

**CÉLULA SOLAR DE SILICIO POLICRISTALINO**

por

**B. ALONSO OTERO, J. PIQUERAS, J. MARTÍNEZ, A. CRIADO**

**Departamento de Física del Estado Sólido  
Universidad Autónoma de Madrid**

## RESUMEN

Se han hecho células solares, sobre obleas de Si policristalino tipo p, mediante difusión. Se ha obtenido una eficiencia del 7,1 % sin usar capa antirreflectante, siendo la profundidad óptima de la unión de 2,6  $\mu$ . Mediante aproximación de la curva experimental de respuesta y la teórica se han obtenido las longitudes de difusión.

## RESUM

Hom ha fet cèl·lules solars sobre oblees de Si policristallí tipus p, mitjançant difusió. Hom n'ha obtingut una eficiència del 7,1 % sense emprar capa antireflectora, amb una profunditat òptima de la unió de 2,6  $\mu$ . Per mitjà de l'aproximació de la corba experimental de resposta i la teòrica han estat obtingudes les longituds de difusió.

## SUMMARY

Solar cells on polycrystalline Silicon p-type wafers have been made by diffusion. An efficiency of 7,1 % without antireflectif layer has been obtained. The optimum depth of the junction has been estimated to be at 2,6  $\mu$  from the surface.

A fitting procedure between the experimental and theoretical curves has been used to calculate the diffusion lengths.

## INTRODUCCIÓN

Las células se construyeron mediante difusión de fósforo sobre Si-policristalino tipo p. El usar Si policristalino como material base reduce el precio de coste de éstos; a pesar del tamaño de grano de estos materiales parece ser que actúan como superficies de recombinación, lo que hace que las células obtenidas a partir de él sean poco eficientes. Teniendo en cuenta que cuanto mayor sea el grano mayor es la probabilidad de que los portadores recorran su longitud de difusión sin que lleguen a recombinarse, y en la idea de que cuanto más corto fuese el trabajo tecnológico para la obtención del material base más barato sería éste, se hicieron en nuestro laboratorio estudios sobre distintos Si policristalinos para su posible aplicación a dispositivos. Uno de los estudios ha sido el que se obtiene mediante deposición química de Si-policristalino sobre un núcleo monocristalino.<sup>1</sup> Cortando la muestra y mediante un ataque químico preferencial se observan dos zonas (fotografía 1), perfectamente diferenciadas, un núcleo central monocristalino y una zona externa estriada.

Estas estructuras son obtenidas típicamente por subenfriamiento que permite una cristalización del núcleo central mientras que la zona externa, al enfriarse más rápidamente, no ha tenido tiempo de nuclearse en monocristales. Debido a la heterogeneidad del grano no es aconsejable para la fabricación de dispositivos ya que generalmente no serán reproducibles.

Mediante una fusión por zonas de este Si, una o dos pasadas, se llega a un tipo de Si de grano más uniforme y mayor como se observa en las fotografías 2 y 3 que nos muestran cortes paralelos y normales a la muestra. La primera nos muestra los granos, sus fronteras y una serie de dislocaciones sin ninguna orientación preferencial. En la otra, que tiene mayor amplificación que la anterior, observamos más nítidamente el grano. Vemos, también, que las fronteras de grano están formadas por unas pocas alineaciones de

