

EFECTO DE GUÍAS ÓPTICAS PLANAS EN PELÍCULAS SEMICONDUCTORAS DE SULFURO DE CADMIO: CDS

Aníbal Valera, Dane Cachi, Mauro Lomer
Laboratorio de Óptica, Facultad de Ciencias
E-mail: avalera@uni.edu.pe

RESUMEN

En este trabajo se presenta el resultado de aplicar películas semiconductoras de Sulfuro de cadmio como Guías de Onda Plana. Los datos experimentales de transmisión transversal por efecto de propagación en guía óptica se complementan con medidas espectrales del coeficiente de transmisión frontal de las películas semiconductoras para obtener finalmente una explicación global a los resultados obtenidos, lográndose establecer con gran certeza la dependencia espectral del índice de refracción efectivo de CdS en la forma de película delgada.

ABSTRACT

In this work, we present the result of the application of Cadmium Sulfide Thin Film semiconductors as Planar Wave Guides. The experimental data of Wave Guide transversal transmission are complemented with spectral frontal transmission measurements to obtain a global explanation of this data. As a secondary result of this analysis, we obtained finally, the spectral dependence of the effective refraction index of CdS as a Thin Film material.

INTRODUCCIÓN

Los semiconductores elaborados en la forma de películas delgadas constituyen una alternativa sumamente interesante para la elaboración de nuevos materiales, con potenciales aplicaciones fotónicas y en particular en el diseño de nuevas celdas solares.

No obstante, dependiendo del modo de elaboración (evaporación al vacío, glow discharge, etc.), las características estequiométricas de los materiales en la forma de película delgada, pueden diferir notablemente de los estándares conocidos (por ejemplo, del monocristal), lo que en la práctica significa que tanto, las propiedades físicas de estos como así sus posibles aplicaciones sean completamente nuevas.

Motivo por el cual, se hace necesario, en cada caso,

efectuar diagnósticos completos con el objeto de especificar con gran certeza el material construido y sus nuevas propiedades.

La determinación de los parámetros ópticos de estos materiales (índice de refracción n , coeficiente de absorción α), constituye una de las principales tareas de diagnóstico. Esta información permite por ejemplo, la determinación precisa del espesor de la muestra, como también el diseño geométrico de una Guía de onda óptica en base a este material.

El materiales semiconductor que se presentan en este estudio: CdS ha sido aplicado exitosamente por nuestro grupo en la elaboración de diversas configuraciones de celdas solares [1], [2].

En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de películas delgadas del semiconductor CdS en la propagación transversal de señales ópticas (Transmisión por efecto de Guías ópticas). Estos resultados deben combinarse con evaluaciones del coeficiente de Transmisión frontal, con el objeto obtener una solución global a los datos experimentales.

FUNDAMENTO TEÓRICO

El fundamento teórico de los métodos experimentales que aquí se presentan, ha sido tratado ampliamente en otros trabajos [3], [4], limitándonos por tanto a resumir aquí lo más relevante de cada caso.

A. Modos de transmisión

Al incidir un haz monocromático λ de manera normal sobre una película de espesor d y de índice de refracción, la fracción de radiación transmitida T , esta dada por la relación:

$$T = t_{12}^2 t_{21}^2 / (1 + r_{21}^4 - 2 r_{21}^2 \cos 2 k d)$$

$$\begin{aligned} \text{donde: } t_{12} &= (2 n_\lambda / 1 + n_\lambda), \\ t_{21} &= (2 / 1 + n_\lambda), \\ r_{12} &= (1 - n_\lambda / 1 + n_\lambda), \\ r_{21} &= (n_\lambda - 1 / n_\lambda + 1), \\ k &= 2\pi n_\lambda / \lambda \end{aligned}$$

Si la radiación monocromática que incide sobre la muestra varía en cierto rango espectral, el coeficiente de transmisión T , asumirá valores máximos o mínimos de acuerdo a que se cumpla las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \text{Máximos : } 2 k d &= 2 N \pi \\ \text{o correspondientemente: } 2 n_\lambda d &= N \lambda \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mínimos : } 2 k d &= 2 (N + 1/2) \pi \\ \text{o correspondientemente: } 2 n_\lambda d &= (N + 1/2) \lambda \end{aligned}$$

Por tanto, el espectro resultante será de tipo acanalado (Con máximos y mínimos sucesivos), bastando encontrar un solo valor N (Orden de la Interferencia) para poder deducir el espesor d de la muestra y la

dependencia espectral del índice de refracción del material.

