

CELDA SOLARES DE SILICIO CRISTALINO PARA USO ESPACIAL: PRIMERAS EXPERIENCIAS Y DESARROLLO DE TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

C.G. Bolzi, C.J. Bruno, J.C. Durán, A. Lamagna, L.M. Merino, J.C. Plá, G.L. Venier,
E. Campitelli[†], E.M. Godfrin, M.G. Martínez Bogado*, M.J.L. Tamasi*
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 iniciaron actividades de investigación y desarrollo en celdas solares para usos espaciales. En una primera etapa, se elaboraron y caracterizaron un conjunto de celdas de silicio monocristalino que dieron lugar a la construcción de dos pequeños paneles. Uno de los paneles fue ensamblado por una empresa brasileña y será incluido en un satélite argentino. Con el objeto de iniciar estudios de daño por radiación en dispositivos fotovoltaicos, se desarrollaron técnicas para la determinación de la vida media y la longitud de difusión de portadores minoritarios, parámetros fundamentales para evaluar el daño sobre el material.

INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), suscribieron a fines de 1995 un acuerdo con el objeto de realizar actividades de investigación y desarrollo en celdas solares para usos espaciales. Las mismas incluyen experiencias de celdas de silicio monocristalino, elaboradas por la CNEA, en satélites de la CONAE, ensayos de daño por radiación en Tierra, y desarrollo de técnicas de caracterización adecuadas.

En una primera etapa, se encaró la realización del primer "Experimento de celdas solares argentinas en el espacio" a fin de evaluar el comportamiento eléctrico de las celdas en el ambiente espacial y su evolución temporal. La experiencia fue diseñada en colaboración con profesionales de la CONAE, contándose, además, con el apoyo del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) y de la empresa DIGICON, ambos de Brasil. El financiamiento del proyecto fue provisto por la CNEA y la CONAE, habiendo contribuido también la Universidad Nacional de General San Martín a través del otorgamiento de un subsidio.

Teniendo en cuenta que los parámetros principales para evaluar el daño producido sobre un dispositivo solar por el bombardeo por partículas (electrones, protones, etc.) son la vida media y la longitud de difusión de portadores minoritarios, se desarrollaron técnicas para su determinación que no requirieran equipamiento sofisticado. Estas técnicas se utilizarán para realizar estudios de daño por radiación en experiencias de laboratorio.

DISEÑO DEL EXPERIMENTO - ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS

El diseño del dispositivo a ser incluido en un satélite argentino tuvo en cuenta las limitaciones de tamaño, peso y disponibilidad de canales en el sistema de adquisición de datos del satélite. Se decidió elaborar un panel de 150mm x 100mm con 11 celdas solares: 8 interconectadas en serie y 3 individuales. Se utilizarán 4 canales analógicos para la medición en vuelo de la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto y un punto de trabajo cercano al punto de máxima potencia, en las 3 celdas individuales, y un punto de trabajo en el módulo de celdas interconectadas. Asimismo, se medirá la temperatura del panel mediante un termistor incluido en el mismo. El diseño detallado del panel se realizó en colaboración con personal del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil.

La elaboración de las celdas se realizó en el Laboratorio Fotovoltaico del Grupo Energía Solar, en base a la experiencia previa de desarrollo de celdas para usos terrestres [1]. Se realizaron 8 procesos de difusión de dopantes, utilizando el método simplificado descrito en Ref. [2]. Ello dio lugar a la elaboración de aproximadamente 80 celdas de 25mm x 25mm (19mm x 19mm de área activa), estructura n⁺pp⁺ y una capa antirreflectante sencilla de SiO₂. Las celdas fueron caracterizadas eléctricamente mediante la carga electrónica y el sistema de adquisición desarrollados en el Grupo [3].

