

# Técnica fotoacústica aplicada a la determinación de propiedades térmicas de muestras de silicio poroso

A. Gutiérrez y J. Giraldo

*Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá,  
Avenida Carrera 30 No. 45-03, Ciudad Universitaria, Bogotá, D.C., Colombia,  
e-mail: agutierrezr@unal.edu.co*

M.E. Rodríguez-García

*Departamento de Nanotecnología, Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada,  
Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, 76000, México,  
e-mail: marioga@fata.unam.mx*

Recibido el 8 de marzo de 2010; aceptado el 9 de diciembre de 2010

La técnica fotoacústica es una técnica que estudia la interacción de la radiación con la materia a través de un fenómeno conocido como *efecto fotoacústico*. En este trabajo, mediante el ajuste teórico de medidas experimentales de la amplitud de la señal fotoacústica, se determinaron los valores de efusividad térmica efectiva de muestras de silicio poroso crecidas sobre sustratos de silicio tipo-*n* (100) de diferentes valores de resistividad en el intervalo 1-25  $\Omega$  cm. Las muestras se fabricaron a temperatura ambiente en un baño electrolítico formado por una mezcla de ácido fluorhídrico al 48 % y etanol absoluto en relación 1:1 en volumen, bajo condición potencioestática (20 V), con un tiempo de ataque de 2 minutos e iluminación trasera mediante un láser con longitud de onda de 808 nm. Los valores obtenidos de la efusividad térmica efectiva de las muestras porosas disminuyeron con respecto al correspondiente valor del silicio monocristalino, esta disminución puede ser atribuida a la restricción del camino libre medio de los fonones de la red en el silicio poroso.

**Descriptores:** Silicio poroso; fotoacústica; propiedades térmicas.

The photoacoustic technique is a technique that studies the radiation-matter interaction through a well-known phenomenon as *photoacoustic effect*. In this work using a theoretical fitting of the photoacoustic signal amplitude the effective thermal effusivity of porous silicon samples was determined. The porous samples were obtained by means of photoelectrochemical etching of (100) *n*-type silicon wafers with different resistivity values, all in the range of 1-25  $\Omega$  cm. The samples were formed at room temperature in an electrolytic bath composed by a mixture of hydrofluoric acid (48 %) and ethanol having a composition ratio of 1:1 in volume under potentiostatic condition (20 V) and an etching time of 2 minutes using back illumination provided by a laser beam with a wavelength of 808nm. The obtained values for the effective thermal effusivity of the porous samples diminished respect to the corresponding value of single-crystalline silicon, this decrease can be attributed to the restriction of the mean free path of phonons in the porous network.

**Keywords:** Porous silicon; photoacoustic; thermal properties.

PACS: 81.70.Cv; 81.05.Rm; 44.30.+r

## 1. Introducción

El silicio poroso (*SP*) es un material que se forma por disolución anódica de silicio monocristalino en soluciones electrolíticas que contienen ácido fluorhídrico (*HF*). Las recientes aplicaciones del *SP* incluyen el desarrollo de biosensores ópticos de alta sensibilidad y bajo costo [1] detección de vapores orgánicos (metanol, etanol, isopropanol, acetona, agua) [2], diodos emisores de luz [3], entre otras.

Lehman [4] reportó la morfología de muestras de *SP* para diferentes sustratos de silicio tipo-*n* con diferentes densidades de dopado en el intervalo entre  $6 \times 10^{16}$  y  $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ; sin embargo, muestras de *SP* crecidas sobre sustratos de silicio tipo-*n* con bajas densidades de dopado y bajos porcentajes de porosidad que aún no han sido extensivamente estudiadas.

Las propiedades térmicas y ópticas de silicio tipo-*n* han sido estudiadas por medio de la técnica fotoacústica [5-7]. Esta técnica es no destructiva y usa la muestra bajo estudio como detector permitiendo estudiar las propiedades térmicas de diferentes materiales tales como semiconductores [8], metales [9], materiales compuestos [10], entre otros.

En este trabajo, aplicando la técnica fotoacústica, se determinaron los valores de la efusividad térmica efectiva de muestras de silicio poroso, con bajos porcentajes de porosidad, crecidas sobre sustratos de silicio tipo-*n* en la dirección (100) con diferentes valores de resistividad ( $\rho \sim 1 - 25 \Omega \text{cm}$ ) mediante el ajuste teórico de las medidas experimentales de la señal fotoacústica. La amplitud teórica de la señal fotoacústica se halló mediante la solución de la ecuación de difusión de calor en el sistema muestra-gas con condiciones de frontera.

