

## CARACTERIZACION DE FOTODIODOS DE JUNTURA p-n EN BASE A SILICIO MONOCRISTALINO

M. García, S. Aguilera, A. Martell, G. Santana, J. Almeida y O. Lam  
Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica,  
Universidad de La Habana

### RESUMEN

En este trabajo se presenta la secuencia tecnológica utilizada en la obtención de fotodiodos de silicio monocristalino de juntura p-n. Además, se analizan dichos dispositivos por curvas I-V en condiciones de oscuridad y por respuesta espectral, observándose que sus características son similares a las de los fotodiodos comerciales del mismo material de partida.

### ABSTRACT

The technological sequence used to obtain p-n junction of monocristaline Si photodiodes is presented. The obtained devices are analysed by I-V curves under conditions of darkness and its spectral response; the shown characteristics are similar to those of commercial photodiodes made from the same starting material.

### I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la automatización y la mecanización de la industria, los dispositivos optoelectrónicos supervisan y regulan todo tipo de procesos, tales como llenado, conteo, colocación, protección, vigilancia, etc. Los detectores más utilizados para estos fines reaccionan a la luz visible y/o infrarroja. Otra aplicación importante está en las comunicaciones ópticas,

la cual puede ser llevada a cabo acoplando un LASER o un LED a un fotodetector, ambos alojados en una misma cápsula.

Los dispositivos fotodetectores se caracterizan por diferentes parámetros ópticos y eléctricos que determinan su posible aplicación. Éstos están relacionados con su eficiencia, su sensibilidad espectral, su tiempo de respuesta a la radiación a la cual es sensible, así como con su voltaje de ruptura, que puede obtenerse a partir de sus características volt-ampéricas, y que permite conocer el rango de trabajo de los fotodiodos polarizados en inversa.

En nuestro país se ha centrado interés en el desarrollo de la electrónica y entre los aspectos abordados juega un papel decisivo la fabricación de dispositivos fotodetectores y, en particular, los fotodiodos de silicio que constituyen el objetivo de nuestro trabajo.

## II. RESULTADO

### 2.1. TECNOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LA JUNTURA p-n

La juntura p-n se obtiene por difusión de boro, a partir de una fuente sólida de  $B_2O_3$  sobre un sustrato de silicio tipo n de orientación  $\langle 100 \rangle$  y resistividad 7,5 - 15 ohm-cm. La superficie de la oblea fue atacada selectivamente con una solución de KOH adecuada [1] para disminuir las pérdidas por reflexión especular en la superficie.

La estructura tecnológica utilizada en nuestro laboratorio para la obtención de fotodiodos de juntura p-n de silicio se muestra en las figuras 1a y 1b. Ambos esquemas difieren por la utilización de una capa  $n^+$  en el segundo caso, la cual se realizó por difusión de fósforo a partir de una fuente líquida de  $POCl_3$ .

### 2.2. CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS

Las características volt-ampéricas, ya sea bajo iluminación o en condiciones de oscuridad, son ampliamente utilizadas para analizar el comportamiento de un fotodiodo [2,3]. En el presente trabajo el análisis se realiza en condiciones de oscuridad conectando el dispositivo a una fuente establecida de voltaje. La corriente medida (I) para cada voltaje aplicado (V) responde a la siguiente expresión:

$$I = I_0 \cdot \{ \exp [ (q/kT) (V + I R_s) ] - 1 \}$$

Las características volt-ampéricas medidas en directa y en inversa permiten calcular las resistencias serie ( $R_s$ ) y paralelo ( $R_p$ ) del dispositivo. Para este fin se elaboró un programa de computación, el cual da también información sobre otros parámetros del dispositivo tales como densidad de corriente de recombinación  $I_r$  y de difusión  $I_d$ , factor de perfeccionamiento de la rama recombinativa  $A_r$  y de la difusiva  $A_d$  y el voltaje hasta el cual predomina la recombinación, con solo introducirse los valores de corriente y de voltaje medidos.

### 2.3. RESPUESTA ESPECTRAL

Para la determinación experimental de respuesta espectral (R.E.) de fotodetectores de silicio monocristalino se utilizó el método de corriente directa, que se basa en la incidencia de la luz continua de longitud de onda conocida sobre el fotodiodo.

