

## DETERMINACION DE LA LONGITUD DE DIFUSION DE PORTADORES MINORITARIOS EN CELDAS SOLARES POR MEDICIONES FOTOVOLTAICAS

O. Vigil, A. Fornés y N. Torres

Laboratorio de Investigaciones en Electrónica del Estado Sólido (LIEES)  
Facultad Físico-Matemática. Universidad de La Habana

### ABSTRACT

The minority carrier diffusion length is one of the most important parameters in solar cells; for this reason, the way of measuring this parameter is very important. However, the measuring of the diffusion length is not an easy measurement, because of the sophistication of

them in itself.

In this paper we present the results of the application of the photovoltaic method to solar cell of Si and CdS/Cu<sub>x</sub>S. These results show that the photovoltaic method is very useful for the measurement of the diffusion length in homojunction and heterojunction solar cell.

### RESUMEN

La longitud de difusión de los portadores minoritarios es uno de los parámetros más importantes en las celdas solares; por esta razón, los métodos experimentales que se escojan para su determinación son importantes. Sin embargo, la medición de la longitud de difusión en líneas generales no es una medida fácil, debido a la sofisticación de los métodos propiamente.

En este trabajo presentamos los resultados de la aplicación del método fotovoltáico en celdas solares de Si y CdS/Cu<sub>x</sub>S. Estos resultados muestran que el método fotovoltáico es muy útil en las mediciones de longitud de difusión en celdas solares a base de homojunturas y heterojunturas, por su relativa rapidez, así como por la confiabilidad del mismo.

## INTRODUCCION

Entre la gama de parámetros a medir en una celda solar, resalta por su importancia, la longitud de difusión de los portadores minoritarios, ya que es un factor que afecta la eficiencia y la respuesta espectral de la celda. Varios métodos han sido utilizados en la determinación de este parámetro, como son: fotoluminiscencia, catodoluminiscencia, método de la junta, etc. [1]; sin embargo, estos métodos presentan algunas dificultades, tales como:

- a) Utilización de instrumentación en general sofisticada y tiempos relativamente largos para el procesamiento de los resultados.
- b) Se diseñan, por lo general, para la determinación de la longitud de difusión volumétrica, que en líneas generales no da una información correcta de la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la celda (producto del proceso tecnológico de preparación del dispositivo).

Debido a estas dificultades, hemos evaluado la aplicación del método de mediciones fotovoltaicas en la medición de  $L_n$  en celdas solares en base a homojunturas y heterojunturas. Este método ha sido aplicable fundamentalmente a celdas solares de Si

[2-3].

En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en una heterojuntura de  $CdS/Cu_xS$  y su comparación con los obtenidos en una celda solar de Si.

En el primer caso se trabajó con celdas solares fabricadas a capas delgadas y, en el segundo, en una celda comercial de Si.

El cálculo de  $L_n$  por el método de la respuesta espectral se basa en la expresión deducida por Hovel [4]

$$I_{fc} = q I_0 (1-R) \left[ 1 + \frac{\exp(-\alpha d)}{1 + \alpha L_n} \right] \quad (1)$$

donde:

$I_{fc}$  = Fotocorriente que circula por la muestra.

$I_0$  = Intensidad de la luz incidente.

$\alpha$  = Coeficiente de absorción en la zona p.

$d$  = Ancho de la región de deflexión.

$R$  = Reflectividad de la zona p.

Para  $L_n \gg d$  y  $\alpha d \ll 1$ , puede hacerse un desarrollo por Taylor y despreciando  $\alpha d$  frente a  $\alpha L_n$  se obtiene una expresión del tipo:

$$I_{fc} = q I_0 (1+R) \left( \frac{L_n}{L_n + \alpha^{-1}} \right) \quad (2)$$

Ahora bien, si mantenemos constante a  $I_{fc}$  para cada longitud de onda de la radiación incidente, y escribimos  $I = I_0(1-R)$ , la ecuación

(2) se convierte en:

$$I = \text{const.} (\alpha^{-1} + L_n)$$

(3)

donde  $I$  es la intensidad de luz que absorbe la muestra.

De (3) no resulta difícil calcular  $L_n$  de un gráfico de  $I$  en función de  $\alpha^{-1}$ . De este gráfico el intercepto para  $I = 0$  es  $L_n$ .

