

# OPTIMIZACION DE LA PROFUNDIDAD DE JUNTURA Y DEL DOPAJE DEL EMISOR EN CELDAS SOLARES DE SILICIO\*

J.C.Durán y R.Weht

## RESUMEN

Las celdas solares convencionales están constituidas básicamente por un semiconductor extrínseco (típicamente, silicio tipo  $p$ ) con un emisor frontal y, eventualmente, uno posterior fuertemente dopados (usualmente, silicio  $n^+$  y  $p^+$ , respectivamente). El dopaje y la profundidad de los emisores influyen en forma fundamental sobre el funcionamiento de la celda y, en especial, sobre la eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica, dado que determinan la resistencia serie y, en consecuencia, las pérdidas óhmicas en dicho emisor. Asimismo, influyen sobre la corriente fotogenerada a través de la recombinación de portadores de carga debida a la alta concentración de impurezas.

En este trabajo se analiza la variación de la eficiencia de una celda solar en función del dopaje y de la profundidad de la juntura del emisor frontal, lo que permite definir criterios para la optimización del dispositivo para diferentes características de la grilla de contacto y ante diferentes intensidades de la radiación solar incidente. Para los casos considerados, se observa que la profundidad óptima varía entre  $0,1$  y  $1,0 \mu\text{m}$ , dependiendo del dopaje del emisor y de las características de la grilla de contacto. Asimismo, se concluye que los valores máximos de eficiencia se obtienen para dopajes entre  $4 \times 10^{19}$  y  $8 \times 10^{19}$  átomos/ $\text{cm}^3$ .

## 1- INTRODUCCIÓN

Las celdas solares convencionales están constituidas básicamente por un semiconductor extrínseco (típicamente, silicio tipo  $p$ ) con un emisor frontal y, eventualmente, uno posterior fuertemente dopados (usualmente, silicio  $n^+$  y  $p^+$ , respectivamente), según se observa en la Fig. 1. Esta configuración da lugar a la formación de una o dos zonas de carga espacial que permiten la recolección de los portadores de carga generados por la radiación solar incidente sobre el dispositivo. El dopaje y la profundidad del emisor influyen en forma fundamental sobre el funcionamiento de la celda y, en especial, sobre la eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica, dado que determinan la resistencia serie y, en consecuencia, las pérdidas óhmicas en dicho emisor.

Por lo expuesto precedentemente, resulta sumamente importante realizar un diseño correcto del emisor a fin de optimizar el funcionamiento de la celda para una aplicación determinada. Una celda convencional tiene típicamente un emisor de una profundidad de aproximadamente  $0,5 \mu\text{m}$  y un dopaje en la superficie de  $10^{20}$  átomos/ $\text{cm}^3$ . Estos valores influyen sobre la curva de corriente en función de la tensión (curva  $I-V$ ) en diversas formas, resultando su elección de un compromiso entre efectos contrapuestos. Al aumentar el dopaje o la profundidad se incrementa la recombinación de

\*Comisión Nacional de Energía Atómica, Depto. Fuentes Renovables y Uso Racional de la Energía, División Energía Solar, Avda. Libertador 8250, 1429 Buenos Aires

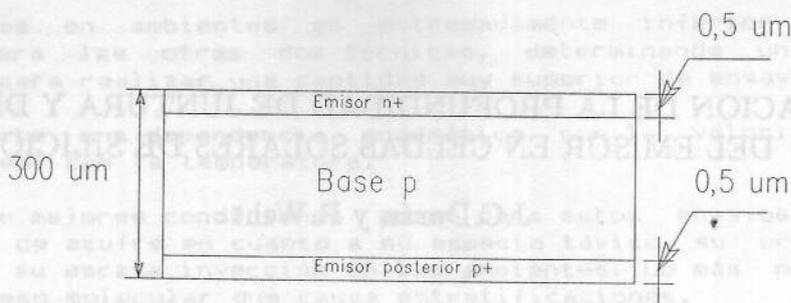


Figura 1: Corte esquemático de una celda solar con emisores frontal y posterior. Los valores de espesor de la celda y de profundidad de los emisores son indicativos.

portadores de carga, a la vez que se reducen las pérdidas óhmicas al disminuir la resistencia serie del emisor.

