

Caracterización Térmica de Capas Semicondutoras de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ en la Región de $0.5 \leq x \leq 0.87$

J. L. Pichardo, J. G. Mendoza-Alvarez

Depto. de Física, CINVESTAV-IPN, A.P. 14-740 México D.F. 07000, México.

A. Cruz-Orea

Programa Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas y Tecnología Avanzada, CINVESTAV-IPN, A.P. 14-740, México D.F. 07000, México

J. J. Alvarado-Gil

Depto de Física Aplicada, CINVESTAV-Merida, A.P.73 Cordemex, Mérida Yuc., México.

G. Torres-Delgado

Laboratorios de Investigación en Materiales, CINVESTAV-UAQ, C. Universitaria, C. de las Campanas, Querétaro, Qro., México

The thermal characterization of $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ alloys grown by liquid phase epitaxy on GaAs substrates, is performed by means of the open photoacoustic cell technique. We determine the thermal diffusivity and thermal conductivity by using a model based on the analogy between electrical and thermal resistances. The experimental results obtained using this model, are in good agreement with the ones reported in the literature. We continue our studies for other Al concentrations in the range $0.5 \leq x < 1$ for $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alloys.

PACS: 44.50.+f;44.30.+v;65.90.+i;66.10.Cb.

Introducción

Es bien conocido que en la industria microelectrónica y optoelectrónica, es de importancia conocer como se genera y transmite el calor en los dispositivos microelectronicos. Sabemos que la mayoría de estos dispositivos se encuentran formados por elementos semiconductores y elementos aislantes (óxidos) formando sistemas en multi-capas. Estos sistemas se crecen por diferentes técnicas como: LPE (Liquid Phase Epitaxy), MBE (Molecular Beam Electron) y otras. También es sabido que, conforme el numero de capas aumenta en un dispositivo, la resistencia térmica de la interface comienza a jugar un papel importante en el transporte de calor. Una gama de modelos teóricos y fenomenológicos han surgido en los últimos años, tratando de explicar la forma en que afecta la resistencia térmica de las interfaces, al transporte de calor a través del sistema. Este efecto se observa experimentalmente. Mansanares, et al [1], propusieron un modelo que surge de la analogía entre los fenómenos eléctricos y térmicos. Este modelo ha sido ampliamente aplicado para varios sistemas de dos capas considerándolos como resistencias térmicas en serie. Así, se ha conseguido determinar la difusividad térmica de una de las capas a partir del conocimiento de las propiedades térmicas de la otra capa y de la difusividad efectiva de todo el sistema. Otros intentos por tratar sistemas compuestos han surgido

entre ellos el de Bing-cheng Li y Shu-yi Zhang et al [2], quienes proponen un modelo teórico para sistemas multi-capas que estudia la resistencia térmica entre una capa de material dieléctrico y un sustrato de silicio con un numero finito de capas crecidas entre ellos. El modelo toma en consideración el efecto de la resistencia térmica de la interface entre las capas intermedias y considera la posibilidad de que la conductividad térmica sea anisotrópica en alguna de ellas. La pregunta central es porque el interés de estudiar el fenómeno de transporte de calor, y porque el interés en sistemas compuestos por elementos semiconductores. Existen varias razones, pero la mas importante es que si un dispositivo es capaz de disipar rápidamente el calor que ha generado, mayor será su tiempo de vida activa. El punto clave es, entonces, la conducción del calor ya que lo deseable es tener elementos que tengan una larga duración y una alta eficiencia en sus propiedades eléctricas y electrónicas. Así resulta de fundamental importancia, conocer como se genera y transporta el calor en dispositivos que, genéricamente, puedan caracterizarse como sistemas semiconductores con multi-capas. Existen varias técnicas de caracterización térmica, entre estas destacan las llamadas técnicas fototérmicas que tienen la ventaja de no ser destructivas y, dentro de estas, la técnica fotoacústica es una de las mas importantes por su versatilidad y gran cantidad de

aplicaciones en muy diversos materiales. Podemos obtener, a través de esta técnica y dependiendo del material estudiado, espectros de absorción óptica, análisis de perfil de profundidad y tiempos de relajación de procesos no radiativos entre otros. La técnica fotoacústica consiste en una celda herméticamente cerrada que contiene una cámara de aire dentro de la cual se coloca la muestra que se desea estudiar [3,4]. Luz modulada en forma mecánica incide directamente sobre la muestra; esta es absorbida y convertida en calor. Como resultado del calentamiento periódico, se crea una variación de presión en la cámara de la celda que oscila a la misma frecuencia de modulación de la luz; las variaciones de presión pueden ser detectadas por medio de un micrófono de alta sensibilidad que se acopla a la celda. En este trabajo, presentamos los resultados obtenidos de la caracterización térmica de capas semiconductoras de $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ crecidas por LPE (Liquid Phase Epitaxy), sobre substratos de GaAs orientados en la dirección (100) y dopados con Si ($n=2.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Con la finalidad de realizar el análisis térmico, y de acuerdo con el modelo que será descrito posteriormente las muestras fueron rebajadas a diferentes razones relativas de espesores por ataque químico y pulimento mecánico [5].

