

# Determinación de la longitud de difusión de portadores minoritarios en celdas solares mediante iluminación posterior: consideraciones teóricas y resultados experimentales

J.C. PLÁ, C.G. BOLZI, J.C. DURÁN\*, M.J.L. TAMASI

GRUPO ENERGÍA SOLAR - DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
CENTRO ATÓMICO CONSTITUYENTES - COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA  
AVDA. GENERAL PAZ 1499 - 1650 SAN MARTÍN - ARGENTINA  
E-MAIL: duran@cnea.gov.ar

Recientemente, se propuso teóricamente una técnica simple para la determinación de la longitud de difusión de portadores minoritarios en la base de celdas solares de silicio cristalino. La misma está basada en el comportamiento de la corriente de cortocircuito en función del espesor de la oblea, iluminando el dispositivo desde la cara posterior. En el presente trabajo, se estudia experimentalmente la nueva técnica midiendo la corriente de cortocircuito generada por la iluminación posterior en celdas solares de diferentes espesores elaboradas durante un mismo proceso. El modelo teórico se analiza también utilizando el programa de simulación de dispositivos PC-1D. Tanto los resultados experimentales como las simulaciones numéricas muestran una dependencia lineal entre el logaritmo de la corriente y el espesor, en buen acuerdo con el modelo teórico. Se discuten los límites de validez de esta técnica.

Recently, a simple technique for the determination of the minority carriers diffusion length in crystalline silicon solar cells has been theoretically proposed. It is based on the behavior of the short circuit current under rear illumination as a function of the wafer thickness. In the present paper, the new technique is experimentally studied in detail by measuring the rear short circuit current on solar cells of different thickness elaborated in the same process. The theoretical model is also analyzed using the semiconductor modeling program PC-1D. Both experimental results and numeric simulations show a linear dependence between the logarithm of the current and the thickness, in good agreement with the theoretical model. The validity limits of this technique are discussed.

## I. INTRODUCCIÓN

Una buena caracterización de una celda solar requiere la medición precisa de distintos parámetros electrónicos sobre el dispositivo final. Entre ellos, la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la base ( $L_d$ ) es uno de los más importantes.

Existen varios métodos para la determinación de  $L_d$  en celdas solares de silicio cristalino, basados fundamentalmente en la variación de la tensión o la corriente causada por el exceso de portadores generados, usualmente, por la absorción de ondas electromagnéticas<sup>(1, 2)</sup>. Algunos de ellos son sólo válidos cuando la longitud de difusión es apreciablemente menor que el espesor de la base, y casi todos requieren iluminación monocromática y la estimación o medición de otras características (por ejemplo, la respuesta espectral y la velocidad de recombinación superficial).

Recientemente, fue propuesta teóricamente una técnica muy simple y de bajo costo para la determinación de  $L_d$ <sup>(3, 4)</sup>. Esta técnica está basada en el comportamiento de la densidad de corriente de cortocircuito ( $J_{sc}$ ), en condiciones de iluminación sobre la cara posterior, como función del espesor de la celda ( $d$ ). Las principales

ventajas de esta nueva técnica son que bajo ciertas condiciones: (i) la medición de  $J_{sc}$  vs.  $d$  no requiere iluminación monocromática y (ii)  $L_d$  puede ser obtenida por medio de una simple aproximación lineal.

En este trabajo, la nueva técnica es estudiada experimentalmente en detalle midiendo la corriente de cortocircuito producida iluminando la celda desde la cara posterior como función del espesor  $d$ . Los resultados son analizados usando el programa de simulación de dispositivos electrónicos PC-1D<sup>(5)</sup>. Los límites de validez de las aproximaciones realizadas son ampliamente discutidos.

Se elaboraron celdas de silicio cristalino con estructura  $n^+p$  sobre obleas provenientes de lingotes crecidos con la técnica Czochralski, dopadas tipo  $p$  y con espesores en el rango de 200 a 500  $\mu\text{m}$ , utilizando procesos de difusión sencillos. Las curvas de  $J_{sc}$  vs.  $d$  fueron obtenidas iluminando las celdas con un simulador solar simple<sup>(6)</sup>, basado en lámparas de tungsteno halógenas con reflector dicróico, interponiendo filtros a fin de limitar el espectro de radiación a un rango de longitudes de onda apropiado.

\* Autor a quien debe dirigirse la correspondencia.

## II. MODELO TEÓRICO

A continuación, se resume brevemente la formulación teórica que da lugar al método propuesto. El desarrollo completo puede verse en Refs. 3 y 4.

