

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA SERIE  
DE LA TRANSCÉLULA**

por

**A. LUQUE, A. CUEVAS, M. G. AGOST, J. EGUREN**

**Laboratorio de Semiconductores, E.T.S.I.T.  
Universidad Politécnica de Madrid**

## RESUMEN

Recientemente se han desarrollado células solares iluminables por las dos caras para concentración estática, que denominamos transcélulas. Estas células presentan buenos valores de corriente de cortocircuito ( $35 \text{ mA/cm}^2$ ) y de tensión de circuito abierto ( $600 \text{ mV}$ ), pero un bajo factor de curva ( $0,5$ ) debido a la alta resistencia serie inherente a la estructura. Un análisis de esta resistencia muestra que un diagrama de metalización adecuada puede dar lugar a valores aceptables de este factor.

## RESUM

Recentment han estat desenvolupades cèl·lules solars il·luminables per a totes dues cares per a concentració estàtica, les quals anomenem transcèl·lules. Aquestes cèl·lules presenten bons valors de corrent de curt circuit ( $35 \text{ mA/cm}^2$ ) i de tensió de circuit obert ( $600 \text{ mV}$ ), però presenten un baix factor de corba ( $0,5$ ), el qual és degut a l'alta resistència sèrie inherent a l'estructura. Una anàlisi d'aquesta resistència mostra que un diagrama de metalització adequat pot donar lloc a valors acceptables d'aquest factor.

## SUMMARY

Solar cells illuminated simultaneously on both sides, so called «transcells» have been recently developed in our laboratory.

These cells show good short circuit current levels ( $\sim 35 \text{ mA/cm}^2$ ) and open circuit values of  $600 \text{ mV}$ . Nevertheless the low curve factor ( $\sim 0,5$ ) has to be related to the high resistance inherent of the cell structure itself.

An analysis of this phenomena shows that the selection of an appropriate metalization pattern, acceptable values for the curve factor can be reached.

WINSTON<sup>1</sup> y sus colaboradores han desarrollado perfiles de espejos cilíndricos capaces de enfocar la luz solar incidente sobre colectores de forma arbitraria siempre y cuando la proyección de los rayos de sol sobre el plano perpendicular a las generatrices del espejo sea inferior a un valor máximo  $\varphi_m$  que denominaremos ángulo de aceptación.

Tales espejos, orientados con las generatrices de E a W y orientados hacia el sur apuntando al ecuador celeste, permitirían concentrar la energía solar sobre el colector para cualquier ángulo horario del sol cuando éste se encuentra en los *equinoccios*. Cuando esto último no ocurre, la energía solar también se concentra en el colector si el ángulo de aceptación es suficientemente grande como para admitir las variaciones de declinación del sol.

Para ángulos de aceptación no demasiado elevados será menester algunos retoques estacionales del ángulo de elevación del espejo. Estos retoques serán tanto menos numerosos cuanto mayor sea el ángulo de aceptación. En la figura 1 se observa la energía que es posible recoger en un espejo de este tipo para ángulos de aceptación de  $\pm 10^\circ$ , en Madrid, suponiendo que se permiten cuatro u ocho variaciones anuales del ángulo de elevación y que éste ha sido elegido de manera que la energía recogida es lo más constante posible a lo largo de todo el año.<sup>2</sup>

Existe una relación entre la concentración máxima alcanzable en un concentrador Winston y el ángulo de aceptación máxima dado por

$$\frac{L_c}{P_c} = \frac{1}{\text{sen } \varphi_m} \quad (1)$$

donde la concentración se ha expresado como cociente entre la

1. R. WINSTON y R. HINTENBERGER, *Solar Energy*, 17, 225, (1975).  
 2. A. LUQUE y E. RÍOS, *Energía recogida en Madrid por un espejo Winston*, UPM/ETSIT/LS/1175, Madrid (1975).

