

## ELABORACION Y CARACTERIZACION FISICA DE PELICULAS SEMICONDUCTORAS DE SILICIO AMORFO

Enver Fernández Chillce, Carmen Eyzaguirre Gorvenia, Aníbal Valera Palacios

Laboratorio de Óptica / Facultad de Ciencias

### RESUMEN

*En este trabajo se presenta el resultado de la elaboración y caracterización de películas finas de Silicio amorfo. Las películas fueron obtenidas por el Método de Descarga plasmática reactivo y a diferencia de otros trabajos realizados anteriormente por el mismo método, muestran muy buena calidad óptica, lo que ha permitido derivar los parámetros ópticos del material (índices de refracción y coeficientes de absorción), en un gran rango espectral. Se complementan los resultados con la determinación de algunas propiedades eléctricas. (Mediciones de conductividad y efecto Seebeck).*

### ABSTRACT

*In this work, we present our first results in the elaboration and characterization of thin film amorphous silicon (a-Si:H). The films were obtained by an original reactive "DC glow discharge" process, which, compared to other results obtained with the same equipment, show now very good optical quality. This goal allows us the measurement of the optical parameters (n, k) of our probes in a great spectral range. At this report, we show also some complementary results related to the semiconductor behaviour as the electrical conductivity and Seebeck effect*

### INTRODUCCION

Silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) constituye actualmente uno de los materiales más importantes para fines fotovoltaicos. Las celdas solares de Silicio amorfo consisten basicamente de capas delgadas de espesores de cerca de

1  $\mu\text{m}$ , cuyas propiedades dependen fuertemente del método de elaboración empleado y cuyas características físicas difieren notablemente de los valores estandares por tratarse muchas veces de "materiales nuevos". Requiriéndose por tanto, para cualquier posible aplicación o diseño practico, tener en claro estas características.

Las propiedades físicas más importantes que caracterizan un semiconductor son: los parámetros ópticos, sus propiedades eléctricas, su diagrama energético, etc;

apartir de los cuales se puede predecir su comportamiento de manera individual, por ejemplo en su interacción con la luz, ó en unión con otros materiales, en la forma de dispositivos.

Los métodos tradicionales de determinar las propiedades descritas son mayormente complejos y exigentes en cuanto al aparataje experimental utilizado. Así por ejemplo, para determinar los parametros ópticos (n, k) de un material se requiere

disponer de buenos espectros de transmisión y reflexión, con cuyos datos y programas de iteración apropiados para PC [3] se encuentra la respuesta. En general, no se dispone de todos los datos espectrales y se tiene que hacer ciertas presunciones, que muchas veces dejan dudas sobre los resultados obtenidos.

En este trabajo se presenta un proceso relativamente simple para determinar los parametros ópticos, teniendo como prerequisite, el disponer de una muestra de calidad óptica, adherida a un substrato (vidrio) con cierto gradiente de crecimiento (cuña) y la realización de mediciones de transmitancia.

### FUNDAMENTO TEORICO

#### A.- Conductividad Eléctrica de Semiconductores

Una característica básica de un semiconductor es la dependencia de su conductividad en función de la temperatura, limitandose a la vez esta conductividad a valores entre  $10^3$  y  $10^5$  ( $\Omega\text{cm}$ )<sup>-1</sup>. Según la teoría de Drude-Lorentz, la conductividad eléctrica está dada por [5]

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}; e: \text{carga del electrón}$$

Donde  $n$  es el número de electrones por unidad de volumen,  $m$  es la masa del electrón y  $\tau$  es el tiempo de relajamiento. En el caso no degenerado ( $n < 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) los valores del camino libre medio y velocidad media son obtenidos de la teoría cinética de gases, y el valor de  $\tau = l_0/v$  es dependiente de la temperatura y la energía del electrón, luego  $\tau = l_0(2m/\pi kT)^{-1/2}$  por lo que:

$$\sigma = \frac{2ne^2l_0}{(2\pi m kT)^{1/2}} = u_0 en$$

$$u_0 = \frac{2el_0}{(2\pi m kT)^{1/2}}$$

Las ecuaciones anteriores son aún verdaderas para el caso en que  $l_0$  es proporcional a  $1/T$ , como un resultado de las vibraciones de los modos acústicos de la red, y para un semiconductor con electrones no-degenerados,  $u_0$  es proporcional a  $T^{3/2}$  por lo que:

$$\sigma = cneT^{-3/2}$$

$C$ : constante de proporcionalidad.

Aplicando el Modelo de Bandas, en la figura (1) mostramos los niveles de energía de un semiconductor tipo "n", cuya densidad de electrones resulta ser

$$n = \frac{N_D N_c}{N_A} e^{-\frac{E_A}{kT}}$$

$N_D$ : número de donadores /  $\text{cm}^3$

$N_A$ : número de aceptores /  $\text{cm}^3$

$N_0 = N_D - N_A$

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_c^* K}{\hbar^2} \right)^{3/2} T^{3/2}$$

$m_c^*$ : masa efectiva

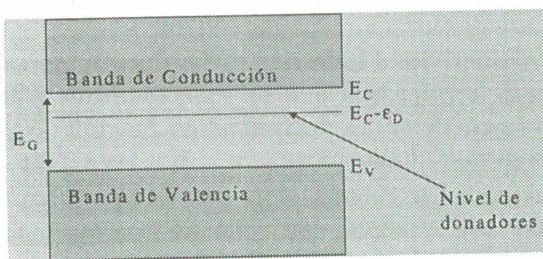


Figura 1: Diagrama esquemático de un semiconductor tipo "n" según el Modelo de Bandas.