1. MUÑOZ, E.; BOIX, J. M.; LLABRÉS, J.; MÓNICO, J. P. y PIQUERAS, J., *Solid State Electronics*, 17, 1974, 439.

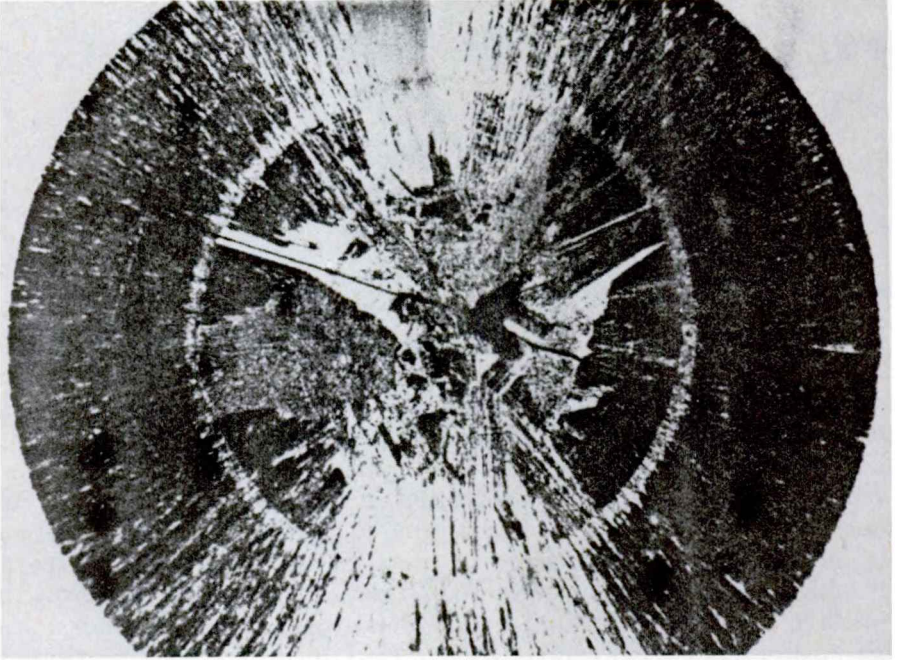


Foto 1

dislocaciones, en algunos casos una sola alineación, lo que da a este Si un carácter bastante monocristalino. El tamaño medio del grano era del orden de  $10^4 \mu^2$  y dentro de ellos existe una serie de dislocaciones cuya densidad media es del orden de  $16^6$  disl/cm<sup>2</sup>, que es un orden mayor que las de un monocristal típico. De la evaluación eléctrica del material se dedujo que  $\rho = 45\omega \times \text{cm}$  y la concentración  $N_a = 2,92 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . También experimentalmente se observó que su movilidad era  $\mu = 370,6 \text{ cm}^2/\text{v. sg}$ , que es ligeramente inferior a la correspondiente a un monocristal de esa resistividad.

Se hicieron difusiones a distintos tiempos y se calcularon las características C-V de las uniones así realizadas, dando una dependencia lineal de  $1/C^3$  frente a V, lo que es característico de una emisión de gradiente lineal. Se calcularon las profundidades de la unión observándose que éstas eran más profundas que si se hiciesen