En este trabajo se analiza la variación de la eficiencia de una celda solar en función del dopaje y de la profundidad de la juntura del emisor frontal, lo que permite definir criterios para la optimización del dispositivo para diferentes características de la grilla de contacto y ante diferentes intensidades de la radiación solar incidente.

## 2.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El cálculo de la eficiencia de una celda fotovoltaica se realiza utilizando el programa de simulación de dispositivos PC-1D [1], juntamente con un modelo de optimización de la grilla metálica de contacto [2]. A partir del primero se obtiene la curva I-V, la cual bajo ciertas hipótesis puede considerarse descrita por la expresión<sup>1</sup>:

$$J = X J_f F - J_d(V_j),$$

donde  $V_j$  es la tensión sobre la juntura ( $V_j = V + J r_s$ ),  $J_f$ , la corriente intrínseca generada por la radiación solar incidente,  $X$ , el factor de concentración,  $F$ , el factor de transparencia de la grilla metálica y  $r_s$ , la resistencia serie específica (en  $\Omega \text{cm}^2$ ) introducida por la base, los emisores y la grilla de contacto. Se supone, además, que la corriente del diodo  $J_d(V_j)$  está dada por:

$$J_d(V_j) = J_{01} \left( e^{\frac{V_j}{V_T}} - 1 \right) + J_{02} \left( e^{\frac{V_j}{2V_T}} - 1 \right) + \frac{V_j}{r_p},$$

donde  $J_{01}$  y  $J_{02}$  son las corrientes de saturación en oscuridad (esencialmente, corrientes de recombinación),  $r_p$ , la resistencia paralela, y  $V_T = \frac{kT}{q}$ , siendo  $k$ ,  $T$  y  $q$ , la constante de Boltzmann, la temperatura de la celda y la carga del electrón, respectivamente. La utilización de los dos exponenciales permite incluir efectos de alta y baja inyección.

A continuación se describen brevemente el programa PC-1D y el método de optimización de la grilla metálica mencionado previamente.

<sup>1</sup>En adelante, todas las corrientes representan densidades de corriente por unidad de área y se identifican con la letra  $J$ .

PC-1D [1] es un programa muy versátil que permite analizar las propiedades de transporte de portadores de carga (electrones y huecos) en diversos dispositivos semiconductores, como por ejemplo capacitores MOS, transistores bipolares y celdas fotovoltaicas. Este programa utiliza un modelo unidimensional para resolver el sistema de 5 ecuaciones diferenciales acopladas que definen el problema, y permite calcular, entre numerosas propiedades, la curva característica de corriente vs tensión de celdas solares iluminadas.

Entre los diversos parámetros que deben especificarse para definir el dispositivo y su funcionamiento, caben destacar los siguientes:

**Parámetros del material:** Conjunto de parámetros característicos del material considerado (silicio), en particular en lo referente a la recombinación de portadores de carga.

**Modelo de movilidad de portadores:** Conjunto de parámetros que definen la movilidad de los portadores minoritarios y mayoritarios, en función del dopaje y de la temperatura.

**Condiciones de contorno en las superficies:** Velocidad de recombinación de portadores en ambas superficies de la celda.

**Perfil de dopaje:** Características del dopaje en la base y en los emisores.

**Vida media de portadores:** Parámetros que definen la vida media de los portadores minoritarios.

**Intensidad y espectro de la radiación solar**

En este trabajo, se utilizan los parámetros predefinidos en el PC-1D, modificándose únicamente los dopajes de la base y del emisor de la celda, como también la intensidad de la radiación solar incidente, a fin de analizar la optimización de la profundidad de la juntura bajo condiciones de radiación concentrada.

## III.- Optimización de la grilla metálica de contacto

El modelo de optimización de la grilla de contacto propuesto en [2] considera que la celda puede ser descrita por la Ec. 1. Se define la eficiencia como:

$$\Gamma = \frac{JV}{P_i X} \longrightarrow \Gamma = \Gamma(F, X, V_j), \quad (3)$$

donde  $P_i$  la potencia de la radiación incidente por unidad de área sin concentración (típicamente,  $1000 \text{ W/m}^2$ ).

Se puede optimizar la eficiencia con respecto a cada una de las variables, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

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

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

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

En el presente trabajo se utilizan sólo las dos primeras ecuaciones, dado que no se optimiza respecto al factor de concentración  $X$ . Para la resolución de dichas ecuaciones acopladas se utilizó un método numérico iterativo.

