



DESARROLLO DE UN EQUIPO BASADO EN UN INTERFERÓMETRO DE BAJA COHERENCIA PARA MEDICIÓN DE TOPOGRAFÍA Y TOMOGRAFÍA DE MATERIALES

Marcelo Sallese ^a, Pablo Tabla ^a, Santiago Cerrota ^a, Eneas Morel ^a, Jorge Torga ^a

^a Laboratorio de Optoelectrónica y Metrología Aplicada, San Martín 1171, Campana, 2804, Buenos Aires, Argentina

Este trabajo presenta los resultados de un proyecto del desarrollo de un equipo para realizar topografías y tomografías de materiales basado en una técnica óptica aplicado como ensayo no destructivo para la caracterización de superficies y determinación de volúmenes en el interior de materiales transparentes o semitransparentes. La técnica permite obtener imágenes 3D de alta resolución espacial, es apta para mediciones “in situ” y monitoreo en línea. Se muestran los avances en el diseño y construcción de un equipo a escala piloto basado en la técnica denominada tomografía óptica coherente en el dominio de la frecuencia. El equipo está constituido por un interferómetro en fibra óptica, un cabezal óptico, un sistema porta-muestra y un sistema de detección basado en un espectrómetro. El desarrollo de este equipo es un proyecto multidisciplinario y ha sido encarado tomando como prioridad el hecho de que varios de los elementos del sistema sean diseñados y construidos por investigadores de los laboratorios participantes. Se busca como objetivo principal que la tarea inicial de investigación se complemente con el posterior desarrollo tecnológico para obtener como resultado final un equipo que pueda ser utilizado por otros usuarios.

Se describe la configuración desarrollada que incluye un novedoso dispositivo para alojar la muestra y realizar barridos controlados, el sistema de detección que utiliza sensores comerciales y también de diseño propio. Se muestran resultados obtenidos en la obtención de imágenes en distintos materiales.

Palabras clave: ensayo no destructivo; caracterización de materiales; interferometría

1. Introducción

Las técnicas de interferometría óptica de baja coherencia han tenido en los últimos años un gran auge debido a que ofrecen la posibilidad de medir distancias, sin contacto y con alta resolución ⁽¹⁾. La tomografía óptica coherente (OCT) se ha desarrollado fundamentalmente en aplicaciones relacionadas con la medicina ^[2] pero en los últimos años ha tenido un gran impulso en el área de los ensayos no destructivos y estudios de materiales ^(3,4). Esta técnica es utilizada normalmente en tres modalidades, en el dominio del tiempo (OCT-TD), en el dominio de la frecuencia (OCT-FD) y utilizando fuentes de barrido (OCT-SSD) ⁽⁵⁾.

Existen diferentes esquemas experimentales para la aplicación de OCT pero la idea básica en todos los casos es similar y utiliza la interferencia de dos haces de luz (uno proveniente de la muestra y otro de una superficie de referencia) para obtener la topografía o la tomografía deseada. Analizando el patrón de interferencia obtenido

debido a la diferencia de camino óptico, es posible obtener imágenes punto a punto haciendo un barrido sobre la muestra. Con la luz reflejada en la superficie se obtiene una topografía y si la luz proviene de reflexiones en interfaces internas se obtiene una tomografía (solo para el caso de materiales transparentes o semitransparentes).

En este trabajo se muestra el desarrollo de un equipo basado en esta técnica orientado a la caracterización de superficies y recubrimientos. Si bien existen sistemas comerciales que ofrecen prestaciones similares ⁽⁶⁾, estos equipos son en general microscopios que requieren muestras de tamaño limitado, condiciones especiales (aislación en vibraciones, condiciones ambientales, etc.). En este caso el diseño está orientado hacia aplicaciones donde el objetivo es obtener mediciones in situ y en tiempo real, para aplicaciones en control de calidad o monitoreo de procesos. En este tipo de aplicaciones es utilizada predominantemente la configuración denominada tomografía óptica en el dominio de la frecuencia, que permite diseños experimentales compactos y robustos; que además pueden resolverse en sistemas integrados con fibra óptica y sin partes móviles. En una configuración típica como la utilizada en este trabajo, se tiene una resolución espacial cercana al micrón y un rango máximo en la medición de distancias cercano a los 3 mm.

En este trabajo se presenta una nueva configuración experimental en donde ambas señales (referencia y muestra) viajan por una misma rama, mejorando la obtención de topografías y tomografías de la pieza en inspección.