Finalmente la conductividad eléctrica de un semiconductor resulta ser :

$$\sigma = 2c \frac{N_0}{N_A} \left( \frac{2\pi m_c^* K}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_D}{kT}}$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_D}{kT}}$$

$$\sigma_0 = 2c \frac{N_0}{N_A} \left( \frac{2\pi m_c^* K}{\hbar^2} \right)^{3/2}$$

Y la resistividad :

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{E_D}{kT}}$$

La resistencia eléctrica de un semiconductor, por ser proporcional a la resistividad, resulta así de la misma dependencia :

$$R = R_0 e^{\frac{E_D}{kT}} \dots (w)$$

### B. Propiedades ópticas

Todo material metálico, semiconductor o aislante, se caracterizan ópticamente por tener espectralmente un índice de refracción ( $n$ ) y un coeficiente de absorción ( $\alpha$ ). Estas propiedades ópticas ( $n$  y  $\alpha$ ) dependen de las condiciones de elaboración y el método empleado.

En el presente trabajo se obtuvieron los valores espectrales "n" y "α" de muestras de Silicio amorfo, a partir de las curvas de transmitancia y absortancia, determinados por espectroscopía fotoacústica (PAS) y los cuales se correlacionaron con la teoría de la interferencia de haces múltiples.

#### B.1 Deducción de la transmitancia y Absortancia a partir de la interferencia de haces múltiples.

En la figura 2 mostramos tres medios caracterizados por sus correspondientes "n" y "k" ( $k = \lambda\alpha/4\pi$ ), separados por interfaces planas. En la interface 1-2 incide un rayo correspondiente a una onda electromagnética, cuya amplitud es  $E_0$ , el cual se refleja y transmite con amplitudes  $r_{12}E_0$  y  $t_{12}E_0$  respectivamente. La onda transmitida llega a la interface 2-3 con una

amplitud  $e^{-\alpha/2} t_{12} E_0$ , la cual también sufre una reflexión y transmisión cuyas amplitudes son  $r_{23} e^{-\alpha/2} t_{12} E_0$  y experimentales por curvas teóricas correspondientes a transmitancia y absortancia deducidas  $t_{23} e^{-\alpha/2} t_{12} E_0$ , y este proceso continúa así sucesivamente[2].

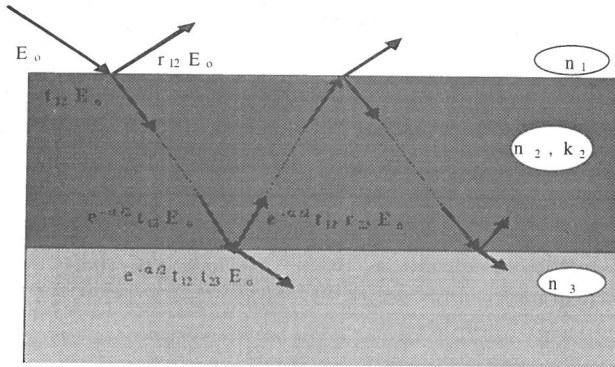


Figura 2 : Diagrama esquemático del proceso de reflexiones múltiples

Luego las amplitudes totales de la onda reflejada y transmitida son:

$$E_R^{total} = \frac{(r_{12} + r_{23} a^2 b) E_0}{(1 + r_{12} r_{23} a^2 b)}$$

$$E_T^{total} = \frac{(t_{12} t_{23} a) E_0}{(1 + r_{12} r_{23} a^2 b)}$$

Donde :

$$r_{12} = \frac{(n_1 - n_2^*)}{(n_1 + n_2^*)} \quad r_{23} = \frac{(n_2^* - n_3)}{(n_2^* + n_3)}$$

$$t_{12} = \frac{2n_1}{(n_1 + n_2^*)} \quad t_{23} = \frac{2n_2^*}{(n_1 + n_2^*)}$$

$$n_2^* = n_2 + ik_2 \quad a = e^{-\frac{\alpha d}{2}}$$

$$b = e^{i\delta} \quad \delta = 2k_0 n_2 d$$

Pero  $r_{12}$ ,  $r_{23}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{23}$  podemos expresar como:

$$r_{12} = A e^{i\omega} \quad r_{23} = B e^{i\beta}$$

$$t_{12} = C e^{i\gamma} \quad t_{23} = D e^{i\phi}$$

$$A = \sqrt{\frac{(n_1 - n_2)^2 + k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2}} \quad B = \sqrt{\frac{(n_2 - n_3)^2 + k_2^2}{(n_2 + n_3)^2 + k_2^2}}$$

$$C = \frac{2n_1}{\sqrt{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2}} \quad D = 2 \sqrt{\frac{(n_2^2 + k_2^2)}{((n_2 + n_3)^2 + k_2^2)}}$$

$$\beta = \begin{cases} \pi - \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_3 - n_2}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_2 + n_3}\right) & ; n_2 < n_3 \\ \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_2 - n_3}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_3 + n_2}\right) & ; n_2 > n_3 \end{cases}$$

$$\omega = \begin{cases} -\left(\tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_1 + n_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_1 - n_2}\right)\right) & ; n_2 < n_1 \\ \pi + \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_2 - n_1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{k_2}{n_1 + n_2}\right) & ; n_2 > n_1 \end{cases}$$

Bajo estos cambios resulta que:

$$E_R^{total} = \left( \frac{A e^{i\omega} + B e^{-\alpha d + i(\delta + \beta)}}{1 + AB e^{-\alpha d + i(\delta + \omega + \beta)}} \right) E_0$$

$$E_T^{total} = \left( \frac{CD e^{-\alpha d + i(\gamma + \phi)}}{1 + AB e^{-\alpha d + i(\delta + \omega + \beta)}} \right) E_0$$

Las intensidades de la onda incidente, reflejada y transmitida son respectivamente :

$$I_0 = n_1 E_0 E_0^*$$

$$I_R = n_1 E_R^{total} (E_R^{total})^*$$

$$I_T = n_3 E_T^{total} (E_T^{total})^*$$

Y por lo tanto la reflectancia y transmitancia son:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{n_1 (E_R^{total}) (E_R^{total})^*}{n_1 E_0 E_0^*}$$