## 2. Técnica fotoacústica

El efecto fotoacústico en sólidos fue descubierto por Alexander Graham Bell ( $\sim 1880$ ) [11] pero sólo fue utilizado a partir de 1973 cuando los primeros modelos teóricos aparecieron para explicarlo [12-14]. Para observar este efecto se confina un gas dentro de una cámara o celda con la muestra como una de sus paredes. La muestra se ilumina con luz de intensidad modulada, al absorber la luz eleva su temperatura de manera modulada, originando con ello que haya un flujo de

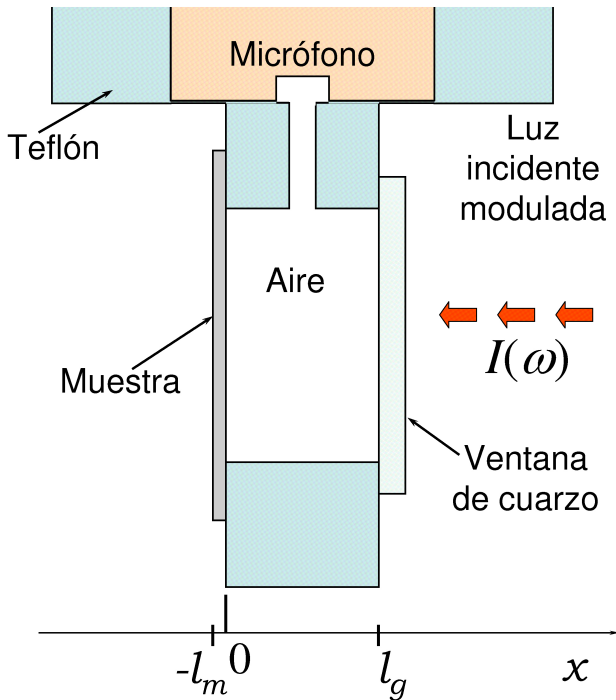


FIGURA 1. Esquema de la vista superior de la celda fotoacústica.

calor modulado desde la muestra hacia sus alrededores, en particular hacia el gas confinado en la celda. La energía suministrada al gas elevará su temperatura de manera modulada, ocasionando fluctuaciones de presión moduladas en el gas, las cuales pueden ser registradas por un micrófono.

La técnica fotoacústica ha sido ampliamente utilizada en física [15-17] y en otras disciplinas tales como química [18], biología [19], medicina [20] e ingeniería [21], debido a que presenta algunas ventajas sobre la espectroscopia óptica convencional de transmisión, reflexión y dispersión. Una de esas ventajas es que la técnica fotoacústica da una medida directa de la absorción (mide la radiación absorbida que relaja en forma de calor), de forma que se puede aplicar al estudio de materiales opacos, poco absorbedores, geles, en forma de polvos o amorfos, que son materiales donde la espectroscopia óptica convencional no es adecuada. Otra ventaja es que se trata de una técnica no destructiva, lo que permite realizar estudios en materiales biológicos “*in vivo*”, así como procesos electroquímicos en tiempo real [22,23]. Resulta ventajoso que en esta técnica el detector de la radiación sea la propia muestra. Adicionalmente permite estudiar tanto propiedades ópticas como térmicas del material, así como su dependencia con el espesor de la muestra por medio de variaciones en la frecuencia de modulación de la fuente luminosa.

## 2.1. Ecuación de difusión térmica

El mecanismo principal de generación de la señal acústica en un sólido es la conducción de calor generado en la muestra hacia el gas de la celda. A continuación se presenta el análisis unidimensional de la producción de la señal fotoacústica en la celda basado en la teoría de Rosencwaig-Gersho [24,25].

Aunque McDonald y Westel [26] propusieron que la señal fotoacústica debe estar basada en la solución de ecuaciones termoelásticas acopladas para la presión y la temperatura, para el caso de sólidos el término acústico que adicionan al modelo de Rosencwaig-Gersho tiene un efecto despreciable en la ecuación de temperatura, por lo tanto la distribución de temperatura en la muestra se obtiene de la solución de la ecuación de difusión térmica.

La Fig. 1 es un esquema de la celda fotoacústica usada para la obtención de la señal fotoacústica de las muestras estudiadas. El cuerpo de la celda fue hecho de teflón, donde la muestra y una ventana de cuarzo forman dos de las paredes de la celda donde se confina un gas (aire). La celda se fabricó en teflón, ya que ésta forma parte del contenedor de una nueva celda fotoacústica electroquímica [23]. El micrófono detecta los cambios de presión producidos en la celda. La columna de gas encerrado tiene una longitud  $l_g$  y se supone que no absorbe luz.

Suponiendo que la fuente de luz de longitud de onda  $\lambda$  tiene una intensidad  $I_o$  y se modula de forma sinusoidal a una frecuencia ( $\omega = 2\pi f$ ), la intensidad de la luz que incide sobre la superficie de la muestra puede expresarse como [25]

$$I = \frac{1}{2} I_o (1 + \cos \omega t). \quad (1)$$

El origen de coordenadas se ha tomado en la frontera entre la muestra y el gas, por lo tanto  $x$  toma valores negativos y la muestra se extiende desde  $x = 0$  a  $x = -l_m$  (ver Fig. 1).

