

DESARROLLO DE UN EQUIPO DE MEDICIÓN DE RESPUESTA ESPECTRAL EN CELDAS SOLARES MULTIJUNTURA: ÚLTIMA ETAPA

J. García^{1,2}, H. Socolovsky¹ y J. Plá^{1,3}

¹ Grupo Energía Solar - Centro Atómico Constituyentes,
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)
Av. General Paz 1499, 1650 San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

² Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

e-mail: jgarcia@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN: Con anterioridad se presentaron diferentes etapas del desarrollo de un dispositivo para la medición de Respuesta Espectral (RE) de celdas solares multijuntura y otros dispositivos fotovoltaicos. En la actualidad este equipo se encuentra totalmente funcional presentándose, como última etapa necesaria para la medición de RE de celdas triple juntura, la calibración de un patrón de RE que abarque las longitudes de ondas entre 300 nm y 1900 nm. Dicho patrón, o celda de referencia, se obtuvo a partir de una celda de triple juntura ATJ (*Advanced Triple Junction*) InGaP/GaAs/Ge calibrada provista por Emcore Corp., calibración que fue transferida a otras dos celdas ATJ especialmente acondicionadas para su uso como celdas de referencia en las mediciones. En este trabajo se muestra el proceso llevado a cabo para dicha transferencia, así como la estimación del error asociado. Por último, se muestra la aplicación del nuevo patrón en la medición de RE sobre una celda ATJ antes y después de un ensayo de daño por radiación con protones de 10 MeV.

Palabras clave: celdas solares, semiconductores III-V, respuesta espectral, caracterización

INTRODUCCIÓN

Parte de las actividades programadas en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales argentinas en el Grupo Energía Solar (GES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) (Alurralde et al., 2004a; Alurralde et al., 2004b; Alurralde et al., 2005; Alurralde et al., 2007; Bolzi et al., 2001; Bolzi et al., 2003) está referida al estudio de celdas solares multijuntura y, en particular, a su caracterización eléctrica y electrónica (Barrera et al., 2008). Parte de esta caracterización incluye la medición de respuesta espectral (RE) de dispositivos fotovoltaicos.

Con anterioridad fue desarrollado en el GES un equipo apto para la medición de la RE de celdas solares homojuntura de silicio cristalino. Dicho equipo consiste esencialmente en una serie de filtros ópticos de banda angosta y un amplificador *lock-in*. Este equipo fue modificado posteriormente para hacerlo apto para la medición de RE de celdas de doble juntura (Fortin et al., 2005), y finalmente fue adaptado para la medición de RE de celdas triple juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica.

La determinación de la RE absoluta requiere del conocimiento de la energía contenida en el haz que incide sobre la celda para cada longitud de onda. Para independizarse de este dato, la RE se calcula sobre la base de una celda calibrada según la fórmula:

$$RE^{cel}(\lambda) = \frac{A^{ref}}{A^{cel}} \cdot \frac{V^{cel}(\lambda)}{V^{ref}(\lambda)} \cdot RE^{ref}(\lambda) \quad (1)$$

donde V^{cel} y V^{ref} son las tensiones medidas (proporcionales a la corriente de cortocircuito) para las celdas a medir y de referencia respectivamente, A^{cel} y A^{ref} son las áreas de las celdas a medir y de referencia respectivamente, y RE^{ref} es la respuesta espectral absoluta de la celda de referencia.

En el presente trabajo se describe la etapa final del desarrollo del equipo de medición de respuesta espectral, que incluye la transferencia de la calibración en RE de una celda triple juntura ATJ (*Advanced Triple Junction*) InGaP/GaAs/Ge suministrado por Emcore Corp. a dos patrones secundarios (celdas de referencia CNEA) basados en celdas ATJ especialmente acondicionadas. Las celdas de referencia CNEA son celdas CIC (*Covered Interconnected Cell*), una basada en una celda de vuelo y la otra basada en una celda de descarte ("Ref ATJ Vuelo" y Ref ATJ Descarte" respectivamente).

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Como se mencionó en publicaciones anteriores (Fortin et al. 2005), el equipo utilizado para la medición de celdas multijuntura es una modificación del desarrollado previamente para la medición de la RE de celdas solares homojuntura de silicio cristalino.