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{n_3 (E_T^{total}) (E_T^{total})^*}{n_1 E_0^2}$$

Reemplazando los cambios hechos anteriormente resulta que

$$R = \frac{A^2 + 2ABe^{-\alpha d} \cos(\omega - \beta - \delta) + B^2 e^{-2\alpha d}}{1 + 2ABe^{-\alpha d} \cos(\omega + \beta + \delta) + A^2 B^2 e^{-2\alpha d}}$$

$$T = \frac{n_3 C^2 D^2 e^{-\alpha d}}{n_1 (1 + 2ABe^{-\alpha d} \cos(\omega + \beta + \delta) + A^2 B^2 e^{-2\alpha d})}$$



## PARTE EXPERIMENTAL

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

Los recubrimientos se realizaron alternativamente, de acuerdo a los fines específicos, sobre los siguientes substratos :

- \* Laminas de vidrio
- \* Laminas de mica
- \* Laminas de acero inoxidable

En cada caso los substratos fueron sometidos previamente a un tratamiento de limpieza y pesado previo.

### A. ELABORACION DE PELICULAS DELGADAS DE a-Si: H .

La obtención de una película de a-Si:H de buena calidad ( para aplicaciones en celdas solares) dependerá de :

- El sistema de deposición .
- Método de deposición .
- Condiciones de deposición .

### A 1) Sistema de deposición : Descarga Plasmática.

El sistema de deposición por descarga plasmática ha sido ya descrito ampliamente en otras publicaciones [4] y está compuesto básicamente (figura 3) de una cámara de reacción, un sistema de vacío, un sistema de inyección de gas( $H_2$ ) y una fuente de alta tensión (DC) .

La cámara de reacción esta formada de un ánodo y un cátodo de metal (acero) en forma de placas cuadradas, las que son colocados cara a cara con una separación de 10cm, uno respecto del otro. Las muestras de silicio policristalino son colocadas sobre el ánodo y los substratos de vidrio son colocados uno sobre el cátodo y los otros en las partes laterales de la zona de descarga.

En la cara posterior de la placa catódica se coloca un calefactor para calentar el substrato y así obtener películas a diferente temperatura de formación. El sistema así descrito va a producir películas delgadas de a-Si:H .

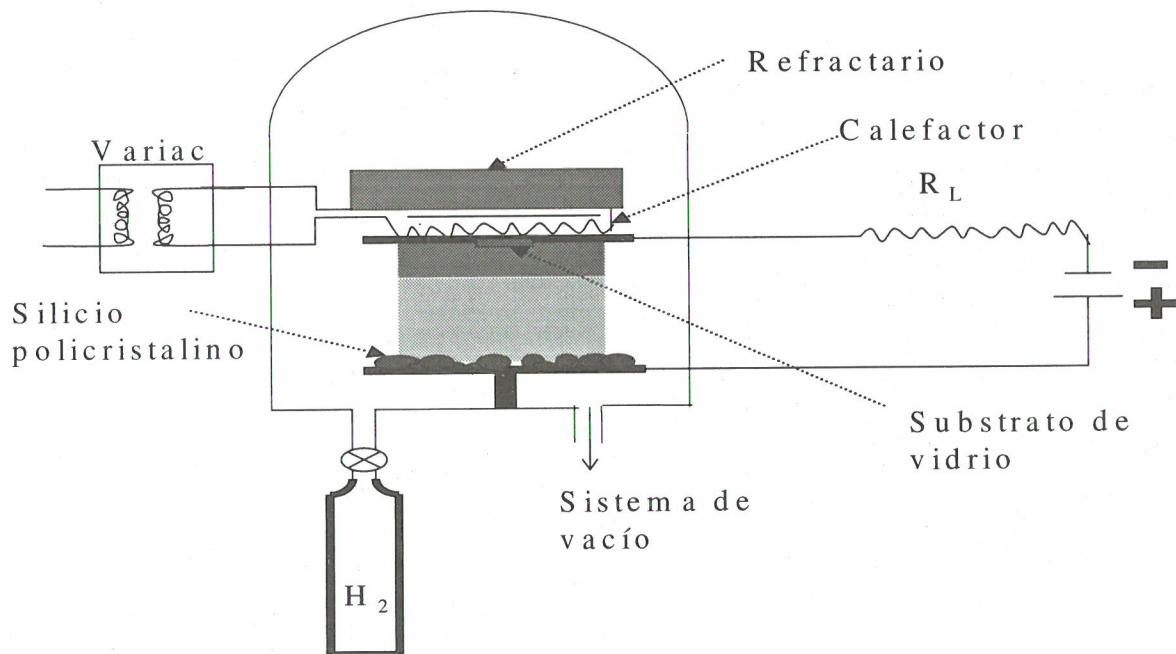


Figura 3: Esquema representativo del sistema de deposición "Descarga Plasmática" empleado en la elaboración de películas de a-Si:H

A 2) Método de Deposición

Para el sistema de deposición mencionado anteriormente, existen dos métodos de deposición usuales: Glow Discharge Catódico DC y Glow Discharge Proximidad DC. La elaboración de nuestras películas se realizaron por el método de Glow Discharge Catódico DC. Según éste método se produce una descarga plasmática debido a la presencia del campo eléctrico entre el ánodo y el cátodo, el cual es el causante de la ionización del gas (hidrógeno). En la descarga, electrones e iones acelerados por el campo eléctrico interactúan con el silicio policristalino y generan una variedad de especies derivadas (por ejemplo SiH<sub>4</sub>: Silano) y éstos son transportados a la superficie del sustrato para formar una película de a-Si:H.

A 3) Condiciones de deposición

Las propiedades físicas de las películas de a-Si:H depende de las condiciones (presión, temperatura del sustrato, corriente de plasma, voltaje DC y pureza de los materiales (silicio e hidrógeno) empleados. Debido a que los fines de la elaboración está dirigido a aplicaciones en celdas solares, entonces un factor importante para la absorción fotónica es el espesor de la película, el cual está limitado por el tiempo de deposición. En la tabla N°1 mostramos los parámetros bajo los cuales se obtienen con este equipo una óptima deposición de películas de a-Si:H.