Foto 2

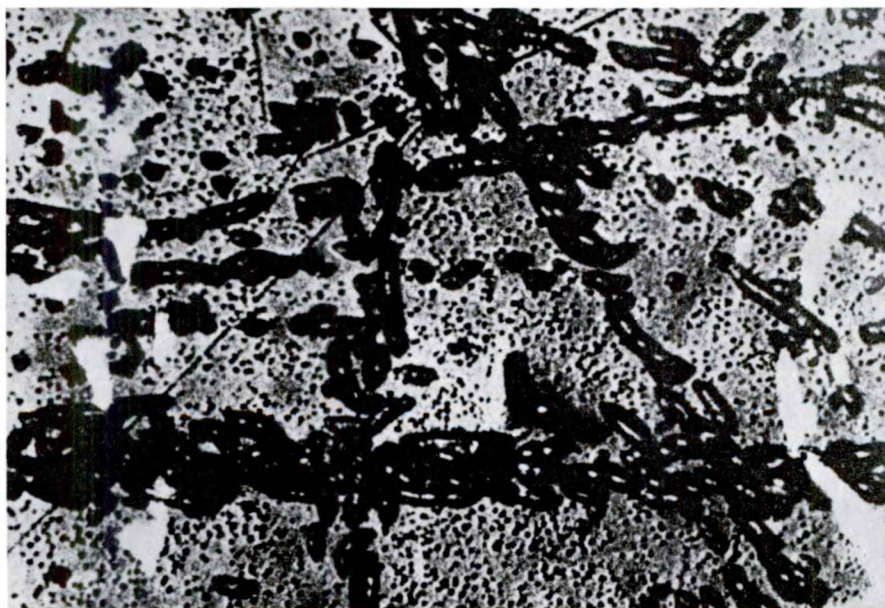


Foto 3

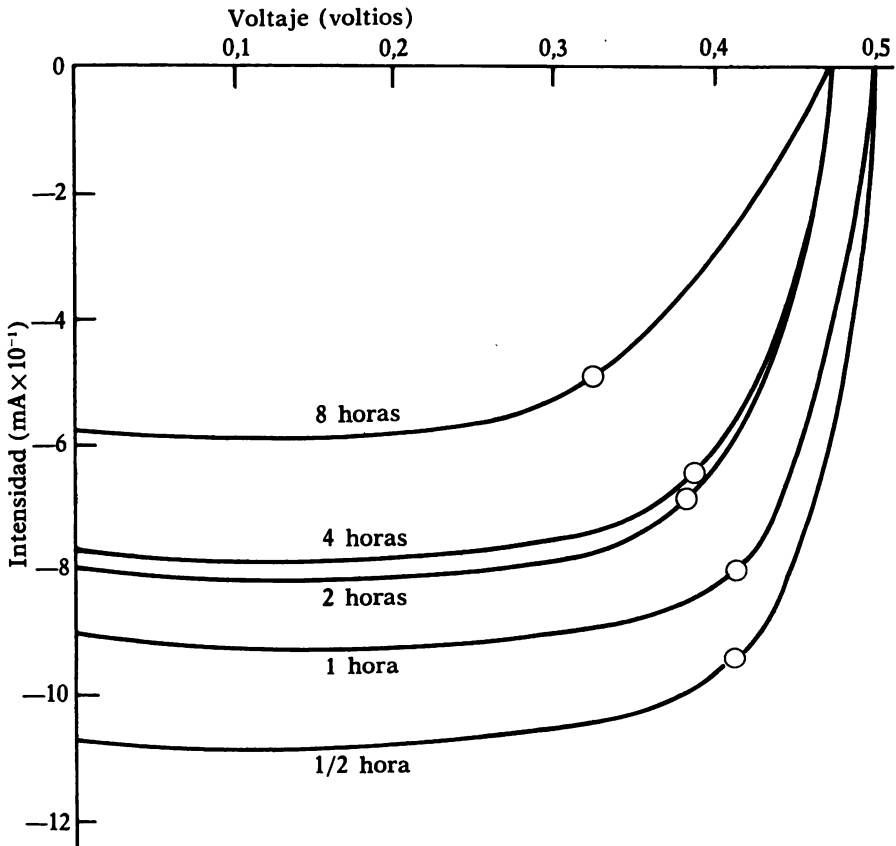
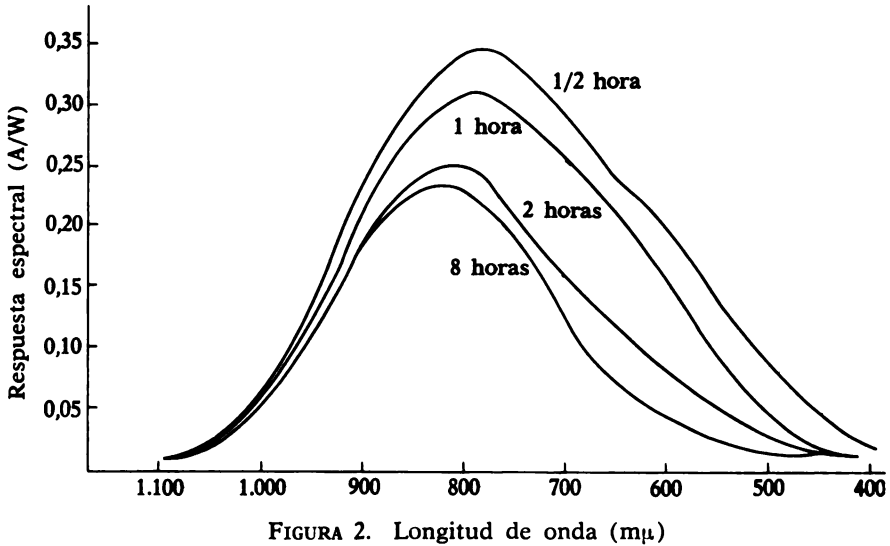


