



Mejoramiento de la respuesta fotoacústica en mediciones de difusividad térmica

Improvement of the photoacoustic response in thermal diffusivity measurements

Gasca-Figueroa David^{1,3}, Bravo-Sánchez Micael Gerardo², Guzmán-López Adriana³, Zavala-Villalpando José Guadalupe⁴, García-Rodríguez Francisco Javier⁴

¹Estudiante del Programa Doctoral en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

²Departamento de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

³Departamento de Ciencias Básicas. Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Tecnológico S/N, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

⁴Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Antonio García Cubas 1200, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México.

Autor de correspondencia: Dr. Francisco Javier García Rodríguez, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Celaya. Av. Antonio García Cubas 1200, Col. Fovissste, 38010 Celaya, Guanajuato, México. E-mail: fcojav@itc.mx. ORCID: 0000-0001-5342-9052.

Recibido: 26 de Noviembre del 2019

Aceptado: 07 de Marzo del 2020

Publicado: 14 de Diciembre del 2020

Resumen. – Se presenta una configuración alternativa de celda fotoacústica para la determinación de la difusividad térmica (α), a temperatura ambiente, para materiales sólidos. El método se basa en el uso de dos cámaras fotoacústicas idénticas, al interior de las cámaras en la parte central, una lámina térmicamente delgada es propuesta para transformar la energía luminosa en energía calorífica. Un material de referencia colocado de manera paralela a un material de estudio en la parte posterior del material térmicamente delgado permite relacionar las propiedades térmicas de estos materiales. Se efectúa la razón de amplitudes de señal fotoacústica con el modelo matemático completo contra el modelo propuesto para cobre vs acero, oro vs plata y granito vs mármol obteniendo un error máximo de 3% al emplear el modelo propuesto en lugar del modelo completo.

Palabras clave: Arreglo fotoacústico; Respuesta fotoacústica; Difusividad térmica; Celda fotoacústica; Modelo de Rosencwaig y Gersho.

Abstract. – An alternative photoacoustic cell configuration for the determination of the thermal diffusivity (α), at room temperature, for solid materials is presented. The method is based on the use of two identical photoacoustic chambers, inside both of them, a metallic foil thermally thin is used to transform the light energy to heat energy. A Reference material placed parallel to a study material allows to relate the thermal properties of the materials used as support in the photoacoustic chambers of the experimental arrangement presented here. The ratio between experimental and theoretical photoacoustic amplitudes is realized to validate a proposed mathematical model.

Keywords: Configuration photoacoustic; Photoacoustic response; Thermal diffusivity; Photoacoustic cell; Rosencwaig and Gersho model.



1. Introducción

La difusividad térmica es la cantidad que mide el cambio en la temperatura producida en la unidad de volumen del material por la cantidad de calor que fluye en la unidad de tiempo a través de un área unitaria de una capa de espesor unitario con la diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. El significado físico detrás de la difusividad térmica es asociado con la velocidad de propagación de calor durante los cambios de temperatura por unidad de tiempo [1]. Es uno de los parámetros térmicos más frecuentemente medidos en las técnicas fototérmicas, esto es debido a que los efectos fototérmicos son principalmente dependientes de la difusión de calor en la muestra [2 - 9]. Sin embargo, algunas de las mediciones de difusividad térmica reportadas son obtenidas de manera intrusiva y están limitadas por el requerimiento de medición de parámetros como densidad, flujo de calor, longitud física de los medios de trabajo, presión y temperatura ambiente, longitud de absorción óptica, eficiencia de absorción de energía, coeficiente de absorción óptica, potencia de la luz incidente, conductividad térmica, solo por mencionar algunos.

Las técnicas de medición de propiedades térmicas trabajan bajo los dominios del tiempo y frecuencia en la determinación principalmente de conductividad y difusividad térmica, particularmente la técnica fotoacústica es no intrusiva, trabaja en el dominio de la frecuencia, su configuración experimental es sencilla, sin embargo, actualmente se reporta un error de alrededor del 10% para la técnica fotoacústica [10], que pueden ser atribuidos a efectos asociados con la instrumentación del equipo experimental así como a la necesidad de medir una serie de parámetros de trabajo como se mencionó anteriormente, a continuación se listan diferentes características de celdas fotoacústicas

en la búsqueda de optimizar la señal fotoacústica con diferentes propósitos.

