

# Mediciones de Temperatura en Láminas de Vidrio utilizando Tomografía Óptica Coherente Sensible a la Fase.

## Temperature Measurements in Glass Sheets Using Phase-Sensitive Optical Coherence Tomography.

Presentación: 8-9/10/2024

Doctorando:

**Jose FOLGUEIRAS**

Grupo de Fotónica Aplicada, Centro de Ensayos Estructurales, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina  
jfolgueiras@frd.utn.edu.ar

Director:

**Jorge TORGA**

Codirector:

**Eneas MOREL**

### Resumen

En este trabajo se propone la medición de temperatura en una lámina de vidrio en forma indirecta a través de la medición de la diferencia de camino óptico (OPD) entre las dos caras de las láminas. Los valores de OPD se obtienen mediante la técnica de tomografía óptica coherente sensible a la fase (PhS-OCT). Se presenta el sistema experimental con una fuente de luz de gran ancho espectral de 180 nm, el sistema de detección y procesamiento de la señal de interferencia generado entre las reflexiones de ambas caras de la lámina. La fase de la transformada de Fourier de la señal de interferencia obtenida es utilizada para obtener la OPD. Se presentan resultados de OPD obtenidos a partir de barridos a lo largo de una lámina de vidrio a temperatura ambiente, con el objetivo de analizar la repetitividad de las mediciones y evaluar la factibilidad de establecer una línea de referencia de temperatura para mediciones en distintos puntos de la lámina. Se muestra también los primeros resultados en la calibración de la temperatura en función de OPD que dan una variación de OPD entre 16 y 17nm por grado centígrado. Los resultados experimentales se contrastan con los resultados obtenidos a partir de simulaciones computacionales realizadas con el método de Volúmenes Finitos.

Palabras clave: tomografía y topografía óptica, microscopía de fase, alta resolución.

### Abstract

In this work, we propose the indirect measurement of temperature in a glass sheet by measuring the optical path difference (OPD) between the two surfaces of the sheets. The OPD values are obtained using phase-sensitive optical coherence tomography (PhS-OCT). The experimental setup is presented, featuring a broad spectral width light source of 180 nm, along with the system for detecting and processing the interference signal generated between the reflections from both surfaces of the sheet. The phase of the Fourier transform of the obtained interference signal is used to determine the OPD. We present OPD results obtained from scans across a glass sheet at room temperature, aiming to analyze the repeatability of the measurements and assess the feasibility of establishing a temperature reference line for measurements at different points on the sheet.

Initial results in the calibration of temperature as a function of OPD are also shown, indicating an OPD variation between 16 and 17 nm per degree Celsius. The experimental results are compared with those obtained from computational simulations conducted using the Finite Volume Method.

Keywords: optical tomography and topography, phase microscopy, high resolution.

## Introducción

La tomografía óptica coherente en el dominio de Fourier (Drexler & Fujimoto, 2008), OCT-FD (por sus siglas en inglés), es una técnica óptica no destructiva utilizada para medir diferencias de camino óptico (OPD) y obtener topografías y tomografías de materiales. Utiliza una fuente de luz de ancho espectral grande (típicamente > 20nm) en una configuración interferométrica de tipo camino común donde la señal de referencia y la señal reflejada en la muestra viajan por una misma rama (figura1). La superposición de la luz reflejada en las distintas interfases genera una señal de interferencia que es detectada con un espectrómetro. Esta señal nos da información de la OPD entre interfaces. De esta forma es posible obtener imágenes 3D, de superficies, o del interior de un material con una resolución del orden del micrón y para rangos de distancias de varios milímetros.

En su forma convencional para obtener el valor de la OPD con OCT-FD, se utiliza el módulo de la transformada Fourier de la señal de interferencia. La idea central en este trabajo es utilizar también la información de la fase de la transformada empujando la técnica que se conoce como tomografía óptica coherente sensible a la fase (PhS-OCT) (Ding et al., 2013; Larin & Sampson, 2017; Taudt et al., 2020; Lan et al., 2017) con la que se puede llevar la resolución axial desde un valor típico en el orden de los micrones a valores del orden de los nanómetros. Los resultados presentados en este estudio muestran la posibilidad de utilizar esta técnica para medir los efectos térmicos en el espesor de láminas de vidrio revelando una tendencia lineal en la variación de la OPD con cambios de temperatura.