FIGURA 1. Característica I-V de células solares para diferentes tiempos de difusión ( $T=1.200^{\circ}\text{C}$ ).

sobre un monocristal, por lo que se dedujo que su coeficiente de difusión era mayor siendo éste de  $3,09\mu^2/\text{hora}^2$ .

Esto nos hizo pensar que el material era bastante apropiado para realizar sobre él dispositivos fotovoltaicos. Mediante difusión de fósforo a una temperatura de  $1200^{\circ}\text{C}$ , durante distintos tiempos se fabricaron las células. Como electrodos se usó aluminio. Sobre la zona N, por la cual se hacía incidir la luz, se evaporó una capa



de aluminio semitransparente; una réplica de ella nos dio un coeficiente de transmisión prácticamente constante en la zona del visible e infrarrojo cercano con un valor del 50 %. Aplicándoles una tensión entre 0 y 0,6 V. se obtuvieron las características de la figura 1. La muestra de 1/2 hora es la que nos dio una intensidad mayor y por tanto es la que va a producir mayor eficiencia (figura 2). Conforme el tiempo de difusión va aumentando, los picos de eficiencia se desplazan hacia el infrarrojo, lo cual es obvio ya que, al ser la unión más profunda, los pares de portadores que tienen más posibilidad de alcanzar ésta son los creados por los fotones de mayor longitud de onda que son los que menos se absorben.

En vista de que la eficiencia aumentaba al disminuir la profundidad de la unión se hicieron otra serie de células a una temperatura de difusión de 1.100°C. Los contactos usados en este caso han sido de cromo. La capa semitransparente presentaba un coeficiente de transmisión del 60 %, prácticamente constante en la zona de trabajo. La respuesta espectral (figura 3) nos muestra que la célula de mayor eficiencia es aquella en que el tiempo de difusión dura una hora, que corresponde a una profundidad de la unión de 2,6 $\mu$ .

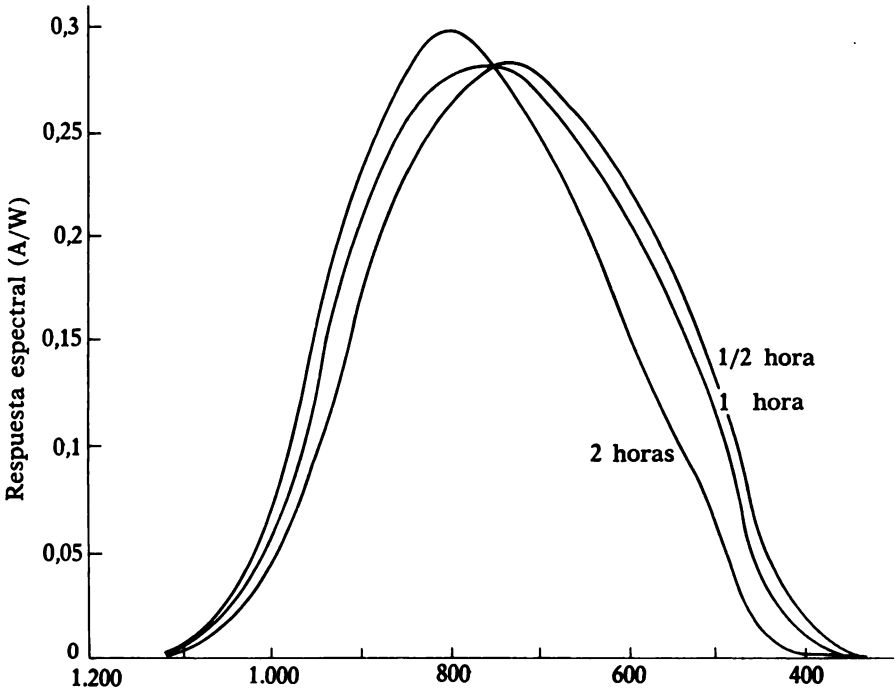


FIGURA 3. Longitud de onda (mμ).