Para las mediciones de fotocorriente se utilizó un electrómetro *TAKEDA RIKEN*, que permite detectar corrientes del orden de pA, acoplado convenientemente a un espectrofotómetro *CF-26*, cuyo rango espectral está entre los 200 y 1200 nm, y al cual hubo que hacerle algunas adaptaciones ópticas y eléctricas que permitieran un perfecto aislamiento.

Para realizar las mediciones se utilizó como referencia un fotodiodo comercial de silicio monocristalino, de respuesta y sensibilidad espectral conocidas, con el fin de calcular y comparar las R.E. y la sensibilidad de los fotodiodos fabricados en nuestro laboratorio.

La respuesta espectral del fotodiodo de prueba se calculó a partir de la expresión

$$RE_p(\lambda) = RE_r(\lambda) \langle I_p/I_r \rangle (A_r/A_p)$$

y su sensibilidad a partir de

$$S_p(\lambda) = S_r(\lambda) \langle I_p/I_r \rangle (A_r/A_p)$$

donde  $I_p$  es la fotocorriente medida del fotodiodo de prueba y  $S_r$ ,  $I_r$  y  $RE_r$  la sensibilidad, la fotocorriente y la R.E. del fotodiodo de referencia, en el rango de 400 a 1200 nm.

Los resultados obtenidos fueron procesados también por métodos computacionales.

## III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 3.1. ANÁLISIS ELÉCTRICO

Para analizar eléctricamente los fotodiodos de juntura p-n obtenidos en nuestro laboratorio se utilizó el método de mediciones en la oscuridad propuesto por Neugroschel [2].

La Figura 2 muestra las características I-V oscuras típicas de los fotodiodos estudiados, sin y con capa  $n^+$ . A partir de ellas se puede calcular la resistencia serie ( $R_s$ ) por la pendiente de la curva a altos valores de corriente y la resistencia paralelo ( $R_p$ ) por la pendiente de la curva para bajos valores de polarización.

En esta figura también se puede apreciar como se incrementa notablemente el voltaje de ruptura  $V_r$  para los fotodiodos con capa  $n^+$  [4].

Las Figuras 3 y 4 permiten observar los mecanismos de conducción que están presentes, encontrar el voltaje límite entre la rama recombinativa

y la difusiva y hallar las densidades de corriente y los factores de perfeccionamiento de las mismas.

En la Tabla I se presentan los valores obtenidos de resistencia serie y paralelo para fotodiodos sin y con capa  $n^+$ . En ella se aprecia que  $R_s$  no cambia sensiblemente, manteniéndose en el mismo orden de magnitud, mientras que  $R_p$  es mayor, en un orden, para los dispositivos que tienen capa  $n^+$ .

### 3.2. ANÁLISIS ÓPTICO

La fotocorriente coleccionada para cada longitud de onda, relativa al número de fotones incidentes sobre la superficie del dispositivo a esa longitud de onda, determina la respuesta espectral. Ésta, a su vez, se puede expresar numéricamente en función de parámetros tales como la eficiencia cuántica externa y la sensibilidad.

La Figura 5 presenta las curvas de eficiencia cuántica externa en función de la longitud de onda para un fotodiodo típico sin y con capa  $n^+$ , respectivamente. Al compararlas se observa que la eficiencia alcanza valores mayores para el caso de los fotodiodos que tienen capa  $n^+$ .

