

ESTUDIOS DE DAÑO POR RADIACIÓN CON PROTONES DE 10 MeV EN CELDAS SOLARES DE SILICIO CRISTALINO UTILIZANDO EL ACELERADOR TANDAR*

M. Alurralde¹, M.J.L. Tamasi², C.J. Bruno², M.G. Martínez Bogado², J.C. Plá², J. Fernández Vázquez²

¹Departamento de Materiales - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

²Departamento de Física - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

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

Tel. (54-11) 6772-7132, Fax (54-11) 6772-7121, www.tandar.cnea.gov.ar, alurrald@cnea.gov.ar

RESUMEN

Se desarrolló un montaje experimental que permitió medir *in situ* la degradación de celdas solares de silicio monocristalino elaboradas en el Grupo Energía Solar, irradiadas con protones de 10 MeV y fluencias entre 10^8 y 10^{13} p/cm², utilizando un haz externo del acelerador TANDAR de la CNEA. Dicho montaje permitió observar la degradación de las características eléctricas de las celdas, determinándose la corriente de cortocircuito, la tensión a circuito abierto y el factor de forma entre irradiaciones mediante la medición de la curva característica corriente-tensión. Asimismo, se realizaron simulaciones teóricas con el fin de verificar la relación entre la variación de los parámetros eléctricos y el deterioro de la vida media de los portadores minoritarios en la base, la cual se ve afectada directamente en este tipo de ensayo.

daño por radiación - paneles solares para usos espaciales - fotovoltaico - satélite - protones

INTRODUCCIÓN

Las celdas solares utilizadas en el espacio como fuente de alimentación eléctrica de satélites artificiales están sometidas al bombardeo de partículas cargadas de diversas energías. Este bombardeo introduce defectos en los materiales que constituyen las celdas, deteriorando, en consecuencia, sus propiedades electrónicas. Los ensayos de daño por radiación realizados en Tierra, bajo condiciones controladas y normalizadas, permiten estudiar la resistencia de los dispositivos fotovoltaicos al ambiente espacial y predecir el comportamiento de los mismos al final de su vida útil, pudiéndose realizar entonces un diseño apropiado de los paneles solares de un satélite. Las principales fuentes de radiación que afectan la vida útil de los paneles solares de los satélites que orbitan alrededor de la Tierra son los protones y electrones atrapados por el campo magnético terrestre, dependiendo el flujo de partículas de la órbita en cuestión. Otras fuentes de daño, no relevantes en el espacio pero sí de posible utilidad para la caracterización de dispositivos, son los neutrones y los rayos γ (Summers, 1994).

Las partículas cargadas que provienen del ambiente espacial poseen una energía cinética que, al atravesar un medio material como la celda solar, se reduce como consecuencia de las interacciones Coulombianas con los electrones y con los núcleos de los átomos de la red. Asimismo, dicha energía cinética inicial determina la profundidad de penetración de las partículas dentro del dispositivo. El daño permanente es causado por las colisiones de las partículas incidentes con los átomos de la red, denominados PKA (*Primary Knock-on Atom*), que son desplazados de su posición en la misma. Los PKA a su vez, dependiendo de la energía recibida, pueden desplazar otros átomos del material, dando origen a una cascada de desplazamientos. Ésta evoluciona hasta disipar toda la energía entregada por la colisión inicial, dejando detrás complejos de intersticios y vacancias que evolucionan y/o se aniquilan hasta formar una estructura estable de defectos. El conjunto de los defectos generados provoca la degradación de las propiedades de conducción y de vida media de los portadores minoritarios de las celdas (ver por ejemplo Gibbons, 1972).

Howe et al., 1981, observaron mediante microscopía electrónica de transmisión que el silicio bajo irradiación con iones pesados amorfiza. Muy diferente es el caso de irradiaciones con electrones, aún para irradiaciones a 1 MeV la energía transferida es tan baja que producirá solamente algunos pares de Frenkel. Luego la estructura de daño va a ser consecuencia de la migración de los defectos producidos, formando distintos tipos de lazos de dislocaciones. Para el silicio, su estructura es fuertemente dependiente del dopaje.