B. Modos de guía de ondas

La estructura de guía de onda óptica usada en este trabajo es la de una capa semiconductor uniforme depositada sobre un sustrato de vidrio. Para que un rayo de luz se pueda propagar por la película de un extremo al otro, este debe cumplir la condición de resonancia:

$$2 k_0 n_\lambda d \sin \theta - 2 \phi_v - 2 \phi_a = 2 M \pi$$

En donde: $k_0 = 2\pi/\lambda$, d es el espesor de la película semiconductor, θ es el ángulo de propagación del rayo dentro del semiconductor, ϕ_v , ϕ_a son los desfases producidos por el rayo al reflejarse en las fronteras vidrio, aire, respectivamente. y M es un valor entero correspondiente a cada rayo de propagación.

La ecuación de resonancia descrita es una ecuación trascendente, que debe ser resuelta por aproximaciones sucesivas y que permite obtener de manera directa, los valores $n\lambda$ y d , siempre y cuando se conozcan por lo menos dos valores consecutivos θ_1 y M_1 .

PARTE EXPERIMENTAL

En esta sección se describen los principales métodos seguidos en la caracterización de las muestras estudiadas, así como los resultados obtenidos.

A. Muestras semiconductoras

Las capas semiconductoras de sulfuro de cadmio (CdS) se realizaron por el método de evaporación al vacío sobre Láminas de vidrio. En la Tabla 1 se indican las muestras elaboradas (34) y sus respectivos espesores (0.44 μm a 14.00 μm). El total de estas muestras fueron empleadas en las evaluaciones del índice de refracción a partir del análisis de los espectros de transmisión.

Para efectos de demostración de la propagación de luz en las películas semiconductoras vía modos de Guía óptica plana se han seleccionado 2 muestras representativas (30k6 y 28Sp12).

Tabla 1: Muestras de CdS.

Muestra	nd - 633 nm	d - um
28M9	1.0653	0.44
6F2	1.2896	0.54
28M8	1.311	0.55
28M6	1.3508	0.56
28M5	1.6147	0.67
c1	1.698	0.71
5AC1	1.7171	0.71
c2	1.795	0.75
c17	1.8757	0.78
28M4	1.8763	0.78
c3	1.88	0.78
5AC17	1.8814	0.78
c4	1.971	0.82
c5	2.0577	0.86
c6	2.1284	0.89
c16	2.1593	0.9
5AC16	2.1784	0.91
c7	2.2219	0.92
28M3	2.2406	0.93
c8	2.2652	0.94
c15	2.2997	0.96
c9	2.326	0.97
c14	2.3611	0.98
c10	2.3741	0.99
c11	2.4008	1
c13	2.4146	1
c12	2.415	1
LL1B	12.2507	5.1
LL1	14.3351	5.96
07D	15.6627	6.52
13D1	15.8975	6.61
14D1	16.1328	6.71
30k6	17.6295	7.33
28Sp12	33.6458	14

B. Mediciones de transmitancia espectral

En la Figura 1 se ilustra esquemáticamente el arreglo experimental empleado en la medición del coeficiente de transmisión frontal de las películas semiconductoras.

Un haz de Luz blanca incide normalmente sobre la muestra de CdS. La Luz transmitida es enfocada a la entrada de una guía óptica, que conduce la señal a un Sistema Multicanal óptico (OMA), el cual analiza la señal y la descompone espectralmente.

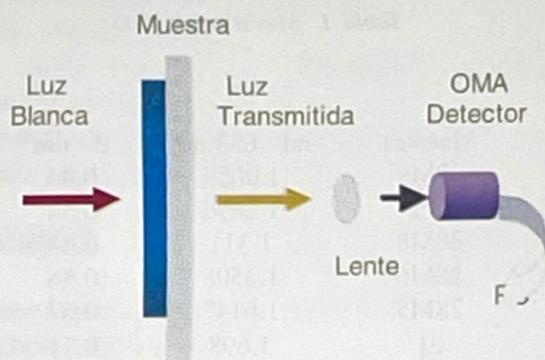


Fig. 1 Diagrama esquemático del arreglo experimental empleado en la medición de espectros de transmisión frontal de películas semiconductoras.

