

SISTEMA ÓPTICO HETERODINO PARA LA MEDICIÓN DE PEQUEÑAS RUGOSIDADES DE OBJETOS REFLECTORES Y PARA LA MEDICIÓN DE OBJETOS DE FASE

Rosario Baltazar, Cristina Solano, Geminiano Martínez-Ponce, Alma A. Camacho
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C
Laboratorio de Holografía
Loma del Bosque #115, Lomas del Campestre
León, Gto. CP.37150
Tel. (477) 7 73 1017, fax (477) 7 14 5000
Correo electrónico: charobal@foton.cio.mx

Resumen: El presente trabajo muestra dos sistemas ópticos basados en el principio de la heterodinización. La diferencia entre estos sistemas es que uno utiliza en modo de reflexión y el otro en modo de transmisión. Ambos modos se analizaron matemáticamente y fueron probados experimentalmente con resultados satisfactorios. En modo de reflexión el sistema está diseñado para la medición de pequeñas rugosidades en objetos reflectores, con este instrumento se midieron espejos y se obtuvo su perfil de rugosidad del objeto del orden de nanómetros. El sistema utilizado en modo de transmisión está diseñado para la medición de objetos de fase. Se obtuvieron resultados experimentales con cuñas, rejillas de fase y gelatinas transparentes.

INTRODUCCIÓN

La medición de la rugosidad tiene aplicaciones en distintos campos que van desde el análisis de calidad de microcomponentes electrónicos¹ hasta el análisis de la rugosidad de la superficie de la cornea después de haber sido corregida por cirugía láser².

Entre los elementos más útiles para observar la rugosidad de una superficie esta el microscopio diferencial de contraste o de Nomarski³. Otra alternativa para la medición de rugosidad es mediante microscopios electrónicos. Entre los principales tipos de microscopios electrónicos están: El microscopio electrónico de transmisión⁴ (TEM), el microscopio electrónico de barrido⁵ (SEM), el de barrido por transmisión (STEM) y el de barrido por tunelaje⁶ (STM). Siendo el último el más sensible y de mayor resolución.

Sin embargo, estos microscopios han sido reemplazados por el microscopio de fuerza atómica⁷ (AFM) ya que es capaz de observar los detalles sobre las superficies hasta décimas de micras y no requiere muestras de tamaño especial ni prepararlas especialmente. Este instrumento esta diseñado para el estudio de la microtopografía de superficies ópticas la mayoría de ellas no conductoras.

Para la medición de fase uno de los instrumentos más utilizados es el microscopio de contraste de fase en el que se modifica la iluminación del objeto,

de tal forma que se produce un contraste entre los elementos de las células. El microscopio de Nomarski en una de sus variantes se utiliza también para la medición de fase.

En el presente trabajo se proponen dos sistemas ópticos. Uno de ellos capaz de medir rugosidad en superficies reflectoras⁸ y el otro capaz de medir objetos de fase y determinar la variación de la misma en términos del índice de refracción o bien del grosor del objeto⁹.

TEORÍA

Descripción del sistema adaptado para la medición de rugosidad en reflexión

El principio básico de la heterodinización óptica¹⁰ consiste en introducir un cambio de frecuencia en la señal. En este trabajo se obtuvo de una forma sencilla y económica mediante la oscilación de una rejilla.¹¹

Para medir el perfil de una superficie reflectora el haz de luz proveniente de un láser se modula en fase con la información de las irregularidades de la superficie, luego se introduce una portadora temporal de la misma manera que para la transmisión de radio en AM, así las irregularidades de la superficie se modulan en tiempo al incidir sobre una rejilla oscilatoria a una frecuencia dada y

finalmente el haz láser modulado que contiene la información del objeto se suma coherentemente con el haz de referencia en un detector colocado en el plano de observación.

En la Figura 1, se muestra el dispositivo donde una rejilla de difracción óptica actúa como elemento modulador de la frecuencia.