Para fluencias de partículas en los intervalos de interés, la variación de la inversa de la vida media de portadores minoritarios en celdas solares (τ^{-1}) es proporcional a la fluencia (ver, por ejemplo, De Angelis et al., 2001):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + k_r \Phi \quad (1)$$

* 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.

donde τ_0 es el tiempo de vida medio de los portadores minoritarios antes de la irradiación, Φ es la fluencia y k_r una constante de proporcionalidad. Esta disminución se manifiesta en la variación de los parámetros de la celda: potencia generada, tensión a circuito abierto (V_{ca}) y corriente de cortocircuito (I_{cc}) con la dosis de irradiación. Comúnmente se utilizan I_{cc} y V_{ca} para caracterizar el daño por radiación en celdas fotovoltaicas.

El gran intervalo de energías que presentan los electrones y protones en el espacio, como asimismo las distintas incidencias 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 aún no existe una norma internacional para la prueba de celdas para uso espacial, se acepta que electrones de 1 MeV y protones de 10 MeV resultan apropiados para dichos ensayos (Kiyota, 2000).

EXPERIMENTO

En la CNEA se disponen de dos aceleradores en donde se pueden realizar las experiencias de irradiación con protones: el Laboratorio TANDAR del Dpto. de Física del Centro Atómico Constituyentes y el Ciclotrón del Centro Atómico Ezeiza. Luego de algunas experiencias preliminares realizadas en el Ciclotrón (Barrera, 2000), se desarrolló un primer experimento mediante el acelerador electrostático tipo tandem de 20 MV máximo en la terminal, TANDAR, el cual se describe en el presente trabajo. Este acelerador permite extraer el haz de protones al aire, estimándose la corriente a partir de experiencias anteriores en el orden de los 1-5 nA.

Los objetivos de la primer irradiación de celdas solares realizada con el acelerador Tandar de la CNEA fueron:

- Observar el comportamiento de las celdas bajo irradiación.
- Estudiar posibles mejoras al equipamiento diseñado, localizar posibles fuentes de problemas, tanto de parte del acelerador como de los equipos de medición. Evaluar posibles problemas debido a la radioactividad inducida por la irradiación en las muestras, soportes, etc..
- Adquirir experiencia en la medición de celdas durante la irradiación.

Se utilizaron celdas rectangulares de 20 mm por 40 mm de lado, elaboradas a partir de obleas de Si monocristalino de origen comercial tipo Czochralski, dopadas con B y con una resistividad de aproximadamente $1 \Omega\text{cm}$. Poseían una estructura n^+pp^+ , con una resistencia de capa (R_c) en la cara frontal de $85 \Omega/\text{cuad.}$ y contactos metálicos frontal (tipo grilla) y posterior formados por una multicapa de Ti-Pd-Ag. La vida media de los portadores minoritarios inicial de estas celdas se encontraba alrededor de $11 \mu\text{seg}$ y fue medida por la técnica OCVD (Bruno et al, 1999). El detalle de los procesos de elaboración de las celdas y paneles puede verse en la Ref. Bolzi et al. (1997). Las celdas fueron irradiadas con protones de 10MeV de energía, en la Figura 1 se muestra esquemáticamente el montaje del equipo construido enfrente de la línea del haz externo.

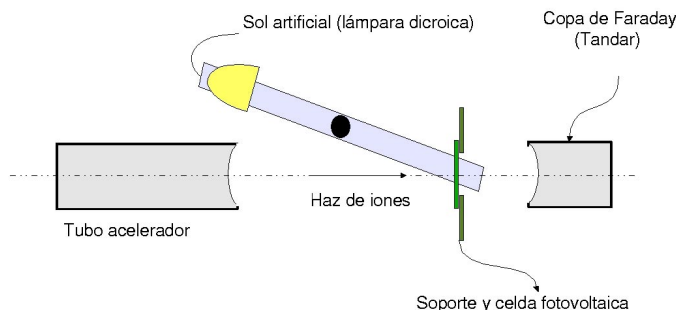


Figura 1. Esquema utilizado en la irradiación en la línea externa del acelerador Tandar del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA. La electrónica de adquisición estaba en un cuarto aparte para evitar la irradiación del experimentador.

Se midió la curva corriente-tensión (I-V) de las celdas previamente a la irradiación, luego se repitió la medición de a décadas entre las siguientes fluencias: 10^8 y 10^{13} protones/ cm^2 . Las muestras se cambiaban si se alcanzaba la dosis o si la duración de la siguiente irradiación era mayor que el tiempo disponible para la utilización del haz. En todos los casos el flujo se mantuvo por debajo de $1.2 \cdot 10^9 \text{ p cm}^{-2} \text{ seg}^{-1}$.

