REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA, VOL. 38, No. 2. 2006

DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN SÓLIDOS USANDO TÉCNICA FOTOACÚSTICA.

G. Peña-Rodríguez [1,*], A. Calderón [2] y R. A. Muñoz-Hernández [2]

*1 Departamento de Física, Universidad Francisco de Paula Santander. A.A. 1055, Cúcuta, Norte de Santander, Colombia.*e-mail:ggabrielp@yahoo.com*

2 Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Legaria 694 Colonia Irrigación, 11500 México D. F.

(Recibido 25 de Sep.2005; Aceptado 21 de Mar. 2006; Publicado 16 de Jun. 2006)

RESUMEN

En este trabajo, presentamos el desarrollo teórico en configuración de transmisión de calor en la celda fotoacústica, el cual es usado para la determinación experimental de la difusividad térmica de sólidos, dicho estudio se presenta tomando como base el del modelo de Rosencwaig y Gersho (RG), el cual utiliza el mecanismo de difusión térmico como el principal generador de la señal fotoacústica (FA). El aporte de este trabajo es la presentación de la expresión para la amplitud de la señal FA en función de la frecuencia de modulación de la radiación incidente, en la configuración de transmisión de calor, la cual es utilizada para ajustar los datos experimentales y así obtener la difusividad térmica de los materiales a estudiar. También se presenta la aproximación para el régimen térmicamente grueso (RTG) y se reportan los rangos de validez de esta aproximación en función de la frecuencia de corte o característica de cada material.

Palabras claves: difusividad térmica, técnica fotoacústica, propiedades térmicas de sólidos, ondas térmicas.

ABSTRACT

In this work, we presented the theoretical development in a heat transmission configuration in the Photoacoustic (PA) cell, which is used for the experimental determination of the thermal diffusivity of solids, this study appears taking a comparation with the Rosencwaig and Gersho (RG) model, which uses the thermal diffusion mechanism like the main generator of the signal (PA). The contribution of this work is the presentation of the expression for the amplitude of signal PA with a function of the modulating frequency of the incident radiation, in a heat transmission configuration, which is used to fit the experimental data and thus to obtain the thermal diffusivity of the materials to study. Also the thermally thickness approximation and the ranks of validity of this approximation are reported in a function of the cut frequency or characteristic of each material.

Keywords: thermal difusividad**,** photo-acustic technique, thermal solid properties, thermal waves.

1. Introducción

Dentro de los fenómenos fototérmicos, los cuales consisten en la generación de ondas térmicas, por procesos de foto-inducción, es decir la conversión de la radiación absorbida por un material en calor, se encuentra la técnica fotoacústica (FA), la cual se basa en el fenómeno fotoacústico descubierto por A. G. Bell en 1880 y que noventa y seis años después Rosencwaig y Gersho (RG) (1976) [1], explicaron por primera vez, teóricamente, basados en el tratamiento de ondas térmicas. Su hipótesis supone que una delgada capa de aire se expande y contrae en la interface aire-sólido dentro de la celda, la cual actúa sobre el resto del volumen, produciendo cambios en la presión de éste y generando la señal acústica. El estudio de esta señal fue usado por Rosencwaig para establecer la espectroscopía fotoacústica, con el objetivo de estudiar propiedades ópticas en sólidos [2]. Desde su presentación hecha en 1977 por Adams y Kirkbright [3], la técnica FA en configuración de transmisión de calor sigue siendo utilizada cada vez con mayor frecuencia en la medición de propiedades térmicas y ópticas de una amplia variedad de materiales [4-9].

Por lo anterior, en este trabajo se presenta un estudio teórico para la amplitud en función de la frecuencia de la radiación modulada de la señal FA, para determinar experimentalmente la difusividad térmica (α) de sólidos.

2. El modelo Rosencwaig y Gersho (RG).

En este modelo teórico se considera al mecanismo de difusión térmico como el principal responsable de la producción de la señal (FA) [1]. A través del estudio unidimensional del flujo de calor en la celda (ver fig. 1), Rosencwaig y Gersho demostraron que solamente una capa muy delgada de aire adyacente a la superficie del sólido, responde térmicamente al flujo de calor periódico proveniente del sólido. Esta capa de aire sufre un calentamiento y un enfriamiento alternado y se comporta como un pistón vibratorio, el cual genera la señal FA. También suponen que la celda y el gas no absorben radiación, y que el gas de la celda responde adiabaticamente a la acción del pistón. Con las consideraciones anteriores y revizando la referencia [1] se llega a que los cambios de la presión en la celda FA esta dada por:

$$\delta P(t) = Qe^{j(\omega t - \pi/4)} \quad \text{con} \quad Q = \frac{\tau_s(0)\gamma P_0}{\sqrt{2}T_0 l_g a_g} \tag{1}$$

