

CELDAS SOLARES DE SILICIO MONOCRISTALINO: DISEÑO DE CONTACTOS Y PRIMERAS ETAPAS DE SU ELABORACION

G.L. Venier, C.G. Bolzi y J.C. Durán

Comisión Nacional de Energía Atómica
Departamento Fuentes Renovables y
Uso Racional de la Energía
Avda. Libertador 8250 - 1429 Buenos Aires

Resumen

Se presenta un método para determinar los parámetros óptimos de una celda solar, en particular en lo que se refiere al diseño de la grilla de contacto y su relación con el dopaje del emisor y la profundidad de juntura.

El método propuesto utiliza el programa PC-1D de simulación unidimensional de dispositivos para el cálculo de la curva I-V de la celda sin grilla de contacto, a partir de la cual se obtienen mediante un ajuste numérico los parámetros del circuito equivalente. Se aplica a celdas solares de silicio con diferentes diseños de la grilla. En cada caso, se obtienen los valores óptimos del factor de transparencia y de las dimensiones de los dedos y del bus colector de la grilla metálica.

En cuanto a la parte experimental, se muestran los primeros resultados obtenidos en la elaboración de contactos óhmicos y de grillas metálicas.

1 Introducción

El diseño de una celda fotovoltaica debe tener en cuenta una serie de factores relacionados especialmente con la recombinación de portadores minoritarios y con las pérdidas de potencia por disipación óhmica. En este sentido y dado que la resistencia serie juega un papel importante en la determinación de la eficiencia de la celda, la grilla de contacto frontal y la profundidad de la juntura deben ser cuidadosamente seleccionadas.

En este trabajo se propone un método para determinar los valores óptimos de la profundidad de juntura y el factor de transparencia de la grilla frontal (tanto del bus cuanto de los dedos metálicos), teniendo en cuenta, entre otros factores, la concentración de dopantes y la velocidad de recombinación de portadores minoritarios en superficie. El modelo presentado incluye en forma

aproximada y dentro de un planteo cuasi-unidimensional las diferentes velocidades de recombinación superficial asociadas con una interfase semiconductor-metal (fracción de superficie cubierta por la grilla) y con una superficie pasivada con óxido.

La utilización de los resultados teóricos obtenidos para la elaboración de celdas fotovoltaicas a nivel de laboratorio, así como la verificación experimental del método propuesto, requiere alcanzar un buen control de la difusión del dopante (típicamente, fósforo) que forma la juntura y de la técnica de fotolitografía para el depósito de la grilla de contacto.

2 Optimización del emisor y de la grilla metálica

El método presentado es una extensión del publicado en Refs. [1,2]. Utiliza el programa PC-1D de simulación unidimensional de dispositivos para el cálculo de la curva I-V de la celda sin grilla de contacto, a partir de la cual se obtienen mediante un ajuste numérico los parámetros del circuito equivalente. El proceso de optimización, que introduce los efectos relacionados con la grilla, tiene en cuenta la influencia del factor de transparencia de la misma sobre la corriente de recombinación del diodo, incluyendo dos velocidades de recombinación superficiales diferentes correspondientes a las zonas del semiconductor sin y con contactos metálicos (zonas pasivada y no pasivada, respectivamente).

El método considera que la corriente que circula a través de la celda es la superposición de las corrientes fotogenerada y de saturación:

$$J = J_{il}F - J_d(V_j), \quad (1)$$

donde V_j es la tensión en la juntura ($V_j = V + Jr_s$), J_{il} es la corriente intrínseca fotogenerada, F es el factor de transparencia y r_s es la resistencia serie intrínseca (en Ωcm^2). J_{il} , J_d y r_s dependen de la profundidad de juntura y de los factores de transparencia del bus, F_b , y de los dedos, F_d ($F = F_b * F_d$). Con respecto a la profundidad de juntura, se define un parámetro adimensional β definido como el cociente entre la profundidad real y una de referencia.

Se define la eficiencia como:

$$\Gamma = \frac{JV}{P_i} \longrightarrow \Gamma = \Gamma(F_b, F_d, V_j, \beta), \quad (2)$$

donde P_i es la potencia de la radiación solar por unidad de área. Esta eficiencia puede ser evaluada en función de cuatro variables independientes (V_j , F_b , F_d y β). Para optimizar la eficiencia con respecto a cada variable, se plantean las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial V_j} = 0 \implies V_j = \left[2r_s + \left(\frac{\partial J_d}{\partial V_j} \right)^{-1} \right] [J_{il}F - J_d] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_b} = 0 \implies F_b = \frac{\left(\frac{\partial J_d}{\partial V_j} \right)^{-1} \frac{\partial J}{\partial F_b} + J_d}{\frac{\partial r_s}{\partial F_b} J_{il}} + \frac{J_d}{J_{il}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_d} = 0 \implies F_d = \frac{\left(\frac{\partial J_d}{\partial V_j} \right)^{-1} \frac{\partial J}{\partial F_d} + J_d}{\frac{\partial r_s}{\partial F_d} J_{il}} + \frac{J_d}{J_{il}} \quad (5)$$

