



## DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ÓPTICAS DE UNA PELÍCULA DELGADA DE CdSe

Juan Carlos Gonzáles\*, César A. Chung

Laboratorio de Alto Vacío y Películas Delgadas, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
Av. Venezuela s/n, Lima 1 - Perú

### Abstract

We determined the complex refractive index of a semiconductor thin film (CdSe) employing transmittance measurements. The  $N$  dispersive low and the absorption coefficient are obtained from the real, respectively, imaginary part of the refractive index. The value of the semiconductor band gap and the nature of the optical transition are studied from the energy dependent absorption coefficient.

PACS: 61.48.+c; 65.40.Gr

Keywords: XMCD, spin valves, nano-oxide layer, magnetoresistance.

### Resumen

Presentamos la determinación del índice de refracción complejo ( $N = n - ik$ ) de una película delgada de Selenuro de Cadmio (CdSe) obtenida a través de medidas de transmitancia. Se obtuvo la ley de dispersión de  $N$  de la parte real del índice de refracción y de la parte imaginaria, el coeficiente de absorción,  $\alpha$ . Analizando la dependencia del coeficiente de absorción con la energía incidente se obtuvo el valor de la banda prohibida de energía del semiconductor y la naturaleza de la transición óptica.

Palabras claves: XMCD, válvula spin, capa nano-óxido, magnetoresistencia.

### 1. Introducción

Una completa caracterización óptica de un semiconductor, en forma de película delgada, es posible mediante medidas del índice de refracción complejo  $N = n - ik$ . La parte real del índice de refracción,  $n$ , está relacionado con importantes propiedades físicas del semiconductor. El conocimiento de las constantes ópticas, tales como:  $n$ ,  $k$  y  $\alpha$ , es muy importante para aplicaciones prácticas de una película delgada semiconductor de CdSe, tal como celdas fotovoltaicas [1]. Por otro lado, la parte compleja del índice de refracción (coeficiente de extinción),  $k$ , está directamente relacionado con coeficiente de absorción,  $\alpha$ , por medio de la expresión,  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ .

Desde un punto de vista práctico, la dependencia con la energía incidente,  $h\nu$ , del coeficiente de absorción nos permitió determinar el valor de la banda prohibida de energía del semiconductor y además obtener la naturaleza de la transición óptica.

Específicamente, se conoce que para una transición directa, el coeficiente de absorción está expresado por [2]:

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

mientras que para una transición indirecta:

$$\alpha = B(h\nu - E_g + E_p)^2 \quad (2)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $E_g$  es el valor de la banda prohibida,  $E_p$  es la energía del fotón envuelto en transiciones indirectas y  $B$  es una constante. Sin embargo si nos encontramos en el caso en que  $E_p \ll E_g$ , entonces la ecuación (2) puede expresarse por:

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^2 \quad (3)$$

\* Corresponding author. e-mail: jgonzalesg1@unmsm.edu.pe

Existen muchos experimentos publicados para medir la banda prohibida de energía de un semiconductor. Muchos de estos métodos utilizan mediciones eléctricas. La más utilizada es la medida de la conductividad en función de la temperatura dentro de la zona intrínseca [3], es decir, variaciones de la temperatura inducidas por un voltaje con una corriente constante en una unión directa polarizada [4].

Cabe señalar que la determinación del índice de refracción complejo,  $N$ , de una película delgada semiconductor es un problema extremadamente complejo. Para determinar dicho índice de refracción complejo aplicamos un método aproximado desarrollado por Szabo y colaboradores [1] para determinar la parte real ( $n$ ) y la parte imaginaria ( $k$ ). Pero el método, a pesar de ser aproximado, es lo suficientemente preciso para determinar el valor de la banda prohibida de energía, así como también obtener la naturaleza de la transición óptica, es decir, si ésta es directa o indirecta.