Además de las condiciones antes mencionadas, es necesario que se cumpla que  $\alpha d \gg 1$  (donde  $d$  es el espesor de la zona  $p$ ). Esto quiere decir que la luz debe ser absorbida en todo el espesor.

Otra variante al método de la fotocorriente lo constituye las mediciones de fotovoltajes (en muchas celdas los valores de fotocorriente son pequeños, siendo aún menores cuando la celda sólo recibe luz monocromática). En estos casos es aconsejable las mediciones de fotovoltaje. En la variante del fotovoltaje se mide el voltaje a circuito abierto en lugar de la fotocorriente de corto circuito. En este caso, es necesario imponer las siguientes consideraciones:

Sabemos que:

$$I_c = I_{cc} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

(4)

donde  $I_c$ : Corriente total

$I_{cc}$ : Corriente de corto circuito

$I_s$ : Corriente de saturación

En condición de voltaje a circuito abierto ( $V_{ca}$ ) la corriente total es cero, es decir:

$$I_{cc} = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{ca}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Si  $V_{ca}$  es pequeño, de manera que:

$$\exp\left(\frac{qV_{ca}}{kT}\right) \approx 1 + \frac{qV_{ca}}{kT}$$

entonces:

$$I_{cc} = \frac{I_s q}{kT} V_{ca} \quad (5)$$

De (5) se observa que  $V_{ca}$  es proporcional a  $I_{cc}$ , por lo que la ecuación (3) será igualmente válida si trabajamos en régimen de voltaje a circuito abierto, constante. Así, será posible obtener un gráfico de la intensidad en función de  $\lambda$ , conociendo  $\alpha^{-1}$  en función de  $\lambda$ , establecer la relación entre la intensidad de luz que llega a la muestra y el inverso del coeficiente de absorción.

#### DESARROLLO EXPERIMENTAL

Un gráfico del sistema utilizado en nuestras mediciones se muestra en el circuito a bloque de la Fig. 1.

La instrumentación utilizada fue la siguiente:

Lámpara de tungsteno: 240 watts - 24 volts.

Fuente estabilizada de voltaje: 300 watts - 30 volts.

Monocromador: SF-4; dispersión lineal  $16 \frac{\text{Å}}{\text{mm}}$ .

Fotodiodo PIN de Si (H.P. 2448).

Microvoltímetro Phillips; sensibilidad 10  $\mu\text{v}$  - impedancia de entrada 1M  $\Omega$ .

Millivoltímetro Phillips; sensibilidad 10 Mv - impedancia de entrada 100M  $\Omega$ .

Espejo semitransparente.

#### a) Calibración del sistema.

Dado que el espejo semitransparente utilizado fue construido en nuestro laboratorio mediante la deposición de una capa de aluminio, procedimos a determinar su porcentaje de respuesta de luz reflejada y transmitida con la longitud de onda de la luz incidente.

Para esta medición utilizamos un fotodiodo PIN de Si y los resultados obtenidos fueron normalizados respecto a la respuesta espectral del fotodiodo.

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 2, mostrándose el porcentaje de luz reflejada por el espejo respecto a la luz transmitida en función de la longitud de onda de la radiación incidente.

La respuesta del sistema (lámpara y monocromador) fue obtenida normalizando la respuesta del fotodiodo (con espejo y sin espejo) respecto a la respuesta espectral de este fotodispositivo, mostrándose los resultados en la Fig. 3. Una vez calibrado el sistema, se procedió a determinar la respuesta espectral de las celdas a estudiar.

#### b) Respuesta espectral de las celdas.

Esta medición es necesaria para tener una idea del rango en que hay mayor variación de la fotocorriente o del voltaje a circuito abierto, con la longitud de onda de la radiación incidente al material base.

Las respuestas espectrales fueron obtenidas en condición de voltaje a circuito abierto, normalizando los valores obtenidos con la respuesta espectral del fotodetector.

Los resultados obtenidos para las celdas solares de Si y CdS/Cu<sub>2</sub>S se muestran en las Figs. 4, 5 y 6 respectivamente.

#### c) Determinación de $\ln$ .

Como se planteó en la introducción, para la determinación de  $\ln$  es necesario conocer los valores de  $\alpha^{-1}$  para el material base.

Esto puede determinarse midiendo directamente sobre muestras análogas a las utilizadas en la fabricación de celdas o tomando los valores reportados en la literatura, método este más impreciso.

