

ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES DE SILICIO CRISTALINO PARA SU ENSAYO EN EL SATÉLITE SAC-A

C.G. Bolzi, L.M. Merino, M.J.L. Tamasi, J.C. Plá, J.C. Durán,
C.J. Bruno, E.M. Godfrin, A. Lamagna, M.P. Barrera* y L.B. Quintero*
Grupo Energía Solar - Depto. de Física - Centro Atómico Constituyentes
Comisión Nacional de Energía Atómica
Av. Gral. Paz km 6,5 - 1650 Villa Maipú
Tel: 754-7131 - Fax: 754-7121 - E-mail: duran@cnea.edu.ar

RESUMEN

Se describen los procesos utilizados para la elaboración de un conjunto de celdas y paneles fotovoltaicos que serán incluidos en el satélite argentino SAC-A, para su ensayo en ambiente espacial. Seis de las celdas serán utilizadas como sensores para la determinación de la posición angular del satélite. Los procesos mencionados incluyen la elaboración de celdas, su interconexión y el armado de los paneles. Las celdas solares fueron caracterizadas eléctricamente antes y después de su integración en los paneles. Se presentan las primeras experiencias de daño producido por bombardeo con protones y neutrones en laboratorio.

INTRODUCCIÓN

El Grupo Energía Solar (GES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) realiza tareas de I&D en el campo de la conversión fotovoltaica (FV) desde el año 1986. Las primeras actividades estuvieron orientadas al desarrollo de materiales para uso FV (en especial, silicio monocristalino), mientras que a partir de 1992 el trabajo se centró principalmente en el diseño, simulación, elaboración y caracterización de celdas solares de silicio cristalino para usos terrestres y espaciales. Ello permitió, durante 1997, obtener dispositivos con eficiencias de alrededor del 17%.

A fines de 1995, el GES inició actividades relacionadas con el desarrollo de celdas y paneles solares para usos espaciales, dentro del marco de un acuerdo de cooperación entre la CNEA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). El proyecto está financiado por ambas instituciones y cuenta, además, con la colaboración de INVAP S.E. y de la División Semiconductores de CITEFA. Las actividades incluyen experiencias de celdas solares en satélites argentinos, ensayos de daño por radiación y desarrollo de técnicas de caracterización. El objetivo final es alcanzar la puesta a punto de la tecnología de fabricación de paneles solares para usos espaciales. Ello permitirá proveer en un futuro, total o parcialmente, los requerimientos de potencia en satélites de la CONAE con dispositivos solares nacionales.

En la primer etapa [1], desarrollada durante 1996, el GES elaboró un conjunto de celdas solares que fueron interconectadas e integradas en un panel de vuelo por la empresa brasileña DIGICON. El diseño de esta experiencia fue realizado en colaboración entre el GES, la CONAE y el INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) de Brasil. La puesta en órbita del satélite en el cual se incluirá este primer panel se encuentra retrasada.

La segunda etapa, actualmente en ejecución, prevé el ensayo en el satélite SAC-A de cuatro celdas individuales y dos paneles solares íntegramente elaborados en la CNEA. El lanzamiento de este satélite está previsto para mediados de 1998. Tres pares del total de celdas incluidas en la experiencia serán utilizados como sensores de ángulo, a fin de determinar la posición del satélite con respecto al Sol. Como paso previo a la elaboración de los paneles de vuelo, se elaboraron dos paneles para ensayos térmicos y de vibraciones. En el presente trabajo se describen los procesos de elaboración utilizados y se analizan las características eléctricas de las celdas elaboradas.

Se realizaron las primeras experiencias de daño por radiación, en particular por bombardeo con: (i) protones mediante un equipo de implantación iónica, y (ii) neutrones, en un reactor experimental del Centro Atómico Constituyentes.