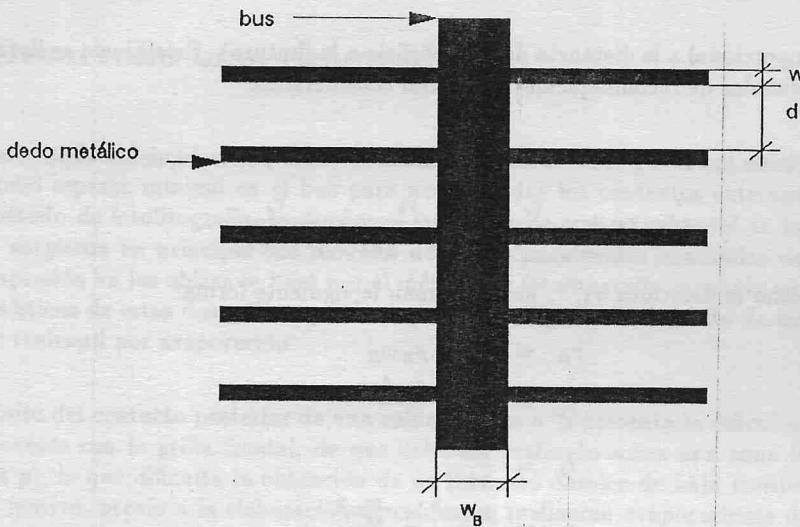


Figura 1: Grilla de contacto considerada

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \beta} = 0 \Rightarrow (V_j - 2r_s J) \frac{\partial J}{\partial \beta} = J^2 \frac{\partial r_s}{\partial \beta} \quad (6)$$

Se aplica el modelo propuesto a una celda n^+p cuadrada de silicio cristalino con emisor pasivado, y una grilla como muestra la Fig. 1. Se consideran dos valores de velocidad de recombinación superficial para caracterizar la superficie pasivada ($S = 10^3 \text{ cm/s}$) y la cubierta por metal ($S = 5 \times 10^6 \text{ cm/s}$). En consecuencia:

$$J_d(V_j) = [F J_{0p} + (1 - F) J_{0n}] \left(e^{\frac{V_j}{V_T}} - 1 \right) + \frac{V_j}{r_{sh}} \quad (7)$$

donde J_{0p} y J_{0n} son las corrientes de saturación del diodo para las superficies pasivada y no pasivada, respectivamente.

Del mismo modo, se considera a la corriente fotogenerada J_{it} como una combinación de ambas zonas:

$$J_{it} = F J_{itp} + (1 - F) J_{itn} \quad (8)$$

El programa de simulación PC-1D se utiliza para obtener las corrientes de saturación y fotogenerada para diferentes profundidades de junta. A fin de obtener una expresión analítica que permita optimizar simultáneamente la grilla de contacto y el emisor, se propone un modelo sencillo para describir el comportamiento de dichas corrientes en función de β :

$$J_{it} = A * \beta^2 + B * \beta + C \quad (9)$$

$$J_0 = a * \beta + \frac{b}{\beta} + c \quad (10)$$

Los dos primeros términos de la corriente de saturación corresponden, respectivamente, a las contribuciones debidas al volumen del emisor (proporcional a β) y a la recombinación en superficie

(inversamente proporcional a la distancia de la superficie a la juntura). Este ajuste se lleva a cabo para las dos velocidades de recombinación superficial consideradas.

La resistencia serie de la celda puede ser caracterizada entonces por la siguiente expresión:

$$r_s = r_B + \frac{r_c}{(1 - F_d)} + \frac{r_b}{(1 - F_b)} + \frac{r_e}{(1 - F_d)^2} \quad (11)$$

Para una celda como la descrita, r_b , r_c and r_d toman la siguiente forma:

$$r_B = r_{cB} + \rho_B w_B \quad (12)$$

$$r_c = r_{cf} + \frac{\rho_m A}{3h} \quad (13)$$

$$r_b = \frac{\rho_m A}{12H} \quad (14)$$

$$r_e = \frac{r_{ee} w^2}{12} = \frac{r_{ee}^0 w^2}{12\beta} \quad (15)$$

donde, r_{cB} y r_{cf} son las resistencias de contacto específicas de los contactos posterior y frontal; w , h y d son el ancho, la altura y la distancia entre dedos de la grilla, H es la altura del bus colector; ρ_b , r_{ee} y ρ_m son las resistividades de base, emisor y metal; y w_b es el espesor de la base.