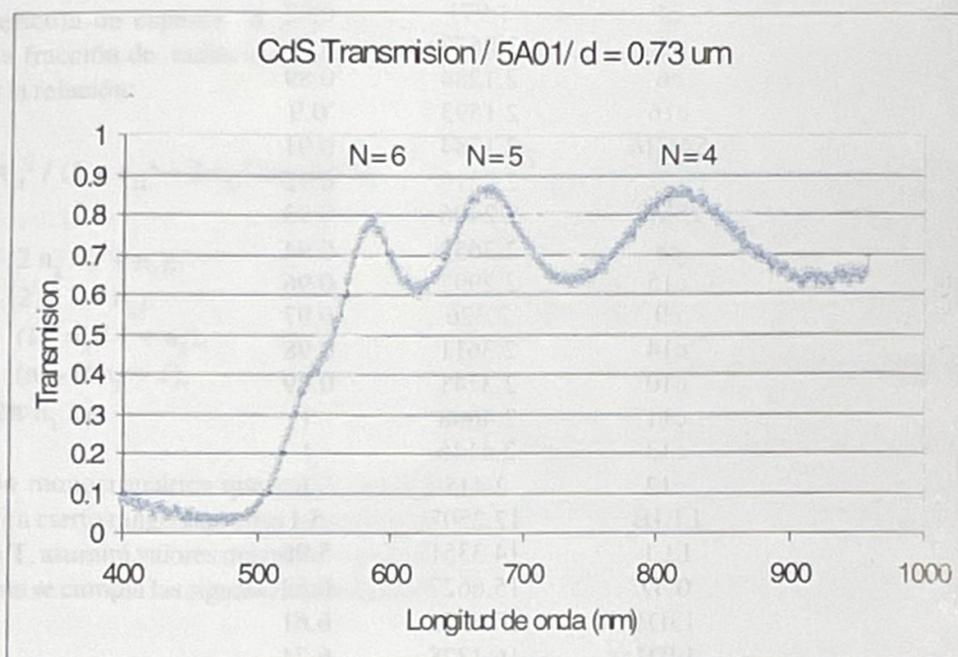


Fig. 2 Espectro de transmisión obtenida para una película semiconductor de CdS de $0.72 \mu\text{m}$ de espesor mediante un Analizador Óptico Multicanal.

En la Figura 2 se muestra uno de los espectros de transmisión obtenidos para una película de CdS.

En el espectro de transmisión de la Figura 5 se identificó los órdenes de transmisión máximos (como se indica, por ejemplo $N = 4$, $N = 5$, $N = 6$, etc.). Lo que, en base al índice de refracción encontrado

posteriormente (Parte C), permitió encontrar el espesor correspondiente ($d = 0.72 \mu\text{m}$) y algunos valores del índice de refracción espectral.

El procedimiento anterior se siguió para las 34 muestras de CdS indicadas en la Tabla 1.

No obstante debido al hecho de no conocer con certeza

el índice de refracción de nuestras muestras, como paso previo a la determinación de los espesores se elaboró un Gráfico resumen del índice de refracción

relativo (n_λ / n_{633}), tal que los resultados de todas las muestras se sobrepongan en una curva común, como se muestra en la Figura 3.