DISEÑO DE LA EXPERIENCIA - ELABORACIÓN DE CELDAS PARA PANELES DE INGENIERÍA

El diseño de la experiencia de celdas solares argentinas en el satélite SAC-A fue realizado en colaboración entre profesionales de la CNEA y la CONAE. Los dispositivos principales del ensayo son dos paneles de 160mm x 70mm con 7 celdas solares cada uno: 4 interconectadas en serie y 3 individuales. Para cada panel, se utilizarán 4 canales analógicos para la medición de la corriente de cortocircuito (I_{cc}), la tensión de circuito abierto (V_{ca}) y un punto de trabajo cercano al de máxima potencia, en las 3 celdas individuales, y un punto de trabajo en las celdas interconectadas. Las celdas para la medición de I_{cc} , junto con otras 4 celdas individuales distribuidas en el satélite, serán utilizadas como sensor de ángulo.

Se elaboraron celdas cuadradas de 25mm x 25mm, estructura n^+pp^+ y una capa antirreflectante sencilla de SiO_2 . El material de partida son obleas de Si monocristalino de origen comercial, dopadas con B y con una resistividad de aproximadamente 1 Ω cm. El proceso de elaboración consta básicamente de los siguientes pasos: preparación de las obleas, oxidación para su utilización como máscara en el proceso de difusión, difusión de los dopantes y depósito de los contactos.

* Estudiantes de la Lic. en Ciencias Físicas de la Univ. de Buenos Aires.

En la elaboración de las celdas para los paneles de ingeniería se utilizó una barrera de SiO₂ para evitar la difusión de P en las zonas cercanas al canto de la oblea, lo que daría lugar a la aparición de una resistencia paralelo que deterioraría las características del dispositivo. Las obleas ya cortadas fueron sometidas a un proceso de oxidación seca, en presencia de TCA, durante 2 horas a una temperatura de 1200°C en el horno de difusión/oxidación. Esto da lugar al crecimiento de una capa de SiO₂ de aproximadamente 0,3 µm de espesor. Luego se abre una ventana en el óxido mediante la técnica de fotolitografía seguida de un ataque con una solución de HF y NH₄F, el cual remueve el óxido y posibilita la difusión del dopante en esa zona.

Entre los métodos de generación de las juntas apropiados para lograr dispositivos de alta eficiencia, se optó por el desarrollado por Basore et al. [2], el cual requiere un único paso a alta temperatura y da lugar a una estructura n⁺pp⁺ con una capa antirreflectante de SiO₂. Este método consta básicamente de las siguientes etapas: depósito de una capa de Al de aproximadamente 1 µm de espesor por evaporación en cámara de vacío, formación simultánea de las juntas frontal, por difusión a partir de una fuente líquida de POCl₃, y posterior, por difusión del Al previamente evaporado. Este último proceso fue realizado a 900°C y consiste en una predeposición de P en ambiente de O₂, un recocido en ambiente de N₂, y finalmente una oxidación en ambiente de O₂, la que da lugar al crecimiento de la capa de SiO₂. La resistencia de capa obtenida osciló entre 50 y 70 Ω/□, con una buena homogeneidad.

Los contactos se obtienen depositando por evaporación en cámara de vacío multicapas de Ti-Pd-Ag. La elaboración de la grilla de contacto frontal se realiza mediante la técnica de fotolitografía. Se ha trabajado con líneas de contacto con un grosor de 50 µm. El proceso de evaporación da lugar a contactos de aproximadamente 0,2 µm de espesor, los cuales, luego de ser sometidos a un recocido de 20 min. a 400°C en ambiente de N₂, se engrosan electrolíticamente mediante una solución de cianuro doble de plata con exceso de cianuro libre, hasta un espesor final de aproximadamente 10 µm.

ELABORACIÓN DE LOS PANELES DE INGENIERÍA

La elaboración de los paneles fue llevada a cabo utilizando una base de Al y elementos calificados para usos espaciales (kapton, elastómero y vidrios), junto con otros elementos desarrollados específicamente (cintas de cobre laminadas y estañadas). La estructura del panel consta de una base de Al sobre la que se adhiere una lámina de kapton; sobre esta última se fijan las celdas solares ya interconectadas, las que a su vez van protegidas frontalmente con un vidrio.