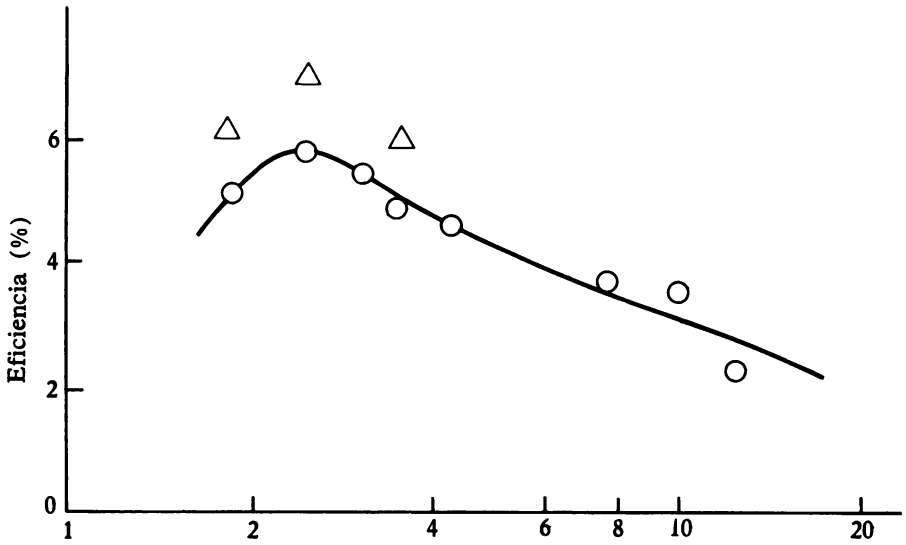


FIGURA 4. Profundidad de la unión (μ)