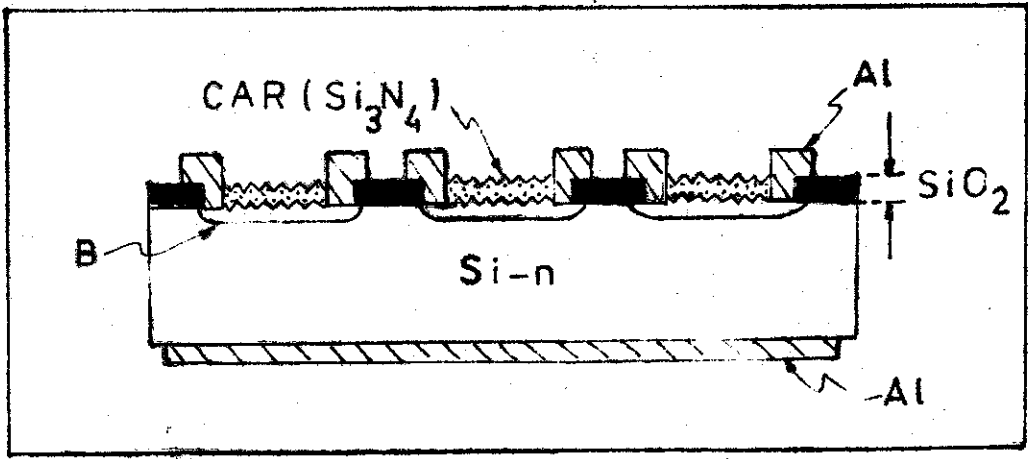
La Figura 6 muestra las curvas de sensibilidad espectral de ambos dispositivos. Es notable el incremento de la sensibilidad en los fotodiodos que presentan capa  $n^+$ , alcanzándose valores de hasta 0,55 A/W para una longitud de onda de 800 nm. Este resultado coincide con lo reportado por la literatura relacionada con fotodiodos de silicio comerciales [5-7].

### CONCLUSIONES

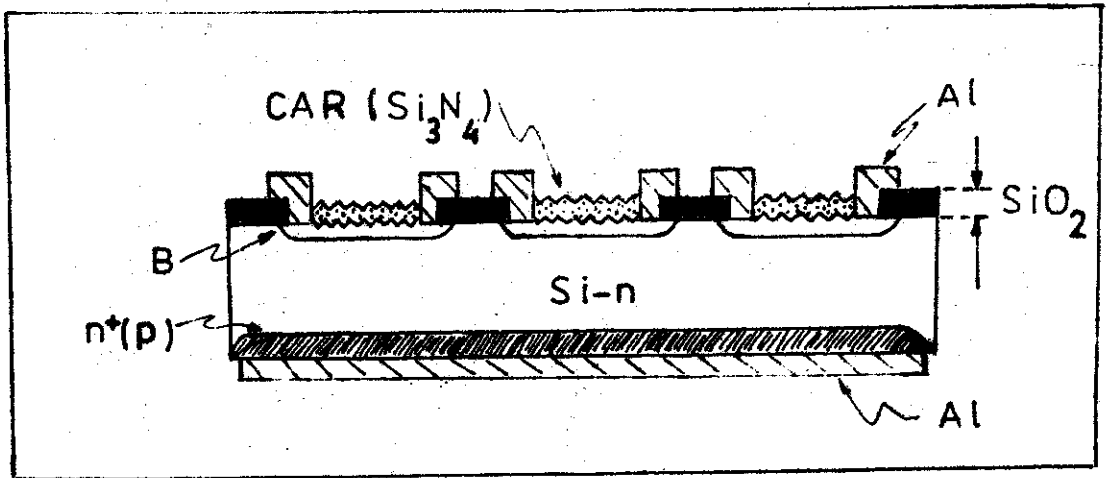
1. La resistencia paralelo se incrementa con la presencia de la capa  $n^+$ , mientras que la resistencia serie no varía sensiblemente.
2. El voltaje de ruptura se incrementa con la presencia de la capa  $n^+$ .
3. La eficiencia cuántica externa y la sensibilidad alcanzan mayores valores en los dispositivos con capa  $n^+$  para  $\lambda$  más altas.
4. Los resultados obtenidos permiten reconocer la puesta a punto de la tecnología de obtención de fotodiodos de Si en nuestros laboratorios.

TABLA I

FOTODIODO	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )
Sin capa $n^+$	9,4 +- 0,63	$1,70 \cdot 10^5$ +- $0,17 \cdot 10^5$
Con capa $n^+$	34,9 +- 1,04	$6,47 \cdot 10^6$ +- $0,21 \cdot 10^6$



(a)



(b)

Figura 1. Estructura tecnológica de los fotodiodos de juntura p-n estudiados: (a) sin capa  $n^+$ ; (b) con capa  $n^+$ .