Se obtuvieron valores óptimos de V_j , F_b , F_d y β para una celda convencional n^+p con un espesor de $300 \mu m$ y una resistividad de base de $0.15 \Omega cm$. Se utilizó un perfil de dopaje gaussiano con una concentración superficial de $5 \times 10^{19} cm^{-3}$. Se consideraron dos anchos distintos para los dedos metálicos (100 y $200 \mu m$) y dos alturas diferentes del bus (20 y $200 \mu m$).

Se analizó la variación de la eficiencia con la profundidad de juntura, obteniéndose un valor máximo de aproximadamente 13 % (fig. 2). Puede apreciarse que la performance de la celda es prácticamente insensible a la profundidad de juntura en un amplio rango de valores.

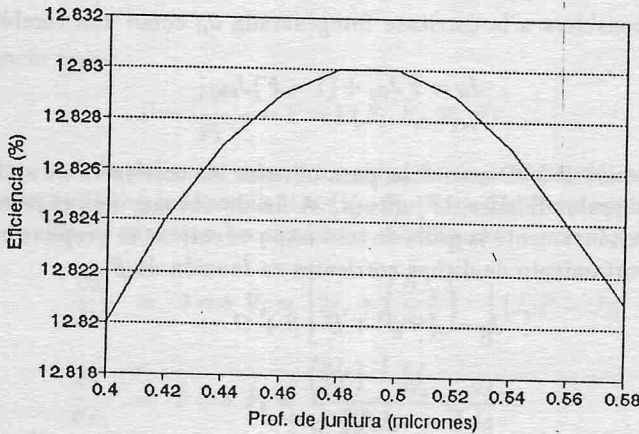


Figura 2: Eficiencia de la celda solar considerada en función de la profundidad de juntura

3 Desarrollo experimental

De los resultados obtenidos en el modelo teórico, y teniendo en cuenta requerimientos experimentales como espesor mínimo en el bus para poder soldar los contactos exteriores, y limitaciones en el método de fotolitografía, se diseñaron las grillas de contacto frontal de las celdas. De este diseño, surgieron en principio dos modelos de grillas para celdas cuadradas de 2.5 cm de lado, cuya impresión en las obleas se hará por el método de fotolitografía conocido como "lift-off". Las características de estas dos grillas, pueden verse en la Fig. 1. El depósito de las capas de Ti, Pd y Ag se realizará por evaporación.

El depósito del contacto posterior de una celda de tipo n^+p presenta la dificultad, a diferencia de lo que ocurre con la grilla frontal, de que debe ser realizado sobre una zona levemente dopada (la zona p), lo que dificulta la obtención de un contacto óhmico de baja resistencia de contacto. Por tal motivo, previo a la elaboración de celdas, se realizaron evaporaciones de Al sobre obleas cortadas de distintos lingotes de silicio monocristalino, crecidos en la División Energía Solar de la CNEA, con orientaciones $\langle 100 \rangle$ y $\langle 111 \rangle$, tipo p y con resistividades del orden de 4 a 5 Ωcm . La interfase así generada presenta características rectificantes por tratarse de una barrera Schottky. Luego de un recocido a temperatura cercana al punto eutéctico del Al-Si, se logró un contacto óhmico (ver Fig. 3) debido a la formación de una juntura pp^+ por difusión de Al en Si. Posteriormente, a fin de obtener un contacto estable y soldable, se realizarán depósitos sucesivos de Ti, Pd y Ag sobre la película de Al.

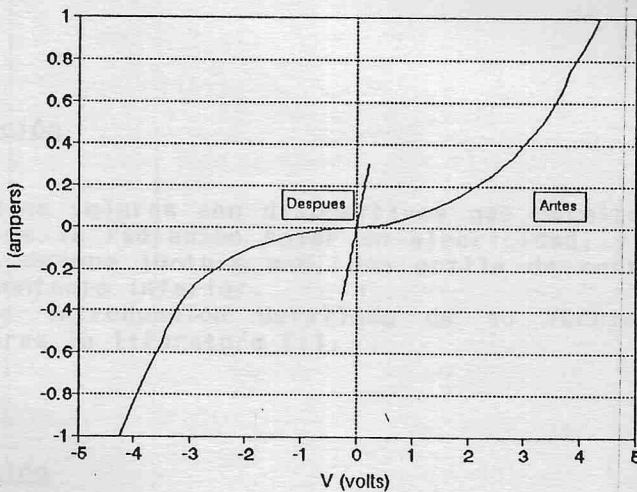


Figura 3: Curva característica I-V de una juntura Al-Si antes y después del recocido

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración de Cristian Bruno en todo lo relacionado con la técnica de fotolitografía y de Hugo Grahmann por su apoyo en lo referente a evaporación.

Referencias

- [1] E. Sánchez y G.L. Araújo, *Solar Cells* 19, 139 (1986).
- [2] J.C. Durán, G. Venier y R. Weht, *Solar Cells* 31, 497 (1991).