

DETERMINACIÓN INTERFEROMÉTRICA DE COEFICIENTES DE EXPANSIÓN LINEAL PARA SÓLIDOS

THERMAL EXPANSION COEFFICIENT MEASUREMENTS OF SOLIDS BY INTERFEROMETRIC DEVICE

Martínez C. C.¹, Alvarez L.², Domínguez D.³, Alanís E.³

¹Facultad de Ciencias Naturales - ²Facultad de Ingeniería - ³Facultad de Ciencias Exactas
Consejo de Investigación - Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177- 4400- Salta - Argentina
e-mail: alvarezl@unsa.edu.ar

En este trabajo se presenta un método interferométrico sencillo, para la determinación del coeficiente de expansión lineal en sólidos. La muestra de prueba, en forma de barra cilíndrica, se coloca en el interior de una celda especialmente diseñada, que se conecta a un sistema de control de temperatura. En un extremo de la barra se adosa uno de los espejos de un interferómetro de Michelson, estando el otro extremo fijo, de manera que la dilatación de la barra se traduce en una variación del camino óptico que puede medirse en el interferómetro. Para ello, las variaciones de intensidad son registradas por medio de un tubo fotomultiplicador colocado en el centro del patrón de interferencia obtenido a la salida del interferómetro. Se determina la fase módulo 2π de la función intensidad, aplicando el método de la transformada de Fourier. La fase desenvuelta permite determinar la variación de camino óptico y de allí el coeficiente de expansión lineal del material.

Palabras Clave: interferómetro de Michelson, expansión térmica, micro-deformaciones

In this article a simple interferometric method for measuring linear expansion coefficients of solids in terms of the temperature is described. The cylindrical-shape test piece is placed inside a thermostatic box which is connected to a temperature control system. One of the mirrors of the Michelson interferometer is joined on one side of the rod while the other side is fixed, so that the dilatation in the rod is translated into optical path variations which can be determined by the interferometer. For this, the intensity fluctuations are detected by a photomultiplier tube placed on the interference pattern center obtained at the interferometer output. The corresponding phase modulo 2π is determined using the Fourier transform method. The optical path variation is calculated from the corresponding unwrapped phase and then the linear expansion coefficient of the material is determined.

Key Words: Michelson interferometer, thermal expansion, micro-deformations

I. INTRODUCCIÓN

El creciente avance de las ciencias de los materiales en las últimas décadas hace necesario el desarrollo de técnicas precisas para la determinación de propiedades que caracterizan a los distintos tipos de materiales. Ésto es de especial importancia en la industria donde se requiere establecer el comportamiento mecánico de componentes que eventualmente pueden estar sometidas a determinadas cargas térmicas.

En particular la determinación de coeficientes de expansión lineal juega un rol importante tanto en la etapa de selección del material como en la etapa de diseño de componentes. Algunos de los dispositivos experimentales convencionales utilizados en las mediciones de dilatación térmica requieren la utilización de muestras estándares o la puesta a cero de referencias⁽¹⁾.

Los métodos de medición basados en las propiedades de la luz láser, tal como las técnicas interferométricas, permiten la evaluación rápida y precisa de deformaciones⁽²⁾. Este tipo de técnicas se caracterizan principalmente por no requerir contacto directo con la muestra, presentar alta sensibilidad y precisión, y no requerir de un proceso de calibración. Por otra parte, estas

técnicas pueden aplicarse a diversos tipos de material y las muestras a ser analizadas no necesitan de alguna preparación especial o costosa.

En este trabajo se propone la implementación de un dispositivo interferométrico sencillo que permite la determinación de micro-deformaciones lineales. A partir de un sistema de control de temperatura es posible relacionar dichos cambios con la variación térmica correspondiente para la medición del coeficiente de expansión lineal del material analizado.

II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Un esquema del dispositivo experimental se muestra en la Figura 1. Se trata de un interferómetro de Michelson, que usa como fuente de iluminación un láser de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm). Este interferómetro tiene la particularidad de que uno de los espejos, en este caso E_2 , se adhiere a la muestra cuyo coeficiente de expansión lineal desea determinarse.

A la salida del láser se coloca una lente L_1 , de esta manera se tiene una fuente puntual, F. A través de una segunda lente, L_2 , se forma una imagen real de la fuente puntual, F_1 , sobre la superficie del espejo E_1 . Mediante el

divisor de haz, DH, se forma otra imagen, F_2 , esta vez por reflexión, en la superficie del espejo E_2 .

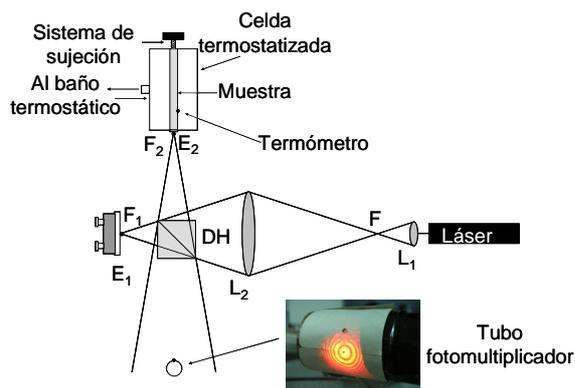


Figura 1: Dispositivo experimental. Interferómetro de Michelson: E_1 y E_2 , espejos; DH, divisor de haz; L_1 y L_2 , lentes convergentes.