En la Figura 1 se muestra una vista del equipo. La configuración final de dicho equipo consta de dos fuentes luminosas. La primera se utiliza para generar la radiación monocromática por medio de una lámpara halógena de tungsteno de 250 W con ventilación forzada, a la cual se le interponen filtros de interferencia óptica de banda angosta de entre 300 y 1900 nm que se encuentran montados en dos ruedas de aluminio anodizado. La primera rueda sostiene a los filtros con longitudes de onda central comprendidas entre 340 nm y 1100 nm, y es parte del diseño original del equipo. La segunda soporta el filtro de 300 nm y los comprendidos entre 1150 nm y 1900 nm, región donde, a diferencia de las celdas de silicio, las celdas triple juntura tienen respuesta. Cada rueda porta filtros es movida por un motor paso a paso controlado por software. Previamente a su paso por los filtros, el haz de luz es acondicionado por un condensador formado por dos lentes plano-convexas de cuarzo de modo que pueda ser interceptado por un conmutador (*chopper*).



Figura 1: Equipo para la medición de RE en celdas multijuntura.

La segunda fuente luminosa consiste en dos lámparas halógenas con reflector dicróico de 250W, también con ventilación forzada. Estas lámparas son las encargadas poner a la celda a medir en condiciones similares a las de funcionamiento. En el caso de dispositivos multijuntura de estructura monolítica además permiten, mediante filtros de interferencia pasa banda montados en soportes especialmente colocados frente a las lámparas, seleccionar la subcelda a medir. Cabe aclarar que se utilizan fuentes de corriente continua independientes para cada una de las 3 lámparas de modo de asegurar la estabilidad en la irradiancia de las lámparas.

El equipo cuenta además con un amplificador *lock-in*, al cual se conecta el conmutador, que permite medir la perturbación introducida por la radiación monocromática, un circuito externo que pone a la celda bajo estudio en condiciones de cortocircuito o bien en condiciones de polarización eléctrica predeterminadas, y una base termostatazada que mantiene la temperatura de la celda en condiciones normalizadas (Norma IRAM 2000). Todo el procedimiento de medición, con excepción del seteo de la polarización lumínica, es automático y comandado por un software especialmente diseñado en Visual Basic y ejecutado en un PC.

Como se observa en la Figura 1 la luz monocromática, el condensador, el conmutador y los filtros están montados sobre una columna en forma alineada y separada, de modo de que la distancia entre la luz monocromática y el plano de medición asegure una homogeneidad en la intensidad de iluminación monocromática dentro de $\pm 2,5 \%$, según lo requerido en la correspondiente norma (Norma IRAM, 2000). También se observa que las lámparas de polarización están montadas sobre un aro, de forma de poder posicionarlas a fin de asegurar una homogeneidad dentro de $\pm 10 \%$ según lo especifica la citada norma.

TRANSFERENCIA DE LA CALIBRACIÓN

Característica de la Celdas

Como fue mencionado con anterioridad, tanto la celda calibrada en RE suministrada por Emcore como las dos celdas de referencia (patrones secundarios) están basadas en celdas ATJ triple juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica. Estas son celdas con polaridad n-p constituidas sobre un sustrato de Ge de 140 μm . Por esta razón, la celda resulta muy frágil para un uso frecuente en el equipo, de modo que se optó por transferir el patrón de RE a dos celdas CIC pegadas en soportes de bronce especialmente diseñados para tal uso. Estos soportes, además de permitir la manipulación frecuente, también permiten la conexión sencilla con los contactos de la celda. En la Figura 2 se muestra una de estas referencias ya montada en el mencionado soporte. Para el proceso de transferencia la celda Emcore calibrada se colocó en el soporte propio del equipo de medición, que también puede verse en la Figura 2.