## Desarrollo

Para el caso en que la OPD a medir sea  $\Delta z$  y que el perfil de intensidades  $S(k)$  del láser en función de  $k$  (vector de onda) es gaussiano y está centrado en  $k_0$ , la señal de interferencia queda entonces como en la ecuación (1).

$$I(k) = S(k) [A_0 + A_1 \cdot 2 \cdot \cos(k \cdot 2\Delta z)] \quad (1)$$

Donde  $A_1$  y  $A_0$  dependen de las reflectividades en las interfaces de la muestra y de la referencia,  $\Delta z$  la distancia entre las posiciones de los reflectores de referencia y muestra. Transformando Fourier la expresión en (1), se obtiene la expresión (2) donde  $z$  es la variable conjugada de  $k$  y  $Dk$  es el ancho del espectro Gaussiano de la fuente de luz.

$$I(z) = \sqrt{\frac{\Delta k}{2\pi}} \left\{ A_0 e^{ik_0 z} e^{-\frac{z^2 \Delta k^2}{2\Delta k^2}} + A_1 \cdot \left[ e^{ik_0(z-2\Delta z)} e^{-\frac{(z-2\Delta z)^2 \Delta k^2}{2}} + e^{ik_0(z+2\Delta z)} e^{-\frac{(z+2\Delta z)^2 \Delta k^2}{2}} \right] \right\} \quad (2)$$

### Expresión para la fase

A partir de la ecuación (2) se puede obtener una expresión para la fase de la transformada (j), que se muestra en la ecuación (3) donde se cumple  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  y donde se expresa la diferencia de camino óptico entre las superficies de la muestra y la ventana de referencia como  $OPD = 2\Delta z$ .

$$\varphi = \left[ \frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \right] \cdot (z - \text{OPD}) \quad (3)$$

A partir de este resultado y dado que se observó y analizó que el comportamiento sigue siendo lineal para la fase de la transformada aún para mediciones con una fuente láser cuyo espectro no es gaussiano, consideramos válida la expresión (3) para casos más generales en la forma del espectro.

#### Esquema experimental

El esquema experimental utilizado (ver figura 1) se basa en los interferómetros de camino común, una herramienta adecuada para usar esta técnica porque ofrecen una mayor estabilidad de fase que los esquemas convencionales de dos ramas, debido al bajo umbral de ruido resultante por tener la referencia y la muestra en el mismo camino óptico y solidario.

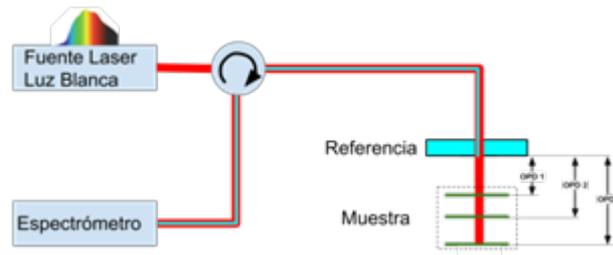


Figura 1: Interferómetro de rama común para mediciones topográficas.

#### Modelado de la Temperatura de la Placa de Vidrio

Si consideramos una placa de vidrio ( $\rho$ ,  $c$ ) de grosor  $w$ , área superficial  $A$  y a una temperatura  $T > T_{amb}$ . El calor se pierde hacia el ambiente a través de las superficies superior e inferior de la placa por radiación y convección libre.

$$\left. \begin{aligned} J_{rad} &= \epsilon \sigma A (T^4 - T_{amb}^4) \\ J_{conv} &= h A (T - T_{amb}) \\ dQ &= \rho A w c dT \end{aligned} \right\} \frac{dQ}{dt} = -2J_{conv} - 2J_{rad} \quad (4)$$

Tiempo característico de convección:

$$T_{conv} = w \rho c / 2h$$

Relación radiación/convección:

$$\beta = \epsilon \sigma \frac{T_{amb}^3}{h}$$

$$\frac{dt}{t_{conv}} = - \frac{d\tau}{(\tau - 1) + \beta (\tau^4 - 1)} \quad (5)$$

## Resultados

#### Repetitividad

En una serie de barridos en medición de perfiles, donde se repitieron las posiciones sobre la muestra, se lograron coincidencias en el orden de los 10 nanómetros.