A fin de realizar ensayos preliminares de montaje y adquisición de datos, se elaboró en la CNEA un primer panel (*panel de ingeniería*) con igual dimensión y configuración del *panel de vuelo*. El ensamble de este último se realizó en la empresa brasileña DIGICON, la cual trabaja en colaboración con el INPE en el desarrollo de paneles solares para usos espaciales. Para ello, se enviaron a Brasil 44 celdas, elaboradas sobre obleas de dos espesores, 450 y 250 μm , y dos intervalos de resistividades, 4-6 y 7-12 Ωcm . Parte de las celdas fueron utilizadas para pruebas de soldadura y 11, de 250 μm de espesor, fueron seleccionadas por DIGICON para elaborar el panel. La elaboración fue llevada a cabo utilizando una base de aluminio calado (que combina rigidez y bajo peso), y elementos calificados para usos espaciales (elastómero, vidrios, cables y conectores de plata, equipo de soldadura por "welding").

[†] Profesional de la Carrera del Personal de Apoyo del CONICET.

* Alumnas de la Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - U.B.A..

En la Tabla 1 se dan las características eléctricas de las celdas utilizadas para el panel de vuelo: tensión de circuito abierto (V_{ca}), densidad de corriente de cortocircuito (J_{cc}), factor de llenado o "fill factor" (FF), y eficiencia (η). Estos parámetros fueron obtenidos antes del armado del panel, mediante iluminación con 3 lámparas de tungsteno, halógenas, de 250 W, con reflector dicróico, las cuales pueden considerarse como un *sol artificial* clase C (norma ASTM E927). La intensidad de la radiación fue fijada en un valor equivalente a una radiación solar de 1 kW/m^2 , utilizando una celda de referencia. Para el cálculo de la eficiencia y de la densidad de corriente de cortocircuito, se utilizó el área activa de las celdas.

TABLA 1: Características eléctricas de las celdas utilizadas para el panel de vuelo.

Celda	V_{ca} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
1	515	32,4	0,73	12,2
2	508	32,9	0,70	11,7
3	500	31,6	0,71	11,3
4	517	31,6	0,76	12,4
5	519	32,4	0,72	12,1
6	514	32,1	0,73	12,0
7	513	31,9	0,75	12,3
8	515	32,1	0,75	12,4
9	512	29,1	0,76	11,3
10	508	32,7	0,72	11,8
11	519	32,4	0,77	13,0

Ambos paneles (de vuelo y de ingeniería) fueron sometidos a un ciclado térmico en cámara de vacío, en los laboratorios de Invap S.E., en Villa Golf, prov. de Río Negro. El control de la experiencia se realizó mediante un termistor ubicado en el panel de vuelo. El proceso completo duró aproximadamente 36 horas y constó de 4 ciclos entre -25 C y 80 C , con mesetas de 2 horas cada una. La presión en la cámara se mantuvo durante casi toda la experiencia por debajo de 10^{-5} torr. Las pruebas eléctricas realizadas luego del ciclado térmico no mostraron diferencias con las mediciones previas. Asimismo, no se detectaron visualmente problemas ocasionados por dicho ciclado.

En la Tabla 2 se dan los valores de algunos parámetros característicos de las celdas individuales y de la interconexión de 8 celdas, ya integradas en el panel, antes y después del ciclado térmico. En este caso la medición fue realizada al sol con incidencia aproximadamente normal. La intensidad de la radiación solar fue estimada utilizando la misma celda de referencia que en el caso del sol artificial.

TABLA 2: Características eléctricas del panel de vuelo.

Celda	Antes del ciclado térmico		Después del ciclado térmico		
	Rad. (kW/m ²)	V_{ca} (mV)	Rad. (kW/m ²)	V_{ca} (mV)	J_{cc} (mA/cm ²)
1-8 (en serie)	0,97	4270	0,95	4250	30,5
9	-----	-----	0,95	522	28,1
10	0,97	526	0,95	520	30,1
11	0,97	539	0,95	530	31,0

DESARROLLO DE TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

El funcionamiento de una celda solar de silicio cristalino, constituida básicamente por una estructura n^+pp^+ , depende de varios parámetros, entre los cuales la longitud de difusión de portadores minoritarios en la región de la base (L_d) es uno de los más importantes. Este parámetro está directamente relacionado con la vida media de dichos portadores (τ), a través de la movilidad. Ambos parámetros dependen fuertemente del proceso de elaboración, pudiendo aumentar o disminuir en las diferentes etapas del mismo [3]. Una buena caracterización de la celda requiere, entonces, la medición de L_d o τ sobre el dispositivo final. A continuación, se describen las técnicas desarrolladas al respecto.