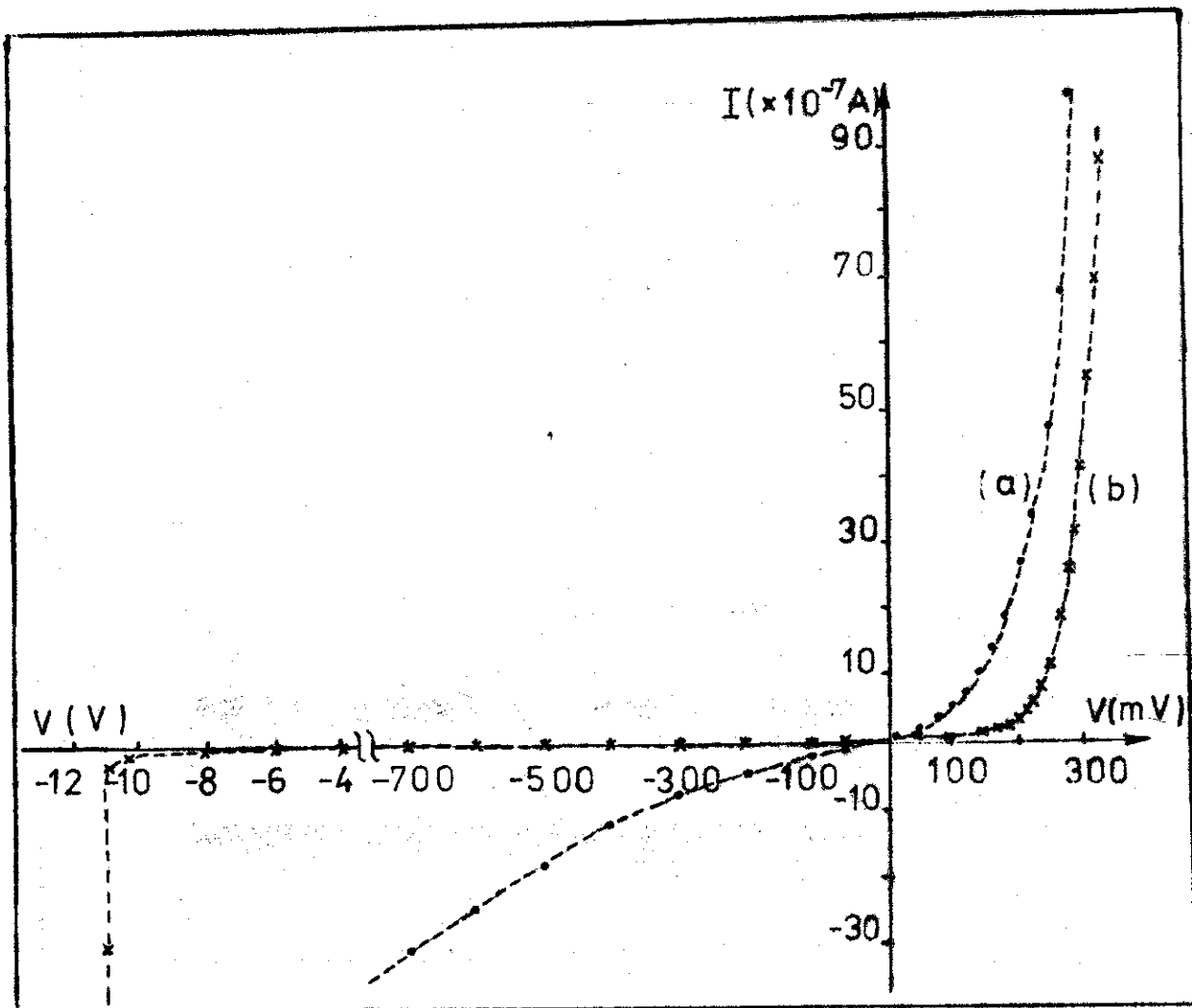


Figura 2. Características I-V típicas en condiciones de oscuridad de los fotodiodos estudiados: (a) sin capa  $n^+$ ; (b) con capa  $n^+$ .