2. Procedimiento experimental

En el sistema experimental utilizado (ver figura 1) el haz de luz se enfoca sobre cada punto de la muestra, es decir las imágenes se obtienen haciendo un barrido y midiendo punto a punto sobre la superficie de interés.

Para la obtención de una topografía o una tomografía se crea una imagen a partir de la medición de las coordenadas espaciales de cada punto medido. Estas coordenadas surgen de la siguiente secuencia. Mediante un sistema de posicionamiento controlado en dos ejes (en el plano horizontal, perpendicular al haz de luz), se mide el desplazamiento y se obtiene las coordenadas x e y (figura 1-a). La distancia en el eje z , se obtiene analizando la señal de interferencia obtenida con la técnica OCT. Con el conjunto de puntos se obtiene una imagen 3D de la zona deseada. El sistema interferométrico utilizado comúnmente es el de una configuración tipo Michelson.

La fuente de luz proviene de un láser de luz blanca supercontinuo (NKT) con salida en fibra, que se conecta a un circulador. Aquí la luz se dirige al “housing” (el sistema que aloja la muestra y donde se encuentra la superficie de referencia). La luz reflejada tanto en la muestra como en la referencia se recombinan generando la señal de interferencia que se obtiene en la salida del circulador y que es detectada por un espectrómetro con un rango espectral entre 740 y 920 nm (OceanOptics HR-4000).

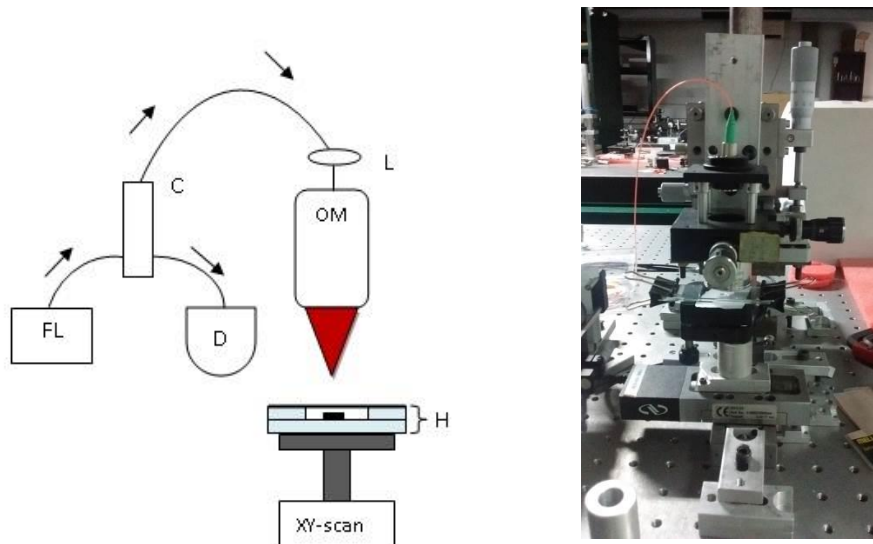


Fig.1. a) Esquema experimental del sistema utilizado basado un interferómetro de Michelson de una sola rama. FL: fuente de luz, D: Detector (espectrómetro), C: Circulador, L: lente de colimación, OM: Objetivo Microscópico, M: muestra. b) Imagen del set-up experimental armado en nuestro laboratorio.

2.3 OCT en el dominio de las frecuencias

En este trabajo se utilizó la técnica de OCT en el dominio de las frecuencias (OCT-FD)⁽⁷⁾. En esta técnica para cada punto medido la resolución y el máximo rango de profundidad varían según la configuración experimental y dependen principalmente del ancho espectral de la fuente de luz y las características del detector que en esta configuración es un espectrómetro⁽⁸⁾. Con nuestro esquema experimental la resolución espacial axial y lateral están en el orden del micrón, mientras que el rango de profundidad (máxima distancia que es posible medir en el eje z), es de 2 mm.

La técnica que utilizamos se basa en un interferómetro de Michelson de una sola rama donde se coloca la muestra a analizar en un alojamiento que también incorpora una superficie plana como referencia (ventana), tal como se indica en la **figura 2a**.