Vida media de portadores minoritarios

La medición de la vida media de portadores minoritarios se realiza usualmente por medio de técnicas basadas en el decaimiento de la fotoconductividad, la tensión de circuito abierto o la corriente de cortocircuito. Uno de los métodos de medición más usuales es el conocido como OCVD (decaimiento de la tensión de circuito abierto) [4-6]. El mismo consiste básicamente en introducir en el dispositivo a estudiar un desbalance de portadores, típicamente mediante un pulso de luz, para analizar posteriormente el decaimiento de la tensión hasta su estado de equilibrio. Si bien este decaimiento depende de la vida media de portadores minoritarios, su dependencia con otras características del dispositivo (capacidades de juntura, transición y difusión, la resistencia paralelo, la corriente de recombinación) dificulta la interpretación de los resultados y, en particular, la determinación de dicha vida media.

Existe una variante de la técnica OCVD [6] que permite simplificar el análisis del decaimiento en una celda solar. En ella, la celda se polariza en directa mediante iluminación continua, aplicando luego un pulso de luz y observando el decaimiento de la tensión de circuito abierto cuando el pulso se interrumpe abruptamente. Utilizando esta variante, se realizaron mediciones de diversas celdas solares bajo diferentes condiciones. En paralelo, se están desarrollando modelos teóricos, basados en desarrollos analíticos y en simulaciones numéricas, a fin de analizar los resultados experimentales. Estos modelos muestran que, bajo ciertas condiciones, algunos de los efectos que influyen sobre la curva de decaimiento en la técnica OCVD, son factibles de ser apantallados.

El arreglo experimental utilizado consiste en dos conjuntos de LEDs de AsGa ($\lambda=632\text{nm}$) de alta eficiencia. Uno de ellos provee la iluminación continua, polarizando en directa la celda a medir y definiendo la componente continua de la tensión de circuito abierto (V_c). El segundo conjunto modifica la iluminación de base en forma pulsada y permite analizar el decaimiento de dicha tensión luego del corte abrupto de cada pulso. La señal obtenida se observa en un osciloscopio, determinándose a partir de ella la constante de tiempo correspondiente (τ). Realizando una serie de mediciones para diferentes valores de V_c , se observa un comportamiento decreciente de τ para V_c creciente, en buen acuerdo con el modelo teórico correspondiente. Como se mencionó previamente, el valor asintótico de τ para valores altos de V_c permite estimar la vida media de portadores minoritarios en la base (τ).

Hasta el momento, se han realizado evaluaciones preliminares de celdas de distintas características: convencionales elaboradas en la CNEA y comerciales, con difusiones localizadas y bifaciales. Los primeros resultados para celdas elaboradas en la CNEA a partir de obleas comerciales muestran valores de vida media de portadores minoritarios en la base de aproximadamente $5\mu\text{s}$, lo que corresponde a una longitud de difusión de alrededor de $140\mu\text{m}$.

Longitud de difusión de portadores minoritarios

Iluminación del dispositivo desde la cara posterior

Existen numerosos métodos para la determinación de L_d . La mayoría de ellos utilizan la corriente o tensión producida por el exceso de portadores generados por la absorción de ondas electromagnéticas [7] o de un haz de electrones [8]. Entre los primeros, el método de Jain, Singh y Kotnala (JSK) [9] utiliza iluminación de la celda desde la cara posterior de la misma. Se desarrolló [10] un nuevo método para la medición de L_d basado en la dependencia de la corriente de cortocircuito con el espesor de la oblea, ante iluminación de la celda desde su cara posterior. El método propuesto puede considerarse una variante del JSK y presenta, a diferencia de otros, las ventajas de no requerir iluminación monocromática y de no necesitar la medición o estimación de otros parámetros característicos del dispositivo (por ej., la velocidad de recombinación superficial y el dopaje del emisor), reduciendo a un mínimo los requerimientos de equipamiento para realizar la medición.

