



## SIMULACIONES NUMÉRICAS DE CELDAS DE SILICIO CRISTALINO PARA USO ESPACIAL

S. M. Yang<sup>1</sup>, J. Plá<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Atómico Bariloche  
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)

<sup>2</sup> Grupo Energía Solar, Departamento de Física, Centro Atómico Constituyentes  
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) - CONICET  
Av. General Paz 1499, (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina  
Tel. (011)6772-7128 - Fax (011)6772-7121; [www.tandar.cnea.gov.ar](http://www.tandar.cnea.gov.ar),  
e-mail: [yang@tandar.cnea.gov.ar](mailto:yang@tandar.cnea.gov.ar), [jpla@tandar.cnea.gov.ar](mailto:jpla@tandar.cnea.gov.ar)

**RESUMEN:** Se efectuaron simulaciones numéricas de celdas de silicio para uso espacial con estructura  $n^+pp^+$  y  $n^+p$ , espesores entre 100  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$ , con y sin pasivación de la cara posterior (c.p.), resistividades de la base entre 1  $\Omega\text{cm}$  y 10  $\Omega\text{cm}$ , y en condiciones BOL (*beginning of life*) y EOL (*end of life*). Se analizó la influencia de la estructura de la celda, el espesor de la misma y el daño por radiación sobre la respuesta eléctrica de los dispositivos. Se encontró, entre otros resultados, que la pasivación es más efectiva que el BSF (*back surface field*) para combatir la recombinación superficial; además, una vez pasivada la c.p., el BSF introduce sólo una pequeña mejora. Asimismo, se observó el aumento de la resistencia al daño por radiación con la resistividad de la base  $\rho_b$ , en paralelo a una cierta disminución de la eficiencia con  $\rho_b$ .

**Palabras clave:** celdas solares de Si, aplicaciones espaciales, simulación numérica

### INTRODUCCIÓN

El rendimiento de una celda solar puede depender de varios factores tales como el tipo y calidad del material, la estructura de la celda, la geometría y dimensiones de la misma, el proceso de fabricación del dispositivo, el tratamiento antirreflectante, las condiciones de uso, etc. La suma de los efectos de todos estos elementos determinan el comportamiento eléctrico y electrónico de la celda reflejándose, entre otros parámetros, en la corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ), la tensión a circuito abierto ( $V_{OC}$ ) y la eficiencia de conversión ( $\eta$ ).

En el Grupo de Energía Solar (GES) del Centro Atómico Constituyentes se trabaja en celdas de silicio cristalino, de estructura  $n^+pp^+$ , con capa dieléctrica como tratamiento antirreflectante, y orientadas al uso espacial. De esta forma, entre los factores mencionados con anterioridad, los más fácilmente modificables para estudiar su influencia en las características eléctricas de estas celdas son, entre otros, el espesor, la presencia o no del *back surface field* (BSF), la pasivación o no de la cara posterior (c.p.), y el tipo y calidad del silicio.

Por lo tanto, con el fin de hacer un análisis que permita la introducción de mejoras en el proceso de fabricación actualmente en uso, se realizaron simulaciones numéricas con el programa PC-1D tratando de emular las celdas potencialmente reproducibles en los laboratorios del GES.

### SIMULACIONES NUMÉRICAS

El programa empleado para las simulaciones fue el PC-1D (Basore y Clugston, 1997), el cual requiere la configuración de una serie de parámetros que caractericen a la celda y a la radiación utilizada para iluminar el dispositivo. Los más relevantes son:

- *Área del dispositivo:* 1  $\text{cm}^2$ .
- *Superficie* no texturada.
- *Reflectancia frontal externa* de un archivo externo.
- *Reflectancia óptica interna:*  
*frontal:* especular, 75 % para el primer rebote, 92 % para los subsiguientes rebotes  
*posterior:* especular,  $r_p$  para todos los rebotes.
- *Base:* Si tipo p, resistividad  $\rho_b$ , concentración de dopante  $N_A$ , tiempo de vida media  $\tau_b$  (asociada a la recombinación en volumen), longitud de difusión  $L_b$ .
- *Emisor frontal:* tipo  $n^+$ , perfil gaussiano, concentración superficial de dopante  $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , profundidad de juntura 0,445  $\mu\text{m}$ , resistencia de capa 57,4  $\Omega/\text{sqr}$ , velocidad de recombinación superficial  $S_f=100 \text{ cm/s}$  (superficie pasivada).
- *Emisor posterior:* tipo  $p^+$ , perfil de función error complementario, concentración superficial de dopante  $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , profundidad de juntura 1,889  $\mu\text{m}$ , resistencia de capa 317,4  $\Omega/\text{sqr}$ , velocidad de recombinación superficial  $S_r$ .
- *Excitación:* intensidad de la radiación incidente: 1,299  $\text{kW/m}^2$ ; espectro: AM0; temperatura: 28  $^{\circ}\text{C}$ .

