

Celdas solares con difusiones localizadas: una alternativa para la determinación de la longitud de difusión

M.J.L. TAMASI, J.C. DURÁN*

GRUPO ENERGÍA SOLAR - DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CENTRO ATÓMICO CONSTITUYENTES
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
AV. GENERAL PAZ KM 6.5 - 1650 VILLA MAIPÚ - ARGENTINA
e-mail: duran@cnea.edu.ar

Se plantea la utilización de celdas solares de silicio cristalino con difusiones localizadas, similares a las utilizadas en celdas de alta eficiencia, para la determinación de dos parámetros fundamentales: la longitud de difusión de portadores minoritarios y la velocidad de recombinación superficial. Se analiza teóricamente el problema mediante un modelo unidimensional y se propone una técnica de medición simple que no requiere iluminación monocromática. Los resultados experimentales obtenidos con celdas elaboradas en la CNEA se encuentran en buen acuerdo con el modelo teórico planteado.

The utilization of crystalline silicon solar cells with localized diffusions, such as those used in high efficiency cells, is proposed for the determination of two essential parameters: the minority carrier diffusion length and the surface recombination velocity. The problem is analyzed by means of a one dimensional theoretical model and a simple technique which does not require monochromatic illumination is presented. Experimental results obtained from solar cells elaborated in the Argentine Atomic Energy Commission (CNEA) are in good agreement with the theoretical model developed.

I. INTRODUCCIÓN

Las celdas solares de silicio cristalino convencionales están constituidas generalmente por un emisor frontal y uno posterior, fuertemente dopados, que cubren toda la superficie de la oblea. La elevada concentración de impurezas en los emisores da lugar a una fuerte recombinación en los mismos (causada principalmente por efecto Auger). Este efecto se puede minimizar reduciendo el volumen de dichos emisores.

Las celdas de alta eficiencia¹⁻³ requieren en cambio de estructuras más complicadas basadas en la difusión de dopantes en determinadas áreas del dispositivo. Estas difusiones localizadas permiten modificar el funcionamiento del dispositivo en varios aspectos, tales como: recombinación en las zonas fuertemente dopadas (modificando en consecuencia la respuesta espectral), resistencias serie asociadas a diferentes regiones de la celda, y sombra producida por la grilla de contacto.

Por otra parte, el funcionamiento de una celda solar depende de muchos parámetros, entre los cuales la longitud de difusión de portadores minoritarios en la base (L_d) es uno de los más importantes, especialmente en celdas de alta eficiencia. Dado que L_d depende fuertemente del proceso de elaboración,⁴ resulta necesario medir este parámetro sobre el dispositivo final.

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.⁵ En general, estos métodos requieren radiación monocromática, como también la medición o estimación de otras características del

dispositivo (en particular, la velocidad de recombinación superficial).

En el presente trabajo, se propone un modelo que permite hacer uso de dispositivos con difusiones localizadas, similares a las utilizadas en celdas de alta eficiencia, para la determinación de dos parámetros fundamentales: la longitud de difusión de portadores minoritarios y la velocidad de recombinación superficial (S). El modelo propuesto no necesita iluminación monocromática y las mediciones correspondientes se realizan con equipamiento simple.

II. MODELO TEÓRICO

Se consideran celdas solares del tipo n^+pp^+ con emisor completo p^+ en la cara posterior y difusiones lineales n^+ en la cara frontal, según se observa en la Fig. 1.

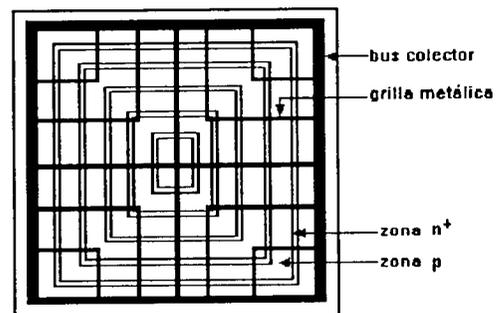


Figura 1: Esquema de la cara frontal de la celda con difusiones localizadas.

* Autor a quien debe dirigirse la correspondencia.

El método de caracterización propuesto se basa en el estudio de la variación de la densidad de corriente de cortocircuito (J_{cc}) con la distancia entre líneas difundidas, y su dependencia con los parámetros L_d y S .

El modelo simplificado que se utiliza para analizar el funcionamiento de las celdas consideradas se muestra esquemáticamente en la Fig. 2. El mismo relaciona la celda con difusiones localizadas con un conjunto de celdas pn^+ iluminadas por la zona p . Un modelo similar ha sido utilizado previamente por P. Verlinden y F. Van de Wiele⁶ para estudiar dispositivos con contactos posteriores interdigitados p^+ y n^+ .