Las muestras fueron irradiadas hasta alcanzar cada una de las dosis preestablecidas momento en el cual se cortaba el haz y se procedía a medir la curva I-V. La corriente del haz sobre la muestra se variaba de manera de tratar de tener tiempos razonables entre dosis, estos lapsos iban de alrededor de ocho segundos hasta más de tres horas.

Se irradiaron tres muestras (271_06, 271_07 y 271_15). Antes de cambiar la muestra se verificaba el nivel de radiación sobre la muestra y el soporte. La radiactividad decaía completamente en aproximadamente 12 horas.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la medición de la curva I-V se utiliza como fuente de iluminación una lámpara de tungsteno con reflector dicroico (simulador solar) midiendo la misma a través de una carga electrónica. Una vez obtenida la curva se desconectaba la luz

inmediatamente para evitar que la temperatura de la muestra se eleve ya que no se contaba con una base con control de temperatura, realizándose estas mediciones a temperatura ambiente. A partir de la segunda muestra, se repitió la medición de la curva tres veces encendiendo y apagando la lámpara en cada medición. (Figura 2).

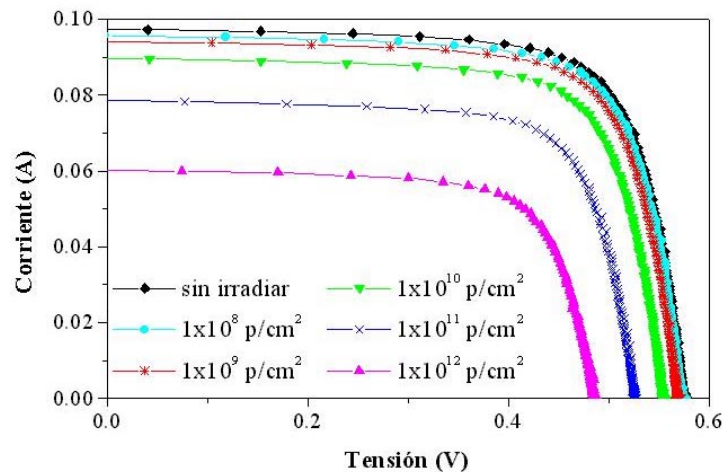


Figura 2. Degradación de la curva IV característica de la muestra 271-07 irradiada con distintas fluencias.

Las curvas I-V fueron ajustadas utilizando el programa desarrollado en el Grupo Energía Solar (GES) (Nuñez et al. 1993). Del ajuste se obtiene el valor de la tensión a circuito abierto (V_{ca}), la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la potencia máxima (P_{max}) y el factor de forma (FF), entre otras características eléctricas. Estos parámetros, que caracterizan el comportamiento de las celdas, normalizados al valor inicial de la celda sin irradiar, se graficaron en función de la fluencia para las tres celdas analizadas (ver Figura 3). Como era de esperar, el efecto más importante se observa sobre la I_{cc} debido a la disminución del tiempo de vida medio de portadores minoritarios (τ) provocada por la introducción de defectos generados por la irradiación. Dicha caída también se refleja en la potencia máxima generada por la celda. El efecto es menor en la V_{ca} y en el FF.

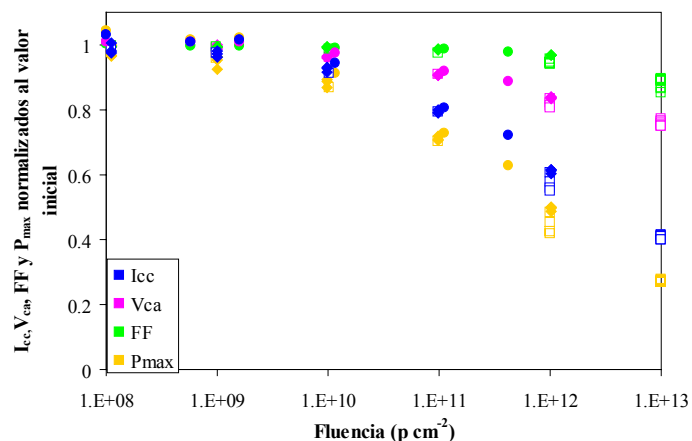


Figura 3: Parámetros característicos normalizados al valor inicial en función de la fluencia para las tres celdas analizadas, 271-06 (●), 271-07 (□) y 271-15 (◆)