La base de aluminio fue maquinada sobre una plancha de Al de espesor 5 mm, según las dimensiones previamente definidas. Previo al pegado del kapton sobre esta base, se realizó una limpieza de la misma con sucesivos enjuagues con tricloroetileno, acetona y alcohol isopropílico. Por su parte, el kapton se limpió utilizando una solución de tetrahidrofurano, sodio metálico, cloruro de calcio en granos (como desecante) y naftaleno.

Como adhesivo se utilizó el elastómero Silgard 184. Luego de preparada la mezcla de la base con el catalizador, se realizó un desgasado de la misma en cámara de vacío y se la aplicó a la superficie de Al con espátula. Posteriormente, se aplicó el kapton y se introdujo el conjunto prensado en un horno a 100 °C durante aproximadamente 6 horas.

El interconexionado de las celdas entre sí (para los casos de 4 celdas en serie) y con los cables que extraen la señal al circuito externo, se realizó utilizando cintas de cobre laminado (espesor aproximado: 350 µm), de 2 mm de ancho, y estañadas. Las cintas fueron dobladas con una geometría apropiada para disminuir los riesgos de rotura debidos al ciclado térmico al que estará sometido el panel. Todas las conexiones se realizaron en forma redundante, utilizando en cada caso dos cintas independientes para la misma función.

El proceso de soldado de las cintas (*tabs*) a las celdas puede realizarse de dos maneras, ya sea utilizando el método convencional de calentamiento mediante soldador, realizado manualmente, o mediante una máquina de soldadura por punto (*welding*). Si bien se realizaron algunas pruebas preliminares de soldadura por punto utilizando un equipo disponible en CITEFA, se optó por la utilización del método manual dado que no se alcanzó aún la puesta a punto de dicha técnica.

La medición de la curva corriente-tensión (I-V) de las celdas se realizó mediante una carga electrónica e iluminación con 3 lámparas halógenas de tungsteno (250W, 24V), con reflector dicróico. Este sistema de iluminación corresponde a un sol artificial Clase C (Norma ASTM E927). La intensidad de radiación standard (equivalente a 1 kW/m² de la radiación solar) se fija utilizando una celda de referencia comercial. La caracterización eléctrica fue realizada antes y después del soldado de las cintas, no observándose diferencias significativas en los resultados obtenidos.

En la Tabla 1 se dan las características eléctricas de las celdas utilizadas para los dos paneles de ingeniería. La falta de repetibilidad observada está asociada con la utilización de celdas provenientes de experiencias preliminares tendientes a optimizar las diferentes etapas del proceso de elaboración. En las mismas tablas se incluyen también las características de los módulos de 4 celdas en serie. Teniendo en cuenta el equipamiento usado, los errores de los parámetros pueden estimarse en los siguientes valores: $\Delta V_{ca} \approx \pm 0,8\%$; $\Delta I_{cc} \approx \pm 4\%$; $\Delta FF \approx \pm 5\%$. Estos errores no tienen en cuenta la diferencia espectral entre el sol artificial y la radiación solar, contribución muy difícil de estimar con el equipamiento disponible.

TABLA I: Características eléctricas de las celdas utilizadas para los paneles de ingeniería.

Panel	Celda	V _{ca} (mV)	I _{cc} (mA)	FF	Observaciones
1	1	581	115	0,74	Interconexión serie
	2	574	112	0,65	Interconexión serie
	3	559	122	0,65	Interconexión serie
	4	585	120	0,74	Interconexión serie
	5	410	112	0,57	Medición I _{cc}
	6	562	113	0,56	Medición V _{ca}
	7	583	111	0,72	Medición pto. trabajo
	Serie 1-4	2290	110	0,72	Medición pto. trabajo
2	1	595	103	0,76	Interconexión serie
	2	586	110	0,65	Interconexión serie
	3	592	105	0,79	Interconexión serie
	4	595	103	0,80	Interconexión serie
	5	451	112	0,55	Medición I _{cc}
	6	597	122	0,60	Medición V _{ca}
	7	504	103	0,54	Medición pto. trabajo
	Serie 1-4	2360	97	0,77	Medición pto. trabajo

El armado final del panel se realizó en dos etapas: (i) pegado de los vidrios, previamente cortados a las mismas dimensiones de las celdas (25mm × 25mm), sobre cada una de las celdas que conforman los paneles; (ii) pegado de las celdas sobre el conjunto kapton-base de aluminio. En ambos pasos se utilizó el mismo adhesivo (Silgard 184).