La resistencia serie que figura en las Ecs. 4 puede caracterizarse mediante la siguiente expresión:

$$r_s = r_b + \frac{r_c}{(1-F)} + \frac{r_e}{(1-F)^2},$$

con  $F = 1 - w/d$ . Los parámetros  $r_b$ ,  $r_c$  y  $r_e$  están dados por:

$$r_b = r_{cb} + \rho_b w_b$$

$$r_c = r_{cf} + \frac{1}{f} \frac{\rho_m A}{h}$$

$$r_e = \frac{1}{g} r_{ee} w^2$$

donde  $r_{cb}$  y  $r_{cf}$  son las resistencias específicas de los contactos posterior y frontal, respectivamente;  $w$ ,  $h$  y  $d$ , el ancho, la altura y la distancia entre dedos metálicos de la grilla de contacto, respectivamente;  $\rho_b$ ,  $r_{ee}$  y  $\rho_m$ , las resistividades de la base, el emisor y el metal, respectivamente; y  $w_b$  el ancho de la base. Los factores  $f$  y  $g$  dependen de la geometría de la grilla de contacto y, para el caso ilustrado en la Fig. 2, toman los valores:  $f = 24$  y  $g = 12$ .

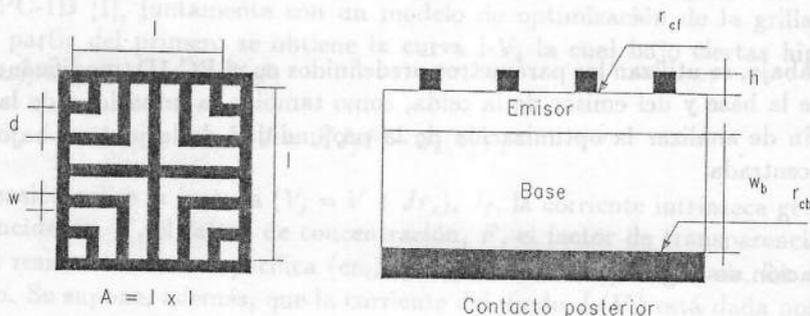


Figura 2: Grilla de contacto y sus parámetros correspondientes

### 3.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se utilizó el programa PC-1D juntamente con el modelo de optimización de la grilla de contacto descrito previamente para estudiar la variación de la eficiencia en función del dopaje y la profundidad de la juntura del emisor.

Para los casos de iluminación con radiación solar no concentrada ( $X = 1$ ), se consideró una celda solar sencilla tipo  $n^+p$  sin emisor posterior y con una grilla de contacto como la de la Fig. 2. Se optimizó la grilla de contacto y se calculó la eficiencia para las siguientes características del emisor y de los dedos metálicos:

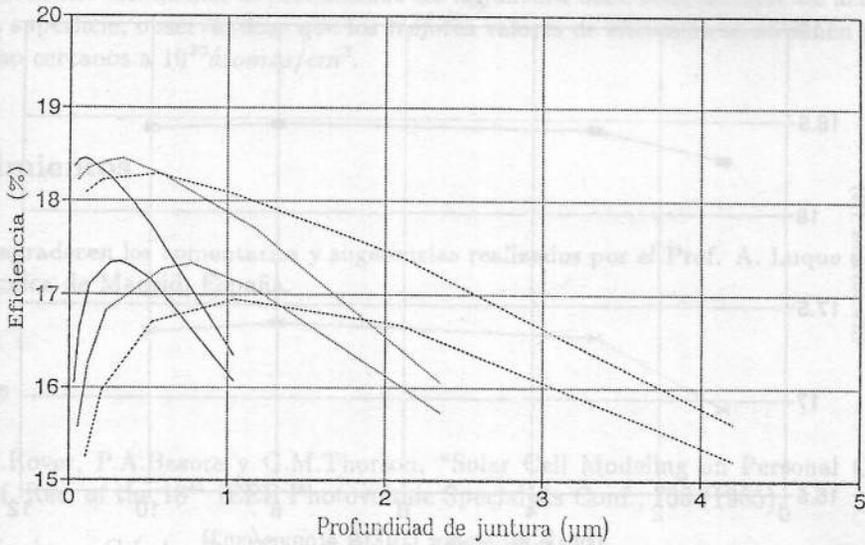


Figura 3: Eficiencia de una celda solar iluminada con radiación no concentrada, en función de la profundidad de juntura, para 3 dopajes del emisor:  $1,0 \times 10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup> (línea de trazos),  $4,0 \times 10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup> (línea de puntos), y  $1,0 \times 10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup> (línea llena). Las 3 curvas superiores corresponden a una grilla con un ancho de los dedos metálicos de  $20 \mu\text{m}$ , mientras que las inferiores, a una de  $200 \mu\text{m}$ .