La densidad de corriente de cortocircuito (J_{cc}) para una celda del tipo n^+pp^+ , iluminada por su cara p^+ con radiación monocromática, está determinada por una expresión que depende en forma complicada de numerosos parámetros [9], entre los que cabe destacar: el espesor de la celda (d), la potencia de la radiación incidente, el coeficiente de absorción, la longitud de difusión en la base y las características del emisor p^+ . Sin embargo, se puede demostrar [10] que para valores de L_d menores que d y longitudes de onda claramente por debajo del ancho del *gap* del silicio (por ej., menores que $0,8\mu\text{m}$), J_{cc} tiene una dependencia exponencial con d , de la forma: $\exp(-d/L_d)$. En estas condiciones, L_d puede determinarse en forma sencilla a partir de la pendiente del $\ln(J_{cc})$ en función de d . Cabe destacar que, dentro del rango de validez de la aproximación realizada, esta técnica puede utilizarse con luz no monocromática.

Se realizaron las primeras experiencias de laboratorio a fin de verificar la aplicabilidad del método propuesto. Se elaboraron celdas solares n^+pp^+ sobre obleas de silicio cristalino de diferentes espesores (entre 160 y $500\mu\text{m}$), obtenidas por pulido químico de obleas de origen comercial. Dado que las celdas debían ser medidas con iluminación desde su cara posterior, se depositó en ésta una grilla en lugar de un contacto completo. La respuesta eléctrica se obtuvo iluminando las celdas por su cara posterior mediante lámparas halógenas con reflector dicróico. El gráfico del $\ln(J_{cc})$ en función del espesor de las celdas muestra correlación según lo esperado teóricamente, pero con una dispersión relativamente importante, posiblemente debida a problemas de repetibilidad en el proceso de elaboración.

Dispositivos con difusiones localizadas

La difusión de dopantes en áreas localizadas de una oblea de silicio cristalino es una técnica usual en la elaboración de dispositivos electrónicos y de celdas solares de alta eficiencia. Utilizando como base este tipo de dispositivos, se desarrolló un modelo que permite utilizar celdas con difusiones localizadas para la determinación de dos parámetros fundamentales: L_d y la velocidad de recombinación superficial (S).

Se consideraron celdas del tipo n^+pp^+ con difusiones lineales n^+ (que cubren una fracción pequeña de la superficie) en su cara frontal, separadas entre sí una distancia D . El modelo teórico utilizado para estudiar el problema asocia estas celdas a otras más sencillas con estructura simple pn^+ , iluminadas por la zona p , lo que permite realizar una aproximación unidimensional. En estas condiciones, puede asociarse la distancia desde el lugar de absorción de un fotón hasta la zona n^+ más cercana, en la celda con difusión localizada, con el espesor w de la zona p del modelo. En consecuencia, diferentes zonas de absorción en la primera corresponden a valores de w variando entre 0 y la mitad de la separación entre emisores ($D/2$). La

corriente de cortocircuito de la celda original se calcula entonces por superposición de las corrientes correspondientes a celdas pn^+ con diferentes espesores.

Mediante el modelo descrito, se estudió la dependencia de J_{cc} con D y su relación con los parámetros L_d y S , para diferentes tipos de iluminaciones (monocromáticas y diversos espectros). Utilizando expresiones analíticas [7] para la corriente de las celdas pn^+ y longitudes de onda para las cuales la absorción de la radiación se produce cerca de la superficie (típicamente, menores que 500nm), se obtienen expresiones relativamente sencillas que permiten estimar L_d y S mediante un ajuste numérico de la curva de J_{cc} en función de D .