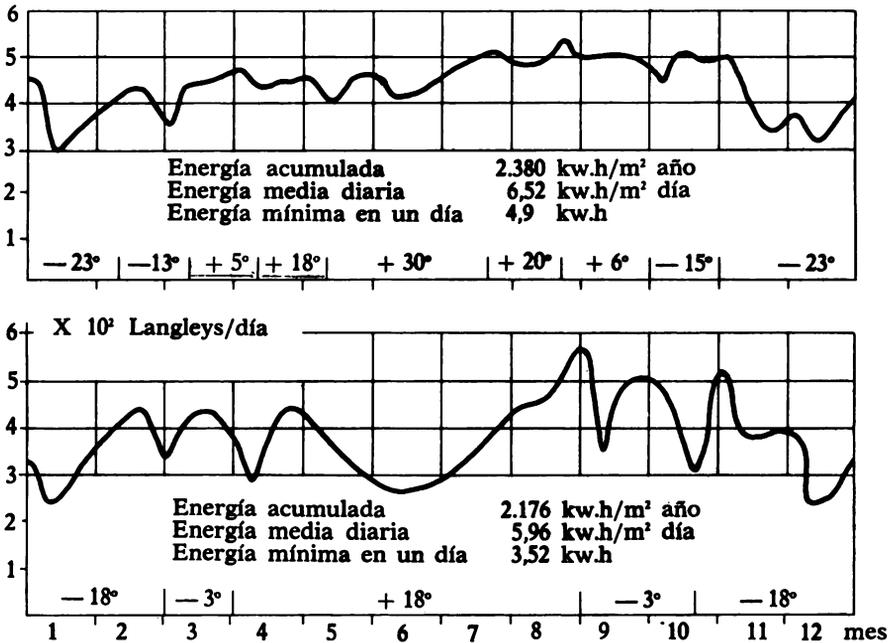


FIGURA 1. *Superior*, ocho cambios estacionales de ángulo de elevación. *Inferior*, cuatro cambios. Curvas obtenidas con la insolación en Madrid, promediadas durante diez días.

longitud de la apertura de entrada  $L_e$  y el perímetro del concentrador  $P_c$ .

La concentración estática fotovoltaica ha atraído sobre sí reciente interés<sup>3, 4, 5</sup> como procedimiento para reducir la masa de silicio necesaria para la conversión *fotovoltaica*. Para un ángulo  $\varphi_m$  dado la máxima reducción de silicio se obtiene si el colector, es decir, la célula, tiene doble perímetro, es decir, puede ser eficiente por ambas caras.

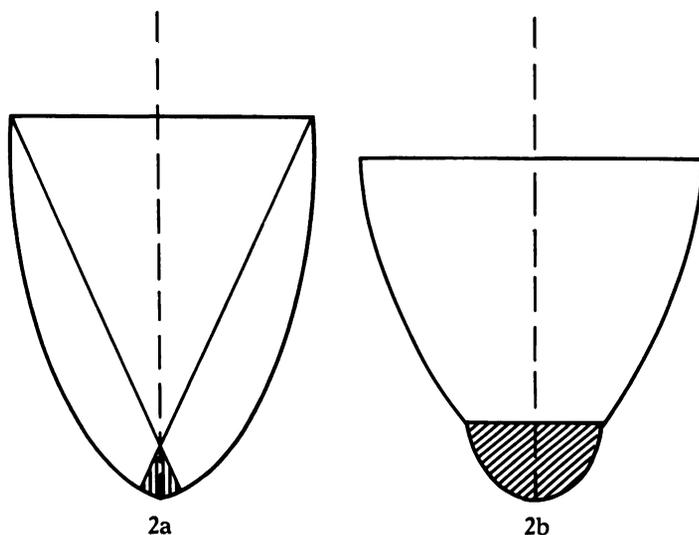
En este caso la concentración vale

$$\frac{L_e}{W_c} = \frac{2}{\text{sen } \varphi_m} \quad (2)$$

3. T. SUREK, R. O. BELL and W. T. KURTH, *Proc. Int. Symp. on Solar Energy*, Spring Meeting of the Electrochem. Soc., Washington, May 1976.