La densidad de calor producida en cualquier punto  $x$  debido a la luz absorbida en ese punto en la muestra está dada por

$$\frac{1}{2} \beta I_o (1 - R) e^{\beta x} (1 + \cos \omega t), \quad (2)$$

donde  $\beta$  y  $R$  son los coeficientes de absorción óptico y de reflectividad de la muestra, respectivamente (estos coeficientes dependen de la longitud de onda de la radiación incidente).

La ecuación de difusión térmica para toda la celda se puede expresar como

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial \Theta}{\partial t}, \quad \text{para } 0 < x < l_g, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_m} \frac{\partial \Theta}{\partial t} - A e^{\beta x} (1 + e^{i\omega t}), \quad \text{para } -l_m < x < 0, \quad (3b)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial \Theta}{\partial t}, \quad \text{para } x < -l_m; \quad (3c)$$

con  $\alpha_{m,g}$  la difusividad térmica de la muestra ( $m$ ) o del gas ( $g$ ),  $\Theta$  la temperatura del gas,  $A = \beta I_o \eta (1 - R) / 2\kappa_m$ ,  $\kappa_m$  la conductividad térmica de la muestra y  $\eta$  la eficiencia a la cual la luz absorbida de longitud de onda  $\lambda$  se convierte en calor mediante procesos de desexcitación no radiativa.

La parte real de la solución,  $\Theta(x, t)$ , de la ecuación diferencial representa la temperatura en la celda relativa a la temperatura ambiente  $\Theta_o$  como función de la posición,  $x$ , y del tiempo  $t$ . Así la temperatura en la celda está dada por

$$T(x, t) = \text{Re}(\Theta(x, t)) + \Theta_o. \quad (4)$$

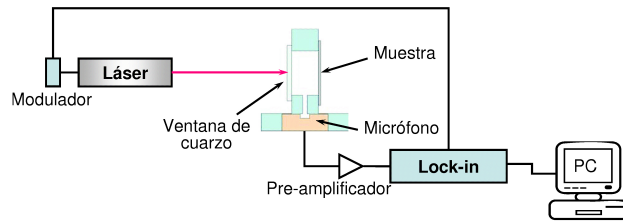


FIGURE 2. Esquema del montaje experimental.

La solución general para  $\Theta(x, t)$  se obtiene mediante el método de separación de variables.

Las condiciones de frontera apropiadas para resolver la ecuación diferencial (Ec. (3)) se obtienen de los requerimientos de continuidad de la temperatura y el flujo de calor en las fronteras  $x = 0$  y  $x = -l_m$ . Debido a que la longitud de la columna de gas  $l_g$  (0.58 cm, ver Tabla I) es mayor que  $2\pi\mu_g$ , donde  $\mu_g$  es la longitud de difusión térmica

$$(\mu_g = \sqrt{\alpha_g/\pi f} \sim 0.1 \text{ cm} \quad \text{para} \\ f = 100 \text{ Hz}, \quad \alpha_g \approx 0.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}),$$

la temperatura en  $x = l_g$  es la temperatura ambiente. Para posiciones lejos de la muestra ( $x \ll -l_m$ ) la temperatura es la temperatura ambiente.

Los procesos de difusión periódica producen una variación periódica de la temperatura en el gas, ésta es dada por la componente sinusoidal ( $ac$ ) de la solución de la ecuación diferencial para la región del gas ( $0 < x < l_g$ , región denominada  $I$ ):

$$\Theta_{I_{ac}}(x, t) = B_3 e^{-\sigma_g x + i\omega t}, \quad (5)$$

con

$$B_3 = \frac{\beta I_o(1-R)\eta}{2\kappa_m(\beta^2 - \sigma_m^2)} \left[ ((r-1)(g+1) + gr)e^{\sigma_m l_m} - (r+1)(g-1)e^{-\sigma_m l_m} + 2(g-r)e^{-\beta l_m} \right] \\ \times \left\{ (g+1)^2 e^{\sigma_m l_m} - (g-1)^2 e^{-\sigma_m l_m} \right\}^{-1}, \quad (6)$$

donde

$$g = \kappa_g \sigma_g / \kappa_m \sigma_m, \quad r = \beta / \sigma_m, \\ \sigma_{g,m} = (1+i)\sqrt{\omega/2\alpha_{g,m}}.$$

Tomando la parte real de la Ec. (5) se obtiene la variación de temperatura en el gas,  $T_{ac}(x, t) = \text{Re}(\Theta_{I_{ac}}(x, t))$ .