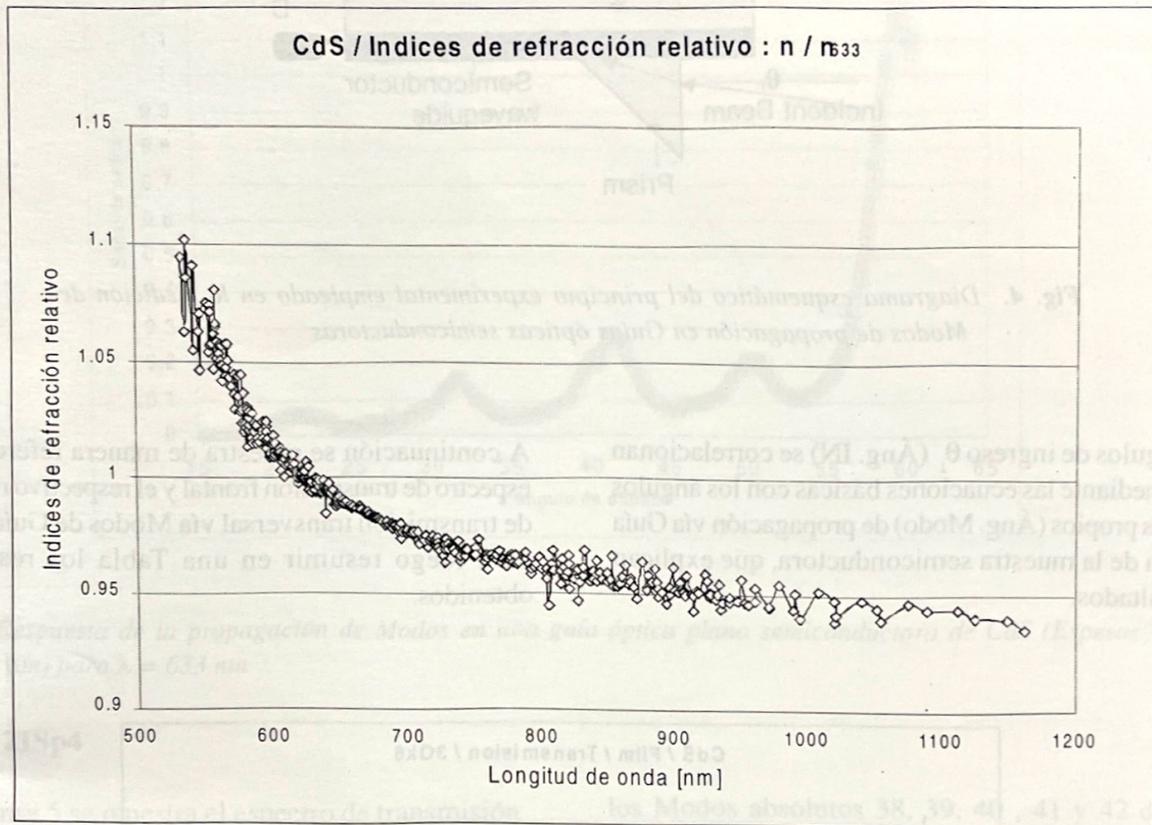


Fig. 3. Curva espectral del índice de refracción relativo (n_λ / n_{633}) de CdS, obtenida del análisis de espectros de transmisión.

La coincidencia espectral de los datos graficados es un indicador que la elección individual de los órdenes (Modos de Transmisión Máximos y Mínimos) es correcta, disponiendo por tanto de los verdaderos productos: $n_\lambda d$, con lo cual se determina los productos: $n_{633} d$ de las muestras de CdS (Tabla I), los cuales son necesarios para la evaluación de los resultados de Transmisión vía Guía óptica plana (Parte C).

C. Mediciones de transmitancia vía modos de guía óptica

En la Figura 4 se muestra de manera esquemática el arreglo experimental empleado en la determinación

experimental (*) de los Modos de propagación en una guía óptica. Un haz monocromático (Luz Láser de 633 nm) incide sobre un Prisma ($n = 1.785$) de acoplehaciendo un ángulo θ_i . El haz se transmite por el prisma, llegando a pasar hacia la guía óptica.

Si la inclinación del haz que llega a la guía óptica cumple la condición de resonancia, el rayo se propagará en la película y llegará al otro extremo de la guía, emergiendo e iluminando el detector D.

El Método de detección de los Modos de propagación, consiste en variar el ángulo de incidencia θ_i sobre el prisma y evaluar al mismo tiempo con el detector D la Intensidad emergente a la salida de la muestra.

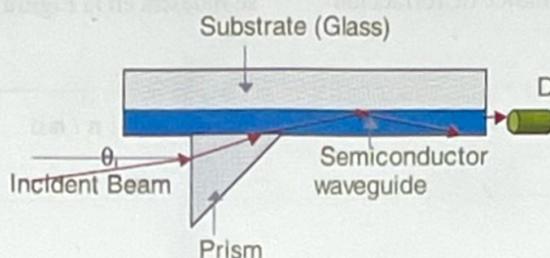


Fig. 4. Diagrama esquemático del principio experimental empleado en la medición de Modos de propagación en Guías ópticas semiconductoras.

Los ángulos de ingreso θ (Áng. IN) se correlacionan luego mediante las ecuaciones básicas con los ángulos modales propios (Áng. Modo) de propagación vía Guía de onda de la muestra semiconductor, que explican los resultados.

A continuación se muestra de manera referencial el espectro de transmisión frontal y el respectivo resultado de transmisión transversal vía Modos de Guía óptica, para luego resumir en una Tabla los resultados obtenidos.