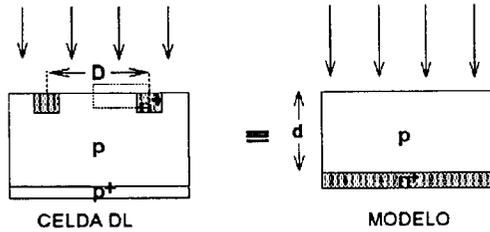


Figura 2: Esquema del modelo utilizado para el estudio de J_{cc} para una celda con difusiones localizadas.

Para longitudes de onda correspondientes al espectro UV y parte del visible (típicamente, menores que 600 nm) la absorción, y en consecuencia la generación de portadores, se produce cerca de la superficie (hasta profundidades inferiores a 2 μm). En estas condiciones, puede asociarse la distancia desde el lugar de absorción de un fotón hasta la zona n^+ más cercana en la celda DL, con el espesor d de la zona p del modelo. En consecuencia, diferentes zonas de absorción en la primera corresponden a valores de d variando entre 0 y $D/2$.

Para una celda n^+pp^+ iluminada por la región p^+ , con un espesor t de la zona p^+ mucho menor que el de la base (d), J_{cc} está dada por:⁵

$$\frac{J_{cc}}{P_{in}} = \frac{q\lambda(1 - R_{b\lambda})}{hc} \left[\frac{L_d\alpha_\lambda}{(L_d^2\alpha_\lambda^2 - 1) \cosh(d/L_d)} \right] \times \exp(-t\alpha_\lambda) \left[\frac{\beta + L_d\alpha_\lambda}{1 + \beta \tanh(d/L_d)} \right], \quad (1)$$

donde P_{in} es la potencia de la radiación monocromática de longitud de onda λ incidente, $R_{b\lambda}$ es la reflectividad de la cara p^+ , α_λ es el coeficiente de absorción, y β es un parámetro relacionado con características superficiales (S) y de volumen (L_d), y con el coeficiente de difusión de electrones en silicio D_n , a través de la ecuación:

$$\beta = S L_d / D_n \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que en el modelo propuesto la celda no cuenta con emisor p^+ ($t=0$) y reagrupando los términos de la Ec. (1) que contienen al cociente d/L_d , se obtiene:

$$J_{cc} = \frac{I_o}{(1 + \beta) \exp(d/L_d) + (1 - \beta) \exp(-d/L_d)}, \quad (3)$$

donde I_o involucra los parámetros incluidos en la Ec. (1) pero es independiente de d .

El cálculo se realiza a partir de la densidad de corriente J_{cc} del modelo que se obtiene de Ec. (3) para distintos espesores de la región p de la celda. La densidad de corriente de cortocircuito de la celda DL se obtiene por superposición de las contribuciones asociadas a los distintos espesores, pudiéndose definir una densidad de corriente de cortocircuito equivalente J_{cce} dada por el promedio de las densidades de corriente de la celda pn^+ con espesores entre 0 y $D/2$:

$$J_{cce} = \frac{1}{D/2} \int_0^{D/2} J_{cc}(y) dy \quad (4)$$

Resolviendo esta integral, se halla la dependencia funcional de J_{cce} con D , con tres parámetros (I_o , L_d y S) que deberán ser ajustados para reproducir resultados experimentales.

III. ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS

El proceso de elaboración de celdas solares utilizado consta básicamente de tres etapas:⁷ oxidación, difusión y depósitos de contactos.

Se utiliza la técnica de oxidación húmeda con el fin de crecer óxidos de espesores apropiados (entre 0,1 y 0,5 μm) para ser utilizados como barrera en el proceso de difusión. Dicha oxidación se realiza a alta temperatura, típicamente entre 850° y 1050°C. El SiO_2 crecido también actúa de pasivador de la superficie. Este óxido se elimina selectivamente en la cara frontal y completamente en la cara posterior, depositando luego en esta última el Al que dará lugar durante la difusión a la formación del emisor p^+ .

Para la creación de los emisores se utiliza un proceso de difusión en un solo paso⁸ que da lugar a una estructura n^+pp^+ . La difusión de P se realiza a partir de una fuente líquida de POCl_3 a 900°C. Durante el mismo proceso se crea simultáneamente el emisor p^+ por difusión del Al depositado previamente en la cara posterior de la oblea.

Los contactos metálicos se depositan por evaporación sucesiva de Ti-Pd-Ag en cámara de vacío. La grilla de contacto es depositada en forma perpendicular a los emisores n^+ , según se muestra en la Fig. 1.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se elaboraron celdas con difusiones localizadas, utilizando una geometría de difusiones lineales en forma de cuadrados concéntricos (Fig. 1), con anchos típicos de 50 μm y diferentes interlineados entre 50 y 1300 μm .