SIMULACIONES TEÓRICAS

Con el propósito de estudiar la degradación de las características eléctricas de los dispositivos con la variación de $1/\tau$, parámetro asociado directamente con la fluencia (Φ), se realizaron simulaciones sobre celdas n^+pp^+ iluminadas por la zona n^+ con el programa de simulación de dispositivos PC-1D5 (Clugstone y Basore (1997)). Las características de las celdas fotovoltaicas simuladas son las siguientes:

- Área de la celda: $A = 8 \text{ cm}^2$
- Base tipo p, resistividad: $\rho = 1 \text{ } \Omega \text{ cm}$ - dopaje: $N_A = 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
- Emisor frontal n^+ : perfil de concentración gaussiano, dopaje: $1.03 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, profundidad de junta: $0.8 \text{ } \mu\text{m}$, R_c : $85 \text{ } \Omega/\text{cuad}$.
- Emisor posterior p^+ : perfil de concentración función error complementaria, dopaje: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, profundidad de junta: $2 \text{ } \mu\text{m}$, R_c : $289 \text{ } \Omega/\text{cuad}$.
- τ inicial: $11 \mu\text{s}$

Con estos valores se reproducían los valores iniciales de las celdas antes de la irradiación.

En la Figura 4 se presenta la variación de los parámetros eléctricos normalizados al valor inicial con $1/\tau$ (simulando la situación antes de la irradiación).

En la figura 5 se muestran simulaciones realizadas para espectros AM1.5, AM0 y luz monocromática con dos longitudes de onda distintas. Se analizaron también distintas intensidades pero la variación normalizada es independiente de la intensidad de la luz incidente.

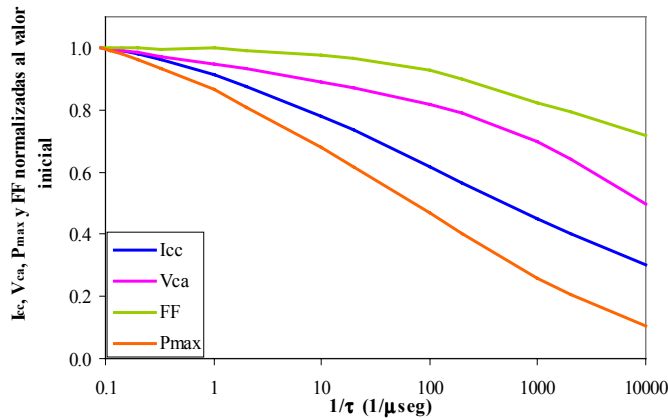


Figura 4: Parámetros eléctricos normalizados al valor inicial en función de la inversa de la vida media de los portadores minoritarios.

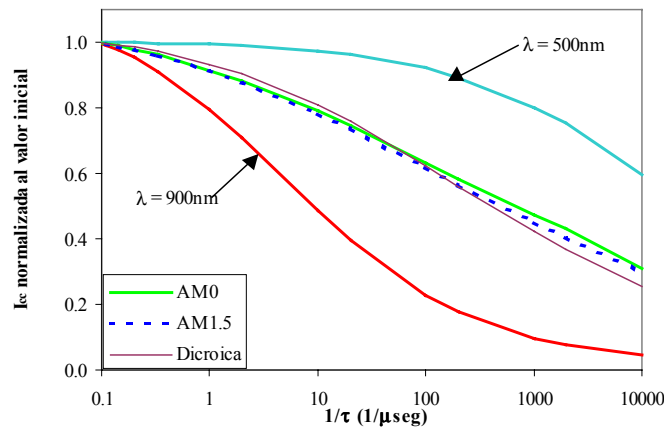


Figura 5: Dependencia del cambio de I_{cc} con de la inversa de la vida media de los portadores minoritarios para las distintas iluminaciones.

Se puede observar que para la longitud de onda más corta analizada (500nm), la I_{cc} disminuye al 60% del valor inicial para el rango analizado, en cambio para 900nm la variación es mucho mayor llegando a superar la degradación de la misma en un 90%.

En la Figura 6 se muestra la variación de la I_{cc} con V_{ca} experimental y la simulada con el programa PC-1D.