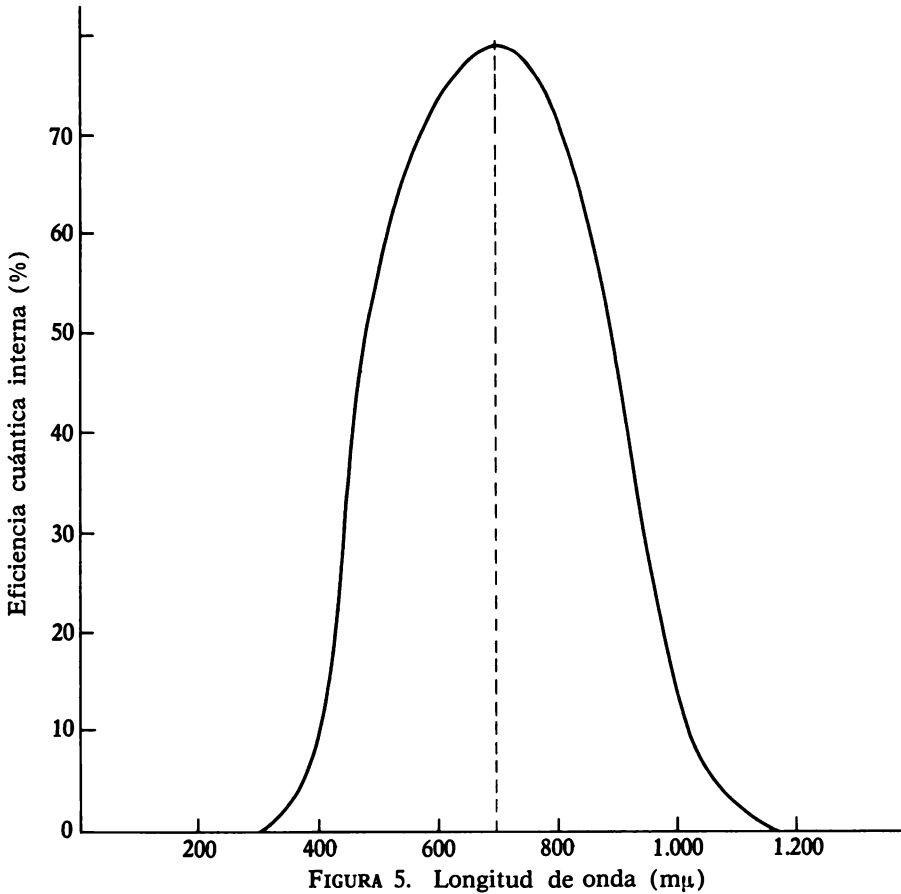


FIGURA 5. Longitud de onda (mμ)

La variación de la eficiencia en función de la profundidad de la unión se observa en la figura 4. Como las transmisiones del cromo y del aluminio son diferentes, se normalizaron éstos a un valor de un 50 %. Los tres triángulos representan las células de electrodos de cromo que al normalizarlas son representadas por los tres círculos que se observan bajo los triángulos. Los otros círculos representan las células de electrodos de aluminio. La figura nos muestra que la máxima eficiencia corresponde a una profundidad de  $2,5\mu$  aproximadamente.

La eficiencia cuántica, el tanto por ciento de pares electrón-hueco generados por fotones que llegan a la unión, de la célula de mayor eficiencia, nos muestra que el 80 % de los portadores que llegan a la unión son los generados por fotones de longitud de onda de  $0,7\mu$ , reduciéndose esta proporción de forma casi simétrica para longitudes de onda superiores e inferiores (figura 5).

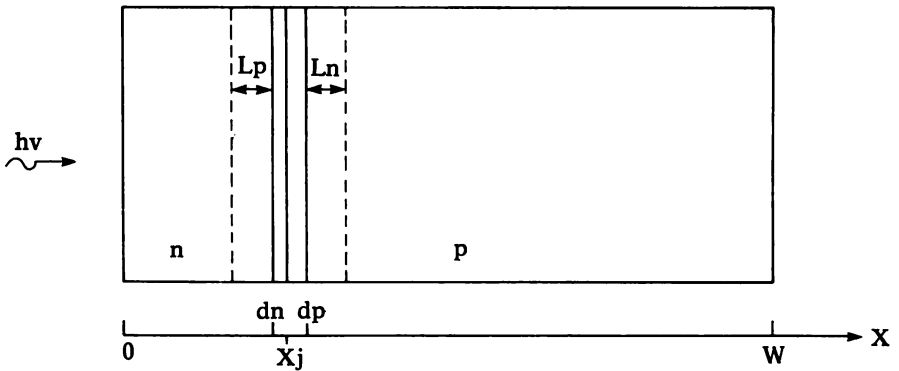


FIGURA 6. Modelo geométrico de una célula solar.

Se ha hecho un cálculo de las longitudes de difusión mediante aproximación de la curva experimental de respuesta espectral a la curva teórica. Esta se deduce a partir de un modelo muy simple<sup>3</sup> que hace una serie de suposiciones, tales como la de suponer constantes el dopaje, la movilidad y el tiempo de vida. El esquema puede verse en la figura 6. Esta curva va a tener la forma:

$$S(\lambda) = S_p(\lambda) + S_n(\lambda) + S_{ce}(\lambda);$$

$$S_p(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} |1 - R(\lambda)| \frac{\alpha L_n}{1 + \alpha L_n} \{ \exp(-\alpha dp) - \exp[-\alpha \omega + (\omega - dp)/L_n] \},$$