La reflectancia frontal externa corresponde a valores de reflectividad obtenidos mediante simulaciones numéricas de la estructura antirreflectante  $MgF_2$ -vidrio- $TiO_2$ - $SiO_2$ -Si según la optimización para celdas encapsuladas realizada en el GES (Barrera y Plá, 2003). De esta forma, se generó un archivo de reflectividad como entrada para el PC1D por medio del programa Optical (Centurioni, 2005) utilizando los valores óptimos de los espesores de  $MgF_2$  y  $TiO_2$  correspondientes a un espesor de  $SiO_2$  pasivante de 10nm (ver Figura 1).

Para la intensidad de la radiación incidente se usa como base la irradiancia estándar de  $1,367 \text{ kW/m}^2$ ; a ella se le resta un 5 % para considerar la sombra producida por la grilla frontal. Las celdas analizadas tienen espesores  $d=100 \mu\text{m}$ ,  $140 \mu\text{m}$ ,  $180 \mu\text{m}$ ,  $220 \mu\text{m}$ ,  $260 \mu\text{m}$  y  $300 \mu\text{m}$ . El emisor posterior de tipo  $p^+$  se activa o se desactiva según se quiera una estructura  $n^+pp^+$  (con BSF) o bien  $n^+p$ , respectivamente. La velocidad de recombinación superficial de la c.p.  $S_r$  puede ser  $100 \text{ cm/s}$  o  $1 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$  según se desee una superficie posterior pasivada o no, respectivamente.

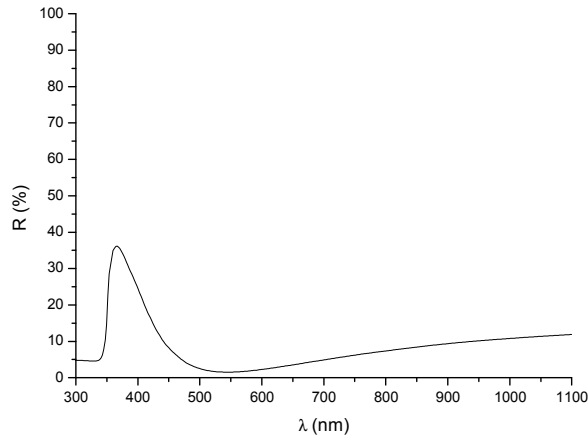


Figura 1: Reflectividad de la cara frontal simulada para la estructura  $MgF_2$ -vidrio- $TiO_2$ - $SiO_2$ , representativa de una celda de Si encapsulada, para los valores óptimos de espesores de  $MgF_2$  (110.41nm) y  $TiO_2$  (35.03nm) con un espesor de  $SiO_2$  de 10nm. El espesor del vidrio utilizado es de  $150 \mu\text{m}$ .

Para la reflectancia interna de la c.p. se emplea  $r_p = 80 \%$  cuando está pasivado,  $r_p = 70 \%$  cuando no está pasivado y no hay BSF, y  $r_p = 50 \%$  cuando no está pasivado pero hay BSF. Los dos primeros valores fueron estimados de simulaciones ópticas empleando el ya mencionado programa Optical, y reflejan situaciones reales de celdas con estructura Si- $SiO_2$ -metal y Si-metal, respectivamente. El último valor de  $r_p$  fue estimado por medio de simulaciones numéricas, usando el PC-1D, a fin de ajustar la respuesta espectral medida de una celda de silicio típica elaborada en el GES, que se estructura como Si-SiAl-Al en su c.p..

En la Tabla I se exponen las características de la base de las celdas estudiadas.