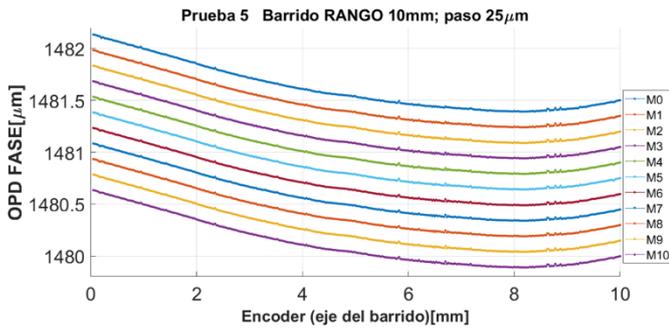


Figura 2: Se muestran las OPD entre las dos interfaces de una lámina de vidrio, 11 barridos independientes repetidos sobre la misma trayectoria en la superficie de la muestra. Para poder visualizar todos los barridos a la vez sin que se superpongan, se agregó un offset a cada curva.

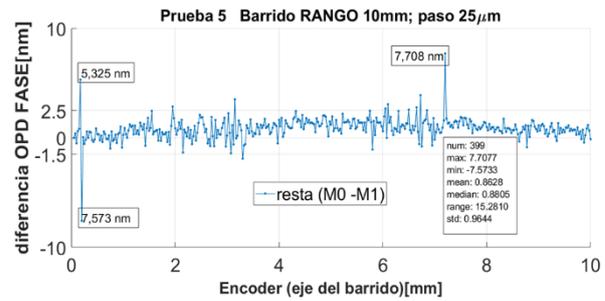


Figura 3: Se muestra a modo de ejemplo la diferencia entre dos barridos independientes de el mismo perfil de la muestra. En particular, con las mediciones M0 y M1, de la figura 2.

### Medición de efectos termicos

Se realizaron medidas en un punto fijo sobre un portaobjeto durante su enfriamiento desde  $T_{in}$  hasta  $T_{fin}$ . Se midió la diferencia de camino óptico entre ambas caras del portaobjeto en función del tiempo.