Las celdas solares se caracterizaron mediante la medición de la curva corriente-tensión ($I-V$), iluminadas con tres lámparas halógenas de tungsteno con reflector dicróico, de 250 W, y realizando el barrido en tensión mediante una carga electrónica.⁸ Interponiendo filtros de interferencia apropiados, se limitó el espectro de la radiación al intervalo de longitudes de onda 350-500nm, compatible con el modelo presentado en la Sec. II.

Los parámetros L_d , S e I_o surgen del ajuste por cuadrados mínimos, utilizando la Ec. (4), de los valores de

J_{cc} vs. D medidos en las condiciones mencionadas. La Fig. 3 muestra el resultado de dicho ajuste.

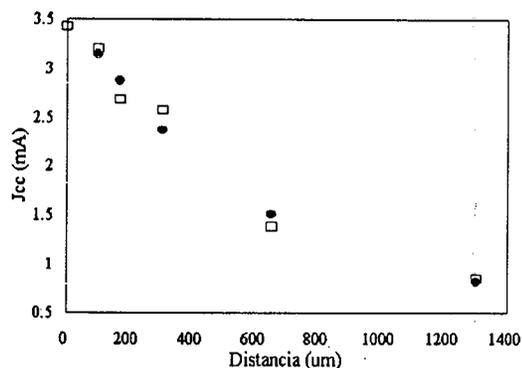


Figura 3: J_{cc} medida (●) e J_{cc} teórica definida por Ec. (4) (□) en función de la separación entre emisores.

La curva teórica de la Fig. 3 corresponde a $L_d = 100 \mu\text{m}$ y $S = 1,5 \times 10^3 \text{ cm/s}$. Teniendo en cuenta la dispersión de los valores experimentales, se puede estimar un error aproximado del 20% en L_d y que la velocidad de recombinación superficial se encuentra entre 0 y $3 \times 10^3 \text{ cm/s}$, siendo estos últimos valores característicos de una superficie pasivada del tipo Si-SiO_2 . Si bien la indeterminación en S es relativamente alta, debe tenerse en cuenta la misma puede alcanzar valores de hasta 10^7 cm/s en interfaces metal semiconductor.

V. CONCLUSIONES

Los valores experimentales de la corriente de cortocircuito en función de la distancia entre líneas difundidas dan una dependencia en buen acuerdo con el modelo teórico planteado. En consecuencia, puede concluirse que el modelo resulta potencialmente promisorio para la determinación de dos parámetros fundamentales de un dispositivo solar, como lo son la longitud de difusión y la velocidad de recombinación superficial. Este modelo presenta la ventaja sobre otras técnicas usuales de un menor requerimiento de equipamiento para su implementación.

Los resultados obtenidos deberán ser comparados con mediciones mediante otras técnicas y utilizando dispositivos con diferentes características en volumen (longitud de difusión) y en superficie (velocidad de recombinación).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a G.L. Venier, C.G. Bolzi y J.C. Plá su colaboración en la elaboración de las celdas, y a C.J. Bruno y L.M. Merino en la caracterización de los dispositivos.

REFERENCIAS

1. K. Fukui, Y. Fukawa, H. Takahashi, K. Okada, M. Takayama, K. Shirasawa y H. Watanabe, Solar Energy Materials and Solar Cells **34**, 111 (1994).
2. J.Zhao, A.Wang y M. Green, Solar Energy Materials and Solar Cells **32**, 89 (1994).

3. M.D. Lammert y R.J. Schwartz, IEEE Transactions on Electron Devices **24**, 337 (1977).
4. R.L. Lagos, A. Moehlecke, J.Alonso, I. Tobías y A. Luque, Proc. First World Conf. Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), Hawaii, EE.UU. de A., pág. 1629 (1994).
5. P.K.Basu, S. N. Singh., Solar Energy Materials and Solar Cells **33**, 317 (1994).
6. P. Verlinden y F. Van der Wiele, Solid State Electronics **26**, 1089 (1983).
7. C.G. Bolzi, C. Bruno, E. Campitelli, J.C. Durán, E.M. Godfrin, A. Lamagna, L.M. Merino, J.C. Plá y G.L. Venier, Anales AFA **7**, en prensa (1995).
8. P.A. Basore, J.M. Gee, M.E. Buck, W.K. Schubert y D.S. Ruby, Solar Energy Materials and Solar Cells **34**, 91 (1994).
9. G. Azzaroni, C. Bruno, L. Dawidowski y A. Frigerio, Proc. Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, Argentina, pág. 246 (1992).