Tabla N°1

CONDICIONES OPTIMAS DE ELABORACION: a - Si : H	
Presión Parcial en la cámara (mtorr)	300 - 400
Corriente Plasmática (mA)	30
Temperatura del sustrato (°C)	100 - 400
Tiempo de deposición (horas)	10 - 150
Espesores obtenidos (µm)	0.1 - 5

B. CARACTERIZACION ELECTRICA DE PELICULAS DELGADAS DE a-Si:H

Una medida característica de un semiconductor y a la vez prueba de su carácter, es la medida de su conductividad eléctrica y la dependencia térmica de este factor.

En la figura 4 se muestra de manera esquemática el equipo experimental empleado: Sobre la muestra en cuestión se adhieren 2 electrodos entre los cuales se mide la resistencia mediante un multímetro digital. La muestra se encuentra a su vez dentro de una cámara en la cual se puede variar la temperatura (horno), la cual es monitoreada por un sensor térmico (Termistor).

Los datos de variación de la resistencia eléctrica resultantes se grafican en función de la temperatura (figura 5), obteniéndose así la variación típica de un semiconductor y como resultado adicional, la energía de activación E<sub>0</sub> del semiconductor.

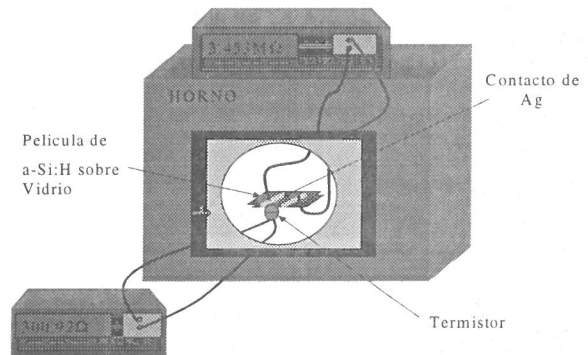


Figura 4: Equipo experimental empleado en las mediciones de conductibilidad eléctrica en función de la temperatura.

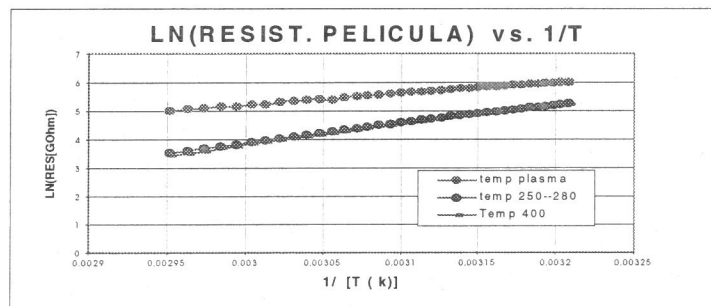


Figura 5: Variación de la resistencia de una muestra de a-Si:H (LP10) en función de la temperatura. T. Plasma: muestra no tratada térmicamente. T. 400: Muestra tratada térmicamente a 400 C

En la Tabla 2 se presentan los valores de  $E_0$  (Energías de activación) encontradas experimentalmente, de acuerdo a los resultados de la figura 5

**Tabla 2 : Energías de Activación**

Muestra (tratamiento)	Energía de Activación $E_0$ (eV)
Muestra sin tratamiento termico	0,32
Muestra tratada termicamente / 250° C	0,56
Muestra tratada termicamente / 400°C	0,58

El dato de la energía de activación, complementada con el resultado del sondeo Seebeck, servirá para establecer el modelo de bandas del material analizado.

**C. DETERMINACION DEL TIPO DE SEMICONDUCTOR**

El equipo de medición empleado en la determinación del tipo de semiconductor construido se basa en una aplicación del efecto Seebeck, por medio del cual a través de 2 sondas (una fría y otra caliente) se mide la diferencia de tensión (Termovoltaje : Voltaje Seebeck) generada. De acuerdo al signo del termovoltaje inducido, se concluye si el semiconductor es de tipo "n" ó "p". Los resultados obtenidos en las muestras de a-Si:H, a cuyo estudio nos estamos refiriendo (por ejemplo la muestra PGC02) son decididamente **tipo "p"**, con o sin tratamiento térmico.

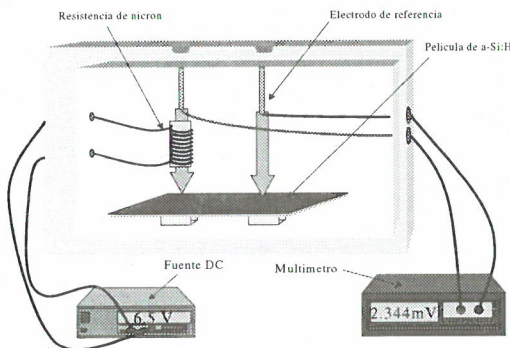


Fig. 6. Diagrama esquemático del equipo empleado en la medición del tipo Semiconductor por medio del Efecto Seebeck

**D. INDICE DE REFRACCION DE a-Si:H ( $\lambda = 675\text{nm}$ )**

La determinación de un índice de refracción es, según nuestro método de analisis, indispensable para calibrar los resultados obtenidos por el método de transmitancia, como quedara claro mas adelante. Debido a que en el tipo de materiales empleados (semiconductores) el índice de refracción asume un valor relativamente alto (usualmente mayor que 2), las técnicas convencionales (Refractómetros ordinarios) no permiten estimarlo, motivo por el cuál se desarrollo en nuestro grupo de trabajo un medidor por reflexion del ángulo Brewster, el cuál acoplado a un rayo Laser permite medir indices de refracción desde  $n = 1.5$  hasta  $n = 4$ , con una certeza de  $\Delta n = \pm 0.01$ . Este equipo sera descrito mas adelante en otra publicación.