Así se tienen dos fuentes puntuales coherentes, F_1 y F_2 , que generan un patrón de franjas de interferencia de simetría circular⁽³⁾. Si d_1 y d_2 son las distancias desde el divisor de haz a los espejos E_1 y E_2 , respectivamente, dichas fuentes puntuales se encontrarán alineadas una detrás de la otra en la dirección del eje principal y separadas por una distancia dada por $2d = 2(d_1 - d_2)$ ⁽⁴⁾.

Control de temperatura

El control de temperatura se realiza mediante una celda termostática construida a tales fines. Este sistema consiste en un recinto prismático como el que se muestra en la Figura 2, el cual por un lado presenta dos aberturas que se conectan a un sistema externo de bombeo. Esto permite la circulación de agua para el control de la temperatura en el interior de la celda.

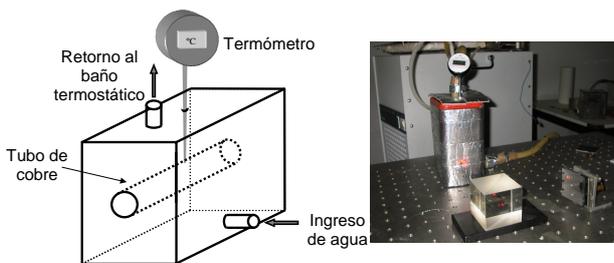


Figura 2: Celda termostática para el control de temperatura.

Por otro lado, el recinto también presenta un orificio de aproximadamente 1 cm de diámetro, por el cual se hace pasar un tubo que atraviesa la celda en forma longitudinal. Para dicho tubo se escoge un material de una alta conductividad térmica, en este caso cobre, y se cubre el interior del mismo con pasta siliconada térmica, de manera de garantizar una buena transferencia de energía a la muestra que se analiza colocada en su interior. Por la parte superior de la celda se introduce un termómetro a fin de evaluar las fluctuaciones producidas en el sistema.

En uno de los extremos de la muestra se adhiere el espejo E_2 , en tanto que el extremo opuesto se fija mediante un sistema de sujeción. La longitud inicial de la

muestra, L_0 , es aquella que queda determinada entre dicho sistema y el extremo en el cual se adosa E_2 . Si bien una pequeña porción de la muestra queda fuera de la celda termostática, la misma resulta despreciable frente a la longitud de la muestra dentro del sistema calefactor. Además, dicha porción se encuentra en contacto con el tubo de cobre por lo que se supone una temperatura uniforme en la longitud L_0 . Todo el sistema se aísla utilizando polietileno expandido de 20 mm de espesor a fin de minimizar las pérdidas de energía. En la Figura 3 se muestra un esquema de la vista lateral del sistema.

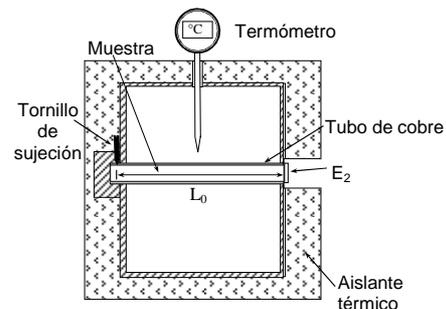


Figura 3: Vista lateral de la celda termostática.

Para las experiencias desarrolladas en este trabajo, se han utilizado muestras sólidas de acero, cobre, vidrio y acrílico de forma cilíndrica, de una longitud promedio L_0 de 110 mm. Sin embargo la forma de las muestras no es determinante en el método, siendo en único requerimiento que ellas presenten una cara plana en cuyo extremo se adhiere el espejo E_2 .

III. FUNDAMENTO

Al inicio de la experiencia el sistema se encuentra en equilibrio térmico a la temperatura ambiente. En estas condiciones el patrón de franjas de interferencia generado a la salida del interferómetro permanece estático. Luego se fija el sistema de control de temperatura para generar un determinado aumento ΔT en el interior de la celda. De esta manera se produce una variación en la longitud inicial de la muestra. Debido a esta expansión térmica el espejo E_2 se moverá hacia el divisor de haz a lo largo del eje principal, produciendo una disminución de la longitud de camino óptico. Un aumento de camino óptico se obtiene para una disminución de temperatura.

Cuando el espejo E_2 se desplaza, el orden central del patrón de franjas de interferencia cambia de brillante a oscuro en forma alternada cada vez que el camino óptico varía en media longitud de onda. Evaluando la variación de fase producida, lo que resulta equivalente al conteo de las franjas que van pasando en el centro del patrón, es posible determinar el desplazamiento correspondiente producido.