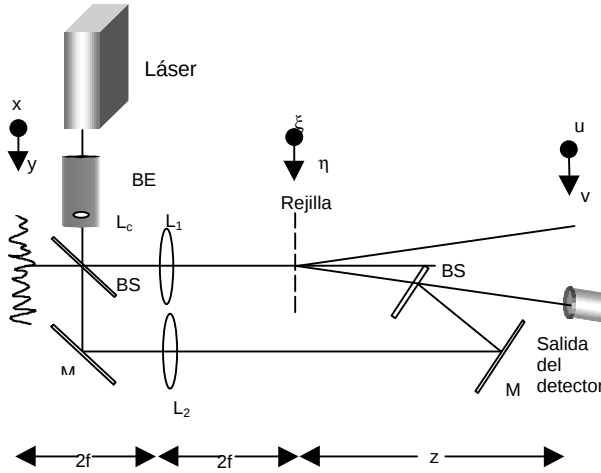


Fig. 1 Arreglo óptico del sistema de medición de rugosidad. BE es un elemento óptico expansor del haz, L_c , L_1 y L_2 son lentes BS son divisores de haz y M espejos.

Se utiliza un láser con un perfil de amplitud gaussiano dado por

$$\Psi_0(x, y; x_0, y_0) = \sqrt{\frac{P}{\pi r_0^2}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{r_0^2}\right], \quad (1)$$

donde P es la potencia del láser y r_0 es la cintura mínima del haz. Este haz se encarga de rastrear la superficie bajo prueba. La superficie se encuentra en el plano $(x, y, z = 0)$. El haz láser es equivalente al tip de prueba mecánico del AFM. Para separar el haz de prueba del haz de referencia utilizamos un divisor de haz, del cual uno de los haces se divide y se refleja por el objeto y el otro haz se divide y se refleja en un espejo que lo conducirá hacia el detector. Cuando el haz de prueba se refleja en el objeto, la diferencia de altura entre los puntos muestreados incorporan una diferencia de fase en el haz, de tal manera que adquiere una modulación en fase que representa las irregularidades de la superficie como se muestra en la siguiente ecuación,

$$\Psi(x, y; x_0, y_0) = \Psi_0(x, y; x_0, y_0)[1 + i2kh(x, y)]. \quad (2)$$

El término de fase introducido por las irregularidades del objeto está dado por $2kh(x, y)$, donde el término $h(x, y)$ representa la altura del objeto en el punto medido y el término k es el número de onda que en este caso es constante. Se utiliza la lente L_1 para hacer la imagen del objeto en el plano de la rejilla $(x, h, z = 4f)$ y se introduce la rejilla senoidal de fase para generar la modulación temporal. Matemáticamente la rejilla puede representarse por

$$t_R(x; t) = 1 + \cos\left[\frac{2p}{L}(x - ut)\right]. \quad (3)$$

La rejilla se hace oscilar de tal manera que se produce un cambio de frecuencia doppler modulando la información del haz objeto. La transformada de Fourier de la imagen del haz objeto se convoluciona con la rejilla por el efecto de propagación. La lente L_2 forma la imagen del punto que llega al espejo M, y luego se propaga hasta que llega al detector, donde se superpone con la señal que lleva la información del objeto.

La potencia de la señal se obtiene de la interferencia del haz objeto con el haz de referencia. Ambas señales se integran debido a la acción del fotodetector, que trabaja como un detector de ley cuadrática.

El proceso de detección completo se representa por la siguiente expresión:

$$P_T(x_0, y_0, t) = 2 \frac{Pz}{\pi r_0^2} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Re(x - x_0, h - y_0) h(x, h) dx dh \right\} \quad (4)$$

El cálculo matemático de la potencia nos da una ecuación con un término senoidal que multiplica a una integral que representa la convolución de la función impulso del sistema dada por

$$\Re(x, h) = \frac{8}{r_0^2} \exp\left(-2 \frac{x^2 + h^2}{r_0^2}\right) \quad (5)$$

con las irregularidades representadas por $h(x, y)$. El término cosenoidal no afecta el resultado de la ecuación debido a que es muy pequeño y además es ortogonal a la función seno.