La primera celda fotoacústica para la determinación de propiedades térmicas fue propuesta por Rosencwaig y Gersho [11]. En este trabajo se propuso una cámara cerrada con un gas, la muestra de trabajo y un material de soporte sólido como elementos principales de la celda, Bennet y colaboradores construyeron una celda en la cual un gas está confinado entre dos ventanas con absorción débil para la determinación de los coeficientes de absorción [12].

Cahen, diseñó una celda interesante en la que podía obtener las señales de transmisión o reflexión de acuerdo con la disposición de la muestra, donde la muestra es parte de la celda fotoacústica, en la celda de Cahen se obtienen dos señales a través de un divisor de luz, una señal es utilizado como señal de referencia y el otro como señal de estudio, también propuso una celda donde la muestra sufre una doble incidencia del haz de luz desde ambos lados [13]. Bijnen y equipo de trabajo describieron el comportamiento acústico en un micrófono y determinó que el volumen de almacenamiento y las columnas de aire suprimen la absorción de energía [14], kovsh y otros modelaron computacionalmente el efecto fotoacústico inducido por el calentamiento local de líquidos absorbentes por medio de pulsos en el orden de nanosegundos [15].

Nagele y su equipo de trabajo desarrollaron un espectrómetro fotoacústico móvil para monitorear gases con capacidad para detectar 70 partes por billón correspondientes a un coeficiente de absorción óptico mínimo de $2 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$ [16]. Besson y sus colegas destacan la importancia del gas almacenado en la celda



fotoacústica, ya que este puede reducir la intensidad de la señal fotoacústica en un orden de magnitud [17]. Rey y otros optimizaron una celda fotoacústica resonante demostrando que, al aumentar el coeficiente de absorción óptica del medio, la señal fotoacústica crece hasta un valor máximo, minimizando la sensibilidad de la señal [18]. Baumann modeló una celda fotoacústica cilíndrica utilizando el método de elemento finito, obteniendo una buena concordancia con la experimentación después de sumar las pérdidas de energía superficial obtenidas experimentalmente. Tavakolli y su equipo de trabajo optimizaron el volumen de almacenamiento de un resonador acústico para la detección de gases mediante espectroscopía fotoacústica con láser, además modelaron la celda fotoacústica unidimensional como un circuito eléctrico [19]. Kost y colaboradores maximizaron la capacidad de detección de un resonador acústico a través del método de elemento finito [20]. Gutiérrez y equipo de trabajo aplicaron la técnica fotoacústica en la determinación de propiedades térmicas como la efusividad térmica del silicio poroso depositado en sustratos de silicio [21].

Lomeli y sus colegas realizaron un estudio sobre aplicaciones biofísicas de la fotoacústica en el conocimiento de las propiedades térmicas y ópticas de los tejidos, tales como la difusividad térmica y el coeficiente de absorción óptica [22]. Chrobak y Maliński en su trabajo para optimizar una célula fotoacústica para estudios de la técnica de espectroscopía fotoacústica no destructiva reportan que cuando la longitud de onda es mucho mayor que las dimensiones de la celda, el sistema resonante puede describirse de manera análoga a un circuito eléctrico [23]. Wolf y su equipo optimizaron numéricamente una célula fotoacústica, lo que resultó en un pequeño tubo con extremos acampanados [24]. Gondal y Dastageer optimizaron un sensor de gas basado en la técnica fotoacústica, capaz de detectar

algunas partes por billón de gases [25]. Alvarado utilizó la espectroscopía fotoacústica para determinar los coeficientes de absorción óptica de la sangre de ratas macho Fisher [26]. Sigrist mostró el potencial de la técnica fotoacústica ilustrando ejemplos de aplicaciones en sólidos, líquidos, gases, en muestras biológicas y médicas [27]. Bychto y equipo de trabajo presentaron un método para determinar el espectro de absorción óptica a partir del espectro fotoacústico en muestras delgadas de semiconductores depositados en sustratos óptica y térmicamente gruesos [28].