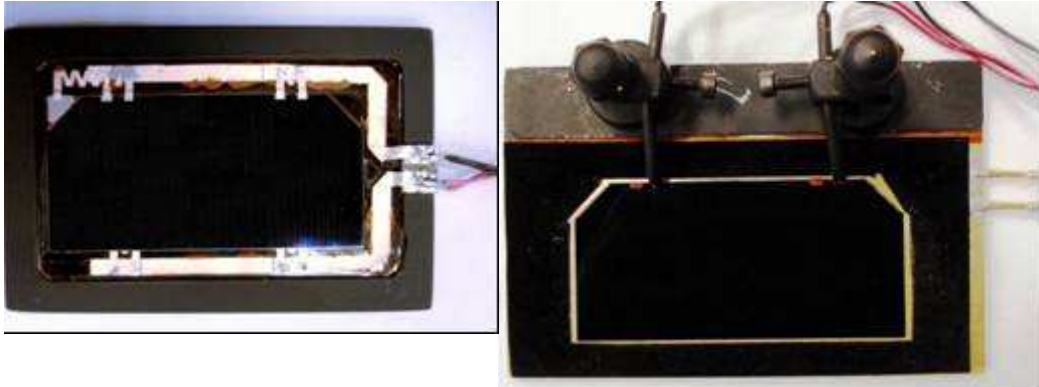


Figura 2: Izquierda, patrón secundario, celda ATJ CIC montada en un soporte de bronce pintado. Derecha, celda Emcore calibrada en la base del equipo de RE.

Polarización Lumínica

Es un hecho conocido que en celdas multijuntura de estructura monolítica la subcelda que genera menos corriente será aquella que limite la corriente de cortocircuito del conjunto. Así, la manera de seleccionar una dada subcelda para su medición es modificando el espectro de la luz de polarización de modo tal que dicha subcelda sea aquella que genere la menor fotocorriente. Sin embargo, la función de la luz de polarización es la de acercar lo más posible a la celda a sus condiciones normales de funcionamiento. En este caso, al ser celdas de uso espacial, lo correcto es poner a funcionar dichas celdas bajo el espectro solar espacial AM0. Si bien obtener una aproximación razonable de este espectro es posible, solo podríamos medir una única subcelda, es decir aquella que genere la menor fotocorriente en estas condiciones espectrales. Por este motivo, el criterio de condiciones normales de funcionamiento que fue aplicado es el de lograr el espectro lo más parecido posible al AM0 con las dos lámparas y filtros disponibles, y modificar este espectro lo menos posible de manera que la corriente sea limitada por las dos subceldas restantes. Estos espectros fueron calculados, analizados y probados (Plá et al., 2007, Barrera et al., 2008) en diferentes celdas de triple juntura. Los tres espectros calculados pueden verse en la Figura 3, donde también se muestra el espectro AM0 (ASTM, 2000).

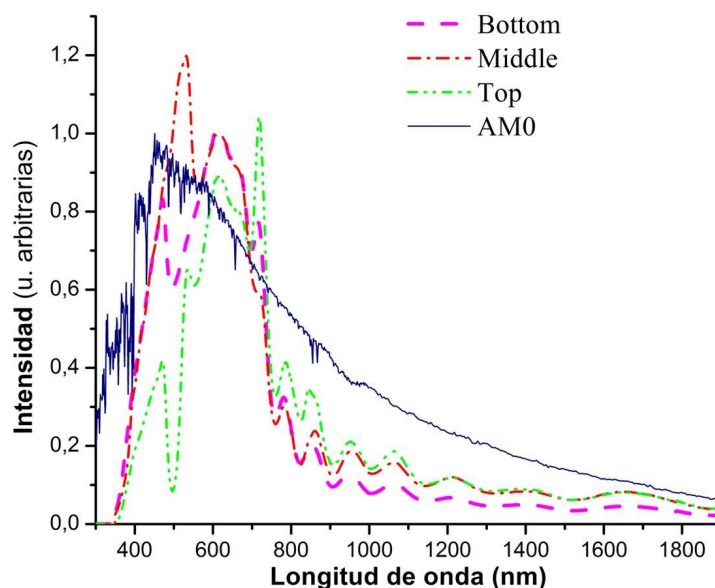


Figura 3: Espectros utilizados para seleccionar las tres diferentes subceldas en celdas de triple juntura.