Se debe hacer notar que el área del patrón de interferencia es mucho mayor que el área del detector. Este patrón corresponde a la señal que contiene las irregularidades de un punto de rastreo del objeto correspondiente a la dimensión del tipo de prueba láser (diámetro del haz láser en el punto de rastreo sobre el objeto). Si colocamos un filtro (máscara) en el detector de tal manera que solo se integre la parte central de este patrón de interferencia por el detector. De esta forma se obtienen dos ventajas importantes, primera el radio del haz láser se reduce lo que incrementa la resolución lateral y sensibilidad del instrumento, la segunda ventaja consiste en que la señal que llega al detector tiene una extensión menor al área del detector, lo que nos permite realizar la integral de la intensidad para calcular la potencia dada en la ecuación 4.

Descripción del sistema adaptado para la medición de diferencias de fase (índice de refracción o cambios de grosor) por transmisión

El principio del sistema propuesto puede adaptarse para medir la fase de un objeto por transmisión. Se conoce por fase a los cambios de índice de refracción o de grosor de un objeto transparente.

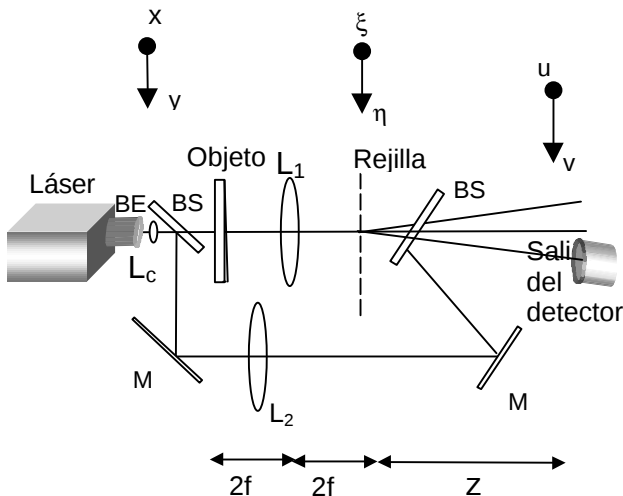


Fig. 2 Esquema de un ejemplo del arreglo experimental para medir, por transmisión, objetos de fase. BE es un expansor del haz, BS son divisores de haz, L_1 , L_2 y L_3 lentes, M espejos, D el detector y f la distancia focal de las lentes.

Para medir la fase de un objeto se modifica el arreglo experimental de tal manera que en el detector se reciba la información de la fase del objeto bajo prueba, como se muestra en la Fig. 2

En este sistema el haz láser rastrea el objeto que en el caso de la figura es una cuña, y se modula por la cantidad de vidrio que atraviesa, consideramos que el índice de refracción de la cuña es isotrópico, por lo tanto, el cambio de fase está dado por la ecuación:

$$\Psi(x, y; x_0, y_0) = \Psi_0(x, y; x_0, y_0) [1 + ikh(x, y)]. \quad (6)$$

El procedimiento para el análisis de este sistema es similar al anterior, con la lente L_1 se obtiene la imagen del objeto bajo prueba en el plano de la rejilla y de ahí se propaga al plano del detector. Finalmente en el detector se tiene la superposición del haz objeto con el haz de referencia. El resultado de la ecuación de la potencia es similar al anterior solo que el término de $h(x, y)$ no está multiplicado por 2 debido a que el haz pasa directamente por el objeto y no se refleja como en el caso anterior.