En (1) Q representa la envolvente compleja de la variación sinusoidal de la presión, donde

$$\tau_s(0) = \frac{\beta I_0 \eta}{2k_s(\beta^2 - \sigma_s^2)}\left[\frac{(r-1)(b+1)e^{\sigma_s l} - (r+1)(b-1)e^{-\sigma_s l} + 2(b-r)e^{-\beta l}}{(g+1)(b+1)e^{\sigma_s l} - (g-1)(b-1)e^{-\sigma_s l}}\right] \tag{2}$$

es el campo de temperatura en la cara de la muestra x=0 (ver figura 1), con

$$g = \frac{k_g \sigma_g}{k_s \sigma_s} = \frac{e_g}{e_s}; \qquad b = \frac{k_b \sigma_b}{k_s \sigma_s} = \frac{e_b}{e_s} \quad \text{y} \quad r = \frac{\beta}{\sigma_s} \tag{3}$$

En (1) P_0 es la presión en el medio ambiente, T_0 la temperatura de la celda, γ es la razón de calores específicos, l_g es la longitud de la columna de aire en la cámara FA y a_g es el coeficiente de difusión térmico del aire.

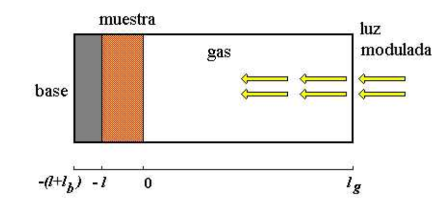

Figura 1. Sección transversal de la celda FA convencional usada en el modelo RG.

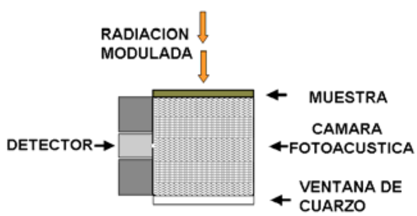

Figura 2. Corte transversal de la celda FA en configuración de transmisión de calor.

3. Análisis de la amplitud de la señal FA para halla la difusividad térmica de sólidos usando configuración de transmisión de calor en la celda FA.

Comparando la figura 1, la cual se utilizo en el modelo RG, con la figura 2, observamos que podemos utilizar el mismo análisis para la configuración de transmisión de calor que el desarrollado en el modelo RG si consideramos en la figura 2 que la base esta compuesta de aire. Ahora ya no estamos interesados en la solución a la ecuación de difusión en *x*=0, sino en *x*=-*l*, refiriéndonos a la figura 1. Considerando que la muestra es ópticamente opaca y que la efusividad térmica del aire (e_g) es mucho menor que la efusividad térmica de la muestra (e_s), de (3) tenemos que $g\approx 0$ y que $b\approx 0$. Por lo tanto reemplazando en (1) a $\tau_S(0)$ por $\tau_S(-l)$ el cual para el caso de absorción superficial [1] esta dado por (4) se obtiene la expresión (5) para Q.

$$\tau_s(-l) = \frac{\beta I_0 \eta}{2k_s\sigma_s}\left[\frac{2}{(g+1)(b+1)e^{\sigma_s l} - (g-1)(b-1)e^{-\sigma_s l}}\right] \qquad (4)$$

$$Q = \frac{C}{\sigma_s}\left[\frac{1}{e^{\sigma_s l} - e^{-\sigma_s l}}\right] \quad \text{con} \quad C = \frac{\gamma P_0 \beta I_0 \eta}{k_s\sqrt{2}T_0 l_g a_g} \qquad (5)$$

Sustituyendo en (5) a $\sigma_s = (1+j)a_s$ [1] y realizando el álgebra correspondiente se obtiene:

$$Q = \frac{C(m-n)}{2a_s(m^2+n^2)} - j\frac{C(m+n)}{2a_s(m^2+n^2)}\,;\; m = \cos(a_s l)[e^{a_s l} - e^{-a_s l}]\,;\; n = sen(a_s l)[e^{a_s l} + e^{-a_s l}]$$

(6)

De (6) se puede ver tanto la parte real (Re) como la imaginaria (Im), luego podemos hallar la amplitud (*A*) de la señal FA de $A = \sqrt{(\mathrm{Re})^2 + (\mathrm{Im})^2}$. Realizando los calculos correspondientes se llega a:

$$A = \frac{C_0}{f}\frac{\sqrt{f_c}}{\sqrt{\cosh^2(\sqrt{f/f_c}) - \cos^2(\sqrt{f/f_c})}} \quad \text{con} \quad C_0 = \frac{\gamma P_0 \beta I_0 \eta l\sqrt{\alpha_g}}{4k_S T_0 l_g\sqrt{\pi}} \qquad (7)$$

Donde f es la frecuencia de modulación de la radiación incidente y f_c es la frecuencia de corte, la cual es igual a la frecuencia de modulación donde la longitud de difusión térmica y el espesor de la muestra (*l*) son iguales, y C_0 es una constante.