Los trabajos mencionados requieren que la muestra de trabajo tenga una incidencia directa de la energía de un rayo láser, así como el conocimiento o la medición de al menos cinco parámetros experimentales y la influencia debida a la instrumentación en la respuesta fotoacústica. En este trabajo, el concepto de muestra de trabajo propuesto por Rosencwaig y Gersho se modifica en su teoría sobre el efecto fotoacústico sobre la materia condensada, el material considerado muestra de trabajo en la celda RG ahora tiene la función de convertir la energía luminosa en flujo de calor en el límite muestra de gas y transportar de esta energía al material de soporte, que ahora es el material de estudio en la configuración experimental presentada aquí. Esta modificación permite la independencia de los parámetros de medición relacionados con la muestra de trabajo, así como la independencia de la medición de los parámetros relacionados con el gas de trabajo en la cámara fotoacústica, además, con esta modificación el retraso en la fase de la señal fotoacústica causada por la instrumentación puede ser minimizado o despreciado, se presenta una expresión matemática para relacionar las propiedades térmicas entre un material de referencia y un material de estudio con las señales acústicas producidas al usar estos materiales como materiales de soporte en la celda RG tradicional.



2. Formalismo

En la celda fotoacústica de Rosencwaig y Gersho (celda RG) de configuración gas-muestra-soporte (figura 1), la señal fotoacústica viene dada por la ecuación 1. La señal fotoacústica es una función de la frecuencia de modulación, ω , de la luz incidente. Para obtener el resultado teórico es necesario medir los siguientes parámetros: longitud de la muestra (l), longitud de la cámara de gas (l'), presión atmosférica (P_o), temperatura ambiente (T_o), razón de calores

específicos del gas en la cámara fotoacústica (γ), eficiencia de absorción de energía en la muestra (η), Potencia de la luz incidente en la muestra (I_o), difusividades térmicas de la muestra de trabajo (α), del gas dentro de la cámara fotoacústica (α') y del material de soporte (α''), además, las conductividades térmicas de la muestra de trabajo (k), del gas dentro de la cámara fotoacústica (k') y del material de soporte (k''), además de, el coeficiente de absorción óptico de la muestra (β).

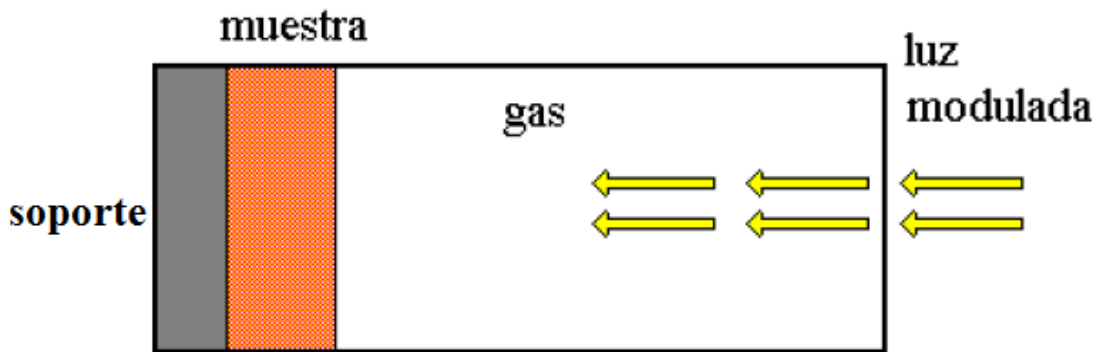


Figura 1. Celda fotoacústica de Rosencwaig y Gersho [11].