Procedimiento experimental

Un láser de argón de 100 mW (Omichrome 543-200 MA) de luz monocromática mecánicamente modulada por un interruptor (chopper, modelo SR-540 Stanford Research Systems) y se enfoca sobre la muestra de tal manera que el haz sea uniforme sobre la superficie de esta. La muestra previamente fue colocada sobre el micrófono de electroreto tal como se muestra en la Fig. (1). Un amplificador Lock-in (SR850 Stanford Research Systems) conectado a una computadora personal se uso en el análisis de la señal del micrófono. El amplificador Lock-in es capaz de discriminar la señal fotoacústica en amplitud y fase como función de la frecuencia de modulación.

Una vez obtenidos los datos experimentales de la amplitud como función de la frecuencia de modulación, llevamos a cabo el análisis de los datos con la finalidad de obtener los valores respectivos de difusividad térmica efectiva del sistema de dos capas $Al_{0.7}Ga_{0.3}As/GaAs$, en el rango de frecuencias donde la muestra es térmicamente gruesa, es decir cuando la longitud de difusión de las ondas térmicas generadas es menor que el espesor de la muestra y cuya expresión para la salida del voltaje del micrófono es [3]:

$$V = V_0 \exp(-a\tilde{\omega}l) \quad (1)$$

donde V_0 , es un parámetro que depende de las propiedades del micrófono y de la frecuencia de modulación, $a = \tilde{\omega}pl^2/a$, donde l es el espesor, $a = k/rc$, es la difusividad térmica, k la conductividad térmica y rc la capacidad calorífica por unidad de volumen de la muestra, respectivamente.

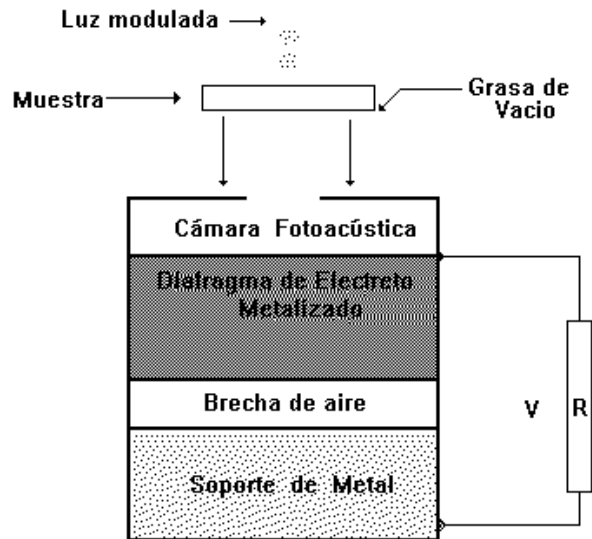


Fig. 1 Esquema de la celda fotoacústica abierta. Esta celda usa la cámara de aire del micrófono de electroreto como medio transductor.

Dada la naturaleza de las muestras (sistemas de dos capas $Al_{0.7}Ga_{0.3}As/GaAs$) hemos considerado hacer uso de la analogía entre sistemas térmicos y eléctricos. Considerando un sistema de resistencias térmicas en serie, obtenemos la siguiente expresión para la difusividad térmica efectiva, en función de los parámetros térmicos de cada una de las capas que constituyen el sistema [6,7]

$$a = (y^2/a_1 + (1-y)^2/a_2 + y(1-y)(1/a_1 + 1/a_2))^{-1} \quad (2)$$

donde $y = L_1/L$, $L = L_1 + L_2$ y $I = k_1/k_2$; k_i , a_i y L_i , para $i=1,2$, denotan la conductividad térmica, difusividad térmica y espesor de las capas de $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ y GaAs, respectivamente. La difusividad térmica efectiva, a , fue medida para una serie de muestras con diferentes razones relativas de espesor y contenido de aluminio de 70%. Para obtener un buen ajuste a los datos experimentales de la amplitud en función de la frecuencia de modulación, usamos la Ec.(1) y tomamos a como parámetro de ajuste. Los resultados que obtuvimos aparecen en la Tabla (1).