## 2. Parte Experimental

### 2.1. Crecimiento y Caracterización

Para el crecimiento de la película delgada de CdSe, se utilizó granos de CdSe de la firma Alemana Leybold AG con una pureza de 99.999 % crecida sobre substratos de vidrio Corning de dimensiones 25.4 x 76.2 x 1.1 mm mediante evaporación térmica. La presión de trabajo fue:  $P \sim 1.5 \times 10^{-5}$  mmHg; más detalles técnicos sobre el crecimiento de la muestra se encuentre en la referencia [5]. Se utilizó un equipo de alto vacío marca Cenco Central Scientific Division of Cenco Instruments Corporation, compuesto [5] principalmente de una bomba mecánica, bomba

difusora, baffles y trampas, como se muestra esquemáticamente en la Fig 1.

Las medidas de transmisión fueron realizadas en el Laboratorio de Óptica del Instituto de Física "Gleb Wataghin", en la Universidad Estadual de Campinas - Brasil, mediante el uso de un espectrofotómetro Perkin Elmer lambda 9 en el rango de longitudes de onda de 300 - 3000 nm. El montaje experimental se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.

### 2.2. Método Experimental

La parte real ( $n$ ) y la parte imaginaria ( $k$ ) del índice de refracción complejo pueden ser obtenidas mediante medidas de transmitancia y reflectancia, por medio de las siguientes expresiones aproximadas [6]:

$$T = (1 - R)^2 \exp(-4\pi kx/\lambda) \quad (4)$$

$$= (1 - R)^2 \exp(-\alpha x)$$

$$R = [(n-1)/(n+1)]^2 \quad (5)$$

donde  $x$  es el espesor de la película delgada semiconductor.

Por otro lado, la principal característica del espectro de transmitancia de una película delgada es la presencia de máximos y mínimos de interferencia, como se muestra en la Fig. 3. Dichos máximos y mínimos de interferencia están relacionados con los valores de  $n$ ,  $k$  y  $\alpha$ . Entonces, para obtener los valores de  $n$  y  $\alpha$  del espectro de transmitancia, se analiza el espectro de dividiéndolo en dos partes: (1) zona con presencia de interferencia y (2) zona sin presencia de interferencia, y cada zona se analiza de la siguiente manera:

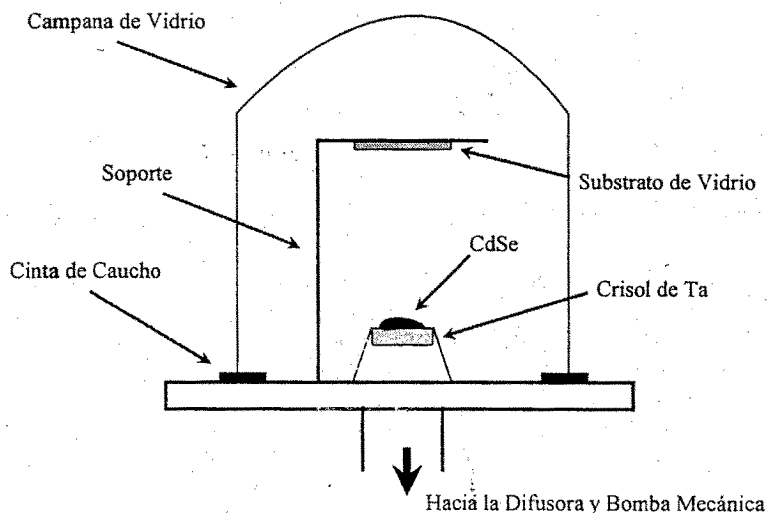


Fig. 1. Diseño esquemático de la campana de Alto Vacío.