Teniendo en cuenta el análisis realizado por Rosencwaig y Gersho [24], la variación de la presión se expresa como la parte real de

$$\delta P(t) = \frac{\gamma P_o \mu_g}{\sqrt{2}\Theta_o l_g} B_3 e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})}, \quad (7)$$

donde  $\gamma$  es la razón de los calores específicos a presión constante y volumen constante, y  $P_o$  la presión ambiente.

 TABLE I. Valores usados en el cálculo de la señal fotoacústica de la muestra de silicio tipo- $p$  de alta calidad cristalina.

| Parámetro  | Valor                               | Referencia   |
|------------|-------------------------------------|--------------|
| $\beta$    | $9.31 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$   | [27]         |
| $R$        | 0.328                               | [27]         |
| $\kappa_m$ | $148 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$    | [28]         |
| $\kappa_g$ | $0.0258 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ | [26]         |
| $\alpha_g$ | $0.19 \text{ cm}^2/\text{s}$        | [26]         |
| $l_g$      | 0.58 cm                             | <sup>a</sup> |
| $\eta$     | 1                                   |              |

<sup>a</sup>Medido con un calibrador.

### 3. Montaje experimental

El sistema usado para la medición de la difusividad térmica de muestras de silicio tipo- $n$  y muestras de silicio poroso se presenta esquemáticamente en la Fig. 2. El láser usado como fuente luminosa tiene una longitud de onda  $\lambda=808 \text{ nm}$  (LASERMATE GROUP INC. LBG808250 A5-T). La intensidad del láser se moduló en el rango de 10 Hz - 1 kHz mediante el oscilador interno del amplificador lock-in (Stanford Research System SR830). La potencia de la radiación incidente fue de 64.8 mW (la potencia se midió con un medidor de potencia (MELLES GRIOT Broad Band Modelo 13PEM001)). La señal de salida de la celda fotoacústica se detectó mediante un micrófono de electreto que se conectó a un amplificador con factor de amplificación  $\times 100$  y posteriormente al amplificador lock-in.

La respuesta del micrófono a las fluctuaciones de presión debe ser tomada en cuenta, así que la amplitud de la señal fotoacústica obtenida mediante la Ec. (7) debe ser corregida multiplicándola por una función que contiene este efecto, esta función es llamada *función instrumental*.

Para obtener la función instrumental en función de la frecuencia,  $FI(f)$ , se midió la señal fotoacústica de una muestra de silicio tipo- $p$  de alta calidad cristalina de la compañía Mittel (Bromont-Ontario, Canadá) cuyo valor de difusividad térmica es  $\alpha = 0.96 \text{ cm}^2/\text{s}$  [29] con espesor  $l_m = 682 \mu\text{m}$ . La función instrumental se halló tomando el cociente entre la amplitud de la señal medida,  $S_{exp}$  y la amplitud de la señal predicha por la Ec. (7),  $S_{teo}$

$$S_{teo} = V_o \|\delta P(t)\| = V_o \frac{\gamma P_o \mu_g}{\sqrt{2}\Theta_o l_g} \|B_3\|, \quad (8)$$

donde  $V_o$  es un parámetro que depende de las propiedades del micrófono [30].

$$S_{exp} = FI(f) S_{teo}. \quad (9)$$

En la Ec. (8)  $\|B_3\|$  se refiere a la magnitud de la expresión compleja  $B_3$  (Ec. (6)). Para evaluar la expresión (8) se usó el conjunto de parámetros reportados en la Tabla I.

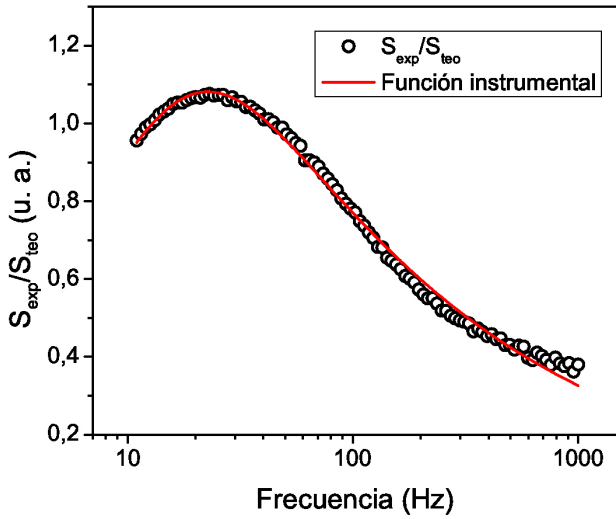


FIGURE 3. Función instrumental  $FI(f)$  hallada mediante el cociente de las amplitudes de las señales fotoacústicas experimental y teórica obtenida mediante la Ec. (9) para una muestra de silicio tipo- $p$  de alta calidad cristalina.