Estos espectros fueron utilizados satisfactoriamente varias veces para seleccionar y medir subceldas en celdas ATJ Emcore de descarte, vuelo, celdas doble juntura fabricadas por el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid y en el momento de transferir el patrón de RE a la celda de referencia de descarte (Ref ATJ Descarte). Sin embargo, ya sea debido a las características únicas de cada celda como dispositivo semiconductor o por el hecho de ser una celda CIC, fallaron a la hora de utilizarlos en la celda de vuelo (Ref ATJ Vuelo) a la cual se quería transferir el patrón. Más específicamente, a la hora de seleccionar las celdas *Middle* (GaAs) y *Bottom* (Ge), de manera que para que cada una de estas subceldas limite la corriente se debieron modificar los espectros originales, para lo cual se trabajó de igual manera que para hallar los espectros seleccionadores originales (Plá et al., 2007, Barrera et al., 2008). Puede observarse en la Figura 4 que ambos nuevos espectros son menos intensos que los originales y, en el caso del espectro para la subcelda *Middle*, la zona donde responde esta subcelda es en la que más disminuyó, pero en el caso de la subcelda *Bottom* esto no es así.

Estos nuevos espectros fueron probados con éxito en la celda “Ref ATJ Vuelo”. Cabe aclarar que en los cálculos que se realizan para elegir los espectros que permiten la selección de cada subcelda, se utiliza una respuesta espectral típica de una triple juntura. Así, en el caso de existir diferencias entre esta respuesta espectral y aquella del dispositivo a medir, podrían darse situaciones como la encontrada para la celda “Ref ATJ Vuelo”.

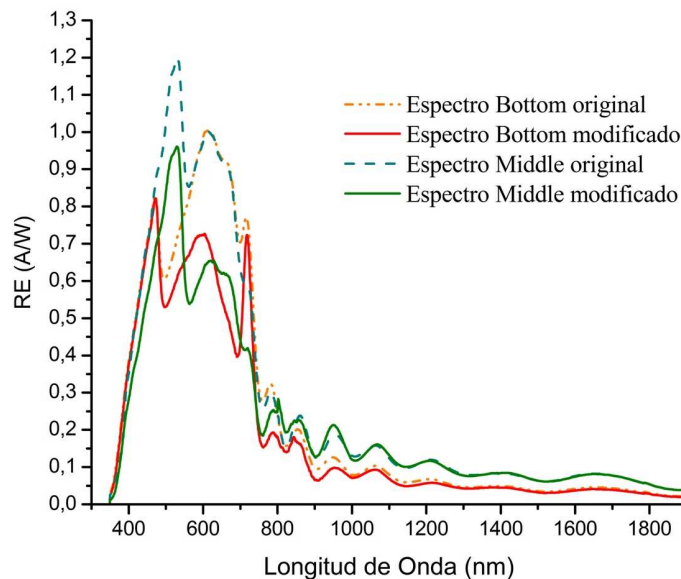


Figura 4: Espectros modificados para la selección de las subceldas *Middle* y *Bottom*.

Polarización Eléctrica

Otro punto importante fue a buscar las condiciones de polarización eléctrica más adecuadas para colocar en condiciones de cortocircuito cada subcelda. De este modo se busca evitar los problemas en la medición descritos en detalle en el artículo de Meusel et al. (2003). El método descrito en el artículo y ya utilizado anteriormente en el equipo (Barrera et al., 2008) consiste en seleccionar la subcelda a medir mediante la polarización lumínica y luego variar la tensión de polarización de manera de minimizar la RE en longitudes de onda donde no debería tener respuesta dicha subcelda y maximizarla donde debería tener respuesta.

Como la celda más problemática suele ser la subcelda de Ge debido a su pobre característica eléctrica, se analizó la respuesta en 500 nm, 800 nm (donde no se espera respuesta de la subcelda de Ge) y 1100 nm (donde se espera respuesta). Como resultado de este procedimiento se optó por utilizar como tensión de polarización eléctrica el valor 1,35 V para la subcelda de Ge. Cabe aclarar que, si bien se optó por este valor de polarización eléctrica, no se observó variación en la respuesta de la celda en el intervalo de 1,2 V a 1,6 V, siendo esto consistente con el hecho de que el espectro de polarización lumínica fue optimizado para este tipo de celdas y en el artículo Meusel et al. (2003) la mayor desviación de la “RE correcta” se produce con polarizaciones lumínicas lejanas a la condición real de funcionamiento.