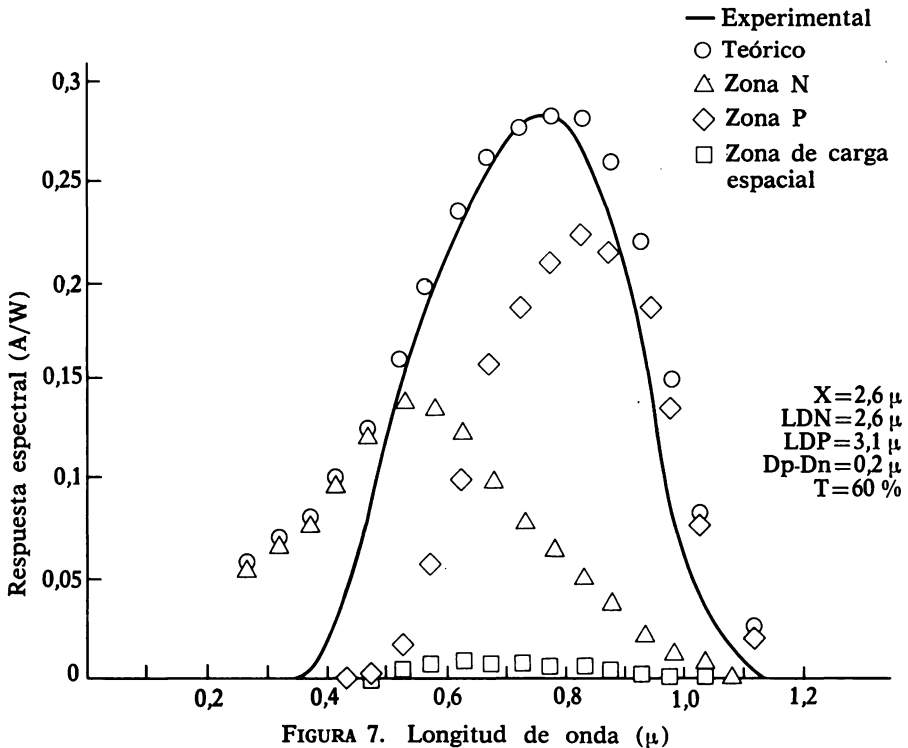
que nos da la contribución de la zona p a la respuesta total;

$$S_n(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} |1 - R(\lambda)| \frac{\alpha L_p}{1 - \alpha L_p} \{ \exp(-\alpha dn) - \exp(-dn/L_p) \}$$

que es la contribución de la zona n,

$$S_{ce}(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} |1 - R(\lambda)| \exp(-\alpha dn) \{ 1 - \exp[-\alpha(dp - dn)] \}.$$

3. SZE, S. M., *Physic of semiconductor devices*, Wiley, 1969.

FIGURA 7. Longitud de onda ( $\mu$ )

$R(\lambda)$  es la reflectividad en función de la longitud de onda.

$\alpha(\lambda)$  es el coeficiente de absorción en función de la longitud de onda.

La curva experimental que vamos a aproximar va a ser para unos valores de  $2,6 \mu$  de profundidad de unión, con un coeficiente de transmisión del 60 % e independiente este último de la longitud de onda. Por medidas de la capacidad se sabía que la anchura de la región de carga espacial era de  $0,2 \mu$ . A partir de valores que se dieron a  $L_n$  y a  $L_p$  se calculó  $S(\lambda)$  para 14 valores diferentes de  $\lambda$  comprendidos entre  $0,3$  y  $1,1 \mu$ . Se eligieron valores de  $L_n$  y  $L_p$  que diesen un máximo para  $S(\lambda)$  próximo al encontrado experimentalmente, y además este valor máximo debía ser igual al máximo de la curva experimental. Por último, los valores de  $L_n$  y  $L_p$  óptimos fueron aquellos que hacían la expresión  $|S(\lambda) - S_{exp}(\lambda)|$  mínima. Estos valores han sido:

$$L_n = 26\mu$$

$$L_p = 3,1\mu$$

En la figura 7 se representa la curva experimental de la respuesta espectral  $S_{exp}(\lambda)$ , la teórica  $S(\lambda)$  y las contribuciones de  $S_p(\lambda)$ ,  $S_n(\lambda)$  y  $S_{ce}(\lambda)$  dadas por las fórmulas anteriores. Como se aprecia, las curvas se ajustan en la región comprendida entre  $0,5$  y  $0,8\mu$ . En las otras zonas la respuesta espectral teórica es mayor que la experimental.