$\rho_b$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$N_A$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\tau_b$ [ $\mu\text{s}$ ]	$L_b$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	$1,513 \cdot 10^{16}$	8,30 (BOL)	149,40
1	$1,513 \cdot 10^{16}$	2,79 (EOL)	86,59
2	$7,216 \cdot 10^{15}$	9,53 (BOL)	168,60
2	$7,216 \cdot 10^{15}$	3,42 (EOL)	101,00
10	$1,368 \cdot 10^{15}$	20,50 (BOL)	263,80
10	$1,368 \cdot 10^{15}$	7,81 (EOL)	162,80

Tabla I: Características de la base de las celdas estudiadas.

Los valores de  $\tau_b$  fueron inferidos en base a mediciones de la vida media efectiva de los portadores minoritarios de celdas elaboradas en los laboratorios del GES y posteriores simulaciones con el PC-1D de la técnica de OCVD para medir vidas medias (Bruno et al, 1999). De esta forma se pudo estimar el valor de  $\tau_b$  BOL, es decir, antes de ser expuesto a ningún tipo de daño por radiación (al comienzo de su vida útil). Para calcular el valor de  $\tau_b$  EOL, es decir, luego de haber sufrido daño por radiación y cumplida su vida útil, se recurrió al siguiente modelo (Alurralde et al., 2004, Morita et al., 1997, Yamaguchi et al., 1999):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_r \cdot \phi \quad (1)$$

donde  $\tau_0$  es la vida media antes de sufrir el daño (BOL),  $\phi$  es la fluencia (cantidad de partículas por unidad de área) recibida y

$\kappa_{\tau}$  es el coeficiente de daño. Éste último fue calculado como  $\kappa_{\tau} = \kappa_L \cdot D_n^{-1}$ , luego de obtener los datos necesarios de la literatura (Yamaguchi et al., 1999, Kahn et al, 2003, Yamaguchi et al., 1996, Faith, 1973, Yamaguchi, 2001, Taylor et al., 1998, Hovel, 1978). Para las simulaciones se consideró que las celdas recibieron una fluencia de  $\phi = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  de protones de 10 MeV de energía. Esta fluencia produce un daño equivalente a la originada por la exposición al espectro espacial de partículas presentes en una órbita circular de alrededor de 660 km, durante un período de 8 años (Alurralde, 2004, 2005).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Dependencia con el espesor

En la figura 2 se presentan algunos resultados representativos de la eficiencia de conversión en función del espesor para celdas con  $\rho_b = 1 \text{ } \Omega\text{cm}$  y  $\rho_b = 10 \text{ } \Omega\text{cm}$ .

En primer lugar, se observa en los datos obtenidos de las simulaciones que las celdas sin BSF ni pasivación de la c.p. mejoran todos los parámetros eléctricos estudiados ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y  $\eta$ ) con el aumento del espesor, tanto para los distintos valores de  $\rho_b$  como de  $\tau_b$ . Esto se debe a que la estructura en cuestión no previene la alta velocidad de recombinación superficial en la c.p., haciendo que la pérdida de portadores por este mecanismo predomine sobre la recombinación en el volumen para espesores comparables a  $L_b$ ; de esta forma, la tasa de recombinación total resulta mayor mientras menor sea el espesor de la celda.