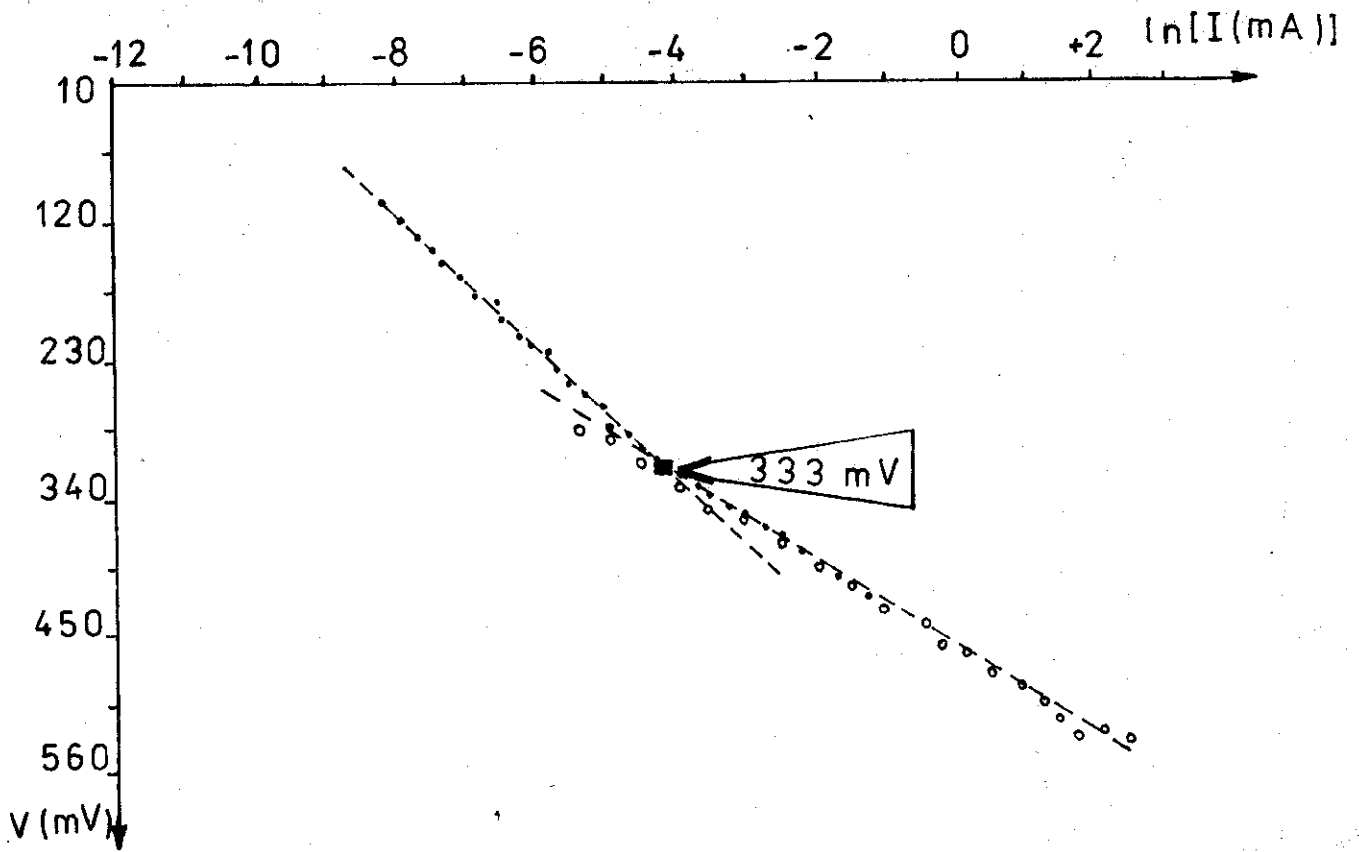


Figura 3. Dependencia del  $\ln I$  vs  $V$  de un fotodiodo típico sin capa  $n^+$ .