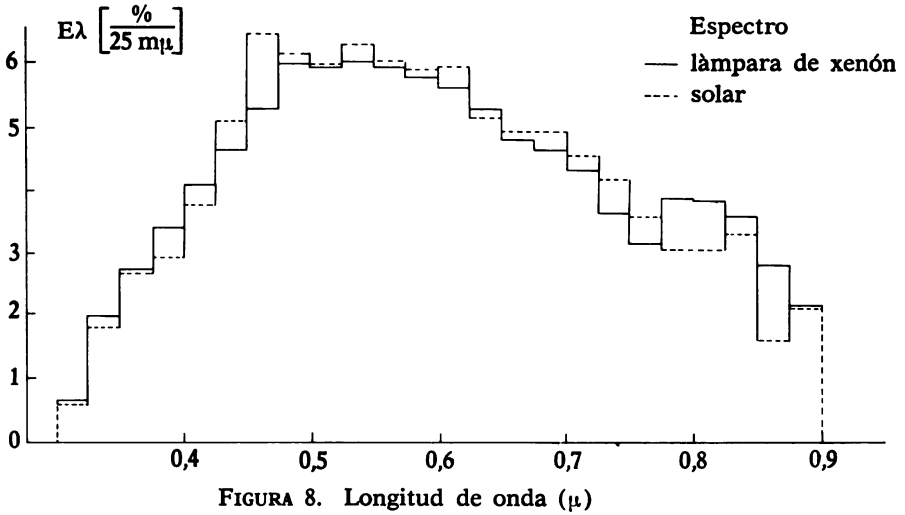
Los fotones correspondientes a las longitudes de onda de  $0,3$ - $0,5\mu$  van a ser absorbidos cerca de la superficie, y en esa región el tiempo de vida media va a ser mucho menor que en las otras regiones ya que la concentración de portadores cerca de la superficie va a ser muy grande y provocará una disminución del tiempo de vida. Por otra parte, debido a la difusión, aumenta la densidad de defectos aumentando, por tanto, la probabilidad de recombinación. Por todo ello, muy pocos portadores generados por estos fotones llegaron a la unión, de ahí que la curva experimental sea menor que la teórica.

El aumento de la curva teórica en la zona del infrarrojo, a partir de  $0,8\mu$  se explica teniendo en cuenta que estos fotones van a ser absorbidos en la zona p. Como hemos dicho anteriormente, las difusiones son del tipo de gradiente lineal, o lo que es lo mismo, una parte de las impurezas difundidas atravesaron la unión y alcanzaron la zona p. Esto produce una perturbación de la red en esa zona que va a actuar como trampa para los portadores creados en ella y por tanto disminuye la probabilidad de que estos alcancen la unión.

Por último, se ha querido saber cuál sería la eficiencia de estas células si en vez de iluminarla con la fuente luminosa del laboratorio se iluminase con la luz solar. En la figura 8 se representan los espectros luminosos de la lámpara de xenón usada y del sol. El espectro solar es mayor en la región del visible y menor en la del infrarrojo. Mediante un programa apropiado se comprobó que la diferencia de eficiencias totales es menor que el 1 % de la eficiencia total de la célula.

## CONCLUSIONES

La célula de mayor eficiencia obtenida ha sido aquella en que la profundidad de la unión está a  $2,6\mu$ ; su eficiencia ha sido del

FIGURA 8. Longitud de onda ( $\mu$ )

7,1 %. Si tenemos en cuenta que la capa semitransparente evaporada reduce su eficiencia casi en un factor 2, creemos que ésta será aumentada si en vez de esta capa usamos contactos óhmicos opacos en forma de pata de gallo. Esto unido a una reducción en el precio de coste, con respecto a las células de Si monocristalino, puede hacerlas bastante competitivas. Esto estimula a continuar la investigación sobre el presente tema.