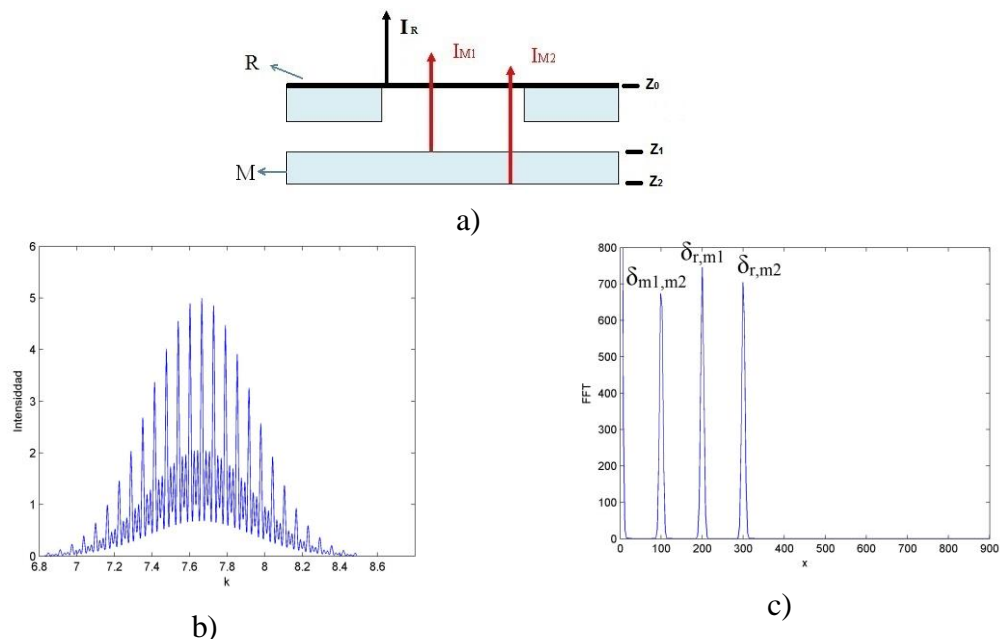


Fig.2.a) Esquema de la configuración del porta-muestra que contiene también a la muestra (M) y la ventana con referencia (R). Con este dispositivo es posible medir muestras sólidas y líquidas. I: Intensidades de luz reflejadas en las distintas interfaces. b) Espectro obtenido con el espectrómetro. c) Transformada de Fourier de una señal típica a partir de una señal de interferencia adquirida.

En esta configuración de la muestra, al realizar el barrido lateral (en el plano x-y), las distintas interfaces de la muestra son solidarias con la superficie de referencia, evitando errores generados por vibraciones y desplazamientos espurios.

El patrón de interferencia es detectado utilizando un espectrómetro y posteriormente se hace un análisis de Fourier de la señal de interferencia para obtener la distancia de cada punto. A partir de este análisis se puede reconstruir un perfil de las interfaces superficiales e internas de la muestra y generar imágenes tanto de la topografía de la superficie como de la tomografía del interior del material.

A modo de ejemplo se presenta la expresión de la señal de interferencia obtenida al superponer las reflexiones provenientes de la muestra y de referencia suponiendo el caso de la figura 2a. En esta situación la señal de interferencia es la superposición de un haz de referencia (I_r), el haz reflejado en la cara superior de la muestra (I_{m1}) y en la cara inferior (I_{m2}), con lo que resulta la siguiente expresión:

$$I_t = I_r + I_{m1} + I_{m2} + \sqrt{I_r I_{m1}} \cos(\delta_{r,m1}) + \sqrt{I_r I_{m2}} \cos(\delta_{r,m2}) + \sqrt{I_{m1} I_{m2}} \cos(\delta_{m1,m2}) \quad (1)$$

Donde I_r y I_m son las intensidades indicadas anteriormente y las fases $\delta_{r,m1}$ y $\delta_{r,m2}$ corresponde a la diferencia de camino óptico entre la referencia y cada una de las interfaces de la muestra, mientras que $\delta_{m1,m2}$ corresponde a la diferencia de camino óptico entre las interfaces de la muestra, o sea, su espesor multiplicado por el índice de refracción de grupo ($Z_0 \cdot n_0$, $Z_1 \cdot n_1$ y $Z_2 \cdot n_2$).

A partir del análisis de Fourier de la expresión del espectro de frecuencias (1) (fig.2b), se obtienen picos centrados en cada uno de los valores de la diferencia de camino óptico correspondiente (fig.2c) y por consiguiente es posible obtener las distancias de interés en cada caso, suponiendo conocido el índice de refracción, o a la inversa obtener información del índice conocida la distancia entre interfases.