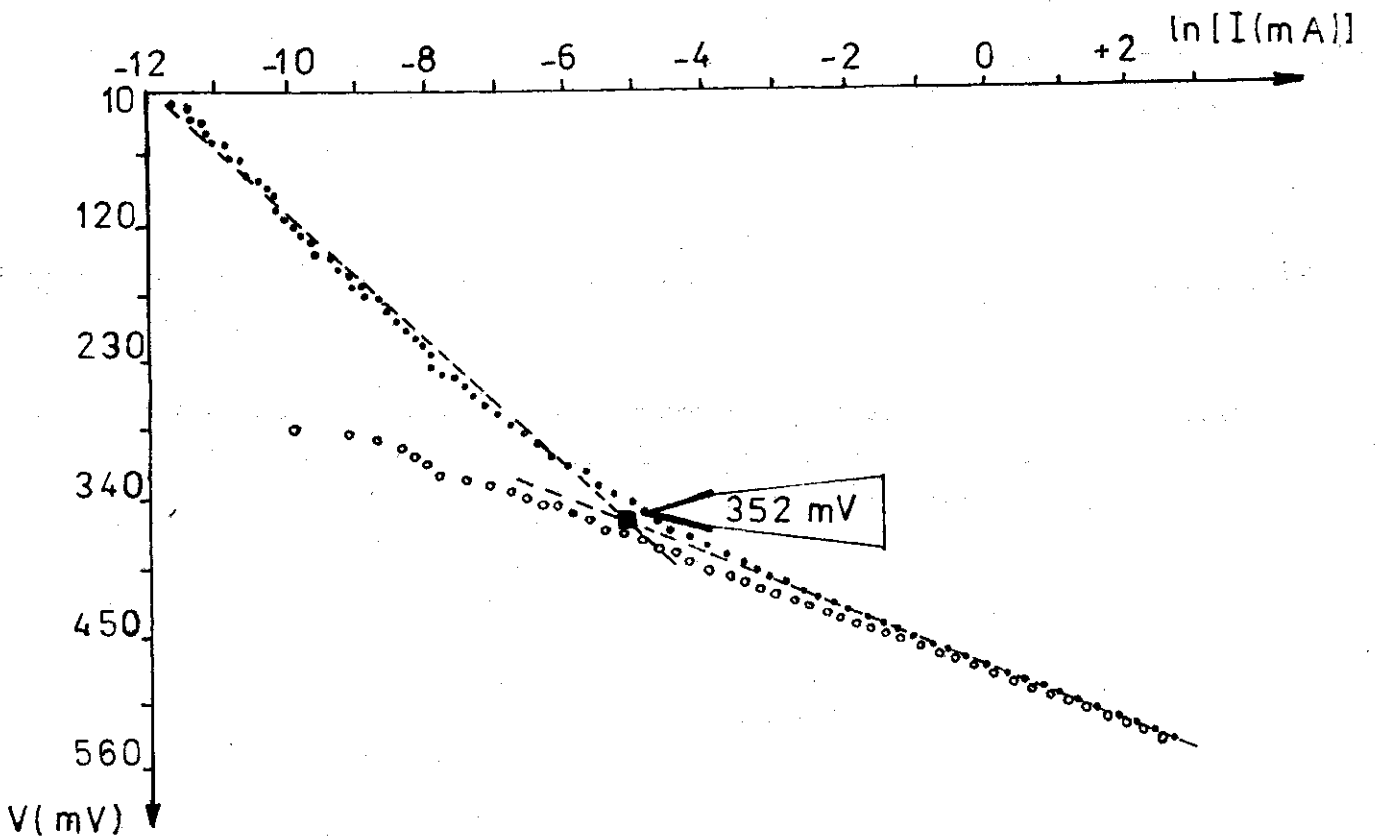


Figura 4. Dependencia del  $\ln I$  vs  $V$  de un fotodiodo típico con capa  $n^+$ .