Se elaboraron celdas con difusiones lineales de 50 μ m de espesor y diferentes interlineados entre 100 y 1300 μ m. La técnica de elaboración utilizada es básicamente la descrita en Ref. [1], con la única diferencia de que se utilizan canaletas abiertas por fotolitografía en una máscara de SiO_2 para generar difusiones de dopante en áreas localizadas. Las mediciones de J_{cc} vs. D , utilizando iluminación que abarca longitudes de onda entre 350 y 500nm, muestran correlación en buen acuerdo con el modelo teórico, permitiendo estimar los parámetros mencionados. Los resultados obtenidos en celdas elaboradas sobre obleas de silicio cristalino crecido en la CNEA dan valores de L_d de aproximadamente 110 μ m.

CONCLUSIONES

Se concluyó con resultados satisfactorios la etapa de elaboración de un panel solar para la realización de la primer experiencia de celdas solares argentinas en el espacio. Actualmente, el satélite en el cual será incluido dicho panel se encuentra a la espera de un lanzador para su puesta en órbita. Más allá de la aplicación específicamente espacial, la producción de celdas en CNEA en pequeñas series permitió verificar la repetibilidad de los procesos utilizados, así como identificar las etapas críticas relacionadas con la elaboración en serie, obteniéndose sistemáticamente celdas con eficiencias de alrededor del 12%.

Utilizando el panel de ingeniería y las celdas sobrantes, se realizará una caracterización eléctrica más cuidadosa. Asimismo, se están programando experiencias de bombardeo con partículas (principalmente, protones y electrones) de energías similares a las existentes en el ámbito espacial, para hacer los primeros estudios de daño por radiación y sus consecuencias sobre las características eléctricas del dispositivo. Para ello, se utilizará equipamiento disponible en la CNEA.

En cuanto a las técnicas de medición de vida media y longitud de difusión de portadores minoritarios desarrolladas, los resultados obtenidos hasta el presente resultan promisorios, especialmente teniendo en cuenta el escaso equipamiento requerido para su realización. Estas técnicas resultarán de utilidad, no sólo para evaluar el daño por radiación en experiencias de bombardeo por partículas sobre dispositivos destinados a usos espaciales, sino también para analizar el funcionamiento de celdas solares convencionales para usos terrestres. Los próximos pasos en este tema estarán orientados a comparar los resultados obtenidos con los tres métodos propuestos.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

1. C.G. Bolzi et al., Desarrollo de celdas solares de silicio cristalino en la CNEA: eficiencias superiores al 14%. *Actas de la XVIII Reunión de Trabajo de la ASADES*, San Luis, en prensa (1995).
2. P.A. Basore, J.M. Gee, M.E. Buck, W.K. Schubert y D.S. Ruby, Simplified high-efficiency silicon cell processing. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **34**, 91 (1994).
3. R. Lagos, A. Moehlecke, J. Alonso, I. Tobias y A. Luque, Contamination and gettering evaluation by lifetime measurements during single crystal cell processing. *Proc. First World Conf. Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, pág. 1629, Hawai (1994).
4. S.R. Lederhandler y L.J. Giacoletto, Measurement of minority carrier lifetime and surface effects in junction devices. *Proc. IRE* **43**, 477 (1955).
5. R. Gopal, R. Dwivedi y S.K. Srivastava, Theoretical investigations of experimentally observed open-circuit voltage decay (OCVD) curves. *Solid-State Electronics* **26**, 1101 (1983).
6. A.R. Moore, Carrier lifetime in photovoltaic solar concentrator cells by the small-signal open-circuit decay method. *RCA Review* **40**, 549 (1980).
7. P.K. Basu y S.N. Singh, On the determination of minority carrier diffusion length in the base region of n^+pp^+ silicon solar cells using photoresponse methods. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **33**, 317 (1994).
8. W. Zimmermann. *Phys. Stat. Sol.* **12**, 671 (1972).
9. G.C. Jain, S.N. Singh y R.K. Kotnala, Diffusion length determination in n^+pp^+ structure based silicon solar cells from the intensity dependence of the short circuit current for illumination from the p^+ side. *Solar Cells* **8**, 239 (1983).
10. G.L. Venier, J.C. Plá, C.G. Bolzi y J.C. Durán, La corriente de cortocircuito de una celda solar y su dependencia con el espesor: un nuevo método para la determinación de la longitud de difusión. Enviado a *Energías Renovables y Medio Ambiente* (1996).