La densidad de corriente de cortocircuito  $J_{sc}$  generada por una celda con estructura  $n^+p$  o  $n^+pp^+$ , de espesor  $d$ , iluminada por su cara posterior con radiación monocromática de longitud de onda  $\lambda$  y potencia incidente  $P_{in}$ , está dada por<sup>(2)</sup>:

$$J_{sc} = \frac{qP_{in}\lambda(1-R_{\lambda})L_d\alpha_{\lambda}}{hc(L_d^2\alpha_{\lambda}^2 - 1)} \exp(-t\alpha_{\lambda}) \times \left\{ \frac{\beta + L_d\alpha_{\lambda}}{\cosh(\frac{d}{L_d}) + \beta \sinh(\frac{d}{L_d})} - \exp(-d\alpha_{\lambda}) \left[ L_d\alpha_{\lambda} + \frac{\cosh(\frac{d}{L_d})}{\sinh(\frac{d}{L_d})} \frac{1}{\sinh(\frac{d}{L_d})(\cosh(\frac{d}{L_d}) + \beta \sinh(\frac{d}{L_d}))} \right] \right\} \quad (1)$$

donde  $t$  es el espesor de la región  $p^+$ ;  $\alpha_{\lambda}$ , el coeficiente de absorción del silicio para una longitud de onda  $\lambda$ ;  $R_{\lambda}$ , la reflectividad de la cara posterior; y  $\beta = S_b L_d / D_n$  (parámetro adimensional), siendo  $D_n$  el coeficiente de difusión en la base  $p$  y  $S_b$  la velocidad de recombinación efectiva en la juntura  $p^+p$ <sup>(1)</sup>.

Si se utilizan espectros de radiación con longitudes de onda  $\lambda < 800\text{nm}$  y  $L_d < 0.6d$ , entonces<sup>(3)</sup>:

$$f'(d) = \frac{\partial}{\partial d} \ln[J_{sc}] \cong -\frac{1}{L_d} \quad (2)$$

En el presente trabajo se muestra que el límite de validez puede extenderse a  $L_d \approx d$ , al menos para casos similares a los considerados en la sección III.

## III. RESULTADOS NUMÉRICOS

A fin de analizar la validez de la ecuación (2) y su independencia del espectro de la radiación electromagnética incidente, se realizaron simulaciones numéricas mediante el programa PC-1D.

Se consideraron celdas solares con distintas características, especialmente en lo que concierne a  $L_d$  y a la velocidad de recombinación superficial. Con el propósito de analizar al problema dentro de las hipótesis del modelo teórico mencionado anteriormente, fueron considerados espectros de iluminación con longitudes de onda menores o iguales a  $0,8\mu\text{m}$ . En particular, fue utilizado un espectro solar AM 1,5 solar truncado en tal longitud de onda (experimentalmente, esta condición se obtiene utilizando un filtro pasa altos).

Como ejemplo, presentamos los resultados obtenidos para celdas de silicio cristalino de estructura  $n^+pp^+$  con una región  $n^+$  de  $38\Omega/\square$  de resistencia de capa y una profundidad de juntura de  $0,3\mu\text{m}$ , y una región  $p^+$  con una profundidad de juntura de  $2,4\mu\text{m}$  y un dopaje superficial de  $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ . La Fig. 1 muestra  $\ln(J_{sc})$  vs.  $d$  para celdas solares de silicio cristalino de  $L_d = 200\mu\text{m}$  y dos velocidades de recombinación superficial  $S_{p^+}$  ( $1000\text{cm/sec}$  y  $10^6\text{cm/sec}$ , valores representativos de superficies pasivadas y no pasivadas, respectivamente) en la región  $p^+$ . Se incluyen valores de espesores hasta  $d = L_d$ .

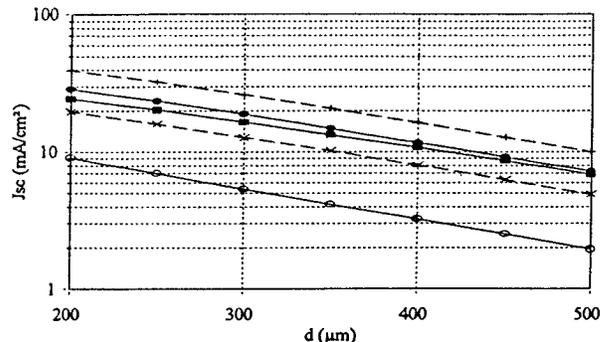


Figura 1: Curvas de  $\ln(J_{sc})$  vs.  $d$  obtenidas con PC-1D, para diferentes espectros de iluminación y dos velocidades de recombinación superficial de la cara posterior ( $S_{p^+}$ ):  $S_{p^+} = 10^3\text{cm/sec}$  y AM1,5 (■),  $S_{p^+} = 10^3\text{cm/sec}$  y AM1,5 truncado (●),  $S_{p^+} = 10^3\text{cm/sec}$  y  $\lambda = 400\text{nm}$  (x),  $S_{p^+} = 10^3\text{cm/sec}$  y  $\lambda = 800\text{nm}$  (+),  $S_{p^+} = 10^6\text{cm/sec}$  y AM1,5 truncado (○).

