

COMPARACIÓN DEL DAÑO POR RADIACIÓN PRODUCIDO POR PROTONES Y ELECTRONES EN CELDAS SOLARES PARA USO ESPACIAL*

M.J.L. Tamasi¹, M. Alurralde², I. Prario², A. Filevich¹, R. Mayer³, J.C. Durán¹, M.G. Martínez Bogado^{1*}, J. Plá¹, C.J. Bruno¹, J. Fernández Vázquez¹.

¹Departamento de Física - Centro Atómico Constituyentes – Comisión Nacional de Energía Atómica

²Departamento de Materiales - Centro Atómico Constituyentes – Comisión Nacional de Energía Atómica

²Departamento de Física Básica - Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica

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

Tel. (011) 6772-7132, Fax (011) 6772-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, tamasi@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN

Continuando con los estudios de daño por radiación en celdas solares para usos espaciales se presentan los resultados de la irradiación con electrones de 2,6 MeV realizada en un acelerador LINAC del Centro Atómico Bariloche de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Se estudió la degradación de los parámetros eléctricos y electrónicos de celdas solares de Si cristalino elaboradas en el Grupo Energía Solar de la CNEA y de doble juntura de GaInP₂/GaAs/Ge, bajo los efectos de la irradiación con electrones. Estos resultados se comparan con los obtenidos anteriormente en irradiaciones con protones, obteniéndose un coeficiente de daño equivalente entre protones de 10 MeV y electrones de 2,6 MeV.

celdas solares - daño por radiación - usos espaciales - fotovoltaico

INTRODUCCIÓN

Las celdas solares utilizadas en el espacio como fuente de alimentación eléctrica de satélites artificiales se encuentran sometidas al bombardeo de partículas cargadas de diversas energías. Estas partículas introducen defectos en los materiales que constituyen las celdas deteriorando, en consecuencia, sus propiedades eléctricas y electrónicas. A partir de ensayos de daño por radiación realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, es posible estudiar la variación con la dosis de irradiación 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 (τ_{ef}). 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 una misión satelital. Asimismo, es necesario garantizar y verificar los datos suministrados por el fabricante en lo que respecta a la resistencia al daño por radiación.

En los últimos años ha crecido el interés del estudio del daño por radiación de las celdas de multijuntura de GaAs sobre sustrato de Ge para aplicaciones espaciales, debido a la mayor resistencia y eficiencia de conversión con respecto a las celdas de Si (Bourgoin et. al, 2001). Este ensayo generalmente se realiza con electrones de 1 MeV con distintas fluencias (Summers et. al, 1994). La degradación de estas celdas por irradiación con protones es más seria que la degradación sufrida en los ensayos con electrones porque la densidad de colisiones es varios órdenes de magnitud mayor para protones que para electrones (Tada, 1982). Así, la información disponible sobre irradiación de celdas de multijuntura para usos espaciales es escasa y los mecanismos que ocurren en el material todavía no están estudiados a fondo como en el caso del silicio. Se realizaron, varias experiencias de irradiación con protones de distintas energías y con electrones, sobre celdas de distintos materiales, presentándose resultados experimentales y algunas simulaciones numéricas que muestran la degradación de los parámetros eléctricos y la respuesta espectral de alguna de las celdas como consecuencia de la introducción de defectos en el cristal.

El gran intervalo de energías que presentan los electrones y protones en el espacio, como asimismo los distintos ángulos de incidencia posibles sobre la celda solar, hacen necesario definir el concepto de daño equivalente producido por partículas de energía definida y apropiada para la realización de ensayos en laboratorio. Si bien aun no existe una norma internacional acerca de daño por radiación en celdas para uso espacial existe un documento de trabajo propuesto para dicha norma (ISO/Tc 20/SC14), en donde se acepta que electrones de 1 MeV y protones de 10 MeV resultan apropiados

* Trabajo financiado fundamentalmente por la CONAE y la CNEA. Cuenta también con aportes de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del subsidio BID 1201/OC-AR, PICT N° 10-06981.