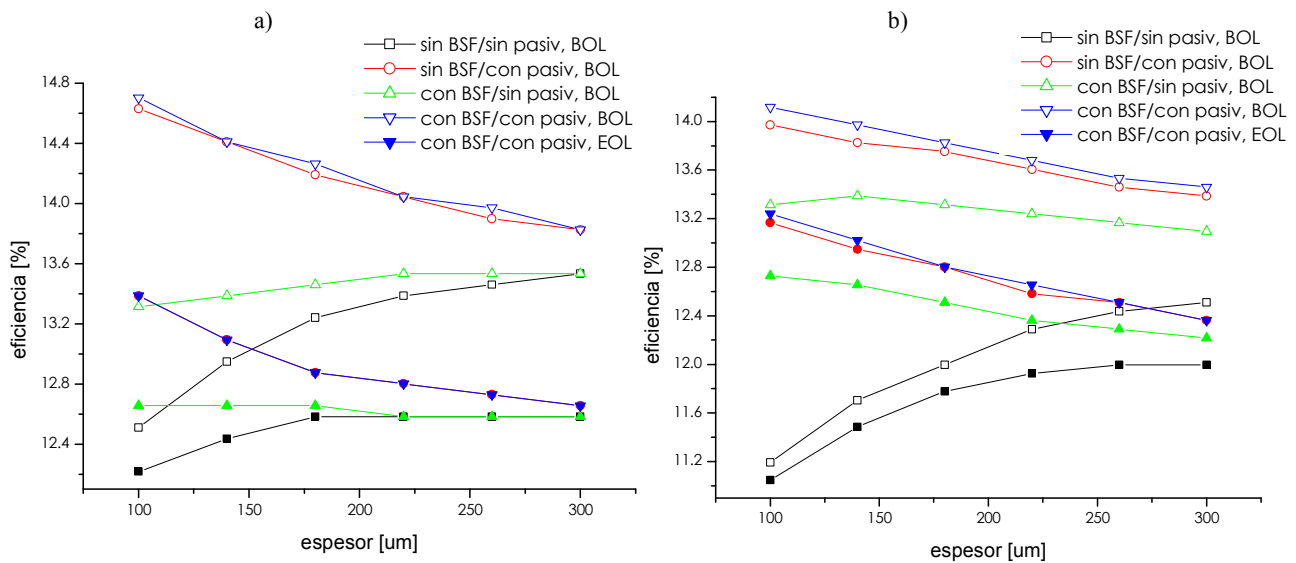


Figura 2: a) Eficiencia en función del espesor para la celda de  $\rho_b = 1 \text{ } \Omega\text{cm}$ , BOL (símbolos huecos) y EOL (símbolos rellenos) b) ídem para  $10 \text{ } \Omega\text{cm}$ , BOL (símbolos huecos) y EOL (símbolos rellenos)

En cambio, para el caso en que se tiene BSF pero no pasivación, los tres parámetros eléctricos permanecen prácticamente invariantes con el espesor (con una dispersión máxima del 1,5 %) para  $\rho_b = 1$  y  $2 \text{ } \Omega\text{cm}$ . En el caso de  $\rho_b = 10 \text{ } \Omega\text{cm}$  se aprecia una leve dependencia con el espesor (en especial para la  $V_{OC}$ ), que en general implica una mejora de las características con la disminución del espesor.

Para los casos en que la c.p. está pasivada, se observan valores de  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y  $\eta$  muy parecidos para el caso con BSF y sin BSF, aunque en el primero se obtienen los valores más altos. El comportamiento que caracteriza a las celdas pasivadas es el de mejorar sus características eléctricas a medida que la celda tiene menor espesor. Este comportamiento puede encontrar su origen en el hecho de que la pasivación de la c.p. prácticamente suprime la recombinación superficial, tornando más importante las consecuencias de la recombinación en el volumen, cuyo efecto es aumentar la pérdida de portadores a medida que se aumentan las dimensiones del dispositivo. Además, se puede notar que los parámetros eléctricos entre las estructuras que tienen y no BSF se parecen aún más en los casos EOL.

Finalmente, se advierte que las diferencias en las características eléctricas entre las distintas estructuras aumentan al disminuir el espesor. Es decir, la influencia de la pasivación y/o el BSF en la respuesta de la celda es tanto más notable cuanto más delgada es la celda, mientras que en algunos casos son prácticamente indistinguibles para espesores grandes ( $d = 300 \text{ } \mu\text{m}$ ). Podría inferirse que asintóticamente (a espesores grandes) las distintas estructuras, para un mismo  $\rho_b$  y  $\tau_b$ , convergen a un mismo valor para cada parámetro eléctrico. Dicha convergencia parece darse más lentamente mientras mayor sea la resistividad de la base. Asimismo, se aprecia que las diferencias por la estructura del dispositivo son mayores para el caso BOL que para el EOL.