Una gráfica típica del ajuste para estas muestras se puede observar en la Fig. (2). En la Fig.(3), mostramos el mejor ajuste de los datos experimentales de la difusividad térmica

efectiva α , en función de la razón de espesores y usando la Ec. (2). De éste obtenemos los valores de α_1 y λ .

Tabla 1. Descripción de las muestras: Contenido de aluminio, espesor total, l , razón relativa de espesores entre la capa de $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ con respecto al espesor total y , difusividad térmica efectiva, α

Muestra	Al(%)	l (μm)	$y=l_1/(l_1+l_2)$	α (cm^2/s)
GaAs	0	275	0	0.250 ± 0.002
370A	70	292	0.126	0.1956 ± 0.014
370B	70	147	0.251	0.160 ± 0.003
370C	70	92	0.402	0.1574 ± 0.002

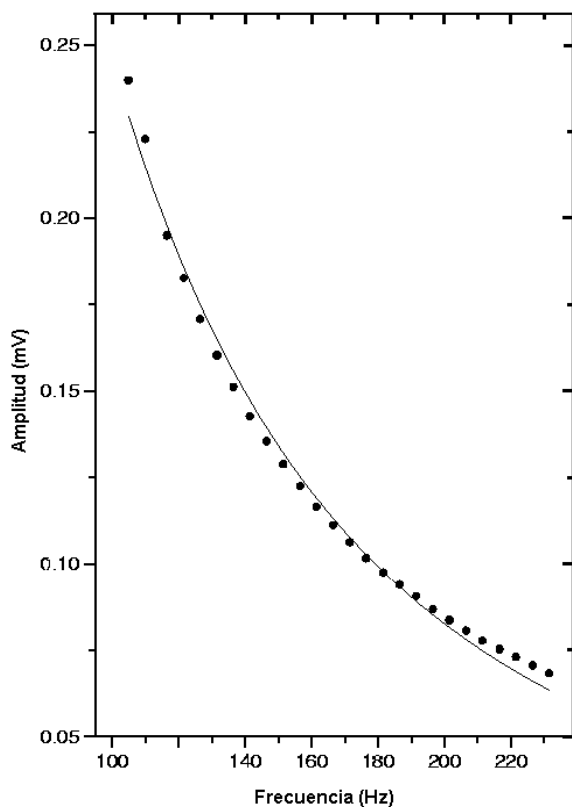


Fig. 2 Amplitud de la señal fotoacústica como función de la frecuencia de modulación para la muestra 370 A. La línea continua representa el mejor ajuste a la Ec. (1).

La conductividad térmica, k_1 , fue estimada a partir del parámetro λ , suponiendo conocida la conductividad, k_2 . El valor de la conductividad térmica, k_2 , corresponde a la capa de GaAs, y se obtuvo, en forma indirecta, a través de la relación $\alpha_2 = k_2/\rho_2c_2$, donde α_2 se obtiene usando la técnica

fotoacústica de celda abierta, siguiendo un procedimiento similar al usado para la obtención de la difusividad térmica efectiva en el régimen térmicamente grueso. La capacidad calorífica por unidad de volumen, ρ_2c_2 , se obtuvo usando otra técnica fototérmica, conocida como técnica de elevación de temperatura por iluminación continua [6]. Así, usando las dos técnicas mencionadas, obtuvimos los siguientes valores de los parámetros térmicos para una muestra de GaAs de $1cm \times 1cm$ y un espesor de $380 \mu m$: $\alpha_2 = 0.25 \pm 0.02 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\rho_2c_2 = 1.50 \pm 0.04 \text{ Jcm}^{-3}\text{K}^{-1}$ y $k_2 = 0.38 \pm 0.04 \text{ Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Finalmente, conociendo los parámetros térmicos del sustrato y los parámetros de ajuste obtenidos con el modelo de dos capas (Ec. (2)), pudimos determinar los valores de los parámetros térmicos de la capa de $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$: $\alpha_1 = 0.062 \pm 0.003 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $\lambda = 0.485 \pm 0.140$, $K_1 = 0.190 \pm 0.062 \text{ W/cmK}$ y $\rho_1c_1 = 3.037 \pm 0.811 \text{ J/cm}^3\text{K}$.