En nuestro trabajo, como hemos utilizado celdas fabricadas en otros laboratorios, nos es imposible la determinación de  $\alpha$  de manera directa con el material base y hemos tenido que utilizar lo reportado por la bibliografía.

Para el caso de la celda de Si el valor del recíproco del coeficiente de absorción fue calculado a partir de la representación matemática dada por Runyan [5].

$$\alpha^{-1} = [0.526367 - 1.14425 \lambda^{-1} + 0.585368 \lambda^{-2} + 0.039958 \lambda^{-3}]^{-1} \quad (6)$$

La corrección de las pérdidas por reflexión (1-R) fue hecha de acuerdo a la representación matemática dada por Phillip y Taft [6]

$$1-R = 0.6786 + 0.03565 \lambda^{-1} - 0.03149 \lambda^2$$

para la evaluación de la ecuación (3) se hicieron varias mediciones a diferentes valores de voltaje de circuito abierto constante y diferentes aberturas en el monocromador. Se hizo variar la longitud de onda, escogiéndose los valores de 0.8, 0.85, 0.9, - 0.95, 0.97 y 1.00  $\mu\text{m}$ . Para cada valor de longitud de onda se fija el valor del voltaje de circuito abierto variando la intensidad de la luz sobre la muestra. Leyendo en el microvoltímetro las variaciones de intensidad que llegan al fotodiodo, podemos conocer la intensidad de luz absorbida por la región base para cada longitud de onda y calculando el inverso del coeficiente de absorción

dado por (6), es posible obtener el valor de  $\ln$  como el intercepto del gráfico de intensidad de luz absorbida vs el recíproco del coeficiente de absorción para  $I=0$ .

Los resultados experimentales se muestran en la Fig. 7. De esta figura se obtiene un valor de  $\ln = 35 \mu\text{m}$ , resultado este comprendido en el rango de valores reportados por otros autores que utilizan esta técnica, en celdas solares construidas por diversos métodos [7], [8], [9]. Para el caso de la celda CdS/Cu<sub>2</sub>S, el recíproco del coeficiente de absorción fue calculado promediando los valores reportados por la literatura [10] mientras que las pérdidas por reflexión no fueron tomadas en cuenta (por no encontrarse este dato en la literatura consultada); no obstante los errores introducidos por este hecho, puede obtenerse un valor bastante acertado para  $\ln$ .

Nuestras mediciones se realizaron en un rango de longitudes de ondas de 0.7 a 1.1  $\mu\text{m}$  y distintas aberturas del monocromador. El método empleado es análogo al que se explicó en el caso de la celda de Si.

Los resultados experimentales de las celdas de CdS/Cu<sub>2</sub>S construidas por evaporación al vacío y el método de spray, se muestran en las figuras 8 y 9 respectivamente. De estas gráficas se obtiene un valor de  $\ln$  de 0,3  $\mu\text{m}$ , resultado este que coincide con lo reportado por Gill [11], usando otras técnicas.

## DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las celdas solares de Si y  $\text{CdS/Cu}_2\text{S}$  para los valores de  $L_n$  nos permite confiar en la validez del método utilizado.

Para la aplicación de este método, es necesario que se cumplan ciertas condiciones; en primer lugar, es necesario que las celdas presenten una respuesta espectral de cierta magnitud (esto se relaciona con la eficiencia de la celda misma), ya que la determinación de voltaje a circuito abierto o corriente de corto circuito constante, puede hacerse crítica.

Este hecho hace crítico el estudio de la longitud de difusión en aquella celda en que el valor de corriente de corto circuito es pequeño.

Otro aspecto crítico a tener en consideración es la determinación precisa del inverso del coeficiente de absorción del material base, ya que de la precisión con que se determina  $\alpha^{-1}$  depende la exactitud del método.

En el caso de la celda  $\text{CdS/Cu}_2\text{S}$ ,  $\alpha^{-1}$  se calculó promediando las curvas dadas por L. G. Barton [10]. En la zona de grandes valores de  $\alpha^{-1}$  el error aumenta debido a la inexactitud de  $\alpha^{-1}$ . Este hecho influyó más decisivamente en la celda construida por evaporación; posiblemente por la mayor influencia en ella, del pequeño aporte de  $\alpha^{-1}$  en esta zona del espectro.

