

# ESTUDIOS DE TÉCNICAS ANTIRREFLECTANTES PARA CELDAS SOLARES DE SILICIO

L.D. German y J.C. Durán

*Departamento Fuentes Renovables y Uso Racional de la Energía, Comisión Nacional de Energía Atómica Av. Libertador 8250, 1429 Buenos Aires.*

El elevado índice de refracción de los materiales semiconductores utilizados para la elaboración de celdas solares hace imprescindible la utilización de un tratamiento adecuado de la superficie frontal a fin de disminuir las pérdidas por reflexión en la cara frontal.

Mediante métodos de cálculo matriciales y de trazado de rayos, se estudian teóricamente las técnicas antirreflectantes usuales: multicapas dieléctricas, texturizado de la superficie y una combinación de ambos. Se tiene en cuenta la respuesta espectral de la celda y el espectro característico de la radiación solar incidente. Asimismo, se analiza la influencia del atrapamiento de la luz ("light trapping") en el interior del dispositivo mediante reflexiones internas generadas por la textura superficial.

Finalmente, se discuten y comparan los resultados obtenidos en función del ángulo de incidencia para celdas con los diferentes tratamientos superficiales presentados.

## I. INTRODUCCIÓN

Para realizar un buen diseño de una celda solar es necesario conocer a fondo las limitaciones relacionadas con las propiedades ópticas y electrónicas del material. Básicamente, estas limitaciones son<sup>1</sup>: (a) pérdidas por reflexión en la cara frontal; (b) absorción incompleta de los fotones del espectro solar; (c) utilización parcial de la energía de los fotones absorbidos; (d) recolección incompleta de los pares electrón-hueco generados.

Estas y otras limitaciones llevan la eficiencia de una celda solar de silicio monocristalino alrededor de un 15%, para celdas comerciales, y a aproximadamente un 23%, para celdas de laboratorio<sup>2</sup>.

Las técnicas antirreflectivas, que permiten reducir la reflexión a valores que varían entre un 1% y un 5%, incluyen la clásica aplicación de películas dieléctricas<sup>3</sup> y el texturizado de la cara frontal de la celda<sup>4</sup>. Este último trae a su vez aparejado el tratamiento de la luz en el interior de la celda, conocido como "light trapping"<sup>5</sup>, el que tiene un efecto significativo sobre la absorción de los fotones del espectro solar con energías cercanas al ancho de la banda prohibida del semiconductor.

Los estudios desarrollados a continuación se llevaron a cabo en forma teórica y con el auxilio del programa de simulación de dispositivos semiconductores<sup>6</sup> PC-1D.

## II. PELICULAS DIELECTRICAS

El método más sencillo para la resolución de un sistema de multicapas dieléctricas está basado en un cálculo matricial que plantea la continuidad de

las componentes paralelas a las interfases de los campos eléctrico y magnético<sup>7,8</sup>. Un problema de multicapas se reduce a la multiplicación de las matrices correspondientes a cada una de ellas.

En este trabajo se utilizó el método mencionado para analizar el comportamiento de una y dos capas dieléctricas sobre la superficie pulida de silicio cristalino. Se consideró, además, que la celda se encuentra encapsulada en Ethyl Vinyl Acetato (EVA), cuyo índice de refracción es 1.46.

En el caso de una capa dieléctrica, el índice de refracción  $n$  de la lámina de cuarto de onda que permite lograr reflexión nula satisface:

$$n^2 = n_{EVA} n_{Si} \Rightarrow n = \sqrt{n_{EVA} n_{Si}} = 2.37 \quad (1)$$

Optamos entonces por considerar, para los resultados que se presentan posteriormente, el  $ZnS$  ( $n = 2.36$ ).

Por su parte, para el caso de dos películas dieléctricas (de constantes  $n^1$  y  $n^2$ ), se debe verificar:

$$\left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 = \frac{n_{Si}}{n_{EVA}} \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} = 1.62 \quad (2)$$

Utilizamos, entonces,  $SiO_2$  ( $n^1 = 1.85$ ) y  $TiO_2$  ( $n^2 = 2.62$ ), con lo cual  $n^2/n^1 = 1.67$ .