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Medición de rugosidad

El arreglo para medir rugosidad se implementó en el laboratorio y se probó con una placa de vidrio a la cual se le pulió y luego se le evaporó una capa de película de aluminio con el fin de hacerla reflectora. El láser utilizado fue de He-Ne de 3 mW de potencia con un perfil de intensidad gaussiano. Para modular el haz temporalmente se utilizó una rejilla de fase con periodo, $L = 9.74 \times 10^{-6}$ líneas/m. Esta rejilla se hizo vibrar a la frecuencia en la que se presentaba una amplitud máxima en la señal detectada. El movimiento del objeto se realizó por medio de un piezoeléctrico para el caso de la medición de rugosidad y mediante un motor nanomover para el caso del sistema detector de fase.

Los resultados obtenidos para el caso del sistema medidor de rugosidad son los siguientes:

1º Se realizó un rastreo de ida y vuelta en el objeto, en una distancia de $17 \mu\text{m}$, tres veces como se muestra en la Fig. 3. En la figura se puede apreciar que las irregularidades tienen repetibilidad, por lo tanto se confirma que el instrumento está midiendo las irregularidades sobre la misma distancia.

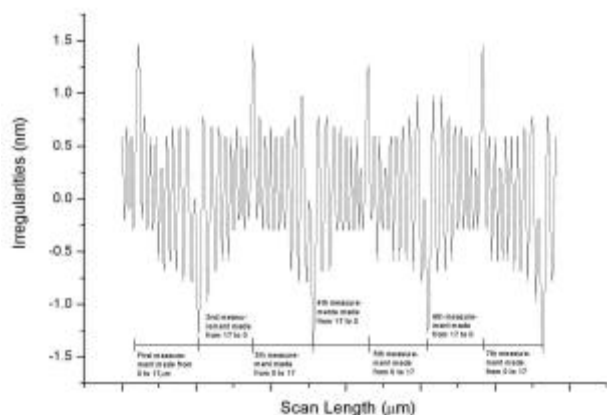


Fig. 3 Gráfica de la medición de un área de rastreo de 17mm, tomada de ida y vuelta varias veces.

2º Además de que el valor de la rugosidad promedio obtenida con nuestro instrumento es del mismo orden de magnitud que la rugosidad medida sobre el mismo objeto con el perfilómetro Dek Tak de Veeco metrology Group.

Medición de fase

En el sistema de medición de fase se midieron tres tipos de elementos, los cuales fueron cuñas con diferente pendiente, una gota de gelatina (material con el que se trabaja para hacer elementos holográficos) y una rejilla de fase grabada por medios interferométricos, las mediciones obtenidas se muestran a continuación:

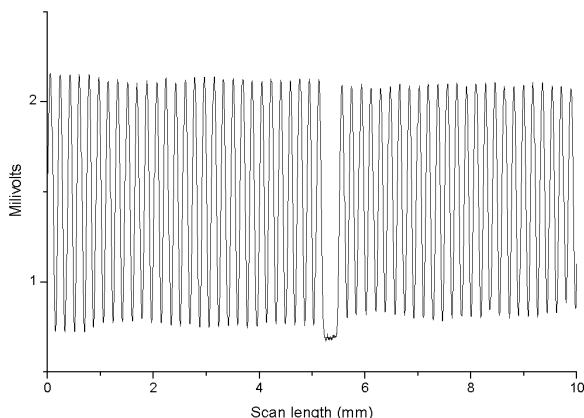


Fig. 4 Gráfica de la cuña de 30 minutos.

1º Las cuñas que se midieron tienen diferentes pendientes la primera tiene una pendiente de 30 minutos, esta placa se midió de ida y vuelta en una distancia de 5mm, los resultados se muestran en la Fig. 4.

En la gráfica se pueden observar 2 series de 28 ciclos, los ciclos representan la pendiente, un mayor número de ciclos implica una mayor pendiente, esto es debido a que con una pendiente mayor se tiene un envolvimiento de fase. La segunda placa tiene una pendiente de 12 minutos, se midió similarmente a la placa anterior teniendo como resultado 2 series de 10 ciclos. Lo cual corresponde a una pendiente menor.