Se consideran diferentes características de la iluminación: luz monocromática (400, 630 y 800nm) y un espectro AM 1,5 truncado; se muestran también los resultados para el espectro AM 1,5 completo a fines comparativos. En todos los casos la simulación se realizó utilizando una intensidad de radiación de  $1\text{ kW/m}^2$ . Puede verse que  $\ln[J_{sc}]$  muestra una dependencia lineal con  $d$ , y que la pendiente correspondiente es casi independiente de la velocidad de recombinación superficial en la cara posterior y de las características de la iluminación, en buen acuerdo con el modelo teórico presentado en la sección anterior. Además, también fue verificado que la pendiente es independiente de la intensidad de iluminación.

TABLA 1 Valores de  $L_d$  obtenidos por la aproximación lineal de cuadrados mínimos aplicada a curvas  $\ln(J_{sc})$  vs.  $d$  generadas con el PC-1D para, (a)  $200\mu\text{m} < d < 500\mu\text{m}$ , y (b)  $300\mu\text{m} < d < 500\mu\text{m}$ .

$S_{p^+}(\text{cm/s})$	1000				$10^6$			
Iluminación	400 nm	630 nm	800 nm	AM 1,5 tr.	AM 1,5	AM 1,5 tr.	AM 1,5	
$L_d(\mu\text{m})^{(a)}$	216	216	216	216	237	195	243	
$L_d(\mu\text{m})^{(b)}$	209	208	208	208	228	197	247	

La Tabla 1 resume los valores de  $L_d$  obtenidos como  $-1/f'(d)$ , donde la pendiente  $f'(d)$  es calculada por la aproximación lineal de cuadrados mínimos. Los resultados obtenidos muestran diferencias con respecto al valor correcto de  $L_d$  ( $200\mu\text{m}$ ) menores que el 10%, cuando son usados valores de  $d$  entre  $200\mu\text{m}$  y  $500\mu\text{m}$ , y menores que el 5%, cuando  $300\mu\text{m} < d < 500\mu\text{m}$ . Aún para el espectro AM 1,5, el valor obtenido para  $L_d$  podría ser considerado una buena aproximación.

## IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Fueron elaboradas celdas solares bifaciales  $n^+p$  sobre obleas Czochralski tipo  $p$  de origen comercial, con valores de  $d$  en el rango  $200\text{-}500\mu\text{m}$ . El proceso de fabricación utilizado consiste básicamente en tres

pasos<sup>(7,8)</sup>: oxidación, difusión de dopantes y depósito de contactos. Se utilizó oxidación seca para el crecimiento de una capa de SiO<sub>2</sub> de espesor adecuado a fin de enmascarar la difusión del dopante. Además, el SiO<sub>2</sub> actúa como pasivante de la cara posterior. Luego de remover el SiO<sub>2</sub> de la cara frontal, se generó la juntura n<sup>+</sup>p mediante un proceso de difusión de P en un paso, a partir de una fuente líquida de POCl<sub>3</sub>. El contacto frontal, una multicapa de Ti-Pd-Ag, y el posterior de Al-Ti-Ag, fueron depositados por evaporación. Las grillas de contacto se definen mediante técnicas fotolitográficas.

$J_{sc}$  vs.  $d$  se obtiene iluminando las celdas con un simulador solar e interponiendo filtros a fin de truncar el espectro de radiación a un rango apropiado. La Fig. 2 muestra el  $\ln(J_{sc})$  vs.  $d$  para distintos espectros: simulador solar sin filtros y con tres conjuntos de filtros: (a)  $\lambda < 750\text{nm}$  (b)  $\lambda < 600\text{nm}$ , y (c)  $\lambda < 500\text{nm}$ . Puede verse que  $\ln[J_{sc}]$  tiene una dependencia lineal con  $d$ , y que la pendiente correspondiente es prácticamente independiente de las características de la iluminación. La Tabla 2 muestra los valores de  $L_d$  obtenidos por la aproximación lineal de cuadrados mínimos.