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

para dichos ensayos

Dado que no existe una cámara de ensayos con la que se pueda reproducir el campo de radiación que reciben las celdas en el espacio, es necesario utilizar métodos para correlacionar el daño en el espacio con el producido en laboratorio. En los mismos se realizan irradiaciones con protones, electrones o iones de energía definida, sin reproducir el espectro de energías que reciben las celdas en el espacio. Actualmente existen dos modelos utilizados para el análisis del daño por radiación para las misiones espaciales, uno desarrollado en el Jet Propulsion Laboratory (NASA) (Tada, 1982) y otro en el Naval Reserch Laboratory (Anspaugh, 1991), y está en desarrollo un nuevo método (Alurralde, 2002) en la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). El objetivo de todos los métodos es obtener la fluencia de partículas necesaria con la que se debe irradiar la celda en Laboratorio, de forma tal de emular la degradación de las propiedades eléctricas al final de su vida útil en el espacio.

En presentaciones anteriores se mostraron distintas experiencias de irradiación con protones de distintas energías analizando la degradación de sus características eléctricas (Alurralde et. al, 2001 y 2002; Tamasi et. al, 2002). En el presente trabajo se analiza la degradación debida a la irradiación con electrones de 2,6MeV y la comparación de dosis equivalentes entre electrones y protones para celdas de Si y celdas doble juntura de GaInP₂/GaAs/Ge. Estas experiencias forman parte del convenio de cooperación entre Comisión Nacional de Actividades Espaciales y CNEA, Subproyecto Paneles Solares del Proyecto SAOCOM.

IRRADIACIÓN CON ELECTRONES

Al irradiar un material con electrones, se produce un proceso atómico llamado ionización. Las partículas incidentes colisionan con átomos de la estructura del cristal, liberando electrones exteriores y creando una corriente proporcional a ese número de partículas. La energía liberada no sólo se convierte en calor sino que puede desplazar átomos de la estructura cristalina, produciendo daños por desplazamiento. En el caso de los dispositivos fotovoltaicos, estos sitios vacantes son eléctricamente activos, causando reducción de la longitud de difusión y, en consecuencia, de la vida media de los portadores minoritarios en la región de la base de las celdas solares. Así, este daño se manifiesta en la disminución de los parámetros eléctricos.

La energía de los electrones que se utilizan en los estudios de daño por radiación en celdas para uso espacial abarcan de algunas décimas de MeV a 3 MeV y flujos hasta 10^{15} o 10^{16} e/cm². La experiencia presentada en este trabajo se realizó con electrones de 2,6 MeV debido a la disponibilidad de esa energía y no de 1 MeV. El experimento fue llevado a cabo en el Centro Atómico Bariloche de la CNEA, utilizando un acelerador lineal (LINAC) para irradiar con electrones de 2,6 MeV. El dispositivo experimental utilizado es similar al utilizado para protones (Alurralde et. al, 2001) y los detalles del experimento pueden verse en (Filevich et. al, 2003).

Resultados

Se irradiaron dos celdas de silicio (muestras 198_03 y 198_14) del mismo proceso elaboradas en el Grupo Energía Solar (GES)-CNEA y dos celdas de doble juntura de GaInP₂/GaAs/Ge de origen comercial, con y sin vidrio de protección, y con características similares a las del experimento con protones (Alurralde et. al, 2001).

Los cambios en las características eléctricas se comienzan a observar a partir de fluencias cercanas a 10^{11} p/cm², debido a que el daño que producen los electrones en las celdas de Si es casi 3000 veces menor que la de protones de 10MeV, como se muestran en la Figura 1.