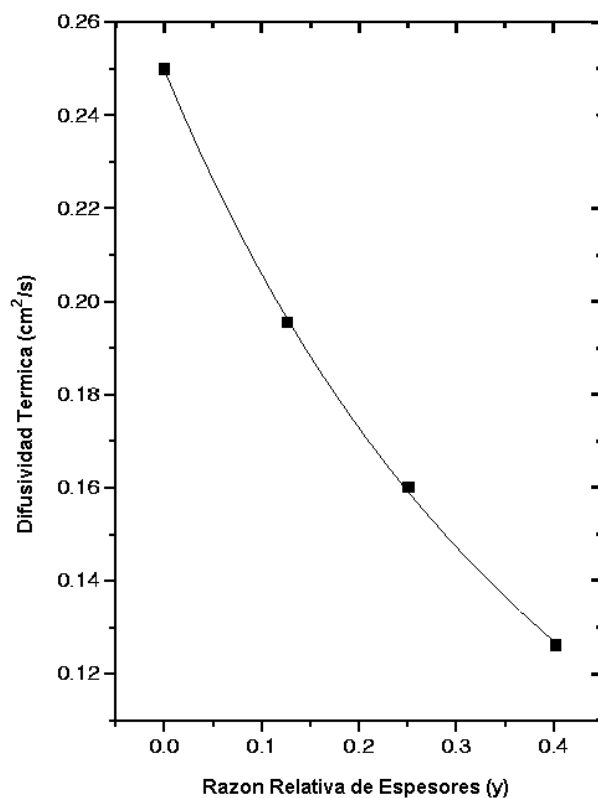


Fig. 3 Difusividad térmica efectiva como función de la razón relativa de espesores para la serie de muestras bicapas $Al_{0.7}Ga_{0.3}As/GaAs$. La línea continua representa el mejor ajuste a la Ec. (2).

Conclusiones

Hemos usado la técnica fotoacústica de celda abierta, para caracterizar térmicamente las bicapas semiconductoras, y así obtener su difusividad térmica efectiva. Además, con ayuda del modelo de dos capas resultante de la analogía entre fenómenos eléctricos y térmicos, fue posible obtener los valores de los parámetros térmicos de las capas semiconductoras de $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ sin haberlas retirado del sustrato donde fueron crecidas. Podemos decir que la técnica fotoacústica de celda abierta es sencilla y versátil en el estudio de sistemas de dos capas. Por otra parte los resultados obtenidos concuerdan satisfactoriamente con algunas interpolaciones de la resistividad térmica de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ hechas por S. Adachi [8]. Dado que los resultados obtenidos concuerdan satisfactoriamente con predicciones en la literatura para esta concentración de aluminio, hemos decidido continuar con la caracterización térmica de estas bicapas en otras concentraciones de aluminio para $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ en el intervalo $0.5 \leq x < 1$, donde algunos resultados previos en este rango confirman la efectividad del método, lo que nos permitirá la caracterización completa en este rango.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el CONACYT, México. Los autores quieren agradecer a Patricia Rodríguez, Marcela Guerrero y Ester Ayala por su asistencia técnica.

Referencias

- [1] A. M. Mansanares, H. Vargas, F. Galembeck, J. Bujis and D. Bicanic, *J. Appl. Phys.*, **70**, 7046 (1991).
- [2] Bin-cheng Li and Shu-yi Zhang. *J. Phys D:Appl. Phys.*, **30**, 1447 (1997).
- [3] Allan Rosencwaig and Allen Gersho. *J. Appl. Phys.*, **47**, 64 (1976).
- [4] M. V. Marquezini, N. Cella, A. M. Mansanares, H. Vargas and L. C. Miranda. *Means Scien. Technol.*, **2**, 396 (1991).
- [5] G. Torres Delgado, *J. Appl. Phys.*, **78**, 5090 (1995).
- [6] J. L. Pichardo, E. Marín, J. J. Alvarado-Gil, J. G. Mendoza-Alvarez, A. Cruz-Orea, I Delgadillo, G. Torres Delgado and H. Vargas., *Appl. Phys. A*, **65**, 69 (1997).
- [7] E. Marín, J. L. Pichardo, A. Cruz-Orea, P. Díaz, G. Torres Delgado, I. Delgadillo, J. J Alvarado-gil, J. G. Mendoza Alvarez and H. Vargas., *J. Phys D: Appl. Phys.*, **29**, 981 (1996).
- [8] Sadao Adachi. *J. Appl. Phys.*, **58**, R123 (1982).