TABLE II. Valores de resistividad nominal y espesor de las obleas de silicio tipo- $n$ .

| Muestra          | $\rho(\Omega\text{cm})^a$ | $l_m(\mu\text{m})$ |
|------------------|---------------------------|--------------------|
| Oblea No. 1 (O1) | 1-5                       | 523                |
| Oblea No. 2 (O2) | 5-10                      | 517                |
| Oblea No. 3 (O3) | 10-15                     | 530                |
| Oblea No. 4 (O4) | 15-20                     | 515                |
| Oblea No. 5 (O5) | 20-25                     | 502                |

<sup>a</sup>Los valores de la resistividad de las diferentes obleas fueron dados por el fabricante.

Los valores de  $\beta$  y  $R$  corresponden al silicio monocristalino a la longitud de onda de 808 nm [27]. El valor de  $l_g$  corresponde a la columna de aire encerrado en la celda fotoacústica. La intensidad de la radiación incidente fue  $I_o = 6.48 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ .

La Fig. 3 muestra la función instrumental obtenida de esta forma, y puede ser expresada como

$$FI(f) = \frac{2\pi f \tau_M}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_M)^2}}. \quad (10)$$

Esta función instrumental corresponde a un circuito  $RC$  en serie, donde  $\tau_M$  es el tiempo característico del circuito conformado por el micrófono, los cables y el preamplificador.

## 4. Resultados experimentales

### 4.1. Difusividad térmica de muestras de silicio tipo- $n$

En la Fig. 4a se ha graficado la amplitud de la señal fotoacústica en función de la frecuencia para cinco muestras

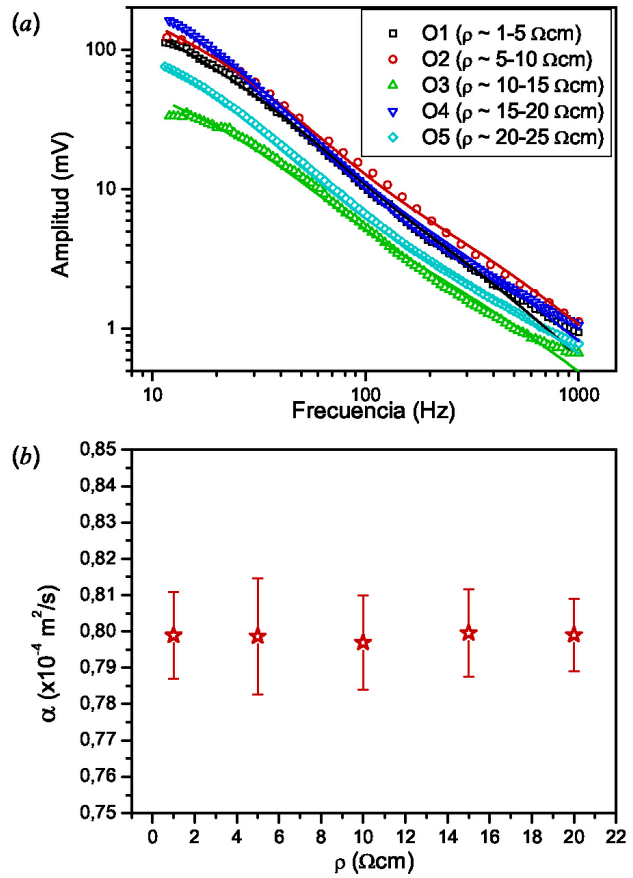


FIGURE 4. (a) Amplitud de la señal fotoacústica de diferentes muestras de silicio tipo- $n$ . (b) Difusividad térmica en función de la resistividad de las obleas de silicio tipo- $n$ .

de silicio tipo- $n$  (100) tomadas de obleas industriales de diferente valor de resistividad nominal de la compañía Mittel (Bromont-Ontario, Canadá) (ver Tabla II); estas muestras sirvieron posteriormente como sustratos para la fabricación de las muestras porosas. Los símbolos representan los datos experimentales, mientras que las líneas continuas los ajustes teóricos realizados mediante el uso de la Ec. (8) teniendo en cuenta el conjunto de parámetros reportados en la Tabla I y el espesor de cada muestra (ver Tabla II).

La Fig. 4b muestra la difusividad térmica en función de la resistividad de los sustratos obtenida mediante el ajuste de los datos experimentales. Se observa que la difusividad térmica no cambia con el valor de resistividad de los sustratos y es en promedio  $\alpha \approx 0.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Este resultado puede ser entendido teniendo en cuenta que las muestras estudiadas en este trabajo presentan niveles de dopado del orden de  $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , por lo tanto la contribución electrónica a la conducción térmica no es significativa para bajos niveles de dopado [31].