Para definir el espesor óptimo de las películas, se desarrollo un programa de cálculo que maximiza la corriente de cortocircuito de la celda, maximizar esta es prácticamente equivalente a maximizar la eficiencia, ya que existe una correlación directa entre el punto de máxima potencia y dicha corriente.

### III. TEXTURIZADO DE LA CARA FRONTAL

El texturizado de la superficie se logra mediante la aplicación de un ataque químico anisotrópico que consiste en una reacción de óxido-reducción de naturaleza electroquímica<sup>9</sup>. Para el Si, el ataque químico libera planos de alta simetría como el [111], [110] y [100]; la microestructura así generada forma una superficie con pirámides distribuidas aleatoriamente. Si, previo al ataque, se realiza mediante la técnica de fotolitografía un enmascarado de líneas paralelas que proteja el Si, se obtiene un patrón de surcos paralelos en forma de V conocido<sup>10</sup> como superficie V. Si el plano de superficie es de [100], al atacarse el plano [111] se forma un ángulo de  $\cong 54^\circ$  con respecto a la superficie.

Para el cálculo de la reflectancia de la superficie V, utilizamos el método de trazados de rayos, considerando que las dimensiones de los surcos son mucho mayores que la longitud de onda de la radiación solar. Básicamente, el método consiste en hallar los rayos críticos que dividen las caras de dichos surcos en sectores según el número de reflexiones generadas (Fig. 1). La reflectancia se calcula como la suma de las contribuciones debidas a los rayos que reflejan 1, 2, ..., n veces.

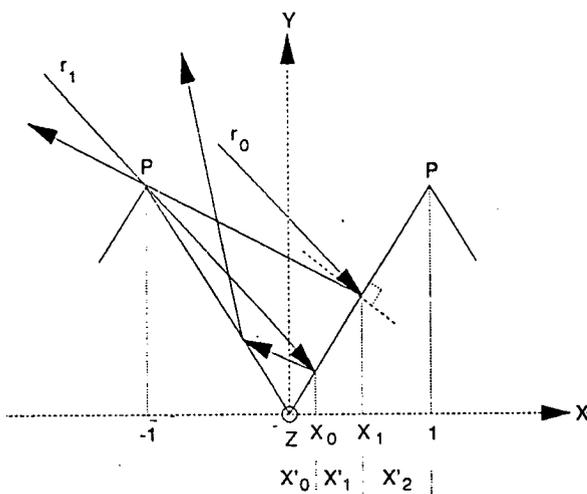


Fig. 1: Esquema donde se indican los rayos críticos que dividen las caras de los surcos en sectores según el número de reflexiones.

### IV. EL "LIGHT TRAPPING"

Para calcular la corriente de cortocircuito en el caso de texturizado se debe considerar, además de la reflectancia, el efecto producido por el "light trapping". Para ello, se tuvieron en cuenta diversos aspectos:

1. El ángulo de reflexión total interna en la interfaz Si-EVA es pequeño ( $22,28^\circ$ ).
2. Para cada ángulo de incidencia, existen distintos caminos según el lugar donde incida el rayo (Fig. 2).
3. Todos los rayos que luego de ingresar a la celda inciden en la superficie de un surco adyacente, lo hacen con ángulos mayores al crítico.
4. La luz no viaja, en el interior del dispositivo, perpendicularmente a las caras, lo que incrementa las posibilidades de absorción.
5. Al acercarse los portadores a la cara frontal, se produce una creciente recombinación como consecuencia directa del aumento de la sección transversal equivalente.

