EVALUATION OF THE RADIATION DAMAGE ON SOLAR CELLS OF DIFFERENT MATERIALS USING 10MeV PROTONS

**ABSTRACT** – This article presents results obtained in radiation damage experiences on solar cells of different materials. The cells used were double junction GaAs/Ge, heterojunction on silicon (a-Si/c-Si and epi-Si/c-Si), and diffused c-Si homojunction. In the case of GaAs/Ge cells, devices with and without coverglass were irradiated with fluences up to  $10^{11}$  p/cm<sup>2</sup>. The actual dose is equivalent that should receive during SAOCOM mission. On the other hand, heterojunction silicon cells were irradiated with fluences up to  $10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>, and crystalline silicon cells were damaged with intermediate fluences to allow lifetime measurements on these devices.