### 4.2. Efusividad térmica efectiva de muestras de silicio poroso

Las muestras de silicio poroso que se estudiaron en este trabajo fueron obtenidas mediante ataque electroquímico de

TABLE III. Tamaño de los poros de las muestras de silicio poroso producidas sobre diferentes sustratos con voltaje de anodización 20 V. El tamaño de los poros y el porcentaje de porosidad se determinaron a partir de las imágenes SEM mediante el programa IMAGE J.

| Muestra | Tamaño del poro<br>$\ell$ (nm) | % de porosidad |
|---------|--------------------------------|----------------|
| O1      | 17.8 - 142.70                  | 10.4           |
| O2      | 17.8 - 553.40                  | 6.9            |
| O3      | 17.8 - 514.62                  | 3.9            |
| O4      | 17.8 - 324.00                  | 6.2            |
| O5      | 17.8 - 534.64                  | 4.6            |

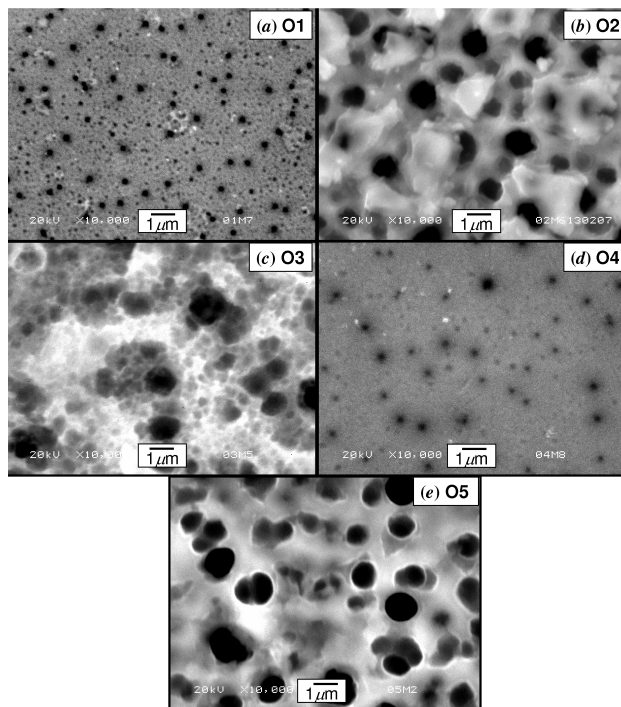


FIGURE 5. Imágenes SEM de las muestras de silicio poroso para electrodos de silicio tipo-*n* (100) anodizadas potencialesmente a 20 V. (a) Muestra O1, (b) muestra O2, (c) muestra O3, (d) muestra O4, (e) muestra O5. La escala en todas las imágenes corresponde a 1  $\mu$ m.

obleas de silicio tipo-*n* (100) con diferentes valores de resistividad (en el rango 1-25  $\Omega$ cm), a temperatura ambiente en un baño electrolítico formado por una mezcla de ácido fluorhídrico (HF) al 48 % y etanol absoluto ( $C_2H_5OH$ ) en relación 1:1 en volumen. La anodización fue realizada de forma potencialesmente (20 V) con un tiempo de ataque de 2 minutos bajo condición de iluminación trasera suministrada por un láser con longitud de onda de 808 nm (LASERMATE GROUP INC. Modelo LBG 8080250 A5-T). Como cátodo se usó una lámina de platino de alta pureza [23].

Mediante un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6060 LV) se tomaron imágenes de las muestras de sili-

cio poroso a un voltaje de aceleración de 20 kV (ver Fig. 5). Para estimar el tamaño de los poros y el porcentaje de porosidad de cada una de las muestras se usó el programa de procesamiento de imágenes IMAGE J (*Image Processing and Analysis in Java*). Los resultados se encuentran en la Tabla III.

Para medir la efusividad térmica efectiva de cada una de las muestras porosas se midió la señal fotoacústica realizando un barrido en el rango de frecuencias 100 Hz-1 kHz, rango en el que las muestras pueden considerarse térmicamente gruesas. Teniendo en cuenta que la longitud de absorción óptica del silicio,  $l_\beta (= 1/\beta \sim 10.74 \mu\text{m})$ , es mucho menor que el espesor de la muestra,  $l_m (\sim 500 \mu\text{m})$ , entonces las muestras son ópticamente opacas. Para el caso en que las muestras son ópticamente opacas y térmicamente gruesas ( $\mu_m < l_m$ ;  $\mu_m > l_\beta$ ), se tiene que  $e^{-\beta l_m} \approx 0$  y  $e^{-\sigma_m l_m} \approx 0$ , entonces

$$B_3 \approx \frac{\beta I_o (1-R) \eta}{2 \kappa_m \sigma_m (\beta + \sigma_m)}.$$

Como  $\mu_m > l_\beta$  entonces  $\sigma_m < \beta$ , y

$$\frac{\beta}{\beta + \sigma_m} \approx 1;$$

por lo tanto

$$B_3 \approx \frac{I_o (1-R) \eta \mu_m}{2 \kappa_m (1+i)}; \quad (11)$$

de esta manera la Ec. (7) se convierte en

$$\delta P(t) = \frac{\gamma P_o I_o (1-R) \eta (1-i) \mu_m \mu_g}{2 \sqrt{2} \Theta_o l_g \kappa_m} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})}. \quad (12)$$

En este caso la señal fotoacústica no depende del coeficiente de absorción óptico,  $\beta$ , el cual también es afectado por el proceso de anodización [32].