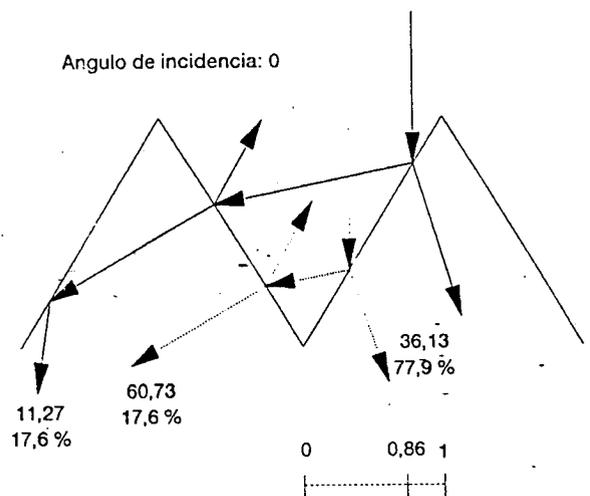


Fig. 2: Trazado de rayos para incidencia normal de la luz, aclarando ángulos de interés (con respecto a la normal), intensidad porcentual y región correspondiente a cada rayo.

### V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la simulación de una celda iluminada con el espectro solar standard AM1.5 ( $1kW/m^2$ ) y con las siguientes características:

- \* Superficie:  $100cm^2$
- \* Espesor:  $300 \mu m$
- \* Profundidad de juntura:  $0.3 \mu m$

\* Dopaje de la cara frontal (tipo n<sup>+</sup>):  $1 \times 10^{20}$  *atomos/cm<sup>3</sup>*.

\* Dopaje de la base (tipo p):  $1,22 \times 10^{17}$  *atomos/cm<sup>3</sup>*

\* Longitud de difusión de portadores minoritarios ( $L_d$ ): 400 *um*

Los límites teóricos entre los cuales puede variar la corriente de cortocircuito de esta celda, según la técnica antirreflectiva que se utilice, corresponden a reflexión nula,  $I_{sc} = 3.78A$ , y reflexión máxima (sin tratamiento alguno),  $I_{sc} = 3.01A$ .

La optimización de una película antirreflectante de  $ZnS$ , para incidencia normal, se logra con un espesor de 0.068 *um* y corresponde a  $I_{sc} = 3.65A$ . Para dos capas de  $SiO_2$  y  $TiO_2$ , los espesores óptimos son de 0,101 *um* y 0,057 *um*, respectivamente, con  $I_{sc} = 3.69A$ .

Por su parte, el método de trazado de rayos muestra que el texturizado lleva a la transmitancia de la superficie frontal a 0.953. Este valor puede incrementarse mediante el depósito de una película de  $Zns$  con un espesor óptimo de 0.074 *um*. La Fig. 3 compara la transmitancia obtenida mediante las cuatro técnicas analizadas, en función de la longitud de onda de la radiación incidente.

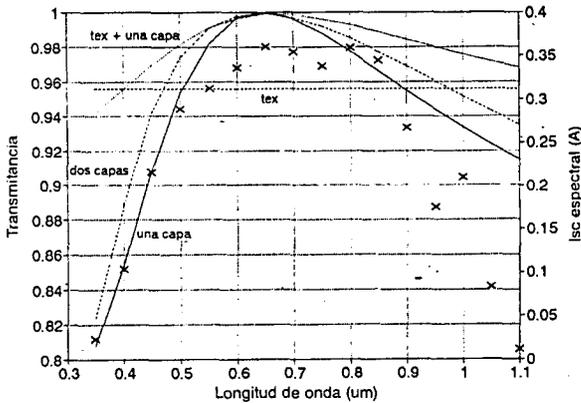


Fig. 3: Curvas de transmitancia para una celda fotovoltaica de silicio cristalino con una y dos películas antirreflectantes, texturizado y texturizado con una película antirreflectante. Como referencia se incluye también el producto del espectro solar por la corriente de cortocircuito para iluminación monocromática.

La Fig. 4 muestra la corriente de cortocircuito en función del ángulo de incidencia, para las cuatro técnicas antirreflectantes. La pequeña diferencia entre los distintos casos permite concluir que la decisión final acerca de la técnica a utilizar deberá

basarse fundamentalmente en una cuestión de simplicidad y costo.