Un análisis combinado de las curvas de respuesta espectral y determinación de  $L_n$  en la región base, permite formular algunas hipótesis sobre algunos de los mecanismos que tienen lugar en las celdas objeto de estudio.

Por no ser objetivo de este trabajo presentar un estudio de estos posibles mecanismos, no nos detendremos en estas consideraciones. Un análisis de estos mecanismos se da en las referencias [12] y [13].

El método de las mediciones fotovoltaicas es particularmente poderoso en el estudio de la influencia de los procesos tecnológicos de fabricación de una celda en el valor de  $L_n$ . En este sentido, es necesario conocer los valores de  $L_n$  en el material base antes y después de la fabricación del dispositivo. La  $L_n$  en el material base puede determinarse mediante la construcción de una barrera de Schottky, siguiendo el mismo método empleado en este trabajo.

## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método experimental para la determinación de la longitud de difusión de los portadores minoritarios en la región base de celdas solares, basado en mediciones de fotovoltaje.

Dada la importancia de este parámetro en la eficiencia de conversión de dispositivos optoelectrónicos, su relativa sencillez comparado con otros métodos y los resultados que se obtienen del mismo, este método puede ser empleado como característica importante en el estudio de los dispositivos que se construyen en nuestro laboratorio

De acuerdo al principio de trabajo, el método puede ser aplicado en la determinación de  $I_n$  e  $I_p$  en elementos y compuestos semiconductores (a través de la formación de un contacto rectificante) y, por lo tanto, el método es poderoso en la evaluación de la influencia de los procesos de fabricación del dispositivo en las propiedades de los materiales base.

#### BIBLIOGRAFIA

1. F. Blood and J. W. Orton. The electrical characterization of semiconductor. Pergamon Press (1979).
2. E. D. Stokes and I. L. Chu. Appl. Phys. Letters 30 No. 8, 425 (1977).
3. W. E. Phillips. Solid State Electronic 15 No. 10, 1097 (1972).
4. Hovel H. J. Semiconductor and Semimetals edited by R. K. Willarson. A. C. Beer Vol 11, Academic Press/75.
5. W. R. Runyan, Southern Methodist University Report. SMI 83-13 (1967) Also N.A.S.A. CR 93154 and available from National Technical Information Service as N68-16510.
6. H. R. Phulipp and E. A. Taft: Phys Rev. 120, 37/60.
7. E. D. Stokes and T. L. Ches: Appl. Phys Letters 30 No. 8, 425 (1977).
8. R. O. Bell  $4^o$  Conferencia de la IEEE, pág. 89/78.
9. A. Rothoof and K. W. Boer: Prog. Sol. State Chemistry 10 71 (1975).

10. L. C. Burton and H. Windarwi: Journal of Appl. Physic. 47, No. 10 (1976).
11. W. D. Gill. Photovoltaic properties of CuS/CdS heterojunction. Ph. D. Thesis. Stanford University (1970).
12. N. Torres, O. Vigil. Trabajo de curso. Facultad Físico-Matemática (1979).
13. R. González, A. Fornés. Trabajo de Diploma. Facultad Físico-Matemática (1980).

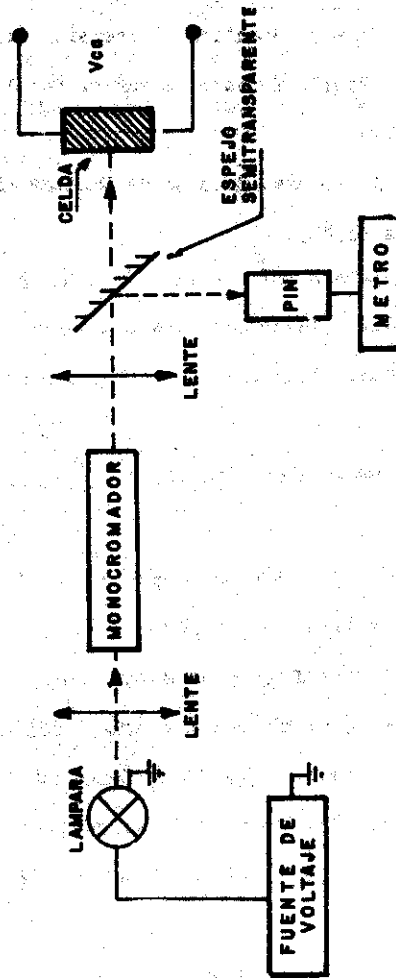


Fig. 1 Circuito a bloque del sistema utilizado en las mediciones de  $L_n$ .