4. A. LUQUE, *The transcell: a novel two sided solar cell*. S.U.B. Meeting, Toulouse, June 1976.

5. A. I. MLAVSKY, R. W. STORMONT, A. S. TAYLOR, *12th Photovoltaic Specialists Conference* (to be published).



FIGURAS 2a y 2b. Concentrador de Winston: a) hueco, receptor vertical; b) mixto, la parte inferior contiene un dieléctrico de índice de refracción mayor que 1. Es el tipo llamado «con aletas».

es decir, que una célula de doble cara permite duplicar la concentración que recibe para un ángulo de aceptación dado con relación a la que puede obtenerse en una célula iluminable sobre una cara.<sup>6</sup> En la figura 2 se observa la disposición de este tipo de células dentro del concentrador:

Para satisfacer esta necesidad A. LUQUE ha inventado recientemente la célula de doble cara.<sup>7</sup> Un esquema de este dispositivo se muestra en la figura 3. Dos capas  $n^+$  han sido difundidas sobre una oblea tipo  $p$  por ambas caras y la tecnología planar ha sido empleada para parar la difusión en los lugares necesarios para permitir la toma de contactos a la región  $p$ . Un esquema del proceso de fabricación se muestra en la figura 4. En la Tabla I aparecen las principales características del dispositivo.

Esta célula ha sido llamada transcélula ya que su estructura y su funcionamiento recuerda un transistor. En el modo normal de funcionamiento ambas capas difundidas se conectan en paralelo

6. N. B. GOODMAN, R. IGNATIUS and R. WINSTON, *Applied Optics* 2434 (1976).

7. A. LUQUE, patente española núm. 453.575 (pendiente).

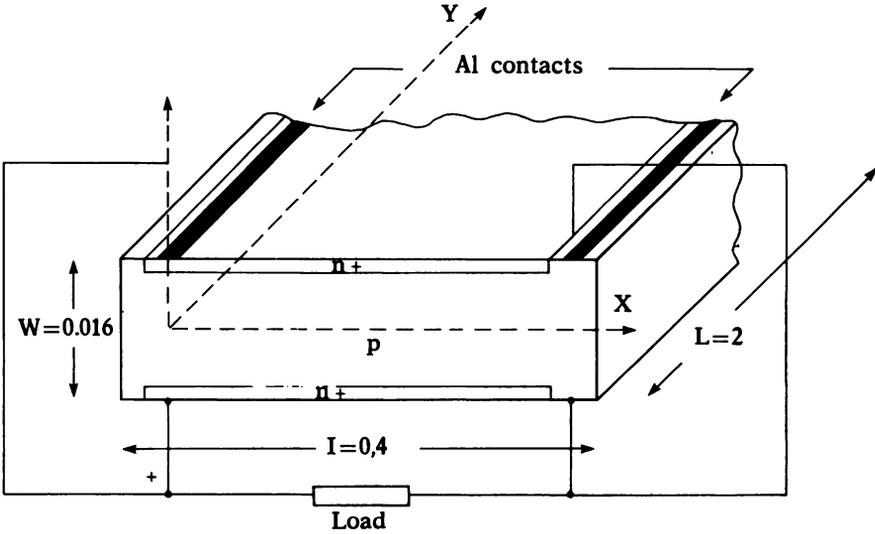


FIGURA 3. Esquema de una transcélula.