Emisor con dopajes entre  $1,0 \times 10^{19}$  y  $1,0 \times 10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup>, y profundidades de juntura entre unas pocas centésimas de  $\mu\text{m}$  y aproximadamente  $4 \mu\text{m}$ .

Grilla con dedos metálicos con (a)  $w = 20 \mu\text{m}$  y  $h = 7,4 \mu\text{m}$  (de Ref. [2]), representativos de un depósito realizado por evaporación, y (b)  $w = 200 \mu\text{m}$  y  $h = 74 \mu\text{m}$ , característicos de un depósito realizado por serigrafía.

Se consideró una base de resistividad  $0,15 \Omega\text{cm}$ , que corresponde a un dopaje de  $2,2 \times 10^{17}$  átomos/cm<sup>3</sup>.

En las Figs. 3 y 4 se resumen los resultados obtenidos en función de la profundidad de la juntura y del dopaje, respectivamente. Se observa claramente que la profundidad óptima de la juntura depende no solamente del dopaje del emisor sino también de las características de la grilla de contacto. Para una grilla con  $w = 200 \mu\text{m}$ , la máxima eficiencia ( $\cong 17,5\%$ ) se obtiene para una profundidad de juntura de aproximadamente  $0,4 \mu\text{m}$  y un dopaje del emisor de  $4,0 - 6,0 \times 10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup>, para una grilla. Los valores correspondientes para una grilla con  $w = 20 \mu\text{m}$  son, respectivamente,  $\cong 18,5\%$ ,  $0,1 \mu\text{m}$  y  $4,0 - 8,0 \times 10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup>.

Se repitieron los cálculos para un caso con radiación concentrada ( $X = 50$ ), considerando en este caso una celda con emisores frontal y posterior, pero variando únicamente las características del frontal. Los resultados obtenidos son cualitativamente similares a los anteriores y se resumen en la Fig. 5.

Se concluye finalmente que el diseño de una celda solar, en lo que respecta fundamentalmente

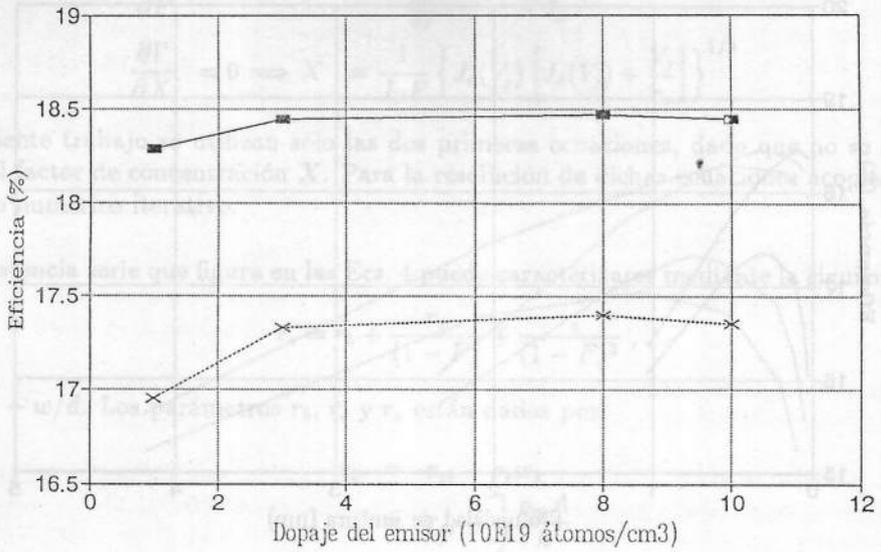


Figura 4: Eficiencia máxima de una celda solar iluminada con radiación no concentrada, en función del dopaje del emisor. La línea llena corresponde a una grilla con un ancho de los dedos metálicos de  $20\mu\text{m}$ , mientras que la de trazos, a una de  $200\mu\text{m}$ .