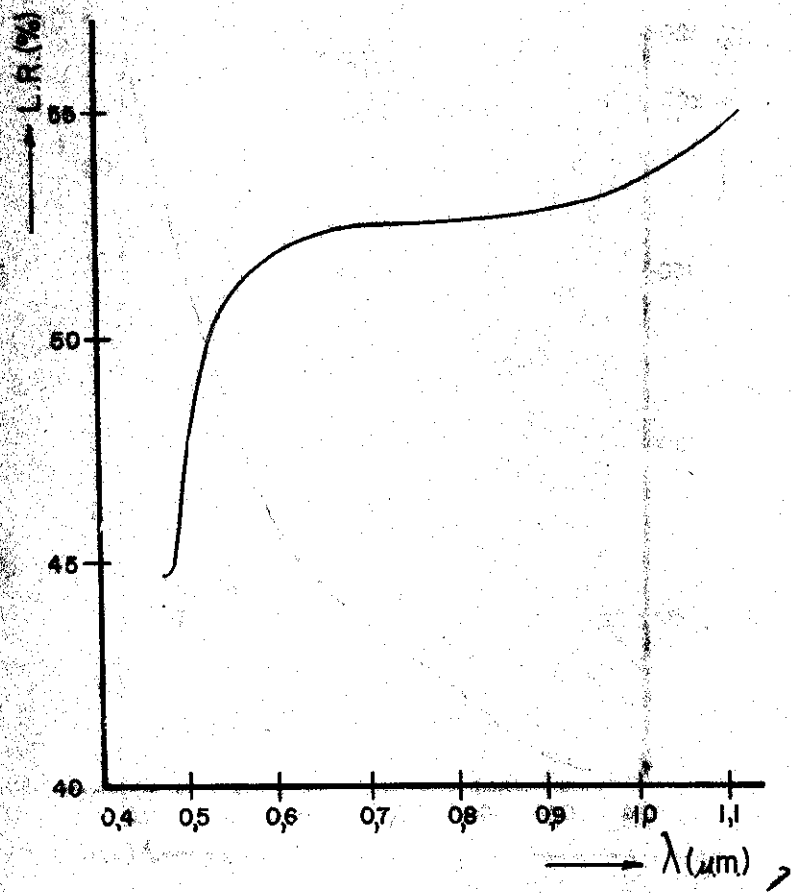


Fig. 2 Luz reflejada por el espejo semitransparente expresado en por ciento respecto a luz total (transmitida + reflejada)



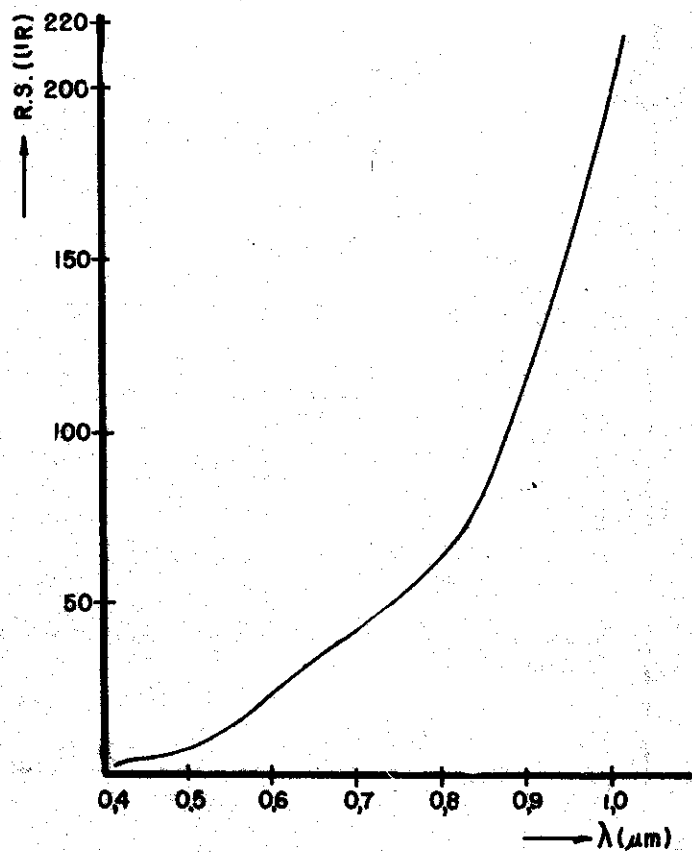


Fig. 3 Respuesta espectral del sistema óptico (lámpara y monocromador).