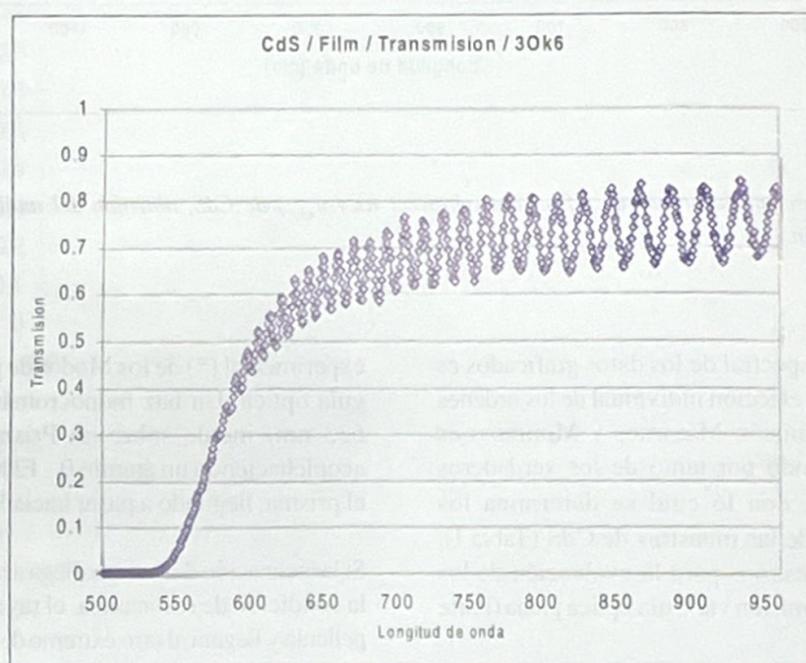


Fig. 5. Espectro de Transmisión frontal de una película semiconductor de CdS (Espesor $7.33 \mu\text{m}$), con : $n_{633} d = 17.63 \mu\text{m}$.

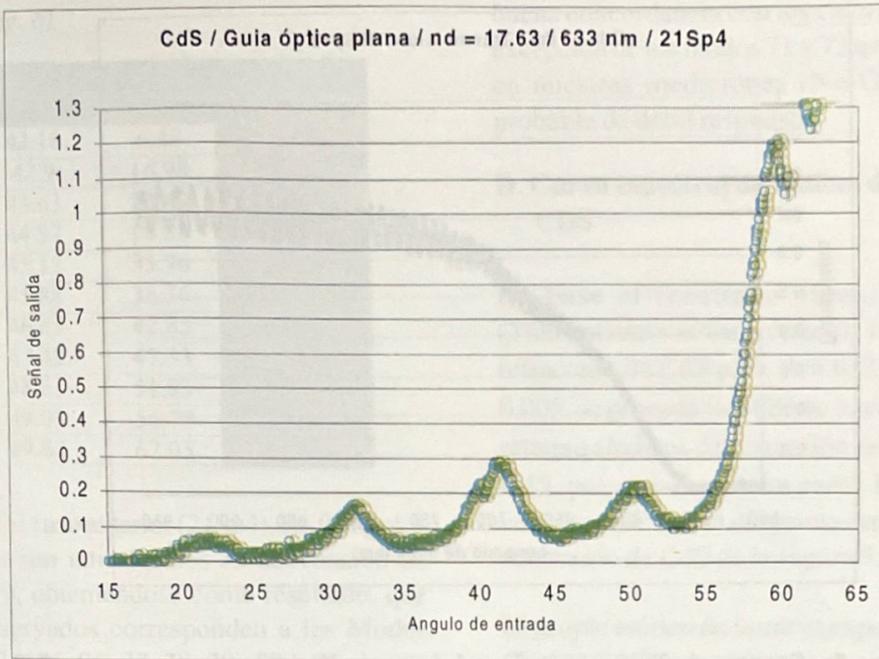


Fig. 6. Respuesta de la propagación de Modos en una guía óptica plana semiconductoras de CdS (Espesor 7.33 μm) para $\lambda = 633 \text{ nm}$

Muestra 21Sp4

En la Figura 5 se muestra el espectro de transmisión de la muestra 21Sp4, correspondiente a una película de CdS de 7.33 μm , con factor $n_{633} d = 17.63 \mu\text{m}$.

De la respuesta de propagación de modos mostrada en la Figura 6, se observa 5 máximos relativos, obtenidos en los ángulos de incidencia (Áng. IN Exp) que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2 : Ángulos Modales del Gráfico 21Sp4 (Fig. 6)

Modo	Ang. Modo	Ang. IN Teo	Ang. IN Expo
37	42.17	6.13	No Ob.
38	43.54	22.71	21.2
39	44.94	32.59	32.5
40	46.37	41.22	41.9
41	47.83	49.69	49.8
42	49.32	58.77	59.4

Los 5 ángulos experimentales son introducidos en la ecuación de resonancia (**), obteniéndose como resultado, que los modos observados corresponden a

los Modos absolutos 38, 39, 40, 41 y 42 de una película de espesor $d = 7.333 \pm 0.005 \mu\text{m}$ y de índice de refracción $n_{633} = 2.404 \pm 0.005$. En base a lo cual se recalcula todos los Modos posibles de ser observados con la geometría disponible y los correspondientes ángulos de ingreso teóricos (Áng. IN Teo) de esta guía de onda. Del conjunto de ángulos teóricos factibles de ser observados se comprueba una buena concordancia con los valores experimentales, a excepción del modo 37 que no es observado en nuestras mediciones (No Ob.), muy probablemente por una débil respuesta.