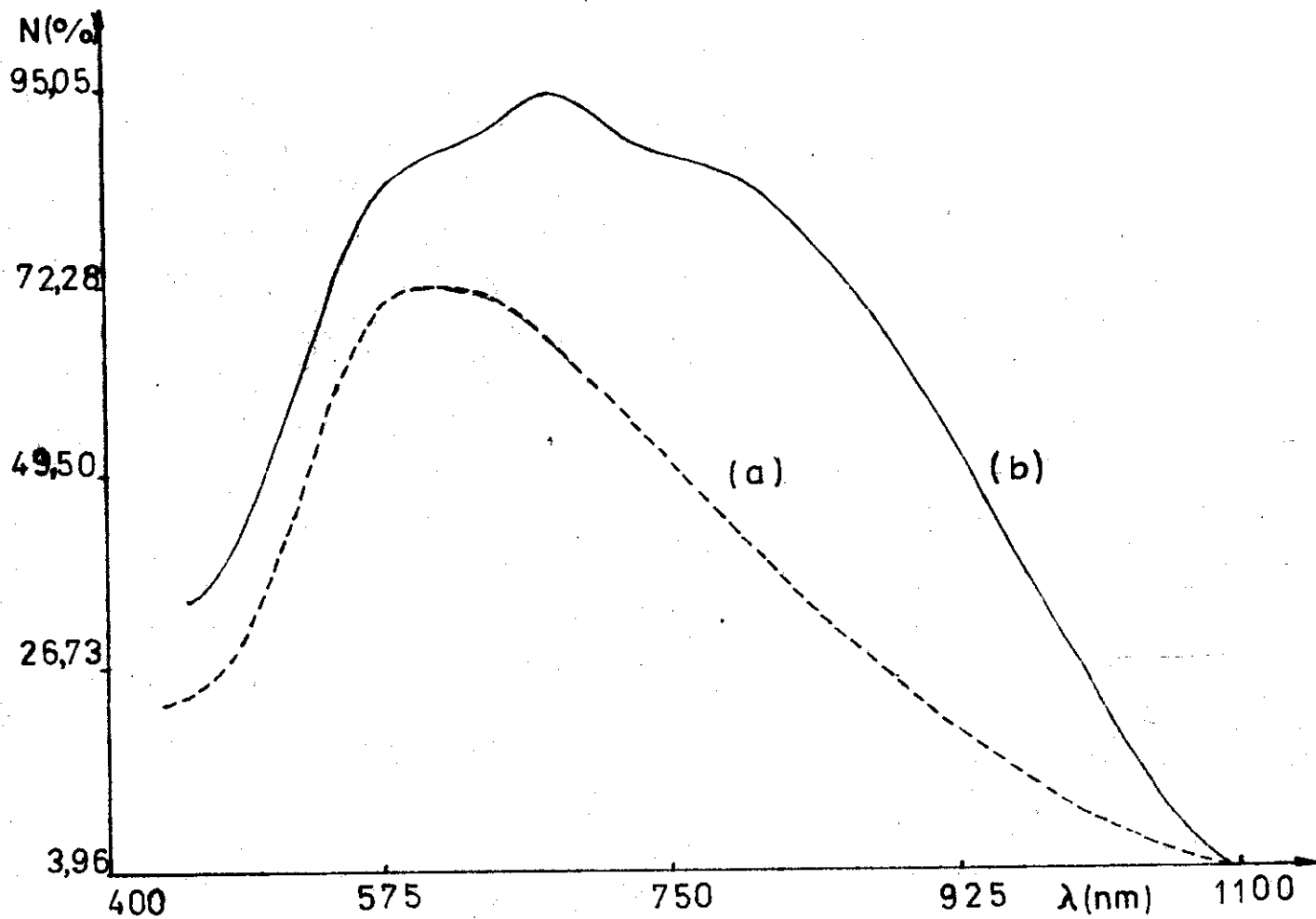


Figura 5. Eficiencia cuántica externa en función de la longitud de onda de la radiación incidente de los fotodiodos estudiados: (a) sin capa  $n^+$ ; (b) con capa  $n^+$ .