$$\delta P \approx \Delta P(t) = -\frac{Y\beta}{k\alpha'(\beta^2 - \sigma^2)} \frac{(r-1)(b_i+1)e^{\sigma l} - (r+1)(b_i-1)e^{-\sigma l} + 2(b_i-r)e^{-\beta l}}{(g+1)(b_i+1)e^{\sigma l} - (g-1)(b_i-1)e^{-\sigma l}} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \quad (1)$$

donde

$$\sigma = (1+i)a \quad a = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad a' = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha'}} \quad a'' = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha''}}$$

$$Y = \frac{\gamma P_o I_o \eta}{2\sqrt{2} T_o l'} \quad g = \frac{k'a'}{ka} \quad r = (1-i)\frac{\beta}{2a} \quad b_i = \frac{k_i'' a_i''}{ka}, \text{ para } i = n, ref$$



La expresión 1 resulta muy compleja y es necesario medir demasiados parámetros, por esta razón Rosencwaig y Gersho proponen seis casos especiales de los cuales son de interés los tres casos en los cuales la muestra de trabajo cubre la característica de ser térmicamente delgada. Clasificando los materiales de acuerdo con la opacidad óptica comparando la longitud de la muestra, l , la longitud de absorción óptica, l_β ,

($l_\beta = 1/\beta$), y la longitud de difusión térmica, μ , ($\mu = 1/a$, donde, $a = \sqrt{\omega/(2\alpha)}$), para materiales sólidos ópticamente transparentes donde $l_\beta > l$ se tienen dos casos; ia) $\mu \gg l$, $\mu > l_\beta$ y ib) $\mu > l$, $\mu \ll l_\beta$. y para materiales sólidos ópticamente opacos se tiene un caso donde $l_\beta \ll l$, se tiene un caso ii) $\mu \gg l$, $\mu \gg l_\beta$. En estos casos especiales la señal fotoacústica está dada por la ecuación 2 [10].

$$\Delta P \approx dP = -\frac{(1-i)\beta l}{2\alpha'k''a''} Y e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \quad (2)$$

3. Modelo

Si la Ec. 1 se aplica a dos cámaras fotoacústicas idénticas (celda de referencia y celda de estudio) con el mismo gas de trabajo, la misma muestra de trabajo y se hace incidir la misma potencia de luz modulada bajo la misma frecuencia y el material que funge como material de soporte se intercambia entre un material de referencia denotado con el subíndice ‘ref’ y un material de estudio denotado con el subíndice ‘n’ y se efectúa el cociente entre la señal fotoacústica de la celda de referencia y la señal fotoacústica de la celda de estudio se obtiene la expresión 3. El cociente de señales fotoacústicas resulta aún complejo, sin embargo, es independiente de la

medición de muchos de los parámetros mencionados anteriormente. De manera similar, si la ecuación 2 se aplica a una celda de referencia y una celda de estudio donde la única variante es el material de soporte, nombrados como material de referencia (subíndice ‘ref’) y material de estudio (subíndice ‘n’) y los resultados de las señales fotoacústicas de referencia y de estudio se dividen se obtiene la ecuación 4, la cual se observa que es una expresión completamente dependiente solo de las conductividades y difusividades térmicas de los materiales de soporte en ambas cámaras fotoacústicas.

$$\frac{\delta P_{ref}}{\delta P_n} \approx \frac{\frac{(r-1)(b_{ref}+1)e^{\sigma l} - (r+1)(b_{ref}-1)e^{-\sigma l} + 2(b_{ref}-r)e^{-\beta l}}{(g+1)(b_{ref}+1)e^{\sigma l} - (g-1)(b_{ref}-1)e^{-\sigma l}}}{\frac{(r-1)(b_n+1)e^{\sigma l} - (r+1)(b_n-1)e^{-\sigma l} + 2(b_n-r)e^{-\beta l}}{(g+1)(b_n+1)e^{\sigma l} - (g-1)(b_n-1)e^{-\sigma l}}} \quad (3)$$

$$\frac{dP_{ref}}{dP_n} \approx \frac{k_n''}{k_{ref}''} \sqrt{\frac{\alpha_{ref}''}{\alpha_n''}} = \frac{\Delta V_{ref}}{\Delta V_n} \quad (4)$$



De la expresión 4, se observa que el cociente de señales fotoacústicas de dos cámaras idénticas donde solo varía el material de soporte y el material térmicamente delgado empleado inicialmente como muestra de trabajo en la celda tradicional RG ahora toma el papel de ser el encargado de transformar la energía luminosa modulada en una onda de energía en forma de calor y transportarla a los materiales de soporte y ahora el material de trabajo es el material de soporte al ser sus propiedades las únicas implicadas en el cociente de señales fotoacústicas.