Muestra 15Ok2

En la Figura 7 se muestra el espectro de transmisión de la muestra 15Ok2, correspondiente a una película de CdS de 14.00 μm , con factor $n_{633} d = 33.65 \mu\text{m}$.

De la respuesta de propagación de modos mostrada en la Figura 8, se observa varios máximos relativos, de los cuales se toman para el análisis respectivo los primeros 9 consecutivos y que se indican (Áng. IN Exp) en la Tabla 3.

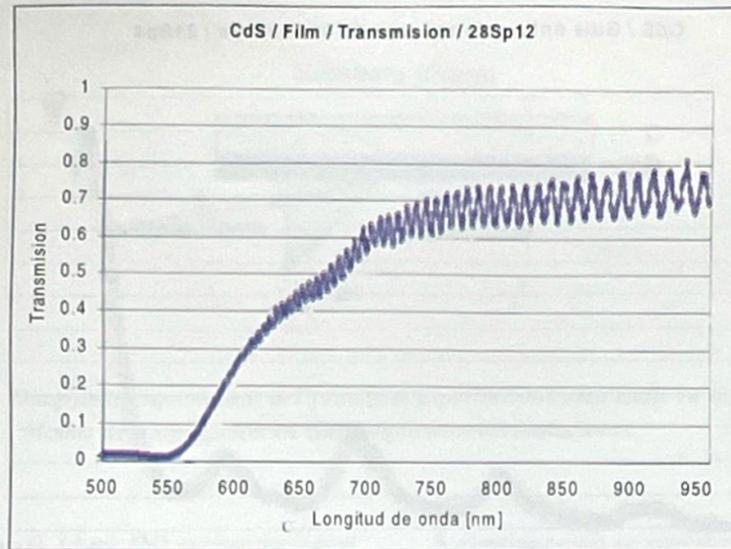


Fig. 7. Espectro de Transmisión frontal de una película semiconductor de CdS (Espesor $14.00 \mu\text{m}$), con $n_{633} d = 33.646 \mu\text{m}$.

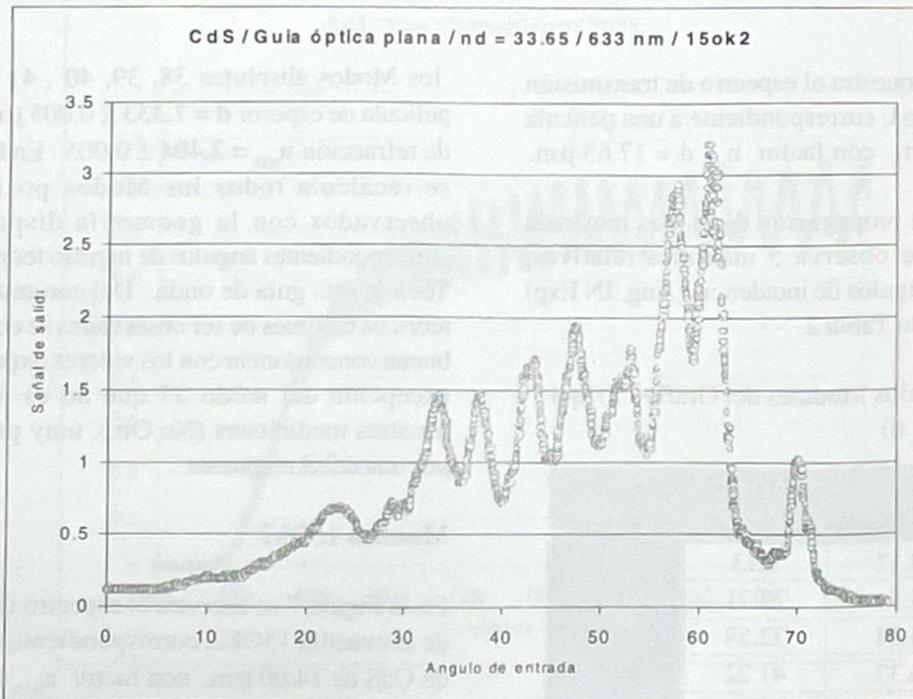


Fig. 8. Respuesta de la propagación de Modos en una guía óptica plana semiconductor de CdS (Espesor $14.00 \mu\text{m}$) para $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Tabla 3 : Ángulos Modales del Gráfico 150k2 (Fig. 8)