Los paneles de ingeniería fueron sometidos a un ciclado térmico en cámara de vacío (entre -25°C y 80 °C) y a ensayos de vibraciones, en laboratorios de INVAP S.E., prov. de Río Negro. Las pruebas eléctricas y la observación visual realizadas luego de estos ensayos no mostraron diferencias con las previas.

ELABORACIÓN DE LAS CELDAS PARA LOS PANELES DE VUELO Y LOS SENSORES DE ÁNGULO

En base a la experiencia obtenida en la elaboración de las celdas para los paneles de ingeniería, se realizaron algunas modificaciones a los procesos con el fin de lograr mayor repetibilidad y eficiencia final de los dispositivos. Por un lado, se eliminó la etapa de oxidación y apertura de la ventana en el SiO₂, debido a que los problemas de falta de repetibilidad en las características de los dispositivos parecerían estar asociados a espesores de SiO₂ que no cumplen apropiadamente su papel de barrera durante el proceso de difusión de P. En su lugar, se realizó la difusión de los dopantes (P y Al) sobre la oblea de 10 cm de diámetro, realizando el corte en obleas de 25mm × 25mm en un paso posterior, lo cual evita completamente la aparición de dopante en los cantos de las celdas.

Por otra parte, cabe destacar que la capa de SiO₂ crecida sobre el área activa de la celda durante el último paso del proceso de difusión, cumple una función antirreflectante en el caso de una interfaz Si-aire (o Si-vacío). En cambio, su efecto es prácticamente nulo en una interfaz Si-adhesivo-vidrio, dado que el índice de refracción del SiO₂ es muy similar al del vidrio y del adhesivo (aproximadamente 1,5). En este caso, una monocapa dieléctrica antirreflectante debe tener índice de refracción de aproximadamente 2,2 (por ej., ZnS o Ta₂O₅) y debe ser depositada directamente sobre el Si o sobre una capa delgada de SiO₂, que actúe como pasivante de la superficie, pero cuyo espesor óptico sea mucho menor que las longitudes de onda involucradas (típicamente, menor que 10 nm). Por tal motivo, a fin de disminuir a valores aceptables el espesor de la capa de SiO₂ crecida durante la difusión, se modificó el proceso de Ref. [2] reemplazando el recocido final en ambiente de O₂ por otro equivalente en ambiente de N₂, realizado en otra boca del horno.

Con un proceso similar al utilizado para las celdas de los paneles de ingeniería al cual se le introdujeron las dos modificaciones mencionadas en los párrafos precedentes, se elaboraron 48 celdas cuadradas de 25mm × 25mm con un área activa[†] de aproximadamente 460 mm². Mediante las curvas I-V obtenidas en las mismas condiciones descritas en la sección precedente se clasificaron estas celdas, seleccionándose un total de 18 celdas para la experiencia en el espacio. En la Tabla 2 se dan las principales características de las celdas seleccionadas para los dos paneles de vuelo como también para las celdas individuales a ser utilizadas como sensores de ángulo. Teniendo en cuenta que los valores presentados corresponden a las celdas sin capa antirreflectante, las eficiencias finales de las celdas en el panel de vuelo (o sea, con capa antirreflectante y vidrio de protección) serán de alrededor del 15%.

Al momento de la escritura del presente trabajo, se estaban llevando a cabo las últimas etapas de la integración (interconexión, depósito de capa antirreflectante, pegado del kapton, celdas y vidrios) de los paneles de vuelo y de las celdas individuales. Estos dispositivos serán sometidos posteriormente a ensayos térmicos y de vibraciones, y finalmente integrados al satélite.

[†] Se define el área activa como el área total difundida n⁺, excluyendo la superficie del bus colector de la grilla de contacto.