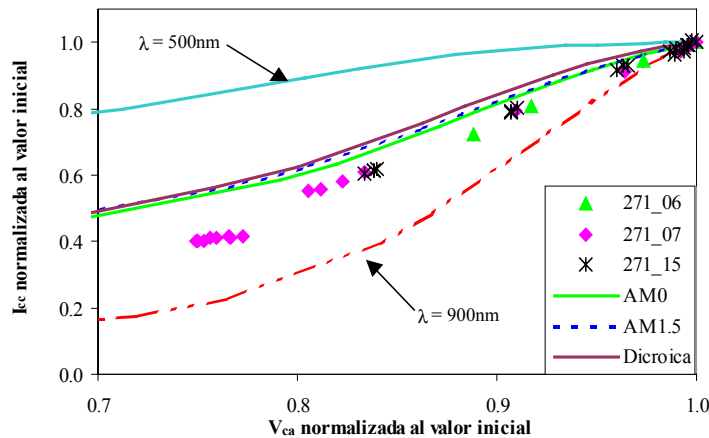


Figura 6: Variación de I_{cc} en función de V_{ca} para las muestras irradiadas y simulaciones con distintos espectros. Tomando todos los valores de I_{cc} normalizadas al valor inicial de las tres muestras e interpolando con los valores de la

simulación se grafica (Figura 7) el τ en función de la fluencia de radiación Φ , luego se realiza un ajuste utilizando la ecuación (1), y utilizando como valor de τ_0 11 μseg , obteniéndose un coeficiente de daño: $k_\tau = 8.8 \times 10^{-11} \mu\text{seg cm}^{-2} \text{p}^{-1}$

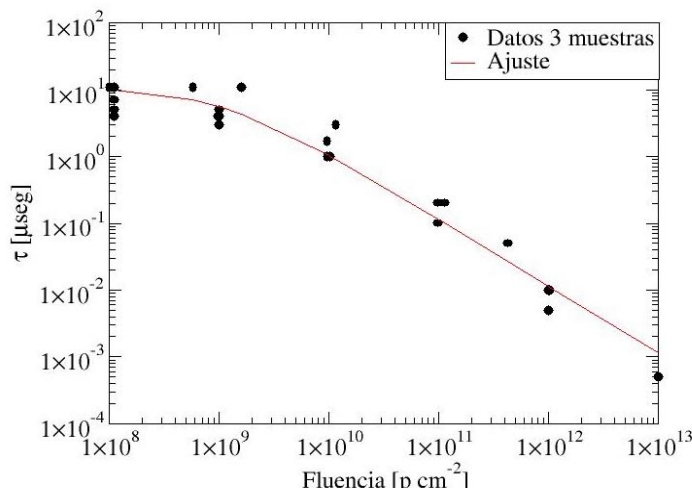


Figura 7: Correlación entre la vida media de los portadores minoritarios y la fluencia obtenida de los datos de las tres muestras y ajuste teórico.

Para verificar el sentido físico del ajuste se grafican los valores experimentales y los resultados de las simulaciones en la Figura 8, donde en las abscisas de la escala inferior se grafica la fluencia y en la escala superior $1/\tau$, utilizando como límites para la escala de τ^{-1} los valores [0,01; 877,79] tomados del ajuste. Las diferencias encontradas pueden atribuirse a la diferencia entre los espectros de la lámpara que se usa para la medición de la curva IV de los dispositivos y los utilizados en la simulación, así como a efectos de la temperatura en la V_{ca} .

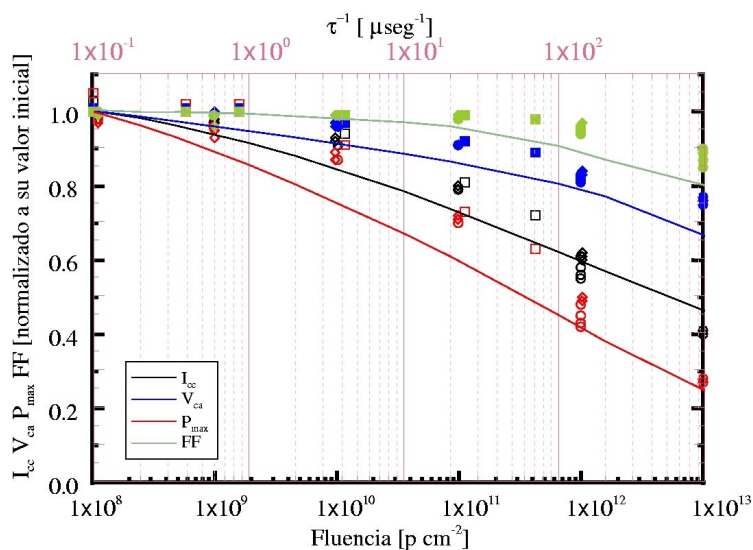


Figura 8: Valores experimentales y teóricos de I_{cc} (negro), V_{ca} (azul), P_{max} (rojo) y FF (verde) normalizados al valor inicial versus fluencia para las tres celdas analizadas, 271-06 (●), 271-07 (□) y 271-15 (◆).