Transferencia del patrón de RE

Definidas las polarizaciones lumínica y eléctrica para cada subcelda de las celdas de referencia CIC se procedió a la medición de las mismas. Se realizaron varias mediciones de manera de evaluar la repetitividad de la medición, así como también para poder evaluar la confiabilidad del equipo y estimar el error cometido en el cálculo del nuevo patrón.

La nueva RE patrón se calculó promediando punto a punto todas las mediciones de cada subcelda; el resultado final puede observarse en la figura 5, donde se muestra además la RE patrón suministrada por Emcore.

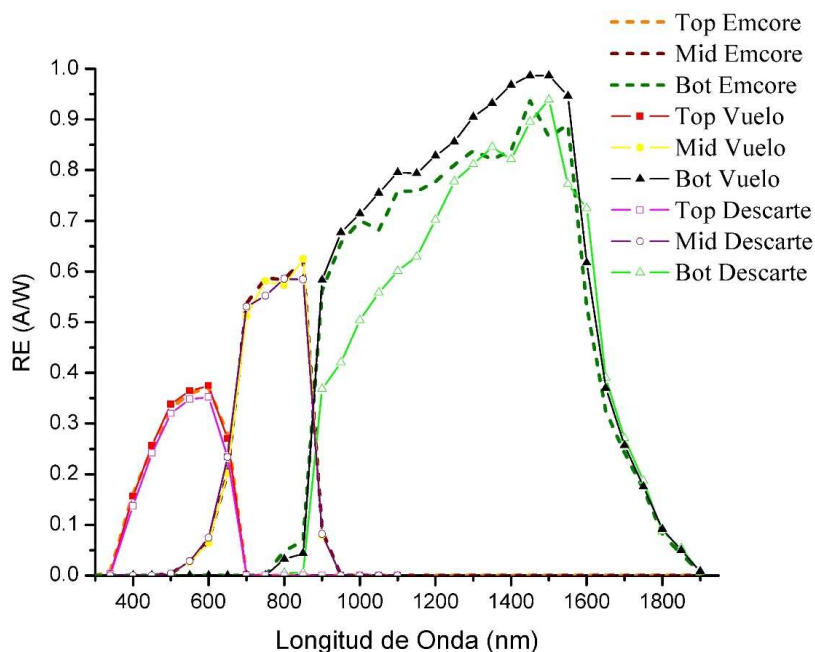


Figura 5: RE de los nuevos patrones y patrón original suministrado por Emcore.

Como forma de estimar el error que posee este nuevo patrón (el cálculo por propagación de error utilizando la Formula 1 no fue posible realizarlo debido a la falta de este dato en el patrón Emcore) se utilizó el triple de la desviación estandar calculada a partir de varias mediciones realizadas para cada subcelda. Los resultados muestran que en las zonas centrales donde cada subcelda tiene respuesta este parametro varía entre el 1 y el 3 %, y se incrementa hasta un 10 % en las longitudes de onda extremas de cada subcelda, donde la señal involucrada es pequeña (ver Figura 6).