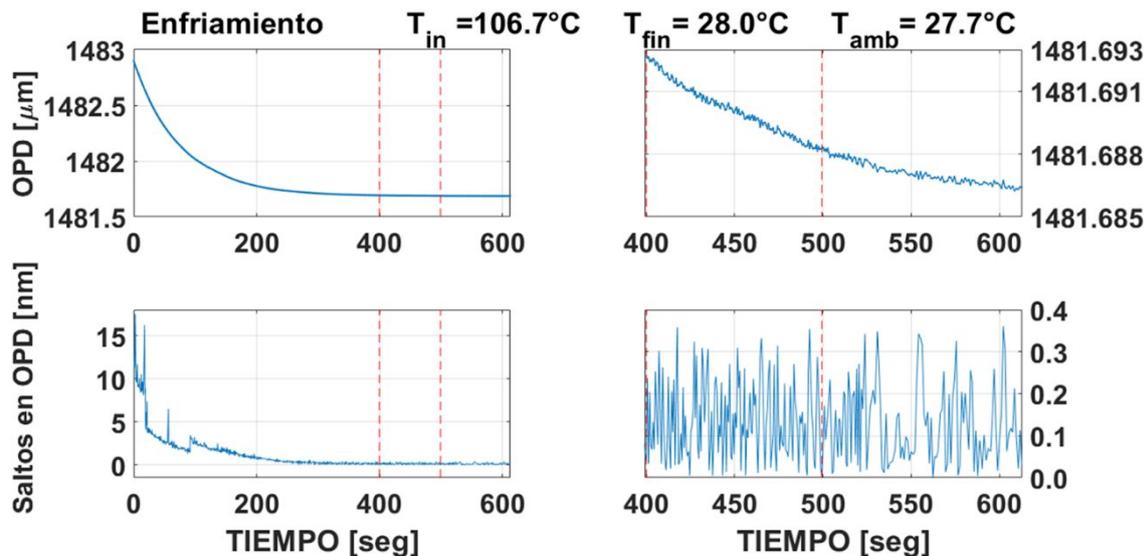


Figura 4: Se muestran medidas de la OPD entre las dos interfaces de un punto fijo de una lámina a lo largo del tiempo mientras su temperatura desciende de  $106.7^{\circ}C$  a  $28^{\circ}C$ . (arriba izq) Se muestra la reconstrucción de OPD con el método de PhS-OCT todo el rango de mediciones completo. (abajo izq) Se muestra la variación de OPD medida respecto del espectro inmediatamente anterior. Del lado derecho se hace un acercamiento en la zona con menor variación de OPD, para poder apreciar la estabilidad de las medidas.

### Validación del Modelo: Concordancia Experimental y Computacional

Para el montaje experimental, la temperatura inicial está entre 5 y 20 Kelvin por encima de la temperatura ambiente. Por lo tanto, la temperatura adimensional es como máximo 1.068, y luego disminuye con el tiempo hasta alcanzar 1. Así que podemos usar que  $(\tau - 1) \ll 1$  y expandir:

$$(\tau^4 - 1) = 4(\tau - 1) + 6(\tau - 1)^2 + \dots \quad (6)$$

En el caso de 20 grados por encima de la temperatura ambiente, el segundo término es 10 veces menor que el primero. Por lo tanto, mantendremos solo el término de primer orden:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dt}{t_{\text{conv}}} &\approx -\frac{d\tau}{(1+4\beta)(\tau-1)} \\ \frac{t-t_0}{t_{\text{conv}}} &= -\frac{1}{1+4\beta} \log \frac{\tau-1}{\tau_0-1} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{Esta relación puede invertirse obteniendo} \\ &T(t) = T_{\text{amb}} + (T_0 - T_{\text{amb}}) \exp \left[ -\frac{(1+4\beta)}{t_{\text{conv}}} (t - t_0) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

A continuación, se compara la expresión computacional obtenida para la evolución de la temperatura según el tiempo (ecuación 7) y las mediciones experimentales de la variación de la OPD en función del tiempo. Este contraste visual permite evaluar la precisión del modelo en la reproducción de los datos experimentales, destacando la concordancia entre ambos.

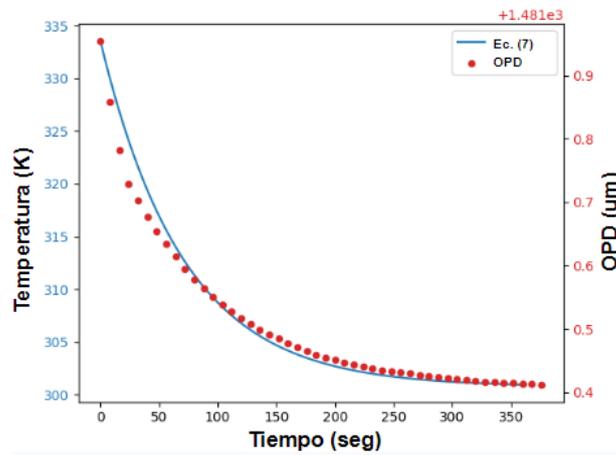


Figura 5: Comparación entre la predicción modelada y las mediciones experimentales de OPD en función del tiempo. La curva celeste representa la predicción de la temperatura obtenida mediante el modelo, mientras que los puntos rojos corresponden a las mediciones experimentales de OPD. La coincidencia entre ambos conjuntos de datos resalta la validez del modelo computacional para describir la evolución térmica del grosor de una lámina de vidrio.

#### Tendencia lineal en variación de la OPD con variación de la temperatura

Las variaciones en la diferencia de camino óptico (OPD) medidas entre las caras de una lámina, en relación con los cambios de temperatura correspondientes, muestran tendencia lineal, con una tasa de cambio entre 16 y 17 nm de OPD por grado Celsius.