Teniendo en cuenta el fenómeno de expansión térmica, la variación del camino óptico puede expresarse como:

$$2d = 2\Delta L = 2 L_0 \alpha \Delta T = m \lambda \quad (1)$$

donde L_0 es la longitud inicial, α es el coeficiente de expansión lineal en la dirección axial de la muestra cilíndrica y ΔT es la variación de temperatura correspondiente. A partir de esta ecuación es posible determinar el coeficiente de expansión lineal para la

muestra sólida considerada, mediante del conteo de órdenes de interferencia.

IV. PROCESAMIENTO Y RESULTADOS

Para la determinación del número de órdenes de interferencia que se suceden en el centro del patrón, se registran las variaciones de intensidad producidas en el mismo mediante un tubo fotomultiplicador. Una forma de automatizar el conteo de los órdenes, sobretodo para el caso en el que este número es elevado, puede efectuarse mediante la determinación de la variación de fase de interferencia a través del procesamiento de la señal registrada, utilizando el método de la Transformada de Fourier unidimensional.

En la Figura 4 se muestra un fragmento de una señal típica registrada por el tubo fotomultiplicador y en la Figura 5 el resultado de su procesamiento para una de las experiencias realizadas.

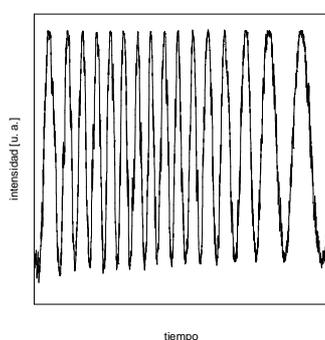


Figura 4: Fragmento de señal típica registrada por el tubo fotomultiplicador.

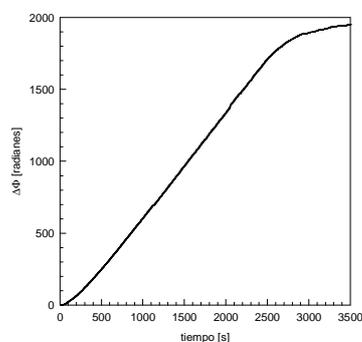


Figura 5: Curva de variación de fase.

Los resultados obtenidos para el coeficiente de expansión térmica de los materiales analizados se muestran en la Tabla 1, en la cual también se han incluido los valores conocidos del mencionado coeficiente.

TABLA 1: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Material	Rango de T (K)	α_{exp} ($\times 10^{-6} K^{-1}$)	α_{tabla} ($\times 10^{-6} K^{-1}$)
Acero	297,2 – 302,4	(14,5 ± 0,9)	11-15 ^(6,7,8)
Cobre	302,4 – 307,4	(17,2 ± 0,9)	16,5-18,5 ^(5,6,7,8)
Vidrio	307,3 – 312,3	(9,6 ± 0,6)	8,9-9 ^(6,7,8)
Acrílico	291 – 313,5	(53,1 ± 0,5)	-

Estimación de errores

Se estima que las mediciones de temperatura para ΔT de 5 K se encuentran afectadas por un error del 4 %. Por otra parte, otra fuente de error considerada corresponde a las fluctuaciones de la temperatura ambiente. Estos cambios están asociados a variaciones del índice de refracción del aire que generan cambios en la fase aleatorios. Se estima una variación de temperatura ambiente de 2 K, lo cual determina un error de aproximadamente 0,2 % en la estimación de la fase de interferencia.

La mayor contribución al error en la determinación del coeficiente de expansión proviene de la medición de la temperatura. La utilización de sensores térmicos más precisos garantizaría una mejor determinación del coeficiente de expansión a partir de la evaluación de ΔL para distintos ΔT mediante métodos de regresión.

V. CONCLUSIONES

El dispositivo propuesto presenta características que hacen fácil su implementación tanto por la sencillez del montaje como por el procesamiento de los datos. Así se han podido determinar los coeficientes de expansión lineal para una serie de muestras sólidas. Dentro de las principales ventajas que ofrece este dispositivo se pueden mencionar:

- i) Es aplicable a cualquier tipo de material sólido.
- ii) Los resultados muestran buena precisión.
- iii) Por su sencillez puede proponerse como experiencia demostrativa de interferometría óptica.
- iv) Permite analizar la variación del coeficiente de expansión lineal en función de la temperatura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo de Investigación y las Facultades de Ciencias Naturales, de Ingeniería y de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Salta.

Referencias

1. L. G. Turnbull. Journal of Scientific Instrument, series 2, Volume 2, pp 991-993, (1969)
2. Johannes Suska and Josef Tschirnich. Measurement and Science Technology 10, N55 – N59, (Feb. 1999)
3. Eugene Hecht. Optics. Addison Wesley, (1987)
4. Elvio Alanís, Graciela Romero, Carlos Martínez, Liliana Alvarez, Germán Salazar. Physic Teacher. 42, 223 - 225 (Ap. 2004)
5. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 79ed. CRC Press. (1998)
6. González, Carlos y Zeleny, Ramón. Metrología. Editorial McGRAW-HILL. México, (1997).
7. Robert Resnick, David Halladay, Kenneth Krane. Física Vol.1. Compañía Editorial Continental. (1997)
8. Francis Sears, Mark Zemansky, Hugh Young, Roger Freedman. Física Universitaria. Volumen 1. Pearson Educación. (2004)