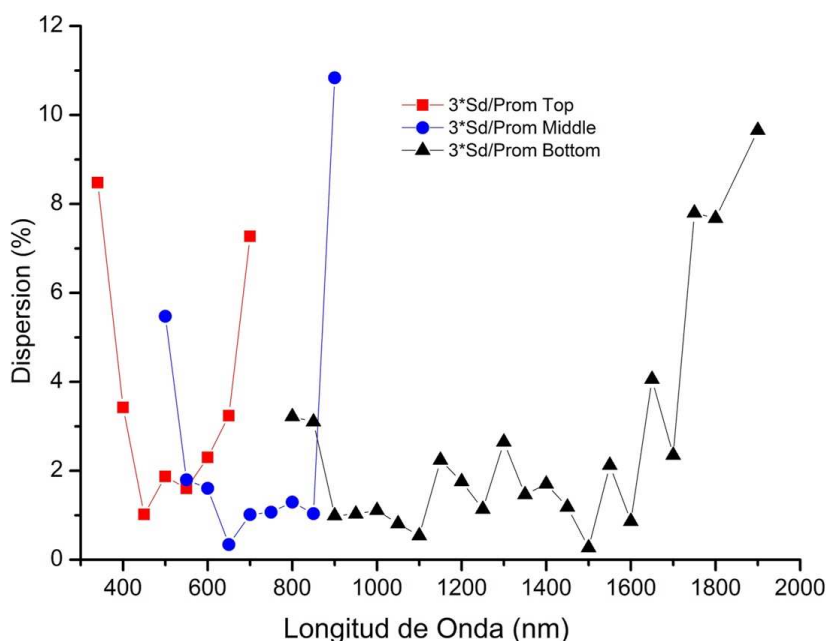


Figura 6: Asignación de incertidumbre en la medición de RE en celdas ATJ.

Daño por radiación y RE

El nuevo patrón fue utilizado para la medición de la RE de una celda ATJ a ser irradiada con protones de 10 MeV en el acelerador de iones pesados TANDAR de la CNEA, así como para la medición luego de la irradiación. Considerando lo expresado anteriormente en cuanto al error estimado con que se mide la RE puede concluirse que para la dosis utilizada se produjo degradación en la RE de la subcelda de GE debido al daño provocado por la radiación (ver Figura 7) ya que las diferencias en esta subcelda antes y después de irradiar rondan el 6 % en la zona central de dicha subcelda.

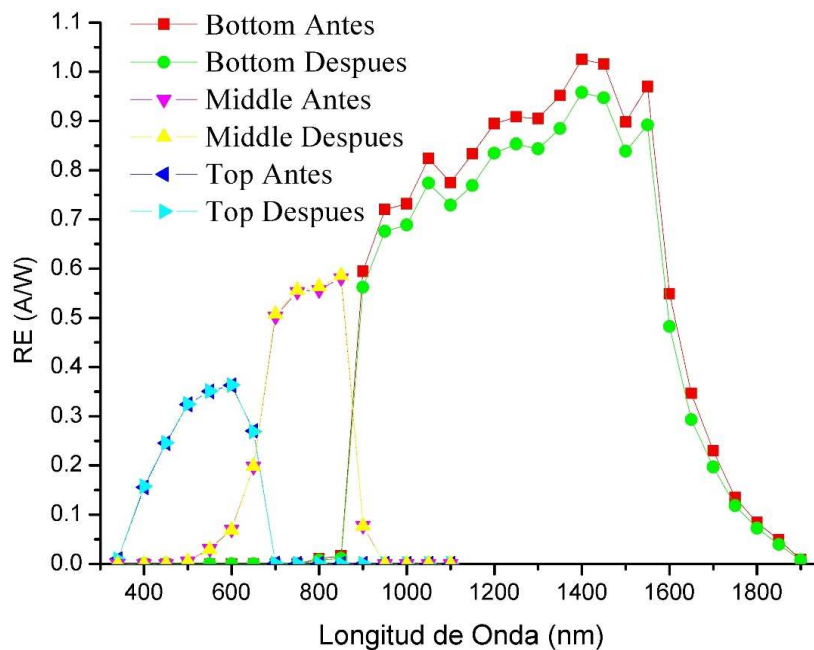


Figura 7: RE de una celda ATJ antes y después de su irradiación con protones. Esta RE fue medida utilizando el nuevo patrón "Ref ATJ Vuelo".

CONCLUSIONES

Se logró transferir con éxito el patrón de respuesta espectral para la medición de esta propiedad en celdas de triple juntura InGaP/GaAs/Ge de estructura monolítica, concluyendo con esto el desarrollo del equipo para medición de dichas celdas. Asimismo, se adquirió experiencia en el cálculo y elección de espectros de polarización lumínica y del valor de tensión óptimos para polarizar las celdas.

Es importante mencionar que la estimación del error con que se mide RE permite establecer, por ejemplo, si las diferencias en RE encontradas son significativas o no entre mediciones de una misma celda sometida a un ensayo de daño por radiación.