TABLA 2: Características eléctricas de las celdas utilizadas para los paneles de vuelo y para la determinación de ángulo.

Panel	Celda	V _{ca} (mV)	I _{cc} (mA)	FF	η (%)	Observaciones
1	1	575	122	0,77	11,8	Interconexión serie
	2	590	121	0,79	12,4	Interconexión serie
	3	591	121	0,76	12,0	Interconexión serie
	4	587	122	0,75	11,8	Interconexión serie
	5	573	116	0,77	11,3	Medición I _{cc}
	6	574	116	0,76	11,0	Medición V _{ca}
	7	587	119	0,78	12,0	Medición pto. trabajo
2	1	575	114	0,76	10,9	Interconexión serie
	2	574	114	0,77	11,0	Interconexión serie
	3	573	114	0,77	11,1	Interconexión serie
	4	575	114	0,76	11,0	Interconexión serie
	5	572	116	0,77	11,2	Medición I _{cc}
	6	575	115	0,77	11,2	Medición V _{ca}
	7	587	120	0,78	12,1	Medición pto. trabajo
Celdas indiv.	1	582	119	0,75	11,3	Sensor de ángulo
	2	574	118	0,76	11,3	Sensor de ángulo
	3	570	113	0,76	10,8	Sensor de ángulo
	4	572	114	0,76	10,8	Sensor de ángulo

PRIMERAS EXPERIENCIAS DE DAÑO POR RADIACIÓN

Se realizaron las primeras experiencias de efectos de la radiación sobre celdas solares. Se utilizaron celdas elaboradas en el GES y comerciales de origen chino (utilizadas por el INPE). Se irradió con neutrones, producidos en el núcleo del reactor RA-1 del Centro Atómico Constituyentes, y con protones, producidos en el implantador de iones del Depto. de Física de la CNEA. Las dosis empleadas van desde 3×10^{10} n/cm² hasta 1×10^{13} n/cm² para los neutrones (con energías >10 keV) y dosis similares para los protones con energías de 120 keV. Se observa degradación en la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto y la eficiencia de todas las celdas ensayadas. En la Tabla 3 se muestran las variaciones de los parámetros característicos para ambos tipos de celdas, irradiadas con neutrones y protones con la máxima dosis utilizada. Teniendo en cuenta que el daño producido sobre el material reduce principalmente la longitud de difusión de los portadores minoritarios [3], se determinará la variación de este parámetro sobre las celdas irradiadas a partir de la medición de la vida media de portadores minoritarios mediante una variante de la técnica OCVD [4].

TABLA 3: Variación de los parámetros característicos de celdas irradiadas con una dosis de 1×10^{13} partículas/cm².

Celda	CNEA-1		CHINA-1		CNEA-2		CHINA-2	
	Sin irradiar	Con neutrones	Sin irradiar	Con neutrones	Sin irradiar	Con protones	Sin irradiar	Con protones
I _{cc} (mA)	149	107	286	221	145	118	288	276
V _{ca} (mV)	600	536	583	501	603	505	598	451

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los profesionales y técnicos de la CONAE, la empresa INVAP S.E. y CITEFA que colaboraron en el desarrollo del presente proyecto. Asimismo, agradecen muy especialmente a A. Cuevas por su apoyo técnico al programa fotovoltaico en ejecución en la CNEA.

REFERENCIAS

- [1] C.G. Bolzi et al., Celdas solares de silicio cristalino para uso espacial: primeras experiencias y desarrollo de técnicas de caracterización. *Actas de la XIX Reunión de Trabajo de la ASADES*, pág. 05.1 (1996).
- [2] P.A. Basore, J.M. Gee, M.E. Buck, W.K. Schubert y D.S. Ruby, Simplified high-efficiency silicon cell procesing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 34, 91 (1994).
- [3] JPL Publication 82-69, *Solar Cell Radiation Handbook*, NASA, California Inst. of Technology.
- [4] C.J. Bruno, M.G. Martínez Bogado, J.C. Plá y J.C. Durán, A new method for the determination of the minority carrier lifetime based on a biased OCVD technique, aceptado para su publicación en *Proc. 26th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (1997).