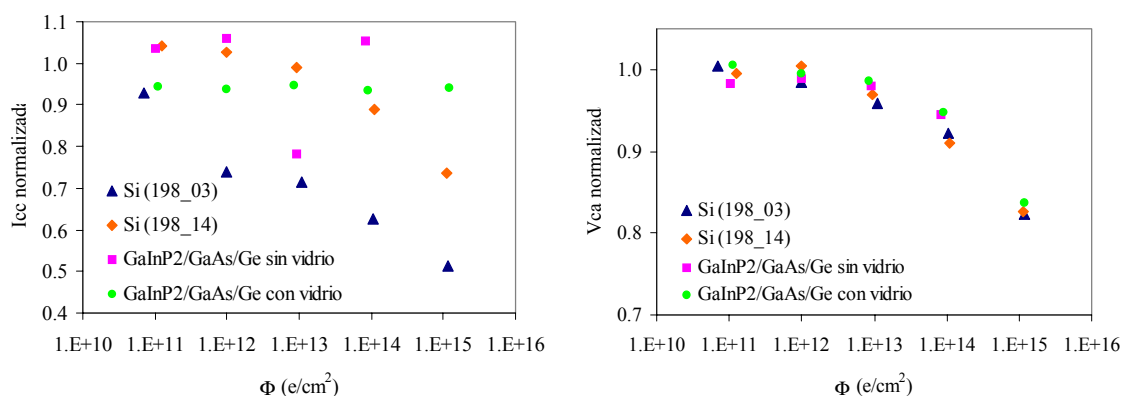


Figura 1. Variación de I_{cc} y de V_{ca} con la fluencia de electrones en celdas de Si y de doble juntura de GaInP₂/GaAs/Ge.

Tal como sucedió en la irradiación con protones de celdas de GaInP₂/GaAs/Ge, la variación de la I_{cc} es comparable al error experimental, mientras que la variación de la V_{ca} en este caso es la más importante.

Como paso previo a la irradiación, se midió el τ_{ef} y la respuesta espectral a los dispositivos de Si para poder compararlos

con los resultados posteriores a la irradiación. En el caso de las celdas de GaInP₂/GaAs/Ge, esta característica no fue medida debido a que por el momento no se cuenta con los filtros ópticos correspondientes para su medición.

La oscilación que se observa en la Figura 1 en la celda 198_03 se atribuye al error cometido al iluminar la celda durante la medición de la curva I-V debido a que en esa irradiación no se contó con el radiómetro por desperfectos técnicos. Esta diferencia no se observa en la V_{ca} ya que este parámetro es menos sensible a pequeños cambios de irradiancia.

DAÑO EQUIVALENTE EN CELDAS DE Si

Los efectos de la irradiación con electrones sobre Si tipo n se puede describir, en general, de manera similar a la de protones. Se suele definir una dosis absorbida debido a la irradiación con protones o electrones con energía E_i expuestos a una fluencia Φ(E_i) como:

$$\text{Dosis absorbida} = \Phi_e(E_i) S_e(E_i) \quad (1)$$

donde S(E_i) es el coeficiente de energía entregada a la red (Summers et. al, 1994). Dosis a distintas energías pueden relacionarse según muestra la ecuación 2:

$$\Phi_e(E_1) = C_{eq} \Phi_e(E_2) \quad (2)$$

donde C_{eq} es el coeficiente de daño equivalente. Este coeficiente en Si tipo n se obtiene directamente del cociente de los S(E_i) (ecuación 3)

$$C_{eq} = S_e(E_2) / S_e(E_1) \quad (3)$$

Sin embargo, el cálculo del daño equivalente entre protones de 10 MeV y electrones de 1 MeV para materiales tipo p, en particular para el Si, es más complejo y no puede obtenerse el coeficiente de manera tan simple mediante el cociente entre los respectivos S(E_i).

En celdas solares de Si con base p la teoría sobre un daño equivalente todavía se encuentra en estudio. Existen resultados empíricos que determinan en base a distintas experiencias el coeficiente de daño equivalente (C_{eq}) entre protones de 10 MeV y electrones de 1 MeV. Por ejemplo, Yamaguchi et. al, (1999) han determinado un C_{eq} del orden de 3000, mientras que Summers et al. (1995), Tada et. al. (1982), entre otros, utilizan un C_{eq} ≅ 3500. Este coeficiente también depende de la resistividad de la base y del espesor de la muestra, entre otros parámetros, ya que el daño ocasionado en el material varía con la profundidad (Alurralde, 2002).