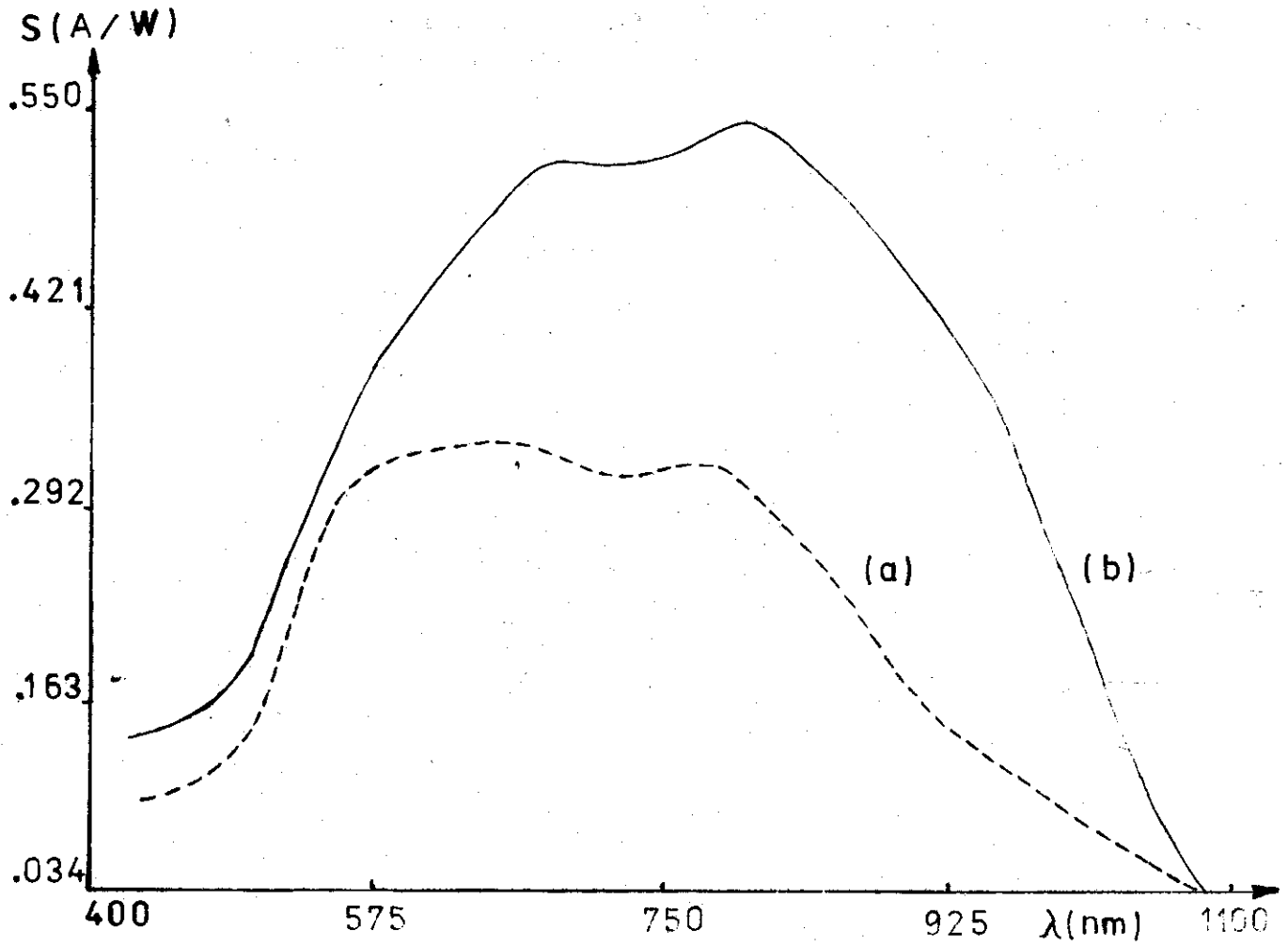


Figura 6. Sensibilidad espectral típica de los fotodiodos estudiados:  
 (a) sin capa  $n^+$ ; (b) con capa  $n^+$ .

## REFERENCIAS

- 1 García. M.; A. Rodríguez Papa  
*Física y Tecnología de Semiconductores*. Vol. II, No 2, 1985,  
127-137.
- 2 Neugroschel, A. y CH. Lindholm F  
*IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-24, 6.
- 3 Martell, A.; S. Aguilera; N. Safronova y M. García  
*Cryst. Res. Technol.*, 20 (1985), 9, 1261-1269.
- 4 Stofieva, V.I.  
*Poluprovodnikobie fotopriomniki*, Moskva, Radio y Sviaz (1984).
- 5 Sze  
*Physics of Semiconductors Devices*, (1985).
- 6 De Sah, Noyce y Shockley  
*Proc. IRE*, 45, (1957), 1228-43.
- 7 Carter, H. y M. Donker  
*Optoelectrónica Aplicada*, Biblioteca Técnica Phillips, Madrid, (1981).