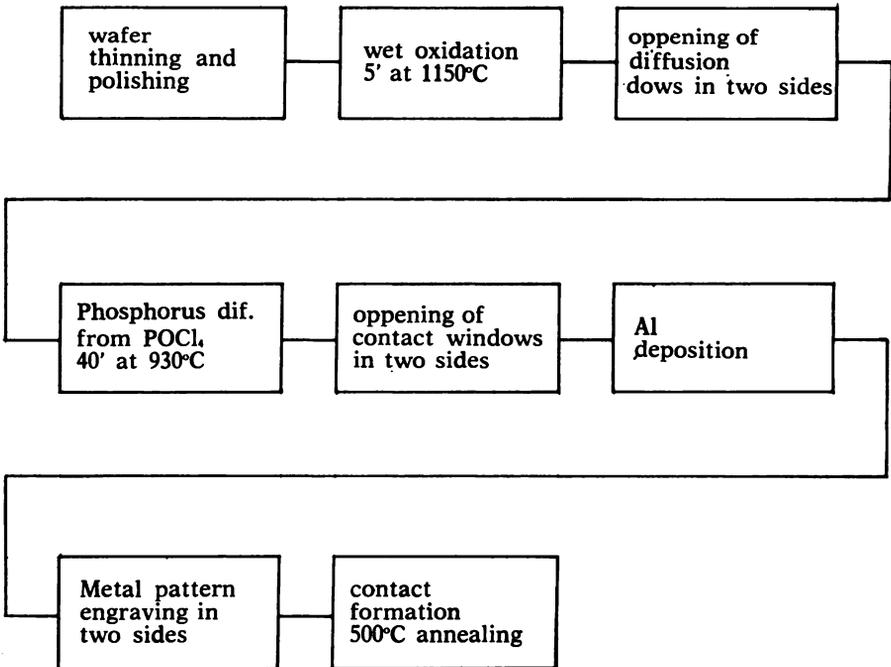


FIGURA 4. Proceso de fabricación de transcélulas.

TABLA I

## CARACTERÍSTICAS DE TRANSCÉLULAS

Espesor . . . . .	140-180 $\mu\text{m}$
Resistencia de capa del volumen (tipo P) . . . . .	40-60 $\Omega$
Resistencia de capa de la región difundida (tipo N) . . . . .	8-12 $\Omega$
Profundidad de unión . . . . .	0,5 $\mu\text{m}$
Área de la célula . . . . .	$0,4 \times 2 = 0,8 \text{ cm}^2$
Error de alineamiento entre ambas caras difundidas . . . . .	10 $\mu\text{m}$
Área de contactos . . . . .	$0,01 \times 2 = 0,02 \text{ cm}^2$
Área efectiva de la célula . . . . .	$0,3525 \times 2 = 0,705 \text{ cm}^2$
Factor de recubrimiento . . . . .	0,88
Recubrimiento antireflectante . . . . .	Capa de PSG azul 800 Å de espesor
$I_{sc}$ típica (AM1×1,4) (una cara) . . . . .	21-24 mA
$J_{sc}$ verdadera (AM1×1,4) (una cara) . . . . .	30-34 mA/cm <sup>2</sup>
$V_{oc}$ típica (AM1×1,4) (una cara) . . . . .	540-600 mV
$R_s$ típica . . . . .	6-12 $\Omega$
$I_{sc}$ típica adicional del electrodo posterior (AM1×1,4) . . . . .	5-10 mA/cm <sup>2</sup>
Resistencia serie calculada (volumen) . . . . .	4,2 $\Omega$

constituyendo el cátodo de la transcélula. El ánodo está constituido por la zona *p*. Esta estructura, aun iluminada por una sola cara, muestra corrientes de cortocircuito superiores a las de la célula convencional ya que los portadores generados cerca de la parte posterior de la transcélula son colectados con gran eficiencia por la unión posterior. Asimismo la tensión de circuito abierto, especialmente para transcélulas delgadas, resulta aumentada al aislar la unión posterior a la zona de base de la zona superficial posterior de alta velocidad de recombinación. Un análisis<sup>8</sup> comparativo de la corriente de cortocircuito y de la tensión de circuito abierto de transcélulas, células convencionales y células de campo retrodifusor<sup>9</sup> (Back Surface Fields o BSF cells) muestra que para espesores prácticos la transcélula presenta mejor comportamiento que las restantes células (ver figura 5). En la Tabla II aparece una evidencia experimental de la mejora en corriente de cortocircuito y en tensión de circuito abierto lograda con la conexión en transcélula.