Se decidió, en este caso, calcular el C_{eq} utilizando los datos disponibles de las experiencias realizadas. Así se halló el daño equivalente entre electrones de 2,6MeV y protones de 10MeV. El cálculo se realizó buscando el valor de la constante C_{eq} que minimiza el área entre las curvas de la degradación de I_{cc} para electrones y protones. El valor obtenido de C_{eq} es 2800. En la Figura 2 se puede ver la comparación en donde las escalas se encuentran desfasadas en este valor.

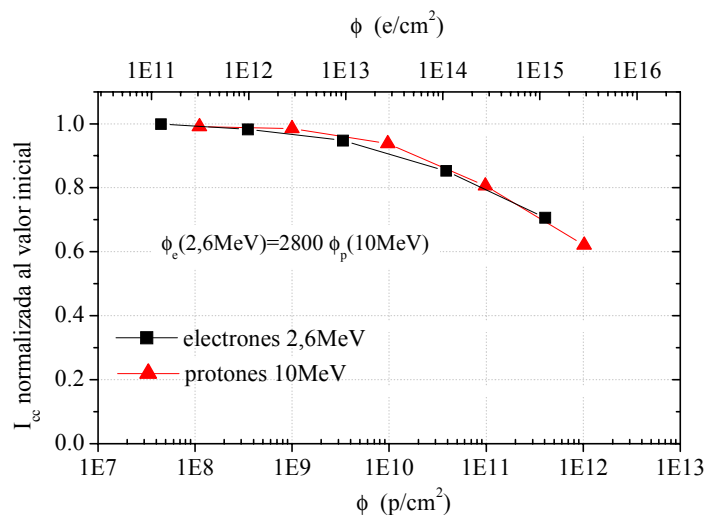


Figura 2. Comparación entre las distintas fluencias de protones y electrones con la degradación de la I_{cc}.

En la experiencia con electrones cabe destacar que no se contó con el tiempo suficiente para irradiar una cantidad apreciable de muestras para realizar comparaciones estadísticas.

Se realizó la medición de la respuesta espectral de las celdas de silicio antes y después de la irradiación con protones y con electrones. En la Figura 3 se puede ver la similitud en las respuestas espectrales de la celda irradiada con electrones de

2,6 MeV con fluencia final de 10^{15} e/cm² y otra irradiada con protones de 10MeV con fluencia final de 10^{12} p/cm².

En base a las características eléctricas obtenidas experimentalmente, tales como la curva IV y el tiempo de vida media efectivo de los portadores minoritarios (τ_{ef}), se realizó la simulación de la celda mediante un programa de simulación de dispositivos (Clugstone et. al, 1997). En la Figura 3 se muestran, con líneas llenas, las curvas con un τ inicial de 8 μ s y de 0,04 μ s para representar las respuestas espectrales de las celdas antes y después de las irradiaciones. En este caso hay que tener en cuenta que se enfocó la simulación tratando de ajustar sólo los parámetros eléctricos y no la respuesta espectral; sin embargo, las curvas experimentales no difieren significativamente de las simuladas.