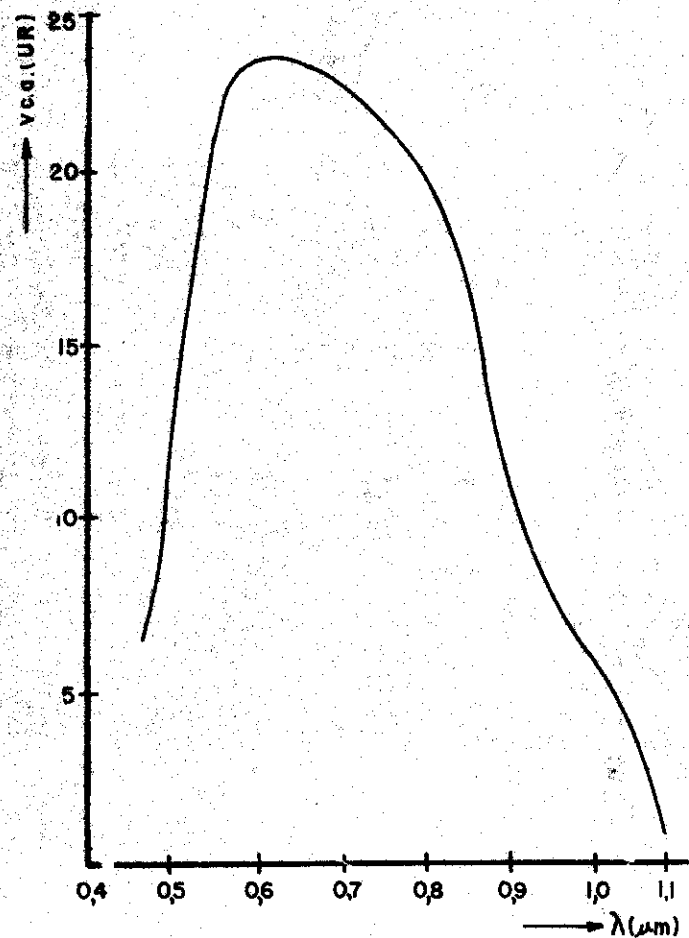


Fig. 4 Respuesta espectral de la celda de Si.

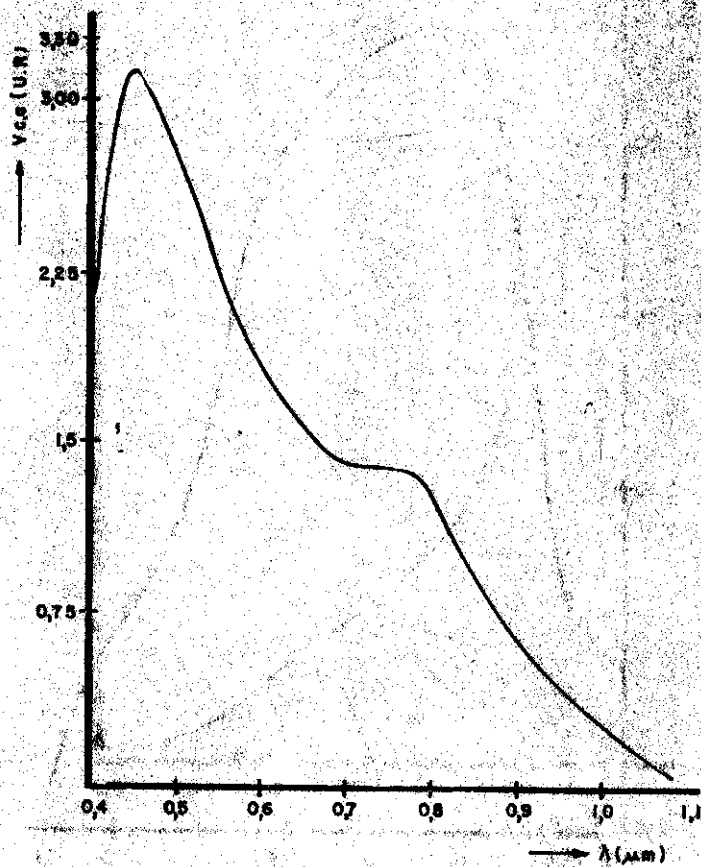


Fig. 5 Respuesta espectral de la celda CdS/Cu<sub>x</sub>S (evaporación).