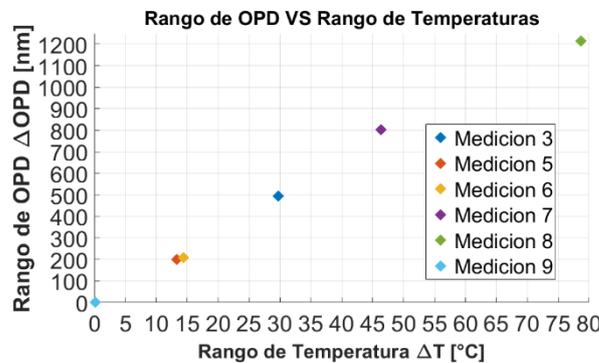


Figura 6: Se presentan 9 mediciones realizadas durante ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento de una lámina. Cada punto ilustra el rango de variación de la OPD en función del rango de temperatura correspondiente, revelando una relación lineal clara con una pendiente entre 16 y 17 nm de OPD por grado Celsius.

## Conclusiones

La repetitividad en las mediciones de OPD mostró una coincidencia en el orden de los 10 nanómetros, indicando una alta estabilidad y fiabilidad en el montaje experimental. Las medidas de OPD en un punto fijo durante el enfriamiento de una lámina confirmaron una variación clara en función del tiempo, revelando la efectividad del método PhS-OCT en la monitorización de cambios térmicos.

La validación del modelo mostró concordancia entre las predicciones computacionales y las mediciones experimentales, destacando la capacidad del modelo para describir con precisión la evolución térmica de una lámina de vidrio. La tendencia lineal observada en la OPD con respecto a las variaciones de temperatura, con una tasa de cambio de entre 16 y 17 nm de OPD por grado Celsius, sugiere una relación directa y predecible entre estos parámetros.

Los resultados destacan la eficacia de la técnica FD-OCT para medir diferencias de camino óptico con alta precisión y cómo el modelo computacional puede predecir con exactitud el comportamiento térmico del sistema. La validación del modelo refuerza la confianza en su aplicación para estudios similares, mientras que la tendencia lineal observada en la OPD proporciona una base sólida para futuros análisis relacionados con medición de temperatura. Los hallazgos sugieren que la técnica de PhS-OCT y el modelo computacional son herramientas valiosas para la caracterización precisa de materiales y el estudio de sus respuestas térmicas.

Aunque los resultados son prometedores, se reconoce que la validación adicional es necesaria para confirmar la linealidad observada en las variaciones de OPD con cambios de temperatura. Las futuras investigaciones deberían centrarse en la realización de más mediciones para confirmar esta tendencia y explorar otras posibles influencias en la OPD.

Este trabajo demuestra el potencial de la técnica de PhS-OCT y el modelado computacional para abordar cuestiones complejas en la medición de diferencias de camino óptico y su variación con la temperatura. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para aplicaciones futuras y abren nuevas vías para la investigación en este campo.

## Referencias

- Drexler, W., & Fujimoto, J. G. (2008, December 10). *Optical Coherence Tomography: Technology and Applications (Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering)* (2008th ed.). Springer.
- Ding, Z., Shen, Y., Chen, Z., Zhao, C., & Ni, Y. (2013, October 21). High-sensitive and broad-dynamic-range quantitative phase imaging with spectral domain phase microscopy. *Optics Express*, 21(22), 25734. <https://doi.org/10.1364/oe.21.025734>
- Larin, K. V., & Sampson, D. D. (2017, January 27). Optical coherence elastography – OCT at work in tissue biomechanics [Invited]. *Biomedical Optics Express*, 8(2), 1172. <https://doi.org/10.1364/boe.8.001172>
- Taudt, C., Nelsen, B., Baselt, T., Koch, E., & Hartmann, P. (2020a, May 26). High-dynamic-range areal profilometry using an imaging, dispersion-encoded low-coherence interferometer. *Optics Express*, 28(12), 17320. <https://doi.org/10.1364/oe.389839>
- Lan, G., Singh, M., Larin, K. V., & Twa, M. D. (2017, October 26). Common-path phase-sensitive optical coherence tomography provides enhanced phase stability and detection sensitivity for dynamic elastography. *Biomedical Optics Express*, 8(11), 5253. <https://doi.org/10.1364/boe.8.005253>
- Zhang, J., Rao, B., Yu, L., & Chen, Z. (2009, October 30). High-dynamic-range quantitative phase imaging with spectral domain phase microscopy. *Optics Letters*, 34(21), 3442. <https://doi.org/10.1364/ol.34.003442>