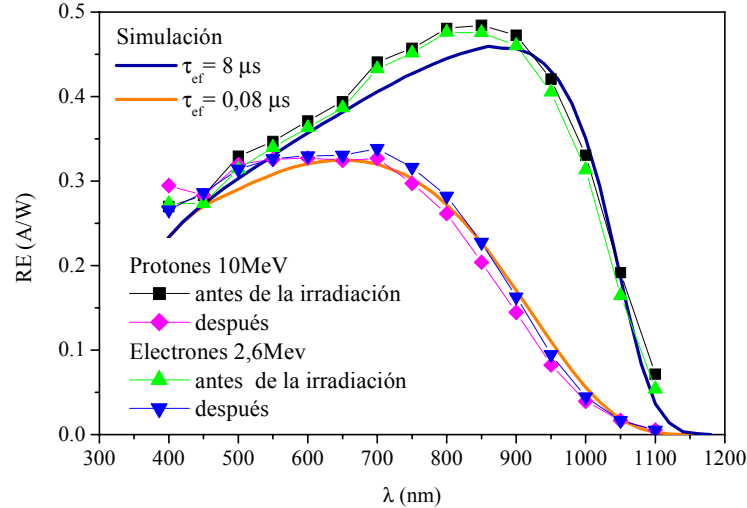


Figura 3. Comparación de la respuesta espectral de dos celdas antes y después de las irradiaciones con protones y electrones para dosis equivalentes.

En ambos casos se observa una disminución en la respuesta espectral para las longitudes de onda más altas en la celda irradiada, hecho consistente con una fuerte disminución de la vida media de los portadores minoritarios en la base producida por la irradiación. El τ_{base} final calculado para esta celda fue 0,082 μ seg que equivale a una longitud de difusión $L_d = 16$ μ m; así, para longitudes de onda mayores a 550 nm la profundidad de penetración de la luz es mayor que la L_d calculada y por lo tanto estas longitudes de onda contribuyen en menor medida a la I_{cc} .

DAÑO EQUIVALENTE EN CELDAS DOBLE JUNTURA DE GaInP₂/GaAs/Ge

Se realizó la comparación entre celdas con iguales características, una perteneciente a la irradiación con protones presentado en Alurralde et. al (2001) y otra al experimento con electrones anteriormente mencionado. Es necesario tener en cuenta que la relación entre el daño provocado por protones de 10 MeV y electrones de 1 MeV puede variar, para estas celdas, según la estructura y materiales. Este factor es distinto en celdas monojuntura y doble o triple juntura. En la Tabla 1 se muestra una comparación entre los coeficientes de equivalencia para los distintos parámetros, entre electrones de 1 MeV y protones de 10 MeV y de una celda monojuntura de GaAs y otra de doble juntura sobre sustrato de Ge obtenidos de Brown et. al (1997).

	I_{cc}	V_{ca}	P_{mp}
Doble juntura	900	700	800
GaAs/Ge	400	1400	1000

Tabla 1. Relación de equivalencia entre electrones de 1MeV y protones de 10MeV (Brown et. al 1997).

La Tabla 2 muestra los coeficientes de equivalencia proporcionados por el fabricante, para distintos porcentajes de degradación en las celdas doble juntura de GaInP₂/GaAs/Ge.

P_{mp}	D(5%)	D(10%)	D(15%)	D(20%)	Promedio
I_{cc}	D(0,1%)	D(0,5%)	D(2%)	D(3%)	
V_{ca}	D(5%)	D(9%)	D(11%)	D(14%)	

Tabla 2. Relación de equivalencia entre electrones de 1MeV y protones de 10MeV para distinto porcentaje de degradación (D) en las características eléctricas (Hoja técnica celdas de doble juntura de GaAs).

Se halló la constante de equivalencia de la misma manera que se hizo para las celdas de Si, minimizando el área entre las curvas experimentales y obteniendo el desfase entre las curvas. El cálculo sólo se realizó para la V_{ca} debido a que no se apreciaron variaciones de la I_{cc} mayores al error experimental. En la Figura 4 se muestra la comparación de las dos irradiaciones. El valor de la constante obtenida mediante este método para las celdas de GaInP₂/GaAs/Ge es 800.