Luego la expresión (7) es la ecuación para la amplitud de la señal FA en función de f, la cual puede ser utilizada para ajustar los datos experimentales y determinar f_c de la muestra, y por ende obtener α, ya que f_c, α y l están relacionadas por la expresión $\alpha = \pi f_c l^2$.

3.1. Régimen térmicamente fino (RTF).

Este régimen ocurre para aquellos valores de f en los que l menor que la longitud de difusión térmica ($l \ll \mu_s$), es decir, cuando f es mucho menor que f_c ($f \ll f_c$)[1]. Luego utilizando a segundo término la expansión en series para el $\cosh(\sqrt{f/f_c})$ y $\cos(\sqrt{f/f_c})$, de (7) tenemos que, $A \approx \frac{C_0}{\sqrt{2}} f_c f^{-3/2}$ es la amplitud de la señal FA, la cual decrece como $f^{-3/2}$, no permitiendose hallar α al no poderse determinar f_c del ajuste de los datos experimentales.

3.2. Régimen térmicamente grueso (RTG).

Se le conoce como el régimen térmicamente grueso, a aquellos valores de f en los que l es mucho mayor que la longitud de difusión térmica (l » μ_s), o sea, cuando f es mucho mayor que f_c (f>>f_c) [1]. Luego $\sqrt{f/f_c} >> 1$ y $\cosh(\sqrt{f/f_c}) >> \cos(\sqrt{f/f_c})$. Usando la definición del coseno hiperbólico, de (7) se obtiene la expresión para la amplitud de la señal FA en función de f para este régimen, la cualesta dada por la expresión (8)

$$A \approx \frac{2C_0\sqrt{f_c}}{f} e^{-\sqrt{f/f_c}} \tag{8}$$

De esta manera en el RTG la amplitud de la señal FA decrece exponencialmente como $\sqrt{f}$. Además, como f_c esta relacionada con α, podemos determinar el coeficiente $c = f_c^{-1/2}$ del argumento de la exponencial mediante el ajuste de (8) a los datos experimentales y de este obtener α..

5. Conclusiones.

Se presenta a partir del modelo RG, el análisis de la amplitud de la señal FA en función de f de la radiación incidente, para la configuración de transmisión de calor en la Celda FA. Nuestro resultado dado por la ecuación (7), permite ajustar los datos experimentales de la amplitud de la señal FA en función de f y determinar f_c, el cual permitirá hallar α. También se presenta un análisis para el RTF y RTG, obteniéndose la ecuación (8) para el RTG. Si se gráfica la ecuación (7)/(8) en función de $x = f/f_c$. Se observa, que para valores de x>5 (f >5f_c) el comportamiento entre las dos expresiones es prácticamente el mismo, mientras que, para x>1.5(f>1.5f_c,) hay un error inferior al 5% en la aproximación (8).

Referencias

[1]. A. Rosencwaig and A. Gersho, *J. Appl.Pys*. 47, 64 (1976)

[2]. A. Rosencwaig, *Opt. Commun*. 7, 305 (1973)

[3]. M. J. Adams and G. F. Kirkbright, *Analyst*, 102, 281-292 (1977).

[4]. N.F. Leite and L.C. M. Miranda, *J. Mat. Sci*. 27, 5449 (1992).

[5]. A. Cruz Orea, I. Delgadillo, H. Vargas, A Gudiño, E. Marín, C. Vásquez-Lopez, A. Calderón and J. J. Alvarado Gil, *J. Appl. Phys.* 79, 8951 (1996)

[6]. A. Calderón, J.J. Alvarado Gil, YG. Gurevich, A. Cruz Orea, I. Delgadillo, H. Vargas and L.C.M. Miranda, *Physical Review Letters* 79, 5022-5025 (1997).

[7]. C. Vázquez López, A. Calderón, M. Enrique Rodríguez, E. Velasco, S. Canoc, R. Colás and S. Valtierra, *J. Mat. Res.* 15, 85-91 (2000).

[8]. YS. Touloukian, RW. Powell, RW HO CY and MC. Nicolu, *Thermophysical Propieties of Matter*, Vol. 10, Plenum, New York, (1970).

[9]. G. Ziegler And DPH. Hasselman, *Journal of Materials Science*. 16, 495-503, (1981).

H. Vargas and L.C.M. Miranda, *Phys. Rep.* 161, 43-101 (1988).