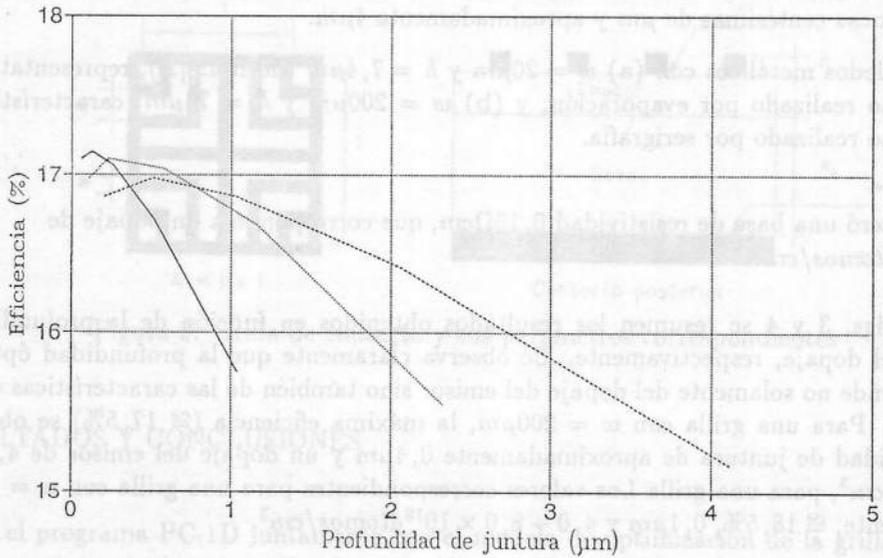


Figura 5: Eficiencia de una celda solar iluminada con radiación concentrada ( $X = 50$ ), en función de la profundidad de la junta, para 3 dopajes del emisor:  $1,0 \times 10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup> (línea de trazo),  $3,0 \times 10^{19}$  átomos/cm<sup>3</sup> (línea de puntos), y  $1,0 \times 10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup> (línea sólida). Las 3 corresponden a una grilla con un ancho de los dedos metálicos de  $20\mu\text{m}$ .

Las características del emisor frontal, depende en forma importante de las dimensiones de los contactos metálicos. Asimismo, la profundidad de la juntura debe seleccionarse de acuerdo con el espesor de la superficie, observándose que los mejores valores de eficiencia se obtienen para valores de este último cercanos a  $10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup>.

S. Carreras, J. Seguí y D. Gómez  
SECRETARÍA DE ESTADO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
Avda. Guemes 300 - 4700 - Catamarca

## Agradecimientos

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizados por el Prof. A. Luque de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

## Referencias

- [1] D.T.Rover, P.A.Basore y G.M.Thorson, "Solar Cell Modeling on Personal Computers", Conf. Rec. of the 18<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 703 (1985).
- [2] E.Sánchez y G.L.Araújo, Solar Cells 19, 139 (1986).

## INTRODUCCION

El Gobierno de la Provincia de Catamarca promueve mediante un convenio entre la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología y la Dirección de Energía Catamarca, el estudio de aplicabilidad de fuentes alternativas destinadas a la generación eléctrica. En este campo se establece un programa que procura una solución regional a la demanda de energía eléctrica, en aquellas poblaciones geográficamente y/o socialmente aisladas, en el interior de la provincia.

El análisis de los posibles emplazamientos deteminó, debido al carácter experimental y de ensayo de la presente situación, seleccionar la localidad de El Invernillo: cita a 25 km al suroeste de la Capital de la provincia. El núcleo poblacional principal consiste en seis unidades habitacionales a las que se provee de energía eléctrica para consumo e iluminación y en equipos de comunicación social fundamentalmente. El diseño del sistema pre-se-ajoras en la prestación con solo aplicar el centro de generación.

La transferencia de tecnología se logra progresivamente y en la medida que los usuarios comprenden el funcionamiento y características inherentes a la generación fotovoltaica y adoptan así mismo una posición comunitaria para el uso del servicio. Para facilitar esta transferencia se han llevado a los pobladores cartillas explicativas y se realizan reuniones programadas entre los usuarios con asesoramiento de técnicos.

Miembro de Carrera del CONICET