3.1 Resultados y Discusiones

En el presente trabajo, se propone el empleo de aire como gas de trabajo en la cámara fotoacústica, aluminio de un espesor de $17 \mu m$ como material encargado de convertir la energía luminosa en energía calorífica y como materiales de soporte de referencia se emplean cobre, granito y oro, en tanto que como materiales de soporte de estudio se emplean acero, mármol y plata. Sus conductividades y difusividades térmicas son listadas en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades térmicas de acero, aluminio y cobre.

	Conductividad térmica (W/m °K)	Difusividad térmica (m²/s)
Aire	0.026	0.0000202
Aluminio	160	0.0000638
Cobre	389	0.000113
Acero	50	0.0000125
Granito	3500	0.00000186
Marmol	2900	0.00000140
Oro	314	0.0001208
Plata	406	0.0001704

En la tabla 2, se muestra el error entre emplear la ecuación 4 en lugar de la ecuación 2 para estimar es el cociente de señales fotoacústicas,

los materiales de estudio y de referencia deben tener propiedades térmicas similares.



Tabla 2. Error al emplear la ecuación 4 en la estimación del cociente de señales fotoacústicas en un rango de 0.001 – 200 Hz.

Gas de trabajo	Material de transporte de energía	Material de referencia	Material de estudio	Error en la estimación del cociente de presiones fotoacústicas tras emplear la ecuación 4 en lugar de la ecuación 2
Aire	Aluminio (17 μ m)	Cobre	Acero	0.031 – 3.01 %
Aire	Aluminio (17 μ m)	Granito	Mármol	0.013 – 3.06 %
Aire	Aluminio (17 μ m)	Oro	Plata	0.0022 – 0.257 %

A continuación, en la figura 2 se muestra una configuración experimental propuesta para determinar el cociente de señales fotoacústica. Dos celdas idénticas con el mismo gas de trabajo (aire) son empleadas, en la región central de las celdas fotoacústicas es empleado un material térmicamente delgado (aluminio de 17 μ m) y dos materiales diferentes son colocados como materiales de soporte en cada celda, uno de ellos es un material de referencia con propiedades térmicas conocidas y el otro es un material de estudio con conductividad o difusividad térmica por conocer. Los materiales en la región de soporte deben tener propiedades térmicas similares para trabajar en el mismo rango de sensibilidad de la instrumentación. Una computadora controla el amplificador lock-in el cual ordena a un modulador mecánico, modular

la luz emitida por los laser 1 y 2, la luz modulada incide en el material térmicamente delgado al interior de las cámaras fotoacústicas, después el material térmicamente delgado transforma la luz modulada en una onda de calor con la misma frecuencia de la luz emitida por el láser y cumple la función de transportar el calor a los materiales de soporte. Dentro de las cámaras de gas, las variaciones de presión son generadas con un comportamiento periódico y la misma frecuencia de la luz laser modulada, (dP_{ref} y dP_n respectivamente), los cambios de presión son sentidos (en forma de diferencias de voltaje) por los micrófonos de electreto 1 y 2 y las señales resultantes son preamplificadas (preamp 1 and 2) y filtradas por el amplificador lock-in para posteriormente completar su procesamiento final en el ordenador (PC).