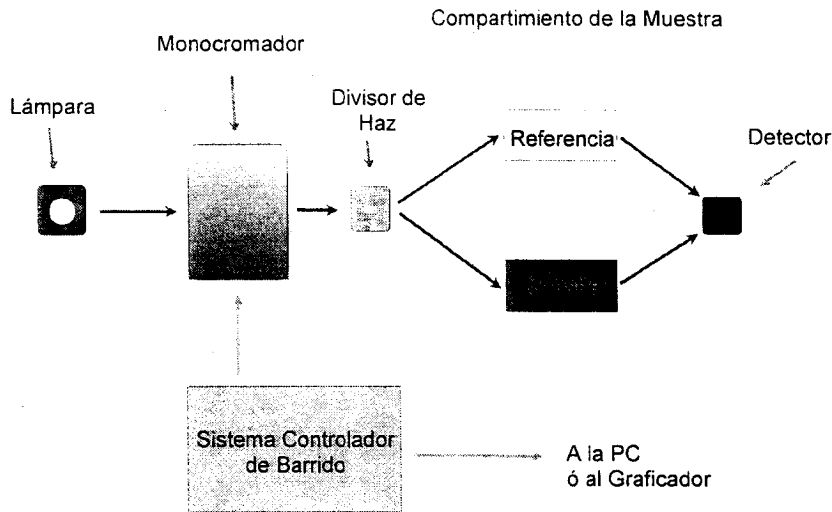


Fig. 2. Diseño esquemático del espectrómetro Perkin Elmer λ - 9.

**Zona con Presencia de Interferencia:**

En primer lugar asumimos que las interferencias observadas son coherentes, la localización de los máximos y los mínimos de interferencia están por lo tanto relacionados con la parte real del índice de refracción a través de las expresiones:

$$2nx = (m + 1/2) \lambda_{m\acute{a}x} \tag{6}$$

$$2nx = m\lambda_{m\acute{i}n} \tag{7}$$

$$m = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$$

donde "m" es el orden de interferencia y x es el espesor de la película.

Podemos observar que todos los parámetros involucrados en las ecuaciones (6) y (7) pueden ser fácilmente determinados como sigue: para valores de energía del fotón incidente lejos del valor de la banda prohibida de energía, es decir, en la región donde la capa semiconductor es transparente, el valor de un mínimo de transmitancia está expresado por la ecuación [6]:

$$T_{\min} = \frac{4n_o n^2 n_i}{(n_o + n^2)(n^2 + n_i^2)} \tag{8}$$

donde  $n_o = 1$  y  $n_i = 1.5$  (valores comúnmente aceptados) son el índice de refracción del aire y del sustrato de vidrio, respectivamente, y  $n$  es el valor desconocido del semiconductor del mismo parámetro. Con estos valores numéricos, la ecuación

(8) se reduce a:

$$T_{\min} = \frac{6n^2}{(n^4 + 3.25n^2 + 2.25)} \tag{9}$$

Entonces, la ecuación (9) puede ser resuelta fácilmente para encontrar los valores de  $n$  en el primer mínimo de transmitancia. Seguidamente, asumimos que el valor de  $n$  para el primer máximo es el mismo, es decir,  $n_{\min} \cong n_{\max}$ . Esta aproximación nos permite obtener el orden de interferencia  $m$ . Así mediante las ecuaciones (6) y (7) se obtiene:

$$m = \frac{\lambda_{\max}}{2(\lambda_{\min} - \lambda_{\max})} \tag{10}$$

Una vez conseguido el orden de interferencia  $m$ , se introduce dicho valor de  $m$  en las ecuaciones (6) y (7), obteniéndose entonces el espesor de la muestra:

$$x = \frac{\lambda_{\max} \lambda_{\min}}{4m(\lambda_{\min} - \lambda_{\max})} \tag{11}$$

Así, la parte real del índice de refracción,  $n$ , puede conseguirse para todos los mínimos de transmitancia por medio de la ecuación (7).

**Zona Libre de Interferencia:**

En esta zona, la ecuación (4) puede ser utilizada para obtener los valores  $\alpha$ ; mientras que los valores de  $n$  para esta zona pueden ser extraídos por la

extrapolación de la parte real del índice de refracción realizado en la zona de interferencia, mediante la regla de dispersión de Cauchy [7]:

$$n = A_1 + B_1 / \lambda^2 \tag{12}$$

Una vez que los valores de  $n$  son obtenidos, se calcula los valores de la reflectancia por medio de la ecuación (5) y al sustituirlos posteriormente en la ecuación (4), se obtienen los valores de  $\alpha$ . Finalmente podemos obtener el valor de la banda prohibida de energía de la siguiente manera: de acuerdo con las ecuaciones (1) y (3), para un semiconductor de banda prohibida directa, la gráfica de los valores de  $\alpha^2$  en función de la energía del fotón incidente,  $h\nu$ , es una línea recta, y la extrapolación de dicha recta bisecando el eje  $\alpha^2 = 0$  nos proporciona el valor de la banda prohibida de energía. Por otro lado, para un semiconductor de banda prohibida indirecta, se realiza un análisis similar, pero con los valores de  $\alpha'^2$  mejor que con  $\alpha^2$ .

**3. Resultados y Discusión**

Mediante el análisis en la zona con presencia de interferencia en el espectro de transmitancia (Fig. 3), obtenemos los valores de  $n$ , reportados en la Fig. 4., donde se observa de manera clara la presencia de una regla de dispersión normal.

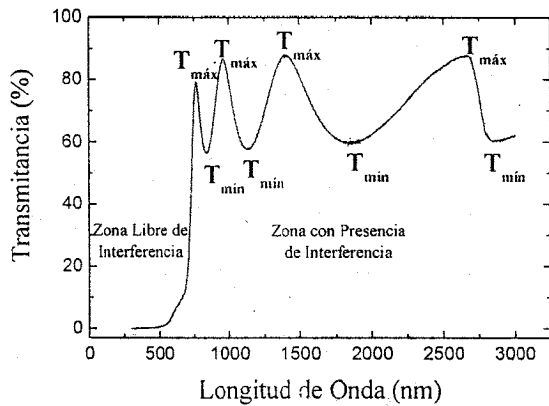


Fig. 3. Espectro de transmisión de una película delgada de CdSe.

A continuación, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados de la parte real del índice de refracción, obtenida en la zona con presencia de interferencia, mediante la ley de dispersión de Cauchy (ecuación (12)) para posteriormente obtener los valores

extrapolados de la reflectancia,  $R$ , en la zona libre de interferencia del espectro de transmitancia. Los resultados son presentados en la Fig. 5.

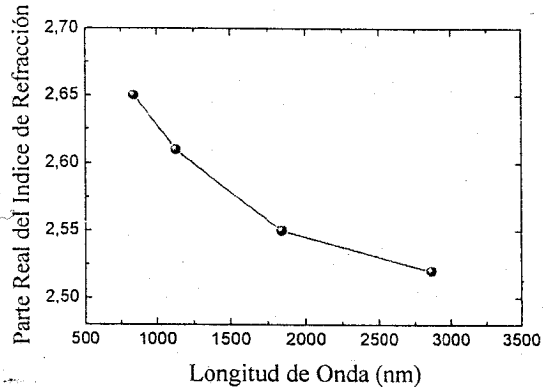


Fig.4. Ley de dispersión de la parte real del índice de refracción,  $n$ .

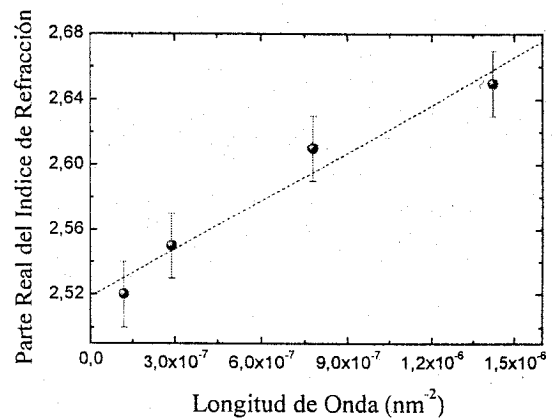


Fig. 5. Ajuste de los datos de la figura 4 por la regla de dispersión de Cauchy.

Los coeficientes de la ecuación de dispersión de Cauchy,  $n = A_1 + B_1 \lambda^{-2}$ , obtenidos de la regresión lineal de la Fig. 5 cuyos valores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Parámetro	Valor
$A_1$	2.52
$B_1$	98380.34
Desviación Estándar	0.014