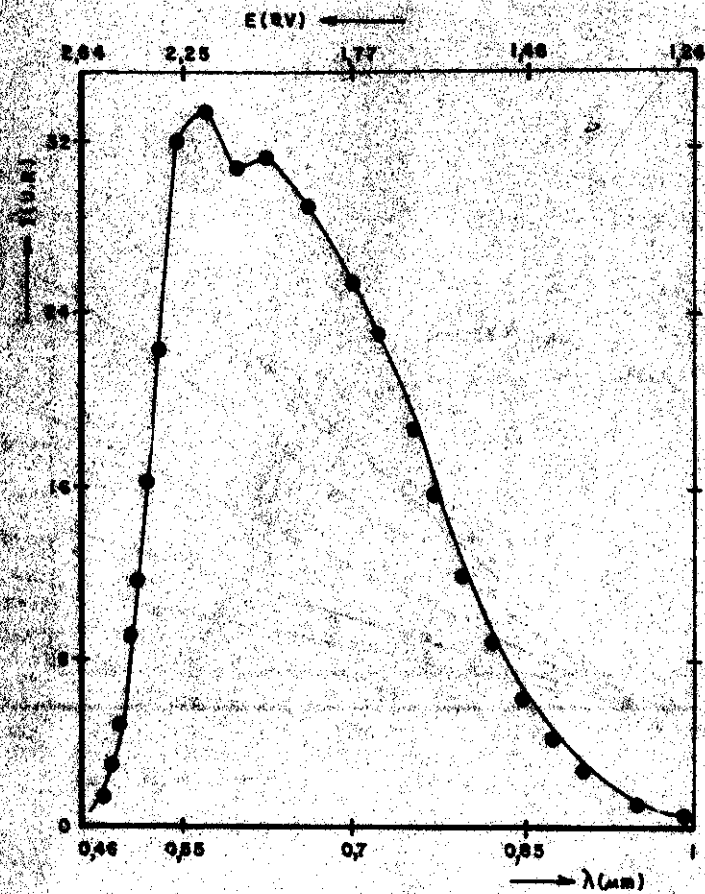


Fig. 6 Respuesta espectral de la celda CdS/Cu<sub>x</sub>S (Spray).

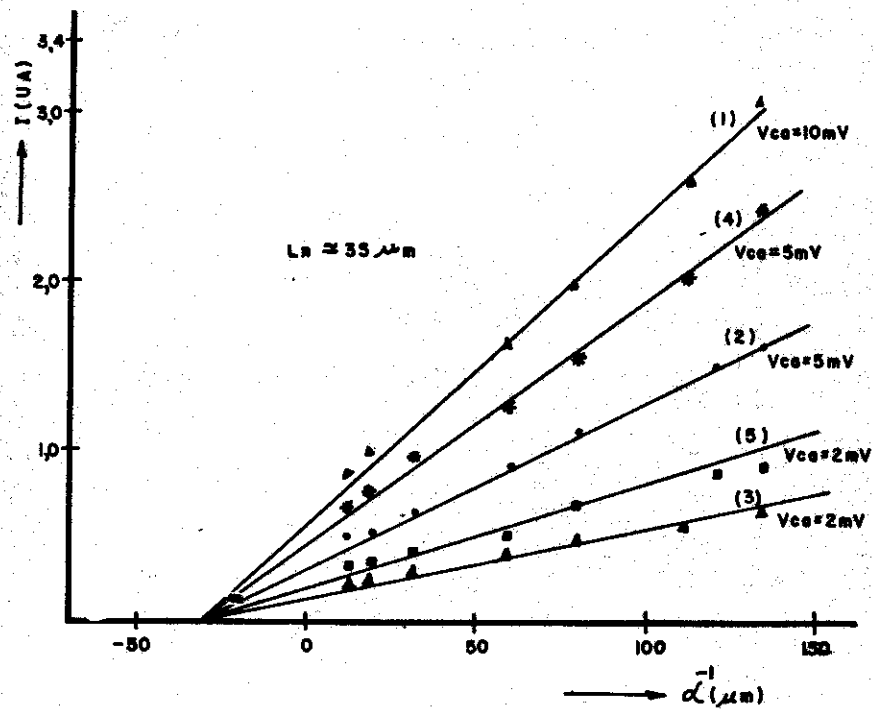


Fig. 7 Variación de la intensidad de luz en función de  $\alpha^{-1}$  para la celda de Si. Las curvas 1, 2 y 3 fueron obtenidas con una abertura en el monocromador de 0,55 mm, a la salida y los 4 y 5 con 0,75 mm.