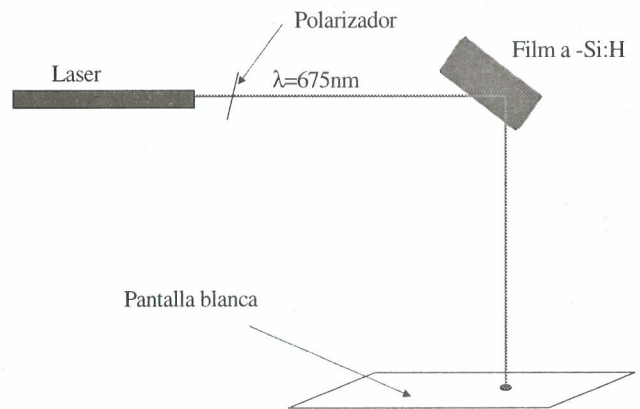


Fig. 7. Diagrama esquemático del equipo de determinación del ángulo Brewster

En la figura 7 mostramos el esquema representativo del equipo de medición del ángulo Brewster, aplicado a hallar el índice de refracción de una película de a-Si:H. Según este esquema se observa que en la pantalla, hay una intensidad mínima del haz reflejado para un determinado ángulo  $\theta$  y por lo tanto se cumple la siguiente igualdad..

$$n_2 = \tan\theta \quad \dots\dots(e1)$$

Midiendo así, el ángulo  $\theta$  (figura 7) se estima el índice de refracción correspondiente a la longitud de onda de 675nm:  $n = 2.13 \pm 0.01$



E. ESPECTROS DE TRANSMITANCIA

E.1 Equipo de Espectroscopía PAS múltiple.

El equipo empleado en las mediciones de transmitancia es un espectrometro Fotoacustico (PAS) de aplicación múltiple descrito ya en otros trabajos [2], con el cual se puede medir entre otras variables coeficientes de transmisión en el rango espectral de 400 nm a 2,500 nm. Las mediciones se realizaron con una resolución de  $R = 0.1$  mm.

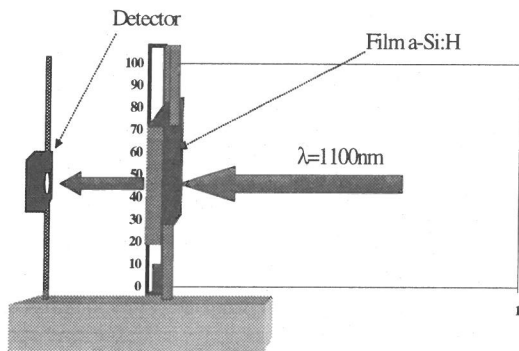


Figura 8: Diagrama esquemático del procedimiento seguido por la medición del coeficiente de transmisión monocromático según un barrido transversal de la muestra.

E.2 Espectros de transmisión a longitud de onda constante y espesor variable (cuña)

Teniendo como base muestras de silicio amorfo hidrogenado ( $a\text{-Si} : \text{H}$ ) depositadas con espesor variable sobre substratos de vidrio de una longitud de 90 mm, se procede a obtener los espectros de transmisión en función de la distancia de la muestra para longitudes de onda fijas.

En la figura 8 se muestra de manera esquemática el procedimiento experimental seguido. Desplazando el substrato de vidrio, que contiene la película, perpendicularmente a la dirección de incidencia del haz monocromático, se midió la transmitancia en función de la distancia transversal. En la figura 9 mostramos el espectro de transmitancia correspondiente a la longitud de onda de 1100nm, en función de la distancia (mm).

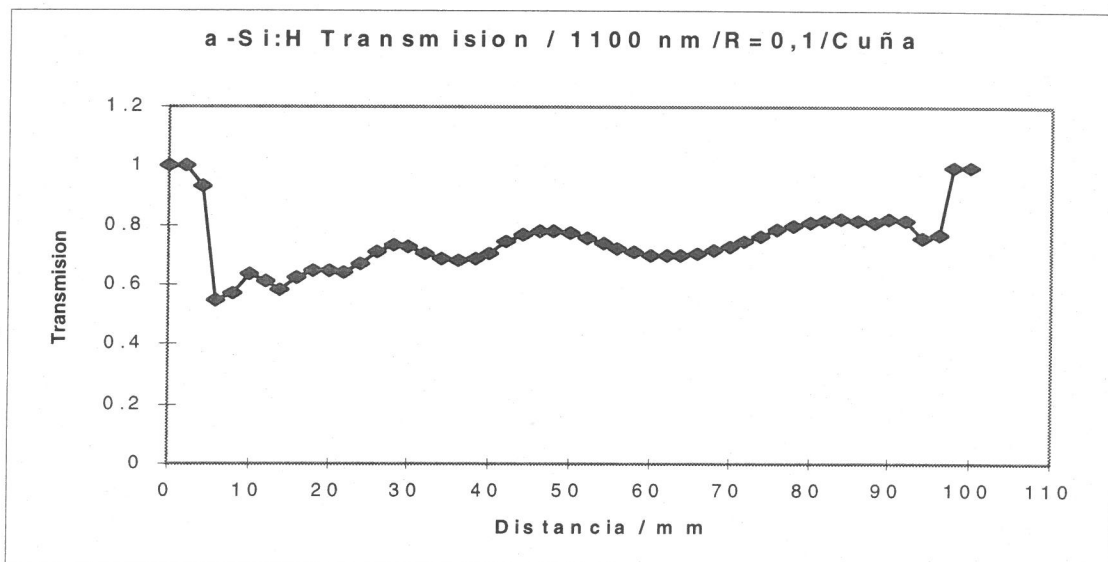


Figura 9: Coeficiente de Transmisión (1100 nm) obtenido para la muestra (PGC) De  $a\text{-Si} : \text{H}$  de geometría tipo cuña.