Finalmente, la amplitud de la señal fotoacústica se encuentra dada por

$$\|S\| = V_o \frac{I_o (1-R) \eta}{4 \Theta_o l_g} \frac{2 \pi f \tau_M}{\sqrt{1 + (2 \pi f \tau_M)^2}} \frac{\sqrt{\alpha_g}}{\pi e_m f}, \quad (13)$$

donde  $e_m$  es la efusividad térmica de la muestra definida como  $e_m = \kappa_m / \sqrt{\alpha_m}$ .

En la Fig. 6 se ha graficado la amplitud de la señal fotoacústica de cada una de las muestras porosas en función de la frecuencia de modulación; las líneas continuas corresponden a los mejores ajustes teóricos mediante la Ec. (13) tomando como parámetro de ajuste la efusividad térmica ( $e_m$ ) de la muestra. El ajuste se realizó mediante un programa desarrollado en ORIGINPRO 7.5 SR0.

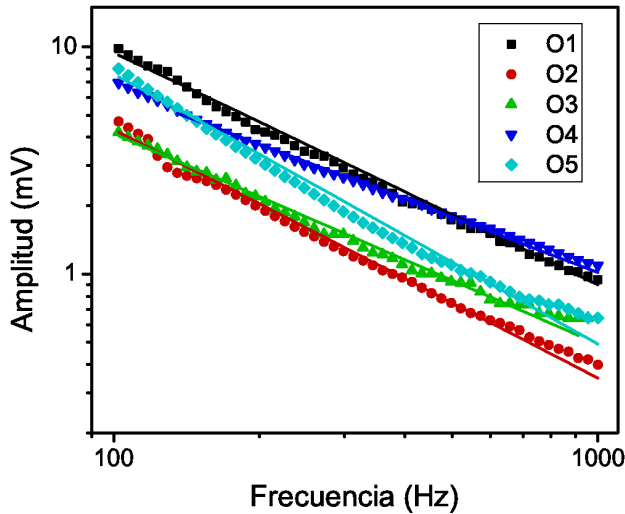


FIGURE 6. Amplitud de la señal fotoacústica de las diferentes muestras de silicio poroso.

TABLE IV. Valores de la efusividad térmica efectiva  $e_m$  de las muestras de silicio poroso.

| Muestra | % de porosidad | $e_m$<br>( $W\sqrt{s}/cm^2K$ ) | Error<br>% |
|---------|----------------|--------------------------------|------------|
| O1      | 10.4           | 1.23                           | 5          |
| O2      | 6.9            | 1.47                           | 7          |
| O3      | 3.9            | 1.62                           | 5          |
| O4      | 6.2            | 1.53                           | 5          |
| O5      | 4.6            | 1.57                           | 6          |

La Tabla IV contiene los datos obtenidos para la efusividad térmica efectiva,  $e_m$ , de las muestras de silicio poroso; en la última columna se ha incluido el error relativo promedio obtenido mediante

$$Error(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{A_T(f_i) - A_E(f_i)}{A_T(f_i)} \right|, \quad (14)$$

donde  $A_T(f_i)$  y  $A_E(f_i)$  representan la amplitud teórica y la amplitud experimental de la señal fotoacústica para la frecuencia de modulación  $f_i$  y  $N$  es el número total de datos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la efusividad térmica efectiva de las muestras porosas disminuye con respecto al correspondiente valor del silicio monocristalino ( $e = \kappa / \sqrt{\alpha} = 1.65 W\sqrt{s}/cm^2K$ ), además se observa que la efusividad de las muestras porosas disminuye a medida que aumenta el porcentaje de porosidad de éstas; estos resultados están de acuerdo con los valores reportados por Abdalla *et al.*, [33]. La disminución de la efusividad térmica de las muestras porosas se debe a las restricciones del camino libre medio de los fonones en la red porosa [34].