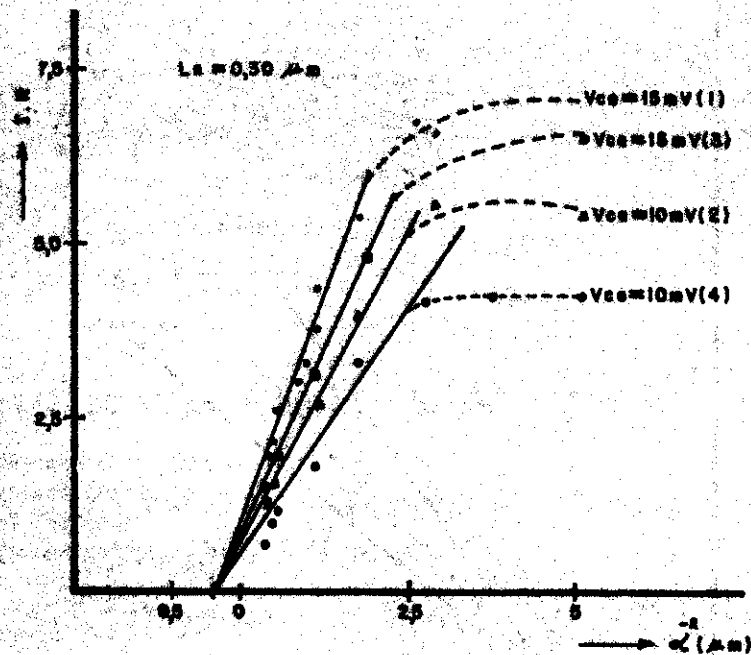


Fig. 8 Variación de la intensidad de luz en función de  $\alpha^{-1}$  para la celda de CdS/CdS (evaporación). Curvas 1 y 2 : Abertura 1 mm. Curvas 3 y 4 : Abertura 0,65 mm.

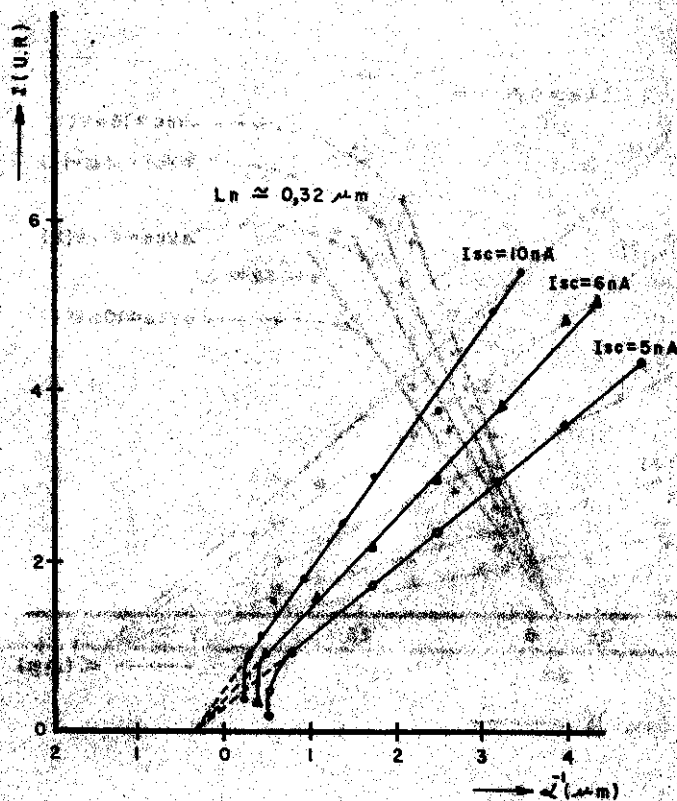


Fig. 9 Idem, de las figuras 7 y 8 para la celda CdS/Cu<sub>2</sub>S (Spray).  
 Abertura: 2 mm.