De la figura 9 es posible advertir de un lado, los límites de la placa de vidrio (por ejemplo: aproximadamente, entre 4 mm a 94 mm de la métrica dispuesta) y en segundo lugar es de observar que la muestra en sí empieza a tener un espesor distinto de cero para distancias menores que aproximadamente 84 mm, en donde se puede considerar que la película atiene un espesor cero.

Nuestro interés es determinar el espesor de la película a partir del espectro de transmitancia resultante, para lo cual aprovechamos de las modulaciones ocurrientes.

Debido a que la observación de las modulaciones se facilita mucho en el rango transparente (cuando  $k_2$  es pequeño), se trabaja preferentemente con longitudes de onda en el rango de 500 nm a 2,500 nm. Cumpliendo así de la teoría presentada, que los máximos y mínimos obedecen a la relación:

$$\frac{4\pi n_2 d}{\lambda} = N\pi \quad ;$$

$N$  : número entero (máximos) y para los mínimos:

$$N + \frac{1}{2}$$

Ya que, para cada uno de los espectros se puede identificar los ordenes  $N$ , podemos así calcular el factor " $n_2d$ " correspondiente y graficar este en función de la distancia del borde de la muestra, perpendicular a la cual se desplaza el haz monocromático.

En la figura 10 se muestra la dependencia del factor " $n_2d$ " ( $\mu\text{m}$ ) vs. distancia (mm) que corresponde a una longitud de onda de 1100nm.

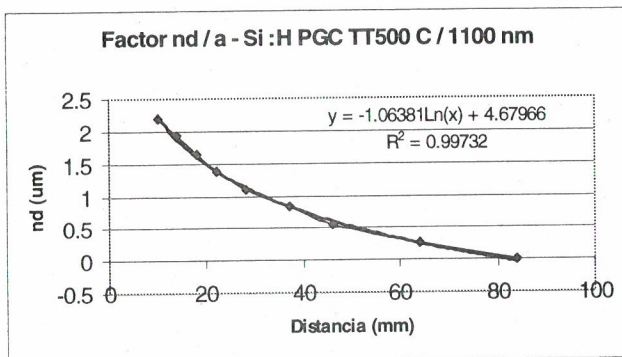


Figura 10: Dependencia del factor " $nd$ " en función de la distancia transversal de la muestra PGC

Es de observar que la dependencia del factor " $n_2d$ " se deja describir con muy buena aproximación por un algoritmo logarítmico, en este caso por la relación:

$$n_2d = 4.67966 - 1.06381 \ln D$$

La dependencia logarítmica encontrada para  $\lambda = 1100$  nm, se encuentra de modo análogo para otras longitudes de onda, en particular para  $\lambda = 675$  nm, longitud de onda en la cual se determinó por el método Brewster el índice de refracción

$$n = 2.13 \pm 0.01$$

En la figura 11 se muestra de modo comparativo las dependencias del factor ( $nd$ ) para las longitudes de onda 1100 nm ( $(n_2d)_{1100}$ ) y para 675 nm ( $(n_2d)_{675}$ ).

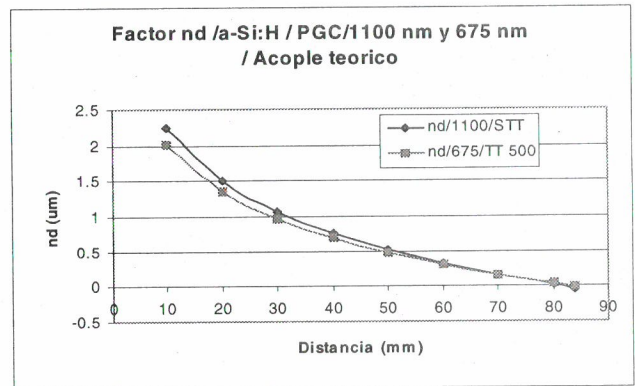


Figura 11: Dependencia del factor  $n_2d$  para la muestra PGC02, tenidas para  $\lambda = 1100$  nm y  $\lambda = 675$  nm.

Es de observar, que en la figura 11, ambas dependencias mostradas se encuentran correlacionadas solo por un factor multiplicativo (1.042), de tal forma que se cumple:  $n_{675} \times 1.042 = n_{1100}$ , obteniéndose así,  $n_{1100} = 2.217$  y de igual manera la dependencia exacta del espesor " $d$ " de la película de a - Si :H en la muestra PGC02 en función de la distancia  $D$ , como se muestra finalmente en la figura 12.

### E.3 Determinación de los parámetros ópticos

Teniendo como base el resultado obtenido en E.2, referente a la determinación precisa de los espesores de la muestra PGC02, se expresa los resultados de transmitancia monocromática en función del espesor correspondiente. Así por ejemplo en la figura 13 se muestra para  $\lambda=1100$ nm la dependencia del coeficiente de transmisión en función del espesor de la película.