REFERENCIAS

- Alurralde M., Barrera M., Bolzi C. G., Bruno C. J., Cabot P., Carella E., Di Santo J., Durán J. C., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C. D., Godfrin E. M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M. G., Mezzabolta E., Moglioni A., Nigri C., Nigro S. L., Palumbo F., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M. C., Rodríguez S. E., Socolovsky H., Tamasi M. J., Vertanessian A. (2007). Advances in the development of photovoltaics for space applications in Argentina. Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pág 687.
- Alurralde M., Barrera M., Bolzi C. G., Bruno C. J., Durán J. C., Fernández Vázquez j., Filevich A., Godfrin E. M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M. G., Mezzabolta E., Nigro S. L., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M. C., Rodríguez S. E., Tamasi M., Vertanessian A., Antonuccio F., Cabot P., Carella E., Franciulli C.D., Moglioni A. (2004a). Últimos desarrollos relacionados con la fabricación y el ensayo de paneles solares y componentes para usos espaciales. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 8, 4.01-4.06
- Alurralde M., Barrera M., Bolzi C. G., Bruno C. J., Durán J. C., Fernández Vázquez J., Filevich A., Godfrin E. M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M. G., Mezzabolta E., Nigro S. L., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M. C., Rodríguez S. E., Tamasi M. J. L., Vertanessian A., Antonuccio F., Cabot P., Carella E., Di Santo J., Franciulli C. D., Moglioni A., Berbeglia G., Fernández Slezack D. (2005). Development of photovoltaic modules for space applications in Argentina. Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 538-541M
- Alurralde M., Tamasi J. L., Bruno C. J., Martínez Bogado M. G., Plá J., Fernández Vázquez J., Durán J., Schuff J., Burlon A. A., Stoliar P., Kreiner A. J. (2004b). Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells. Solar Energy Materials and Solar Cells 82, 531-542
- ASTM (2000), Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00 - http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/E490_00a_AM0.xls
- Barrera M., García J., Socolovsky H., Rubinelli F., Godfrin E., Plá J. (2008). Activities on simulation and characterization of multijunction solar cells for space applications in Argentina", Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 781
- Bolzi C. G., Bruno C. J., Cabot P., Carella E., Durán J. C., Fernández Vázquez J., Franciulli C. D., Godfrin E. M., Goldbeck V., Martínez Bogado M. G., Moglioni A., Plá J., Rodríguez S.E., Tamasi M. J., Alurralde M., Antonuccio F., Filevich A., Iglesias A., Mezzabolta E., Nigro S. L.. (2003) Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para misiones satelitales argentinas - primer módulo para ensayos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7, 04.07-04.12
- 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., 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, 4.07-4.12
- Fortin S., Martínez Bogado M. G., Plá J. (2005). Respuesta espectral de celdas solares multijuntura para aplicaciones espaciales: diseño del equipo y primeras mediciones. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9, 04.01-04.06.
- Meusel M., Baur C., Bett A. W., Warta W. y Fernández E. (2003) Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: measurement artifacts and their explanation. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 11, 499-514
- Norma IRAM 210013-12 (2000). Métodos normalizados para la medición de la respuesta espectral de celdas fotovoltaicas
- Plá J., Barrera M., Rubinelli F., García J., Socolovsky H., Bosi M., Attolini G., Pelosi C. (2007). Avances en el estudio de celdas solares basadas en materiales III-V, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 04.85-04.92

ABSTRACT: In previous contributions were presented different stages of the development of a setup for measuring spectral response (SR) on multijunction solar cells and other photovoltaic devices. At present, this setup is fully functional and here is presented, as the last step necessary for the measurement of SR on triple junction solar cells, the calibration of a pattern to cover the wavelengths between 300 nm and 1900 nm. The pattern was obtained using a calibrated ATJ (Advanced Triple Junction) InGaP-GaAs-Ge cell acquired from Emcore Corp, by transferring this calibration to other ATJ cells specially conditioned to this use. This paper shows the process carried out for this transfer as well as the estimation of the error produced in this transfer. Finally, the new standard was used in the measurement of SR before and after proton irradiation of an ATJ cell.

Keywords: Solar cells, III-V semiconductors, spectral response, characterization