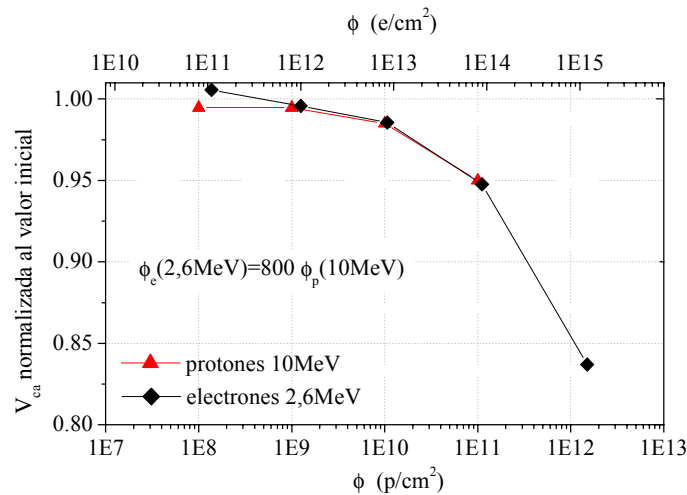


Figura 4. Comparación de la degradación de V_{ca} entre irradiaciones con protones de 10MeV y electrones de 2,6MeV.

CONCLUSIONES

Observando las curvas experimentales y simuladas de respuesta espectral de las celdas de Si se deduce que el efecto de la radiación afecta directamente al τ_{base} . La disminución de este parámetro, o equivalentemente de L_d , se observa para longitudes de onda largas, mayores a 700 nm. Esto era de esperarse ya que a medida que disminuye la longitud de difusión los portadores de carga pueden recorrer menores distancias antes de recombinarse contribuyendo en menor medida a la corriente y disminuyendo así la respuesta espectral para esas longitudes de onda.

En cuanto a la irradiación con electrones (2,6 MeV) puede observarse que para causar el mismo daño sobre las celdas de Si debe irradiarse con una fluencia tres órdenes de magnitud mayor que con protones de 10 MeV. Esto se confirma en la degradación de la respuesta espectral observándose el mismo comportamiento en ambas experiencias (Figura 3).

En cuanto a los valores obtenidos de C_{eq} , no es posible realizar una comparación estricta con los valores reportados en la bibliografía ya que el mismo depende de numerosos parámetros, en particular la resistividad de la base, el espesor de la celda y la profundidad de juntura. Existen por estos motivos discrepancias entre los distintos autores. Sin embargo, es necesario establecer el valor de C_{eq} que corresponde a las celdas con las cuales se podrá predecir luego su comportamiento en el espacio con la estructura y energías que se dispone. A futuro, se espera realizar experiencias con distintas energías y la evaluación del daño correspondiente, en particular con electrones de 1 MeV.

Debido a que no se contaba, hasta la finalización de este trabajo, con los vidrios de protección apropiados, la irradiación de celdas de Si con cubierta de vidrio protector no se pudo realizar hasta el momento. Queda por analizar el comportamiento de las celdas de Si con vidrio y pegamento así como estudiar la resistencia de estos materiales en ambiente espacial en su conjunto.

La variación de la corriente en las celdas doble juntura con la dosis de radiación es poco apreciable como puede verse en la Figura 1 y en buen acuerdo con los datos proporcionados por el fabricante en la Tabla 2. En cuanto a la V_{ca} el cambio con la fluencia es más evidente.

Las celdas doble juntura con vidrio protector 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 multijuntura son más resistentes al daño producido por la radiación que las celdas de Si.

Para una mejor caracterización eléctrica de las celdas multijuntura es necesario iluminarlas con un espectro apropiado dado que cada una de las juntas que forman este tipo de dispositivos aprovecha una región distinta del espectro. Estas celdas fueron diseñadas para un espectro solar AM0 y hasta el momento no se contaba con este tipo de simulador solar en el GES. Por esta razón, los resultados obtenidos deben considerarse como preliminares. Si bien se observa una disminución en la V_{ca} , la misma debe considerarse en forma cualitativa.

Cabe mencionar que la importancia de estos estudios radica en el hecho que proporcionan un mecanismo de control y verificación de los datos suministrados por el proveedor de las celdas para paneles solares así como la calificación de las elaboradas en el país.

Quedan por hacer experimentos con distintas energías de protones y electrones para establecer con mayor precisión el coeficiente de daño equivalente entre estas partículas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a quienes aportaron el equipamiento correspondiente y realizaron la irradiación con electrones en el Centro Atómico Bariloche.