<sup>1</sup>  $\kappa_{\tau} = 2,376 \cdot 10^{-11} \text{ } \mu\text{s}^{-1}\text{cm}^2$  para  $\rho = 1 \text{ } \Omega\text{cm}$ ,  $\kappa_{\tau} = 1,874 \cdot 10^{-11} \text{ } \mu\text{s}^{-1}\text{cm}^2$  para  $\rho = 2 \text{ } \Omega\text{cm}$ , y  $\kappa_{\tau} = 7,920 \cdot 10^{-12} \text{ } \mu\text{s}^{-1}\text{cm}^2$  para  $\rho = 10 \text{ } \Omega\text{cm}$

### Estructura de la celda

En primer término se observa que, como era de esperarse, las características eléctricas son mejores cuando hay pasivación de la c.p. que cuando no la tiene, y cuando tienen BSF que cuando éste no se encuentra. No obstante, la diferencia que presentan los respectivos pares de casos de caras posteriores pasivadas (con y sin BSF) es muy pequeña, como se mencionó con anterioridad. Este comportamiento conduce a pensar que el tratamiento más efectivo contra la recombinación superficial sobre la c.p. es la pasivación y no el BSF. Más aún, una vez que la superficie está pasivada, los beneficios producidos por el BSF son mínimos.

Como datos representativos, se muestra en la figura 3 la mejora porcentual de la eficiencia definida como

$$mejora = \frac{PE - PE_0}{PE_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

donde PE es el valor del parámetro eléctrico con la estructura de interés y PE<sub>0</sub> es el valor para la celda sin BSF ni pasivación; los datos se presentan en función del espesor para  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$  y  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  en el caso BOL.

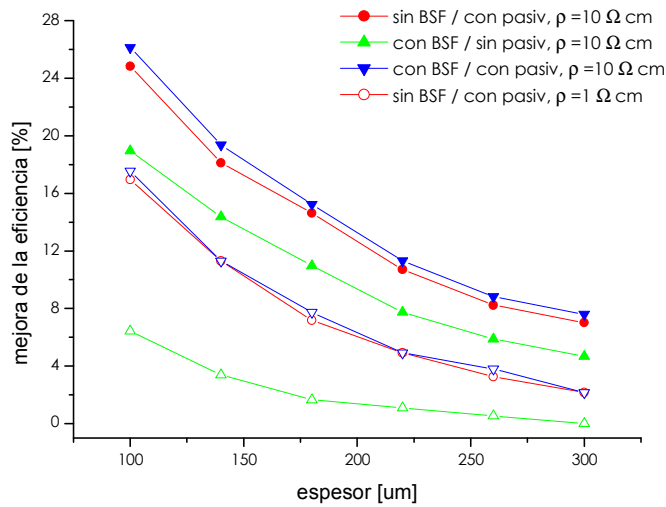


Figura 3: Mejora de la eficiencia en función del espesor para  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  (símbolos rellenos) y  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$  (símbolos huecos), en el caso BOL

Por otra parte, la mejora producida por alguno de los tratamientos (o la combinación de ambos) contra la recombinación superficial es mucho más amplia mientras menor sea el espesor de la celda. Este efecto positivo (respecto al caso sin pasivación ni BSF) crece con la resistividad de la base y, para un mismo  $\rho_b$ , y disminuye con el daño por radiación (con la disminución de  $\tau_b$ ). Por ejemplo, la mejora de la eficiencia para una celda de  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  BOL, 100 µm de espesor, con BSF y pasivación es de aproximadamente 26 %, mientras que para una celda de  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$  EOL, con espesor mayor a 220 µm, con BSF y sin pasivación es prácticamente nula.

Tanto la pasivación como el BSF producen una mejoría de los parámetros eléctricos respecto al caso en que la estructura de la celda no está orientada a mitigar la recombinación superficial, pero la magnitud de este mejoramiento depende de la resistividad de la base. Para  $\rho_b = 1$  y  $2 \Omega\text{cm}$  la mejora relativa de la  $I_{SC}$  es mayor a la de la  $V_{OC}$ , por lo menos en un factor dos. Sin embargo, para  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  la mejoría de  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$  son del mismo orden. Para todos los casos estudiados, la mejora de la eficiencia es aproximadamente igual a la suma de las mejoras de  $I_{SC}$  y de  $V_{OC}$ .

### Efecto del daño por radiación

Con el objeto de estudiar el efecto del daño por radiación, se reprodujeron las secuelas del uso en órbita de las celdas bajo una fluencia de  $\phi = 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  de protones de 10 MeV recalculando la vida media final (EOL) de los portadores. Para ello se recurrió al modelo dado por la ecuación (1).