Modo	Ang. Modo	Ang. IN Teo	Ang. IN Expo
71	42.18	6.48	No Ob.
72	42.9	16.98	No Ob.
73	43.63	23.49	23.38
74	44.37	28.88	28.9
75	45.12	33.76	33.75
76	45.88	38.36	38.06
77	46.65	42.85	43.08
78	47.42	47.33	47.53
79	48.21	51.93	52.95
80	49.01	56.77	57.94
81	49.82	62.05	61.35

Al igual que en el caso anterior (21Sp4), los 9 ángulos experimentales son introducidos en la ecuación de resonancia (**), obteniéndose como resultado, que los modos observados corresponden a los Modos absolutos 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 y 81 de una película de espesor $d = 14.00 \pm 0.005 \mu\text{m}$ y de índice de refracción $n_{633} = 2.404 \pm 0.005$. Con el resultado anterior se recalcula todos los Modos posibles de ser observados con la geometría disponible y los correspondientes ángulos de ingreso teóricos (Áng. IN Teo) de esta guía de onda. Del conjunto de ángulos

teóricos factibles de ser observados se comprueba una buena concordancia con los valores experimentales, a excepción de los modos 71 y 72 que no son observados en nuestras mediciones (No Ob.), por el motivo probable de débil respuesta.

D. Curva espectral de índices de refracción de CDS

En base al resultado obtenido en la parte C (Transmisión vía Guía óptica), respecto al índice de refracción de CdS para $\lambda = 633 \text{ nm}$: $n_{633} = 2.404 \pm 0.005$, se procede finalmente a recalibrar el resultado relativo (índices de refracción relativos: n_{λ} / n_{633}) de CdS presentado en la parte B de este trabajo, concluyendo con el diagrama espectral de Índices de refracción de CdS de la Figura 9.

El acople teórico de la curva experimental resultante (Figura 9 / Curva continua) se ajusta a una dependencia de la forma :

$$n^2 = 1 + A + [B \text{ Ev}^2 / (E_0^2 - \text{Ev}^2)]$$

donde $\text{Ev} = h\nu$, resultando en este caso: $A = 3.98$, $B = 0.7093$, $E_0 = 2.693$.

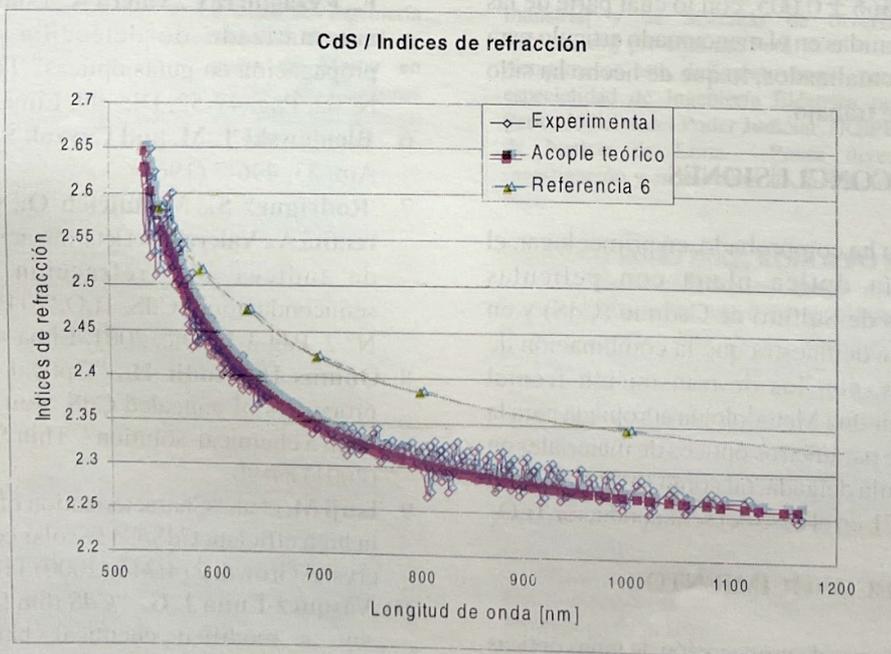


Fig. 9. Curva espectral del índice de refracción de CdS, obtenida del análisis de espectros de transmisión frontal y conducción vía Modos de Guía óptica.