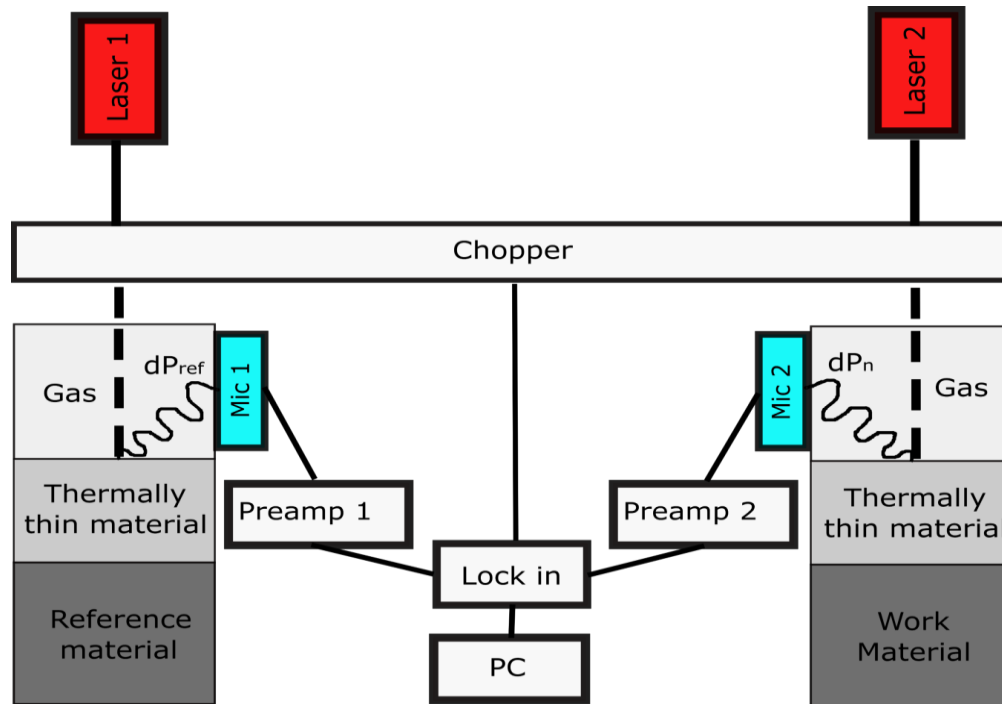


Figura 2. Configuración experimental: Dos celdas fotoacústicas idénticas con el mismo gas de trabajo, el mismo material térmicamente delgado en la región central para la conversión de energía luminosa de los laser 1 y 2 en energía térmica y su posterior transporte hacia los materiales de soporte donde un material de estudio y un material de referencia tienen participación notable en la generación de las señales fotoacústicas detectadas por los micrófonos 1 y 2 de manera simultánea para su posterior preamplificación (preamp 1 y 2) filtrado en el lock in y procesamiento final dentro del ordenador.

4. Conclusiones

Se presenta una expresión matemática para conectar la difusividad y conductividad térmica de dos materiales empleados como soporte en dos celdas fotoacústicas con la respuesta fotoacústica que podría obtenerse de manera experimental en dichas celdas donde los materiales de soporte tienen influencia notable en la producción de la señal acústica. El material de transporte de energía localizado en la región central de las cámaras fotoacústicas debe ser térmicamente delgado (cobre o aluminio) para permitir que los materiales de soporte tengan influencia notable en la producción de la señal fotoacústica.

Los materiales de referencia y de estudio empleados como materiales de soporte en la parte

posterior de las celdas fotoacústicas deben tener propiedades térmicas similares para disminuir errores causados por la sensibilidad del amplificador lock-in en el filtrado y amplificación de la señal fotoacústica. Las lecturas de las señales fotoacústicas en ambas celdas deben ser obtenidas de manera simultánea para asegurar que se trabaja bajo la misma frecuencia en ambas celdas fotoacústicas.

La configuración experimental propuesta elimina la necesidad de efectuar la medición de algunos parámetros necesarios en el arreglo tradicional de la teoría desarrollada por Rosencwaig y Gersho gracias a la razón de respuestas fotoacústicas. La expresión 4, proporciona una manera de obtener una conductividad o difusividad térmica desconocida de algún material de estudio sin necesidad de medir los parámetros asociados al



gas de trabajo y al material de transporte de energía en la celda fotoacústica.