Se simuló entonces numéricamente el comportamiento de las distintas celdas, antes de sufrir ningún daño (BOL) y luego de ser expuestas a la radiación (EOL). Es importante aclarar que se trabajó bajo la condición de que el único efecto de la radiación sobre las celdas es la degradación de la vida media de los portadores en el volumen. Si se comparan los casos BOL y EOL, se encuentra que la dependencia con el espesor de la celda y con la estructura de la misma se mantiene cualitativamente igual, aunque los valores EOL de los parámetros eléctricos son claramente menores.

Se define la degradación porcentual de un parámetro eléctrico producida por la radiación como:

$$deg \text{ radiación} = \frac{PE_{BOL} - PE_{EOL}}{PE_{BOL}} \cdot 100\% \quad (3)$$

donde  $PE_{BOL}$  es el valor del parámetro eléctrico para el caso BOL y  $PE_{EOL}$  es el valor para el caso EOL. En la figura 4 se presenta la degradación porcentual de la eficiencia en función del espesor para celdas de  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$  y  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  como muestra representativa de los resultados obtenidos.

Análogamente a los valores de los parámetros eléctricos, la degradación por radiación es mayor para las celdas pasivadas que las que no tienen pasivación, y mayor para las que tienen BSF frente a las que no tienen dicha capa. Además, la degradación de  $I_{SC}$  es mayor a la de  $V_{OC}$  para los casos  $\rho_b = 1$  y  $2 \Omega\text{cm}$ ; en cambio, la relación es inversa para  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$ . No obstante, para todos los valores de resistividad de la base se halla que la suma de los porcentajes de degradación de  $I_{SC}$  y de  $V_{OC}$  arroja aproximadamente el valor de la degradación porcentual de  $\eta$ .

Un hecho muy importante es que la degradación de la eficiencia es menor mientras mayor es la resistividad de la base, alcanzando un valor máximo del orden del 9 % (correspondiente a celdas con pasivación y  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$ ). A pesar de este comportamiento, que refleja mayor resistencia al daño por radiación por parte de las celdas de mayor resistividad, también se encuentra que a mayor  $\rho_b$  disminuyen la eficiencia y la  $V_{OC}$ , aunque aumenta la  $I_{SC}$ . Aún así, la diferencia EOL de la eficiencia entre las celdas de  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$  y  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  es ínfima (más pequeña mientras más angosta la celda y mejores los tratamientos contra la recombinación superficial).

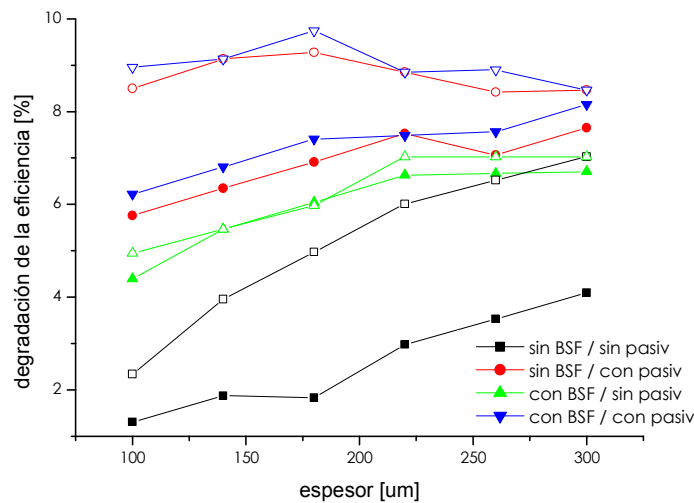


Figura 4: Degradación de la eficiencia debida al daño por radiación en función del espesor para  $\rho_b = 10 \Omega\text{cm}$  (símbolos rellenos) y  $\rho_b = 1 \Omega\text{cm}$  (símbolos huecos)

En el momento de evaluar el diseño de las celdas para uso espacial se toman en consideración los valores EOL de los distintos parámetros eléctricos. Por lo tanto, en base al análisis previo, no se pueden inferir conclusiones definitivas sobre la resistividad de base recomendable. El hecho de que las celdas con menor  $\rho_b$  generen eficiencias EOL levemente mayores compite con su menor resistencia al daño por radiación, que se manifiesta independientemente de la estructura y el espesor del dispositivo. Por ejemplo, una medida conservadora para prevenir cualquier percance o contratiempo que conduzca a una exposición de la celda a una radiación mayor a la empleada para los cálculos sería utilizar celdas de alta resistividad de base, ya que éstos garantizan mayor resistencia al daño por radiación. Por lo tanto, dado que las diferencias en los valores EOL de  $\eta$  encontradas entre las celdas con distintas  $\rho_b$  es pequeña, para definir el diseño sería recomendable hacer un análisis más exhaustivo según cada caso particular, teniéndose en cuenta también otros factores que no sean la eficiencia de conversión. En la Tabla II se presentan algunos valores representativos de los parámetros eléctricos obtenidos en las simulaciones realizadas; estas corresponden a celdas con BSF, pasivación, y  $d=180 \mu\text{m}$ .