CONCLUSIONES

En esta experiencia se pudo observar la degradación de las características eléctricas de las celdas durante la irradiación con protones de 10MeV utilizando un equipo preparado especialmente para medir la curva I-V *in situ*. Los resultados obtenidos son altamente repetitivos y el comportamiento de los valores experimentales de las muestras es similar al encontrado en la literatura acerca del tema y a los valores simulados.

La dependencia de τ con la dosis cumple la relación (1) determinándose que el coeficiente de daño k se encuentra en buen acuerdo con los valores de bibliografía (Yamaguchi, 2001). El apartamiento que se observa en las figuras 6 y 8 en la variación de las características eléctricas de las celdas irradiadas respecto de la simulación teórica, pueden explicarse en la diferencia de espectros entre la lámpara utilizada en el simulador solar y el espectro AM1.5 del programa. Este corrimiento se encuentra en la región de las longitudes de onda largas, siendo el esperado ya que la lámpara de tungsteno tiene una componente importante en esa región. Esto es consistente con el hecho que para longitudes de onda más largas los portadores recorren mayores distancias sin ser absorbidos y, en consecuencia, el efecto de la disminución del tiempo de vida medio es

más importante para estas longitudes de onda.

El estudio del daño por radiación en celdas solares para usos espaciales, en un futuro próximo abarcaría ensayos de daño producido por electrones, celdas de otros materiales (por ejemplo de GaAs) y celdas cubiertas con un vidrio protector.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen 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.

REFERENCIAS

- Barrera M. (2000). Estudio de daño por radiación en celdas solares de silicio para uso espacial. Tesis de licenciatura en Ciencias Físicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U.B.A.
- Bolzi C.G., Merino L.M., Tamasi M.J.L., Plá J.C., Durán J.C., Bruno C.J., Godfrin E.M., Lamagna A., Barrera M.P. y Quintero L.B. (1997). Elaboración y caracterización de celdas y paneles solares de silicio cristalino para su ensayo en el satélite SAC-A. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente **1**, Nro. 2, 1.
- 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.
- Clugstone D. y Basore P. (1997). PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. 26th Photovoltaic Specialist Conference, Anaheim, California, 207.
- De Angelis N. et. al, (2001). Solar cells degradation by electron irradiation Comparison between Si, GaAs and GaInP cells. Solar Energy Mat & Solar Cells **66**, 495.
- Gibbons K. (1972). Ion Implantation in Semiconductors-Part II: Damage Production and Annealing. Proc. of IEEE, **60** 1062.
- Howe L.M. y Rainville M.H. (1981). Features of collisions cascades in silicon as determined by transmission electron microscopy. Nucl. Instr. And Meth **182/183**, 143.
- Kiyota, Y. (2000). ISO new work item proposal for space solar cells electron and proton irradiation test methods. Presentado en el 7th International Workshop on Space Solar Cell Calibration and Measurement Techniques, Alyeska, Alaska, USA.
- Núñez T., Durán J.C., Godfrin E.M., (1992). Ajuste de curvas I-V en celdas solares con y sin iluminación. Anales de la Asociación Física Argentina **4**, 325.
- Summers G.P., Walters R.J., Xapos M.A., Burke E.A., Messenger S.R., Shapiro P. y Statler R.L. (1994). A new approach to damage prediction for solar Cells exposed to different radiations. Proc. of the 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Viena, Austria, 2068.
- Yamaguchi M. (2001). Radiation-resistant solar cells for space use. Solar Energy Mat. & Solar Cells **68**, 31.

ABSTRACT

An experimental facility was developed to measure *in situ* the degradation of crystalline silicon solar cells fabricated by the Solar Energy Group. The cells were irradiated with 10MeV protons and fluences between 10^8 y 10^{13} p/cm², using an external beam of the linear tandem accelerator TANDAR, at CNEA. This facility allowed to observe the degradation of the electrical characteristics of the cells, by determining the short circuit current, the open circuit voltage and the fill factor after each irradiation, by measuring the current-voltage characteristic curve. Furthermore, theoretical simulations were performed to establish the relation between the variation of the electrical parameters and the degradation of the lifetime of minority carriers in the base, which is directly affected by the irradiation.