Referencias

- [1] A. Salazar, "On thermal diffusivity". Eur. J. Phys., vol. 24, pp. 351–358, May. 2003. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/24/4/353/pdf>
- [2] L.F. Perondi, L.C.M. Miranda, "Minimal-volume photoacoustic cell measurement of thermal diffusivity: effect of the thermoelastic sample bending". J. Appl. Phys., Vol. 62, no. 7, pp. 2955e9, 1987. <https://doi.org/10.1063/1.339380>
- [3] N.F. Leite, C. Cella, H. Vargas, L.C.M. Miranda, "Photoacoustic measurement of thermal diffusivity of polymer foils". J. Appl. Phys. Vol. 61, no. 8, pp. 3025e7, 1987. <https://doi.org/10.1063/1.337853>
- [4] H.K. Park, C.P. Grigoropoulos, A.C. Tam, "Optical measurements of thermal diffusivity of a material". Int J Thermophys. Vol. 16, no. 4, pp. 973e95, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF02093477>
- [5] A. Calderón, J. J. Alvarado-Gil, Yu Gurevich, A. Cruz-Orea, I. Delgadillo, H. Vargas, L. C.M. Miranda, "Photothermal characterization of electrochemical etching processed ntype porous silicon". Phys. Rev. Lett. Vol. 79, no. 25, pp. 5022, 1997. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.5022>
- [6] A. Calderón, R. A. Muñoz Hernández, and S. A. Tomás, "Method for measurement of the thermal diffusivity in solids: application to metals, semiconductors, and thin materials". J. Appl. Phys., Vol. 84, no. 11, pp. 6327e9, 1998. <https://doi.org/10.1063/1.368957>
- [7] A. M. Mansanares and H. Vargas. Photoacoustic characterization of a two-layer system. J. Appl. Phys., Vol. 70, no. 11, pp. 7046e50, 1991. <https://doi.org/10.1063/1.349782>
- [8] J. J. Alvarado-Gil, O. Zelaya-Angel, H. Vargas, and J. L. Lucio M. "Photoacoustic characterization of the thermal properties of a semiconductor-glass two-layer system". Phys. Rev. B., Vol. 50, no. 19, pp. 14627, 1994. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.14627>
- [9] G. C. Astrath Nelson, B. G. Astrath Francine, J. Shen, C. Lei, J. Zhou, S. S. Liu Zhong, et al. "An open-photoacoustic-cell method for thermal characterization of a two-layer system". J. Appl. Phys. Vol. 107, no. 4, pp. 043514, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3310319>
- [10] B. Abad, M. Rull-Bravo, Hodson SL, Xu X, Martin-Gonzalez M. "Thermoelectric properties of electrodeposited tellurium films and the sodium lignosulfonate effect". Electrochim Acta., Vol.169, pp. 37–45, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.04.063>
- [11] A. Rosencwaig and A. Gersho, "Theory of the photoacoustic effect with solids," J. Appl. Phys, vol. 47, no. 1, pp. 64–69, Jan. 1976. <https://doi.org/10.1121/1.2002181>
- [12] H. S. Bennett and R. A. Forman, "Frequency dependence of photoacoustic spectroscopy: Surface and bulkabsorption coefficients," J. Appl. Phys, vol. 48, no. 4, pp. 1432–1436, Apr. 1977. <https://doi.org/10.1063/1.323883>
- [13] D. Cahen, "Photoacoustic cell for reflection and transmission measurements," Rev. Sci. Instrum., vol. 52, no. 9, pp. 1306–1310, Sep. 1981. <https://doi.org/10.1063/1.1136788>
- [14] F. G. C. Bijnen, J. Reuss, and F. J. M. Harren, "Geometrical optimization of a longitudinal resonant photoacoustic cell for sensitive and fast trace gas detection," Rev. Sci. Instrum., vol. 67, no. 8, pp. 2914–2923, Aug. 1996. <https://doi.org/10.1063/1.1147072>
- [15] D. I. Kovsh, D. J. Hagan, and E. W. V. Stryland, "Numerical modeling of thermal refraction in liquids in the transient regime," Opt. Express, vol. 4, no. 8, p. 315, Apr. 1999. <https://doi.org/10.1364/OE.4.000315>
- [16] M. Nägele and M. W. Sigrist, "Mobile laser spectrometer with novel resonant multipass photoacoustic cell for trace-gas sensing" Appl. Phys. B, vol. 70, no. 6, pp. 895–901, Jun. 2000. <https://doi.org/10.1007/PL00021151>
- [17] J. P. Besson, S. Schilt, and L. Thévenaz, "Multi-gas sensing based on photoacoustic spectroscopy using tunable laser diodes," Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc., vol. 60, no. 14, pp. 3449–3456, Dec. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2003.11.046>