## 5. Conclusiones

La efusividad térmica efectiva de muestras de silicio poroso crecidas sobre sustratos de silicio tipo-*n* de diferente valor de resistividad en el intervalo 1-25  $\Omega cm$  se determinó mediante el ajuste de los datos experimentales de la amplitud de la señal fotoacústica en la región de frecuencias entre 100 Hz y 1 kHz, donde las muestras son térmicamente gruesas, haciendo uso de la solución de la ecuación de difusión de calor para la celda fotoacústica usada. Se obtuvo que los valores de efusividad térmica disminuyeron con respecto al correspondiente valor del silicio monocristalino. De esta manera, las muestras de silicio poroso pueden ser usadas como material para aislamiento térmico.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado parcialmente por COLCIENCIAS (Colombia), DINAIN-Universidad Nacional de Colombia (Colombia) y Proyecto Papiit 120809, UNAM; proyecto Conacyt 101332, México. Uno de los autores (A.G.) agradece el apoyo financiero de COLCIENCIAS (Colombia) (Programa Créditos Condonables para Doctorados Nacionales 2004) y Dirección Nacional de Investigación DINAIN-Universidad Nacional de Colombia (Colombia) (Contrapartida Programa Créditos Condonables para Doctorados Nacionales 2004) para realizar sus estudios doctorales.

1. V. Torres-Costa, F. Agulló-Rueda, R.J. Martín-Palma y J.M. Martínez-Duart, *Optical Materials* **27** (2005) 1084.
2. G. García Salgado, T. Díaz Becerril, H. Juárez Santiesteban y E. Rosendo Andrés, *Optical Materials* **29** (2006) 51.
3. S. McGinnis, P. Sines y B. Das, *Electrochem. Solid-State Lett.* **2** (1999) 468.
4. V. Lehmann, R. Stengl y A. Luigart, *Mater. Sci. Eng.* **B 69** (2000) 11.
5. G. Benedetto, L. Boarino y R. Spagnolo, *Appl. Phys.* **A 64** (1997) 155.
6. U. Bernini, P. Maddalena, E. Massera y A. Ramaglia, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **1** (1999) 210.
7. Ch. K. Sheng *et al.*, *Physica B* **403** (2008) 2634.
8. L. Chrobak y M. Maliński, *Solid State Commun.* **149** (2009) 1600.
9. C. Vázquez-López, A. Calderón, M.E. Rodríguez, R. Colas y S. Valtierra, *J. Mater. Res.* **15** (2000) 85.
10. M.E. Rodríguez, P.J. Mendoza, A. Mandelis y L. Nicolaidis, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **B 184** (2001) 421.

11. A.G. Bell, *American Journal of Science* **20** (1880) 305.
12. W.R. Harshbarger y M.B. Robbin, *Acc. Chem. Res.* **6** (1973) 329.
13. A. Rosencwaig, *Phys. Today* **28** (1975) 23.
14. A. Rosencwaig y A. Gersho, *Science* **190** (1975) 556.
15. O. Zelaya-Angel, J.J. Alvarado-Gil, R. Lozada-Morales, H. Vargas y A. Ferreira da Silva, *J. Appl. Phys.* **64** (1994) 291.
16. O. Delgado-Vasallo *et al.*, *Meas. Sci. Technol.* **11** (2000) 412.
17. O. Vigil-Galán *et al.*, *J. Mater. Sci.* **42** (2007) 7176.
18. T. Schmid, *Anal. Bioanal. Chem.* **384** (2006) 1071.
19. A.K. Rai, D. Mathur y J.P. Singh, *Inst. Sci. & Tech.* **29** (2001) 355.
20. F.L. Dumas, F.R. Marciano, L.V.F. Oliveira, P.R. Barja y D. Acosta-Avalos, *Med. Eng. & Phys.* **29** (2007) 980.
21. O.V. Sidorov, A.M. Shcetinín y S.V. Sidorov, *Fibre Chemistry* **31** (1999) 484.
22. M.E. Rodríguez-García *et al.*, *Rev.Sci. Inst.* **78** (2007) 034904.
23. A. Gutiérrez *et al.*, *Rev. Sci. Inst.* **81** (2010) 013901.
24. A. Rosencwaig y A. Gersho, *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 64.
25. A. Rosencwaig, *Photoacoustics and photoacoustic spectroscopy* (John Wiley and Sons, 1990). Chap. 9.
26. F.A. McDonald y G.C. Wetsel Jr., *J. Appl. Phys.* **49** (1978) 2313.
27. D.F. Edwards, *Handbook of Optical Constants of Solids* (editado por E.D. Palik Academic, New York 1998) p. 552.
28. D.R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics* 83rd Edition, (CRC Press 2003).
29. M.E. Rodríguez *et al.*, *J. Electrochem. Soc.* **147** (2000) 687.
30. M.V. Marquezini, N. Cella, A.M. Mansanares, H. Vargas y L.C.M. Miranda, *Meas. Sci. Technol.* **2** (1991) 396.
31. C.M. Bhandari y D.M. Rowe, *Thermal conduction in semiconductors* (John Wiley & Sons, New York, 1988) p.59.
32. Q. Shen, T. Takahashi y T. Toyoda, *Anal. Sci.* **17** (2001) S281.
33. S. Abdalla *et al.*, *Rev. Sci. Inst.* **74** (2003) 848.
34. V. Lehmann, *Electrochemistry of silicon: Instrumentation, science, materials and applications* (Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002) p.115.