El mayor inconveniente de la transcélula radica en su resistencia serie inherentemente elevada debido a que los portadores, antes de alcanzar los electrodos exteriores, han de recorrer un camino

8. A. LUQUE, *Double Sided Solar Cell for Static concentration*, por publicar.

9. J. MANDELKORN and J. H. LAMECK, *Proc 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 66 (1972).

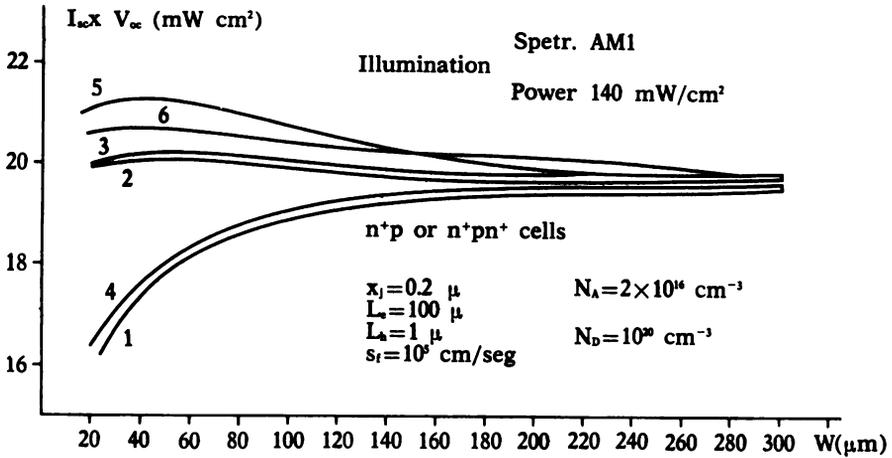


FIGURA 5

TABLA II

**CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO Y TENSION DE CIRCUITO ABIERTO DE TRANSCÉLULAS EXPERIMENTALES BAJO ILUMINACIÓN AM2**

Iluminación	Cara A				Cara B				Cara A
	Unión A		Unión B		Unión A		Unión B		Operación en transcélulas
Condiciones de la unión opuesta	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	en paralelo
Corriente c.c. (mA)	10,6	9,3	8,0	2,5	11,25	9,9	8,5	2,8	12,3
Tensión c.a. (mV)	495	430	478	320	472	379	479	325	489

de elevada resistencia constituido por parte de la resistencia de capa de las regiones  $n$  y parte de la resistencia de capa de la región  $p$ .

Suponiendo una iluminación idéntica por ambas caras, las ecuaciones que gobiernan el voltaje en cada punto  $x$  (ver figura 1) son:<sup>8</sup>

$$\frac{dV_n(x)}{dx} = -\frac{R_n}{L} I_n(x) \text{ con } V_n(0)=0 \quad (3)$$

$$\frac{d V_p(x)}{dx} = - \frac{R_p}{L} I_p(x) \text{ con } V_p(1) = V_s \quad (4)$$

$$\frac{d I_n(x)}{dx} = - I_{sc} L \left[ 1 - \exp \frac{q(V(x) - V_{oc})}{kT} \right] \text{ con } I_n(1) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d I_p(x)}{dx} = I_{sc} L \left[ 1 - \exp \frac{q(V(x) - V_{oc})}{kT} \right] \text{ con } I_p(0) = 0 \quad (6)$$

con

$$V(x) = V_p(x) - V_n(x) \quad (7)$$

donde:

$V_n(x)$  = tensión en cada punto de la zona  $n^+$

$V_p(x)$  = tensión en cada punto de la base

$R_n$  = resistencia por cuadro ( $\Omega/\square$ ) de la capa difundida

$R_p$  = resistencia por cuadro ( $\Omega/\square$ ) de la capa de base

$L$  = longitud de la célula

$I_n(x)$  = corriente en cada punto de la zona  $n^+$

$I_p(x)$  = corriente en cada punto de la zona  $p$

$V_s$  = tensión aplicada

$I_s$  = corriente de la célula

$I_{sc}$  = densidad de corriente de cortocircuito

$V_{oc}$  = tensión de circuito abierto

$l$  = anchura de la célula

$R_s$  ( $\Omega$  cm)

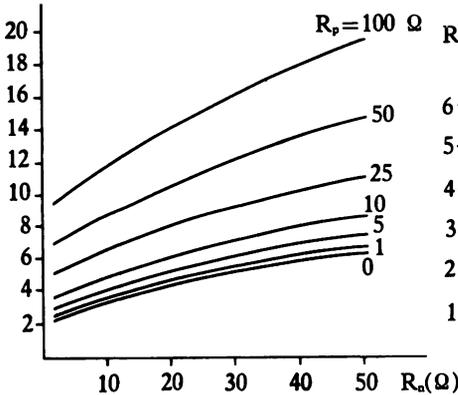


FIGURA 6

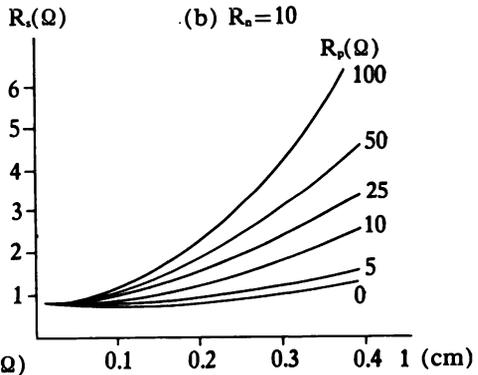


FIGURA 7

La solución de estas ecuaciones aparece en la figura 6. En ella es posible apreciar cómo para resistencias de capa crecientes en la zona  $p$  aparecen también crecientes resistencias series que en las transcélulas experimentales realizadas hasta ahora incluso llegan a cuadruplicar la resistencia de células convencionales.

El resultado de las ecuaciones (3) a (7) en condiciones asintóticas puede expresarse analíticamente. Así, para

$$(R_n + R_p) \frac{1}{L} \ll \frac{kT}{q I_{sc} L l},$$

$$R_s = \frac{kT}{q I_{sc} L l},$$
(8)

que es la resistencia «intrínseca» de la célula solar, es decir, la que acontece cuando los efectos parásitos de resistencia son poco notables. Esta expresión sería también válida para una célula convencional en iguales condiciones. En el caso contrario, es decir si

$$R_n + R_p \frac{1}{L} \gg \frac{kT}{q I_{sc} L l},$$

$$R_s = \frac{R_n R_p}{(R_n + R_p)} + \sqrt{\frac{kT}{q I_{sc} L l} (R_n + R_p) \frac{1}{L}},$$
(9)

que representa la conexión en paralelo de las dos resistencias  $R_n 1/L$  y  $R_p 1/L$  cuando ambas resistencias son de parecido valor y tiende a la media geométrica entre la resistencia intrínseca y la resistencia  $R_n 1/L$ , cuando  $R_p$  es próxima a cero, que es el caso de las células convencionales.

Sin embargo, existen diversos medios de reducir estas resistencias hasta valores aceptables, entre ellos la realización de un enrejillado adecuado de contactos. Así, reduciendo  $l$  en cantidades no excesivas se pueden lograr buenos resultados. Tal como se observa en la figura 7, donde se ha representado el término  $R_s 1$ , que es el factor que, de hecho, influye en la eficiencia, bastaría reducir la anchura  $l$  de la rejilla de metalización de 0,4 cm a 0,1 para tener, para una célula de  $R_p = 100$ , que es el valor en las actuales, mejor factor de curva que el correspondiente a una célula convencional con una separación entre dientes de 0,4.