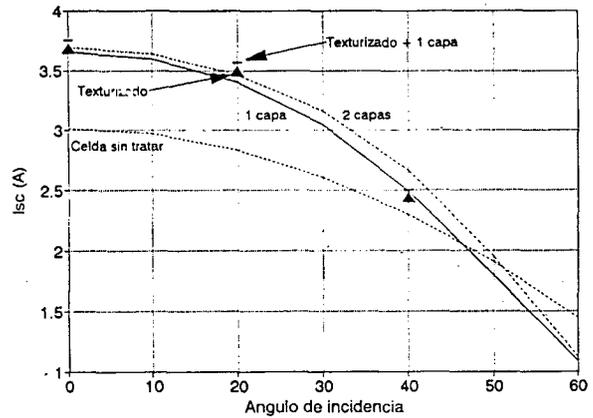


Fig. 4: Dependencia de la corriente de cortocircuito con el ángulo de incidencia de la luz solar para un sistema con una y dos películas antirreflectantes, texturizado y texturizado con una película antirreflectante.

El atrapamiento de la luz en el interior de la celda hace factible, desde el punto de vista de absorción de la radiación, reducir su espesor<sup>11</sup>, con el fin de ahorrar material o incluso de aumentar la eficiencia. Sin entrar a discutir su factibilidad técnica y a modo de ejemplo, se analizó con el método propuesto una celda de 100 *um*. Se obtuvo  $I_{sc} = 3.63A$ , tan solo un 1% por debajo de la que se obtiene para una celda de 300 *um* (3.68A). Las ventajas de reducir el espesor se hacen aún más notables si el cristal de Si es de peor calidad, especialmente en lo que se refiere a la longitud de difusión de portadores minoritarios. En particular, si  $L_d = 50$  *um*,  $I_{sc}$  resulta claramente mayor para la celda de menor espesor (ver Tabla 1), debido a que los portadores generados más allá de 100 *um* de la junta difícilmente lleguen a ésta.

Tabla 1: Corriente de cortocircuito para celdas fotovoltaicas de dos espesores, 100 *um* y 300 *um*, texturadas y con dos valores de longitud de difusión de portadores minoritarios  $L_d$ . Como referencia se dan los valores correspondientes para reflexión nula en la cara frontal.

d( $\mu m$ )	Isc (A)			
	R=0 Ld=430 $\mu m$	Tex. Ld=403 $\mu m$	Tex. Ld=50 $\mu m$	R=0 Ld=50 $\mu m$
100	3.5	3.63	3.47	3.29
300	3.78	3.68	3.35	3.31

## REFERENCIAS

1. M. Wolf, *Photovoltaic Energy Conversion System*, U. of Pennsylvania Press, U.S.A. (1977).

2. M.A. Green, *High Efficiency Silicon Solar Cells*, Proc. Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, Argentina (1992).
3. S.W. Angrist, *Direct Energy Conversion*, Alley & Bacon, Massachusetts, U.S.A. (1976).
4. P. Verdinden, O. Evrard, E. Magy y A. Crohay, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **26**, 71 (1992).
5. M.A. Green, *Proc. 7th Photovoltaic Solar Energy Conference*, Sevilla, España pág. 681 (1986).
6. D.T. Rover, P.A. Basore G.M. Thorson, *Proc. 17th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, IEEE, Las Vegas, pág. 703 (1985).
7. E. Campitelli, Apuntes del curso "Optica de Películas Delgadas", Facultad de Ingeniería, U.B.A., Argentina (1977).
8. E. Hecht, A. Zajac, *Optica*, Fondo Educativo Interamericano, Massachusetts, U.S.A. (1977)
9. W. Kern, Chemical Etching of Silicon, Germanium, Gallium Arsenide, and Gallium Phosphide, *RCA Review* **39**, 278 (1978).
10. C.R. Baraona, H.W. Brandhorst, *Proc. 11th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.* Arizona, U.S.A., pág. 44 (1975).
11. J.A. Rand, R.B. Hall, A.M. Barnett, *Proc. 11th IEEE Photovoltaic Specialists' Conf.*, Florida, U.S.A., pág. 263 (1990).