- [18] J. M. Rey, D. Marinov, D. E. Vogler, and M. W. Sigrist, "Investigation and optimisation of a multipass resonant photoacoustic cell at high absorption levels," *Appl. Phys. B*, vol. 80, no. 2, pp. 261–266, Feb. 2005. <https://doi.org/10.1007/s00340-004-1705-1>
- [19] M. Tavakoli, A. Tavakoli, M. Taheri, and H. Saghafifar, "Design, simulation and structural optimization of a longitudinal acoustic resonator for trace gas detection using laser photoacoustic spectroscopy (LPAS)," *Opt. Laser Technol.*, vol. 42, no. 5, pp. 828–838, Jul. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2009.12.012>
- [20] B. Kost, B. Baumann, M. Germer, M. Wolff, and M. Rosenkranz, "Numerical shape optimization of photoacoustic resonators," *Appl. Phys. B*, vol. 102, no. 1, pp. 87–93, Jan. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4170-z>
- [21] A. Gutiérrez, J. Giraldo, and M. E. Rodríguez-García, "Técnica fotoacústica aplicada a la determinación de propiedades térmicas de silicio poroso," *Rev. mex. fis.*, vol. 57, no. 2, pp. 99–105, Abril 2011. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&id=S0035-001X2011000200001&lng=es&nrm=iso>.
- [22] P. A. Lomelí Mejía, N. P. Castellanos Abrego, M. M. Méndez González, A. Cruz Orea, and J. L. Jiménez Pérez, "Aplicaciones biofísicas de la fotoacústica," vol. 1, no. 2, pp. 90–94, 2012. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=37334>
- [23] Ł. Chrobak and M. Maliński, "Design and optimisation of the photoacoustic cell for nondestructive photoacoustic spectroscopy," *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 28, no. 1, pp. 17–27, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1080/10589759.2012.667408>
- [24] M. Wolff, B. Kost, and B. Baumann, "Shape-Optimized Photoacoustic Cell: Numerical Consolidation and Experimental Confirmation," *Int. J. Thermophys.*, vol. 33, no. 10–11, pp. 1953–1959, Nov. 2012. <https://doi.org/10.1007/s10765-012-1257-2>
- [25] M. A. Gondal and M. A. Dastageer, "Design, fabrication, and optimization of photo acoustic gas sensor for the trace level detection of NO₂ in the atmosphere," *J. Environ. Sci. Health Part A*, vol. 45, no. 11, pp. 1406–1412, Aug. 2010. <https://doi.org/10.1080/10934529.2010.500933>
- [26] M. L. Alvarado-Noguez, M. Cano-Europa, C. Hernández-Aguilar, F. A. Domínguez-Pacheco, and A. Cruz-Orea, "Obtención y Análisis del Espectro de Absorción Óptico de Sangre Rata Fisher con Daño Hepático Mediante Espectroscopía Fotoacústica," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 38, no. 1, pp. 349–356. <https://doi.org/10.17488/rmib.38.1.31>.
- [27] M. W. Sigrist, "Photoacoustic Spectroscopy, Applications," in *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Elsevier, 2017, pp. 589–597. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11307-1>
- [28] L. Bychto, M. Maliński, A. Patryn, M. Tivanov, and V. Gremenok, "Determination of the optical absorption spectra of thin layers from their photoacoustic spectra," *Opt. Mater.*, vol. 79, pp. 196–199, May 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.03.043>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)