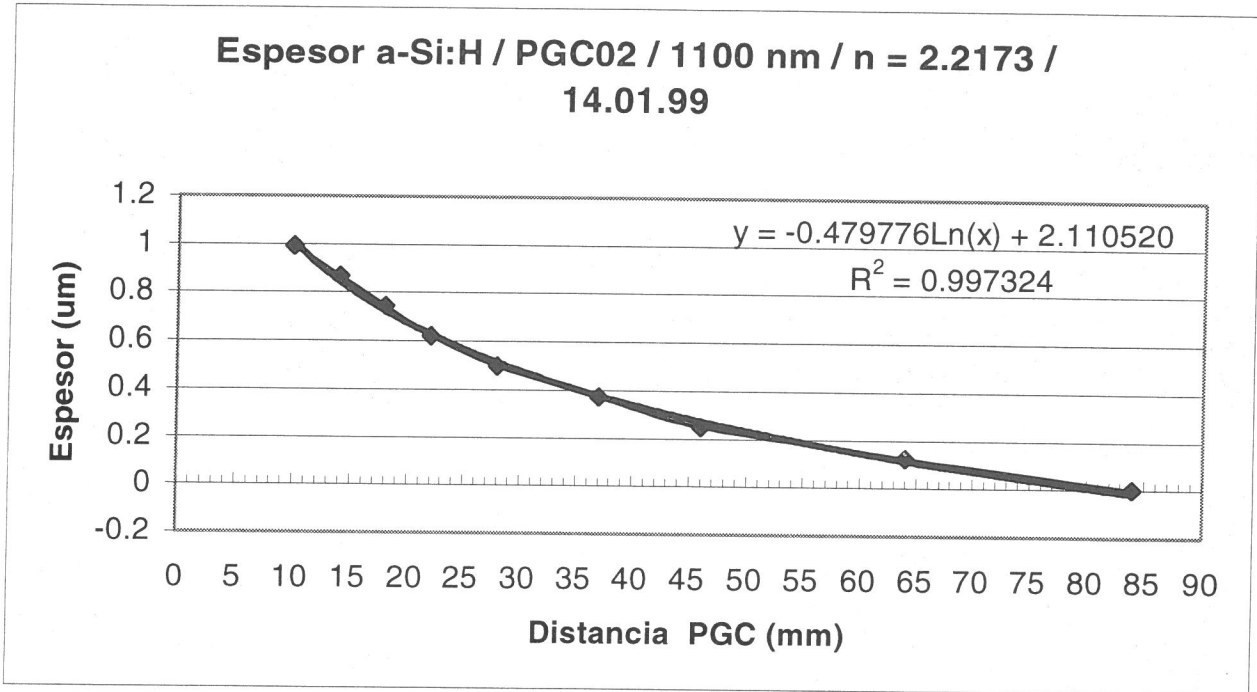


Figura 12: Variación del espesor  $d$  ( $\mu\text{m}$ ) en función de la distancia  $D$  (mm) para la muestra PGC02, obtenida del análisis de las modulaciones ocurrientes en las mediciones de transmisión.

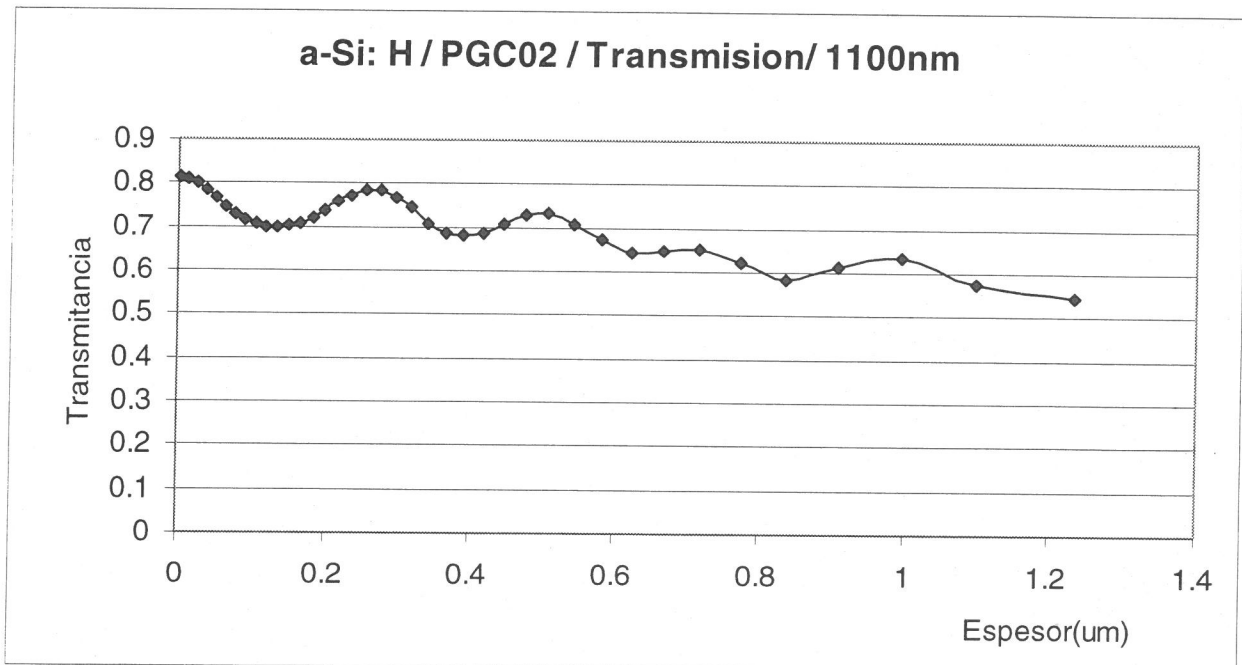


Figura 13: Variación del coeficiente de transmisión de la muestra de a- Si: H / PGC02 en función

Aplicando la teoría desarrollada para la dependencia del coeficiente de transmisión, se encuentra la curva teórica que mejor se acople al resultado experimental, como se muestra comparativamente en la figura 14 para el

caso de  $\lambda=1100\text{nm}$ , obteniéndose así como resultado de esa optimización los parámetros ópticos del material para esa Longitud de onda:

$$n_{1100} = 2.12, \quad k_{1100} = 0.025$$

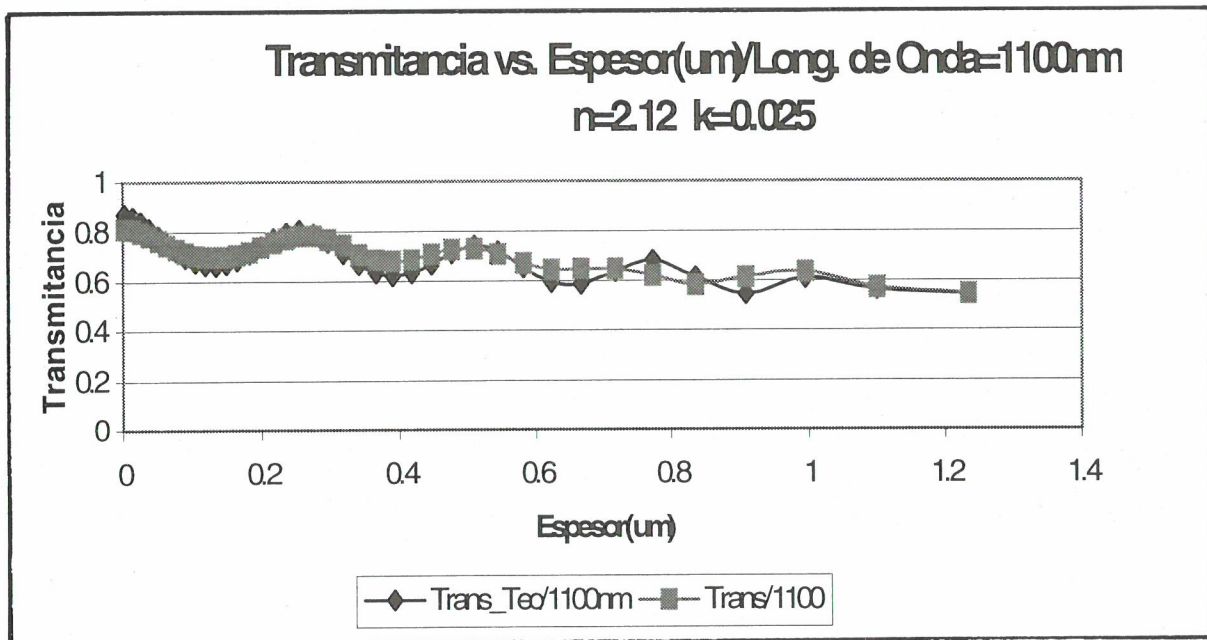


Figura 14: Resultados comparativos de acople teórico al espectro de transmisión de la figura 13

Procediéndose del mismo modo para todas las otras longitudes de onda evaluadas se obtiene finalmente (figura 15) los valores espectrales de "n" y "k" para silicio amorfo (a-Si:H) / PGC02.

## CONCLUSIONES

El trabajo aquí descrito presenta dos contribuciones importantes: de un lado se presenta las condiciones experimentales en las cuales se ha obtenido por primera vez en el país muestras semiconductoras de Silicio amorfo (a-Si:H) de calidad óptica y en segundo lugar se presenta los métodos experimentales seguidos

Para determinar de un modo inequívoco los parámetros ópticos del material elaborado, en el rango espectral permitido por el equipo empleado. Cabe mencionar que, en general, la determinación de los parámetros ópticos se basa en parte en la presunción de ciertos valores no comprobables implícitamente.

En una próxima publicación presentaremos la buena correlación existente entre los resultados aquí presentados y medidas complementarias de absorción fotoacústica y de un método experimental alternativo para determinar los parámetros ópticos a partir de un espectro de transmisión y uno de absorción.

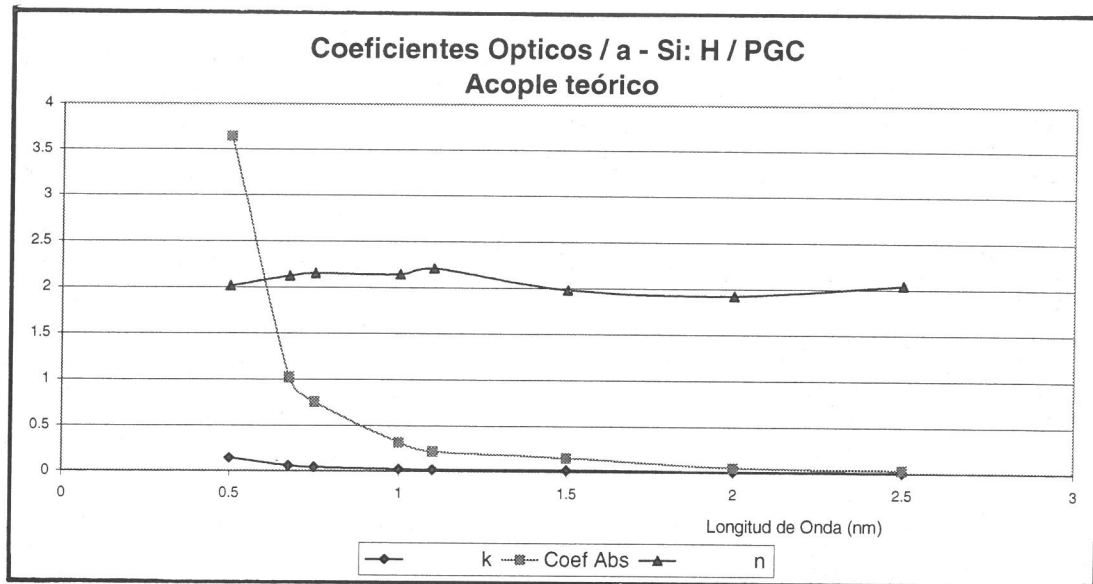


Figura 15: Coeficientes ópticos de silicio amorfo (a - Si: H / PGC02), obtenidos mediante el acople teórico a datos experimentales :

n: índice de refracción,

k: coeficiente de extinción,

Coef. Abs.:  $\alpha (10)^{-4}$

$\alpha$  = coeficiente de absorción

## REFERENCIAS

1. Heavens O.S. "Optical properties of Thin Solid Films"  
Butterworths Scientific Publ. London. 1955
2. Valera A., Eyzaguirre C. "Óptica Física"  
Ed. Hozlo, 420 págs., Nov. 97, Lima
3. Swanepoel R. "Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon"  
J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 16, London 1983
4. Valera A. y Col. "Elaboración y propiedades de Películas Delgadas de Silicio amorfo por PAT"  
TECNIA, Vol. 6, N° 1, págs. 69 - 71, Lima 1996
5. Wright, D.A. "Semi-conductors"  
Science perpbaks & Methuen