Haciendo un barrido en el plano x-y es posible obtener las imágenes 3D descritas anteriormente. Para este barrido se utiliza un sistema combinado de dos posicionadores de translación lineal controlados por motores paso a paso. Ambos dispuestos en forma perpendicular, cada uno con un rango de 2.5 mm y una resolución de 2 μ m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Medición de una indentación en vidrio

A modo de ejemplo se muestra algunos resultados típicos que pueden ser obtenidos con el sistema experimental descrito anteriormente. En el primer caso se midió la indentación realizada en un ensayo de dureza sobre vidrio BK7. En este caso se busca obtener la topografía de la indentación tratando de identificar microfisuras en los bordes de cráter.

En la **figura 3-a** se representa imágenes de la muestra el sustrato medido y las topografías resultantes obtenidas.

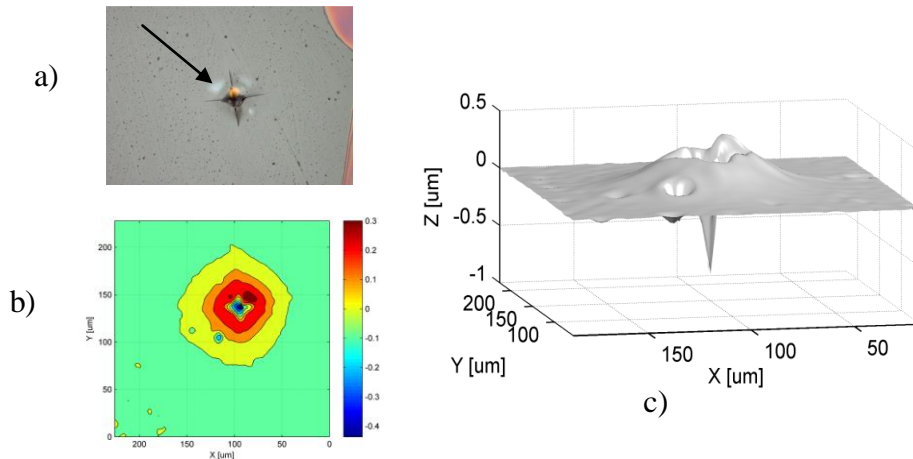


Figura 3 a) Vista de la zona a medir tomada con un microscopio (20X). b) Medida de la indentación con nuestro sistema interferométrico. c) Representación de curvas de nivel correspondiente a la medida realizada.

3.2 Medición de electrónica en silicio

Aquí se muestra una topografía obtenida de una superficie metálica con forma escalonada. Se puede ver claramente que el sistema permite obtener imágenes que reconstruyen la topografía en regiones donde la muestra presenta flancos abruptos. En este caso el área medida es de 2mm x 5mm obtenida en pasos de 20 μm . (**figura 4**)