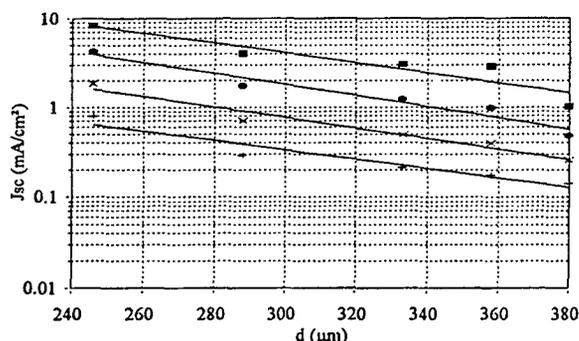


Figura 2: Curvas experimentales de  $\ln(J_{sc})$  vs.  $d$ , para distintos espectros de iluminación: simulador de radiación solar sin filtros (■),  $\lambda < 750\text{nm}$  (●),  $\lambda < 600\text{nm}$  (x), y  $\lambda < 500\text{nm}$  (+), y los correspondientes ajustes por cuadrados mínimos.

TABLA 2 Valores de  $L_d$  obtenidos por la aproximación lineal de cuadrados mínimos aplicada a las curvas experimentales de  $\ln(J_{sc})$  vs.  $d$ , para distintos espectros.

Espectro	Simulador	< 750nm	< 600nm	< 500nm
$L_d$ ( $\mu\text{m}$ )	$80\mu\text{m} \pm 7\%$	$64\mu\text{m} \pm 7\%$	$58\mu\text{m} \pm 9\%$	$61\mu\text{m} \pm 16\%$

## V. CONCLUSIONES

Se verificó experimentalmente un modelo teórico original presentado anteriormente que permite, por medio de la dependencia de la corriente de cortocircuito en condiciones de iluminación sobre la cara posterior de una celda solar con el espesor de la misma, la determinación de la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la región de la base.

La verificación se hizo sobre celdas solares de silicio cristalino de estructura n<sup>+</sup>p para distintas condiciones de iluminación. Asimismo, se realizaron simulaciones numéricas que confirman el modelo, extendiendo además

su límite de validez hasta valores de longitud de difusión similares al espesor de las celdas utilizadas para realizar la medición.

El truncamiento del espectro de iluminación a valores de longitud de onda menores que 800nm resulta suficiente para obtener valores de  $L_d$  con una buena aproximación.

El valor de  $L_d$  obtenido con el espectro completo puede considerarse una estimación razonable que acota superiormente al valor verdadero.

## REFERENCIAS

- 1 - P.K. Basu y S.N. Singh, "On the determination of minority carrier diffusion length in the base region of n<sup>+</sup>pp<sup>+</sup> silicon solar cells using photoresponse methods", Solar Energy Materials and Solar Cells 33, 317 (1994).
- 2 - G.C. Jain, S.N. Singh y R.K. Kotnala, "Diffusion length determination in n<sup>+</sup>pp<sup>+</sup> structure based silicon solar cells from the intensity dependence of the short circuit current for illumination from the p<sup>+</sup> side", Solar Cells 8, 239 (1983).
- 3 - J.C. Durán, G.L. Venier, M.J.L. Tamasi, C.G. Bolzi, J.C. Plá y E.M. Godfrin, "Determination of the diffusion length and surface recombination velocity: two simple methods", Proc. 26th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pág. 195 (1997).
- 4 - G.L. Venier, J.C. Plá, C.G. Bolzi y J.C. Durán, "An alternative method for the determination of the diffusion length in solar cells using rear illumination", enviado a IEEE Transactions on Electron Devices (1997); versión preliminar, "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", Energías Renovables y Medio Ambiente 1, 21 (1996).
- 5 - P.A. Basore y D.A. Clugston, "PC-1D Version 4 for Windows: from analysis to design", Proc. 25th. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pág. 377 (1996).
- 6 - G. Azzaroni, C. Bruno, L. Davidowski y A. Frigerio, "Photovoltaic characterization facilities development", Proc. Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, Argentina, pág. 246 (1992).
- 7 - C.G. Bolzi, C.J. Bruno, E. Campitelli, J.C. Durán, E.M. Godfrin, A. Lamagna, L.M. Merino, J.C. Plá y G.L. Venier, "Estado actual del desarrollo de celdas solares de silicio en la CNEA", Anales de la Asociación Física Argentina 7, 209 (1995).
- 8 - J.C. Plá, E.M. Godfrin y J.C. Durán, "Diseño, elaboración y caracterización de celdas solares de silicio cristalino con textura superficial", Energías Renovables y Medio Ambiente 4, 1 (1998).