$\rho_b$ [ $\Omega\text{-cm}$ ]	condición	$V_{OC}$ [mV]	$I_{SC}$ [mA]	$\eta$ [%]
1	BOL	613,4	41,2	14,26
1	EOL	594,4	38,8	12,87
10	BOL	580,6	43,1	13,83
10	EOL	552,9	41,8	12,80

Tabla II: Parámetros eléctricos resultantes de las simulaciones, para celdas con BSF, pasivadas y de  $180 \mu\text{m}$  de espesor, para  $\rho_b=1 \Omega\text{cm}$  y  $\rho_b=10 \Omega\text{cm}$

## CONCLUSIONES

Se efectuaron simulaciones numéricas con el programa PC-1D de celdas de silicio para uso espacial con estructura  $n^+pp^+$  y  $n^+p$ , espesores entre  $100 \mu\text{m}$  y  $300 \mu\text{m}$ , la cara posterior pasivada y sin pasivar, resistividades de la base de  $1 \Omega\text{cm}$ ,  $2 \Omega\text{cm}$  y  $10 \Omega\text{cm}$ , y en condiciones BOL y EOL. A partir de estas simulaciones, se estudió la respuesta eléctrica de los dispositivos ante las distintas combinaciones de los parámetros mencionados.

Se observó que tanto los valores de los parámetros eléctricos ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  y  $\eta$ ) como la degradación por radiación de los mismos son mayores cuando hay pasivación de la cara posterior que cuando no la hay, y cuando la celda tiene BSF que cuando no lo tiene. Asimismo, la pasivación de la cara posterior es claramente más efectiva que la presencia del BSF para controlar la recombinación superficial de los portadores minoritarios. Además, una vez que la celda está pasivada, el agregado del BSF implica una mejora mínima de las características eléctricas respecto a la obtenida con cualquiera de los dos tratamientos por separado.

Por otra parte, se estableció que la mejora introducida por la pasivación y/o el BSF en la respuesta de la celda es mayor mientras menor sea el espesor del dispositivo, y que dicha mejora aumenta con  $\rho_b$  y con  $\tau_b$ . A espesores grandes, las diferencias entre las distintas estructuras parecen desaparecer asintóticamente. Dicha convergencia aparenta ser más lenta a mayor resistividad de la base. El comportamiento de las celdas con el espesor y con la estructura son cualitativamente iguales entre los casos BOL y EOL, lo cual se debe a que el modelo utilizado para cuantificar el daño por radiación propone que el deterioro se refleja únicamente en la disminución de la vida media de los portadores minoritarios  $\tau_b$ . La resistencia al daño por radiación aumenta con la resistividad de la base, independientemente de la estructura y el espesor de la celda. Este comportamiento compite con el hecho de que a mayor resistividad de la base menor eficiencia y  $V_{OC}$ , aunque  $I_{SC}$  aumenta ligeramente. No obstante, la diferencia EOL de la eficiencia es mínima entre las distintas resistividades.

Las características eléctricas dependen, en gran medida, del proceso de recombinación de los portadores minoritarios. El resultado de la competencia entre los dos posibles mecanismos, la recombinación en el volumen y la superficial, explica buena parte de los comportamientos encontrados. Así, por ejemplo, el predominio de la recombinación en volumen o en superficie hace que los parámetros eléctricos empeoren o mejoren, respectivamente, con el espesor. La preponderancia de uno u otra forma de recombinación depende, entre otros parámetros, de la resistividad de la base, de la longitud de difusión en la base y, en especial, de la estructura de la celda.