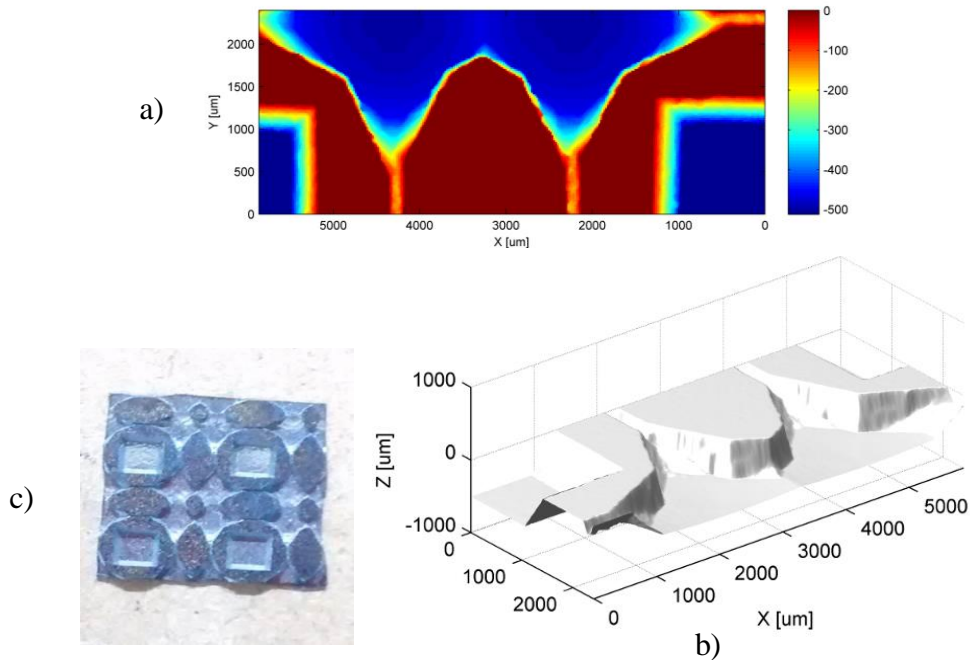


Figura 4. Topografía de una superficie metálica. a) vista superior (parcial) de la imagen obtenida con el sistema de interferometría de baja coherencia y b) detalle de la topografía a partir de la imagen obtenida c) fotografía de la muestra.

3. Conclusiones

Se ha presentado un esquema de interferometría de baja coherencia de una sola rama para la determinación de topografía de superficies y tomografía en distintos materiales. De los resultados obtenidos se muestra que esta configuración tiene varias ventajas sobre el esquema tradicional (dos ramas). En primer lugar permite disminuir ruidos y errores debidos al sistema de translación y a inestabilidades en las fibras del interferómetro. Por otro lado se destaca que el sistema puede ser aplicado en una variedad de materiales y permite medir tanto en sistemas de laboratorio como en sistemas industriales. Puede ser adaptado a una forma compacta, estable y económica por lo que creemos es una buena opción como sistema de medición de superficies, rugosidades, control de calidad y evaluación de materiales en diversos ámbitos industriales. Se destaca que el desarrollo de este equipo tiene como uno de sus objetivos el hecho de que varios de los elementos del sistema sean diseñados y construidos por investigadores de los laboratorios participantes buscando que la tarea inicial de investigación se complemente con el posterior desarrollo tecnológico para obtener como resultado final un equipo industrial o de laboratorio que pueda ser utilizado por otros usuarios.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a la financiación obtenida en los siguientes proyectos PIP- CONICET 2012 – N° 112-201-101-01031, PID- UTN MAUTIDE0002221TC y PDTS N° 77 CINN-CONICET.

E.N. Morel y J. R. Torga son investigadores del CONICET.

Referencias

1. W. DREXLER, J. G. FUJIMOTO, "Optical Coherence Tomography", Cap. 2, 2008, Ed. Springer. R.M. German, "Sintering, Theory and Practice"; 1996, John Wiley and Sons, Inc. (libro)
2. D. HUANG, E. A. SWANSON, C. P. LIN, J. S. SCHUMAN, W. G. STINSON, W. CHANG, M. R. HEE, T. FLOTTE, K. GREGORY, C. A. PULIAFITO, AND J. G. FUJIMOTO, *Science* 254, 1178 (1991).
3. ENEAS MOREL, MARINA GUTIERREZ, HERNÁN MIRANDA, EDGARDO SAMBRANO, AND JORGE TORGA, "Optical coherence tomography-based scanning system for shape determination, wall thickness mapping, and inner inspection of glass containers," *Appl. Opt.* 52, 1793-1798 (2013).
4. *Optical Measurement of Surface Topography*, R. Leach, Springer, (2011) ISBN 978-3-642-12012-1.
5. D. STIFTER, K. WIESAUER, M. WURM, E. LEISS, M. PIRCHER, E. GÖTZINGER, B. BAUMANN, AND C. HITZENBERGER, "Advanced optical coherence tomography techniques: novel and fast imaging tools for nondestructive testing," *World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China, (2008).
6. www.bruker.com/es-www.zygo.com-www.met/profilers/profile.
www.optimet.com/our_technology.php.
7. A. VAKHTIN, D. KANE, W. WOOD, AND K. PETERSON, "Common-Path Interferometer for Frequency-Domain Optical Coherence Tomography," *Appl. Opt.* 42, 6953-6958 (2003).
8. V. JAYARAMAN, J. JIANG, H. LI, P. HEIM, G. COLE, B. POTSAID, J. FUJIMOTO, AND A. CABLE, "OCT Imaging up to 760 kHz Axial Scan Rate Using Single-Mode 1310

nm MEMs-Tunable VCSELs with 100 nm Tuning Range," CLEO 2011 - Laser Applications to Photonic Applications, paper PDPB2 (2011).