REFERENCIAS

- Alurralde M. (2002). A new method to characterize the electrical degradation of monocrystalline silicon solar cells by space protons, enviado para su publicación a Journal of Applied Physics.
- 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**, pág. 8.43.
- Alurralde M., Tamasi, M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Plá J.(2002). Evaluación del daño por radiación de celdas solares de distintos materiales con protones de 10MeV. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **6**, pág. 04.25.
- Anspaugh B. (1991). Proton and electron damage coefficients for GaAs/Ge solar cells. Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaics Specialist Conference, pág. 1593.
- Clugstone D. y Basore P. (1997). PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. Proceeding of the 26th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Anaheim, EE.UU., pág. 207.
- Brown M., Goldhammer L., Goodelle G.S., Lortz C. U., Perron J., Powe J., Schwartz J., Cavicchi B.T., Gillander M., Krut D. (1997). Characterization testing of dual junction GaInP₂/GaAs/Ge solar cell assemblies. Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, EEUU, pág. 805.
- Bourgoin J.C., de Angelis N. (2001). Solar cells degradation by electron irradiation Comparison between Si, GaAs and GaInP cells. Solar Energy Mat. & Solar Cells **66**, pág. 495.
- Hoja técnica celdas de doble juntura de GaAs; <http://www.spectrolab.com/DstaSheets/DJCell/DjCells.html>.
- Filevich A., Bruno C.J., Fernández Vázquez J., Alurralde M., Prario I., Tamasi M.J.L., Martínez Bogado M.G., Plá J.C., Durán J.C., Schuff J., Burlon A., Stoliar P., Minsky D., Kreiner A., Mayer R.(2003). A Compact Portable Setup for in situ Solar Cells Degradation Studies. Aceptado para su presentación en la IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, que se realizará en Monterey, California (USA) Julio, 2003.
- ISO/Tc 20/SC 14 N 213 Space systems- Space solar cells- Electron and proton irradiation test methods. Documento de trabajo de International Organization for Standardization (ISO), 13-11-2002.
- Tamasi M.J.L., Martínez Bogado, M.G., Alurralde, M., Plá, J.C. (2002). Estudio teórico-experimental de daño por radiación con protones de 10MeV en celdas solares de silicio cristalino. Energías Renovables y Medio Ambiente **11**, pág.19-24.
- Summers G.P., Burke E.A., Xapsos M.A.. (1995). Displacement damage analogs to ionizing radiation effects. Radiation Measurements **24**, (1) pág. 1.
- Summers G.P., Walters R.J., Xapsos M.A., Burke E.A., Messenger S.R., Shapiro P., Statler R.L. (1994). A new approach to damage prediction for solar Cells exposed to different radiations. Proceedings of the 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Viena, Austria, pág. 2068.
- Tada H.Y., Carter J.R., Anspaugh B.E., y Downing R.G. (1982). Solar Cell Radiation Handbook. JPL publication 82, pág. 69.
- Yamaguchi M., Khan A., Taylor S., Imaizumi M., Hisamatsu T. y Matsuda S.. (1999). A detailed model to improve radiation-resistance of Si space solar cells. IEEE Transactions on Electron Devices **46**, pag. 2133.

COMPARISON OF ELECTRON AND PROTON RADIATION DAMAGE IN SOLAR CELLS FOR SPACE USES

ABSTRACT As a continuation of previous studies of radiation damage on solar cells for space applications, we present results regarding to an irradiation using 2.6 MeV electrons performed with the LINAC accelerator at the Bariloche Atomic Center from CNEA. The degradation of electric and electronic parameters under electron irradiation in crystalline silicon solar cells, elaborated in the Solar Energy Group from CNEA, and in double-junction GaInP₂/GaAs/Ge solar cells were studied. These results are compared with the previous obtained under proton irradiation, and an equivalent damage coefficient relating 10 MeV protons to 2.6 MeV electrons was determined.