DISCUSION DE RESULTADOS

Como es de observar, en este trabajo se combinan dos resultados independientes: Espectros de Transmisión frontal y Propagación transversal vía Modos de guía óptica, con el objeto de concluir en un resultado común, que explique ambos resultados parciales. La conclusión de estas medidas complementarias es la curva espectral de índices de refracción de CdS en película delgada (Fig. 9), la que difiere sustancialmente de la correspondiente curva espectral del CdS en monocristal (curva promedio de n_o y n_c) [6], que a modo de comparación se grafica también en la Figura 9. Esto último confirma la necesidad de realizar nuevas medidas en el caso de materiales en la forma de película delgada.

En un anterior trabajo referente a este tema, próximo a ser publicado [7], se estimó por el método del Ángulo de Brewster el índice de refracción de CdS (película delgada) para $\lambda = 675$ nm, obteniéndose $n_{675} = 2.29$, no obstante en ese trabajo también se indicó que el método del Ángulo de Brewster proporciona un valor relativamente grueso del índice de refracción, el cual solo permite estimar un orden de magnitud para ese valor. Como consecuencia del presente análisis se obtiene $n_{675} = 2.366 \pm 0.005$, con lo cual parte de las deducciones obtenidas en el mencionado artículo para CdS deben ser actualizados, lo que de hecho ha sido efectuado en este trabajo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha comprobado, en primer lugar, el efecto de Guía óptica plana con películas semiconductoras de Sulfuro de Cadmio (CdS) y en segundo lugar, se demuestra que la combinación de estos resultados, con los de transmisión frontal conllevan a definir una Metodología apropiada para la determinación de parámetros ópticos de materiales en la forma de película delgada, tal como se realizó en un trabajo anterior [7], en el caso del semiconductor Ti_3O_5 .

RECONOCIMIENTO

- Las mediciones de propagación de guías ópticas se realizaron mediante el Sistema automatizado construido por el Prof. Guido Castillo [5].

- Tanto el análisis de los Modos observados, así como el cálculo de Modos absolutos se realizaron por programas en Pascal (TESPESOR, N₂) realizados por el profesor Roddy Ramos, actualmente realizando su doctorado en CAMPINAS / BRASIL.

REFERENCIAS

1. **Fernández E., Castillo G., Valera A.** "Elaboración y caracterización de celdas solares de película delgada de silicio amorfo y sulfuro de cadmio a-Si:H/CdS" TECNIA, Vol. 10, N° 01, Pag. 51-57, Julio 2000, Lima - Perú.
2. **Mosquera L., Valera A.** "Celdas Solares de película delgada de tipo Unión Schottky: CdS/Au" TECNIA, Vol. 7, N° 01, Pag. 45-51, Nov. 97, Lima - Perú.
3. **Valera A., Eyzaguirre C.** "Óptica Física" Ed. Hozlo, 420 págs., Nov. 7, Lima.
4. **Valera A.**, "Energía Solar I" Ed. Hozlo, 394 pag. Lima - Perú, 1993.
5. **Castillo G., Ramos R., Loayza C., Fernández E., Eyzaguirre C., Valera A., Lomer M.** "Sistema automatizado de detección de modos de propagación en guías ópticas" TECNIA, Vol. 9, N° 02, Pag. 47-52, Dic. 99, Lima - Perú.
6. **Bleniewski T. M. and Czyzak S. J. J.** Opt. Soc. Am. 53, 496-7 (1963).
7. **Rodríguez S., Miculicich O., Oliva C., Fiorentini A., Valera A.** "Determinación experimental de índices de refracción en películas semiconductoras: CdS, Ti_3O_5 ". TECNIA, Vop 11, N° 2, Pag 3-12 Dic. 2001, Lima - Perú.
8. **Oumus H., Hadir H.**, "Optical and electrical properties of annealed CdS thin films obtained from a chemical solution". Thin Solid Films 386 (2001) 87-90.
9. **Tsuji M. et al.** "Characterization of CdS thin films in high efficient CdS/CdTe solar cells". Journal of crystal Growth 214/215 (2000) 1142-1147.
10. **Vasquez-Luna J. G.** "CdS thin films deposited by a modified chemical - bath deposition Method". Journal of Crystal Growth 187 (1998) 380-386.