De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible establecer los siguientes criterios para la mejora del proceso de fabricación de celdas de Si cristalino para aplicaciones espaciales en el GES: si bien no es en principio determinante, sería conveniente utilizar obleas de partida de alta resistividad ( $10 \Omega\text{cm}$ ); resulta indiscutiblemente mejor fabricar celdas de estructura  $n^+p$  con la cara posterior pasivada que celdas  $n^+p$  sin dicha pasivación; finalmente, es aconsejable trabajar con sustratos delgados, en lo posible de espesor menor que  $200 \mu\text{m}$ .

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda de Julio Durán en la discusión e interpretación de varios de los resultados obtenidos en este trabajo.

## REFERENCIAS

- Alurralde, M., Tamasi, M.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. (2004). Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 82, 531-542.
- Alurralde, M. (2004). Method using the primary knock-on atom spectrum to characterize electrical degradation of monocrystalline silicon solar cells by space protons. *Journal of Applied Physics* 95, 3391-3396.
- Alurralde, M. (2006). Comunicación privada.
- Basore, P.A. y Clugston, D.A. (1997). PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers. *Proceedings of the 26th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference* 207-210.
- Barrera, M. y Plá, J., (2003). Películas dieléctricas antirreflectantes-pasivantes en celdas solares de silicio cristalino para uso espacial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7, 9.07-9.12.
- Bruno, C.J., Martínez Bogado, M.G., Plá, J.C., Durán, J.C. (1999). Determination of the minority carrier lifetime in solar cells: a novel biased OCVD technique. *Physica Status Solidi (a)* 174, 231-238.
- Centurioni, E. (2005). Generalized matrix method for calculation of internal light energy flux in mixed coherent and incoherent multilayer. *Applied Optics* 44, 7532-7539.
- Faith, T.J. (1973). Temperature dependence of damage coefficient in electron irradiated solar cells. *IEEE Transactions on Nuclear Science* NS-20, 238-242.
- Hovel, H.J. (1975). *Semiconductors and semimetals (Vol. II, Solar Cells)*, Academic Press Inc. New York, p. 26.
- Khan, A., Yamaguchi, M., Ohshita, Y., Dharmaraso, N., Araki, K., Khanh, V.T., Itoh, H., Ohshima, T., Imaizumi, M., Matsuda, S. (2003). Strategies for improving radiation tolerance of Si space solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 75, 271-276.
- Morita, Y., Ohshima, T., Nashiyama, I., Yamamoto, Y., Kawasaki, O., Matsuda, S. (1997). Anomalous degradation in silicon solar cells subjected to high-fluence proton and electron irradiations. *Journal of Applied Physics* 81, 6491-6493.
- Taylor, S.J., Yamaguchi, M., Yamaguchi, T., Watanabe, S., Ando, K., Matsuda, S., Hisamatsu, T., Kim, S.I. (1998). Comparison of the effects of electron and proton irradiation on  $n^+p$  silicon diodes. *Journal of Applied Physics* 83 4620-4627.
- Yamaguchi, M., Taylor, S.J., Yang, M., Matsuda, S., Kawasaki, O., Hisamatsu, T. (1996). High-energy and high-fluence proton irradiation effects in silicon solar cells. *Journal of Applied Physics* 80, 4916-4920.
- Yamaguchi, M., Khan, A., Taylor, S., Imaizumi, M., Hisamatsu, T., Matsuda, S. (1999). A detailed model to improve the radiation-resistance of Si space solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices* 46, 2133-2138.
- Yamaguchi, M. (2001). Radiation-resistant solar cells for space use. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 68, 31-53.

**ABSTRACT:** Numerical simulations of Si solar cells for space applications were performed. The following cases were considered: structure  $n^+pp^+$  and  $n^+p$ , thickness between 100  $\mu\text{m}$  and 300  $\mu\text{m}$ , passivated and non-passivated rear surface, base resistivities from 1  $\Omega\text{cm}$  to 10  $\Omega\text{cm}$ , and BOL (beginning of life) and EOL (end of life) conditions. The influence of these cell characteristics on the electrical response was analyzed. It was found that, among other results, the passivation of the rear surface is more efficient than the BSF (back surface field) in order to diminish rear surface recombination. Furthermore, once the rear surface is passivated, BSF introduces just a little enhancement. Another result is the improvement of the resistance to radiation damage for higher base resistivity  $\rho_b$ , although BOL efficiency in these cases is a bit lower.

**Keywords:** Si solar cells, space applications, numerical simulation.