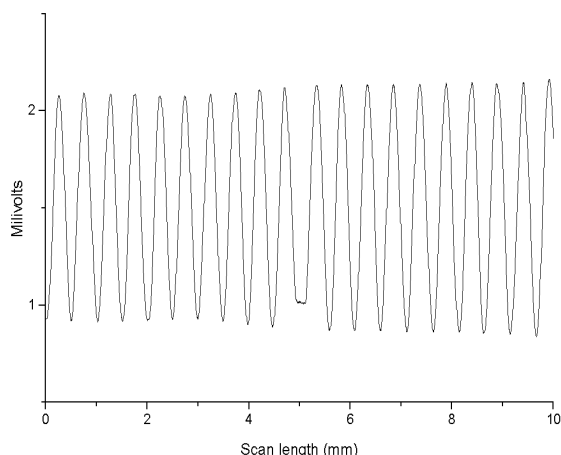


Fig. 5 Gráfica de la cuña de 12 minutos.

La tercera placa tiene una pendiente de 0° grados (placa plano paralela) y en su gráfica no se observa ningún ciclo, no existe envolvimiento de fase por lo que las variaciones en la gráfica corresponden a las irregularidades de la superficie, Figura 5. Con estas gráficas se comprueba que el método de medición sugerido en este trabajo funciona perfectamente para la medición de fase en placas donde el índice de refracción es constante y la variación de la fase se debe solamente al grosor.

2º Las siguientes mediciones se realizaron sobre una gota de gelatina depositada en un vidrio plano. En la Fig. 7 se muestra la medición sobre la gelatina en un viaje de ida y vuelta, como puede apreciarse a partir del centro de la gráfica existe un reflejo especular en la forma de la gráfica de fase, es decir, la forma que presenta la gelatina en el viaje de ida es la misma forma que presenta en el viaje de regreso.

3º Finalmente se midió una rejilla de fase grabada en gelatina dicromatada con un periodo de 4 μm. Se realizaron los cálculos para determinar la correspondencia entre la medición del periodo real y el periodo observado en la medición, dando un resultado totalmente satisfactorio.

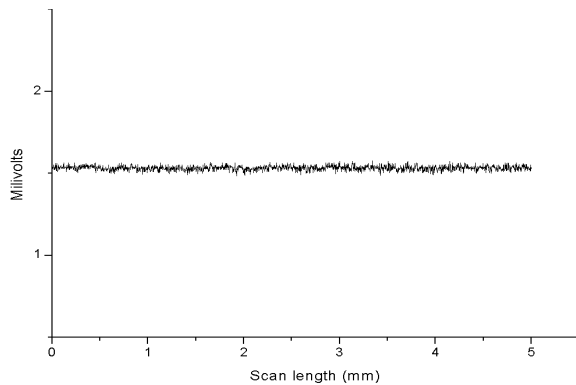


Fig. 6 Gráfica de la placa plano paralela.

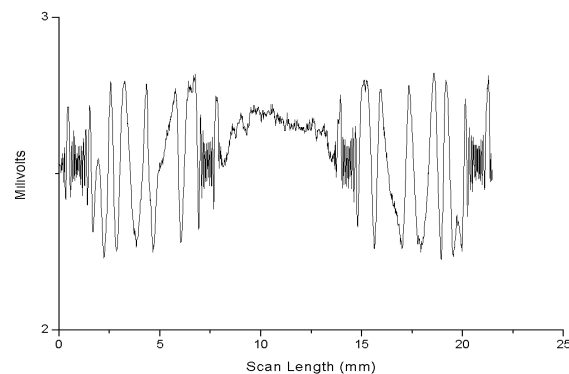


Fig. 7 Gráfica de una gota de gelatina.

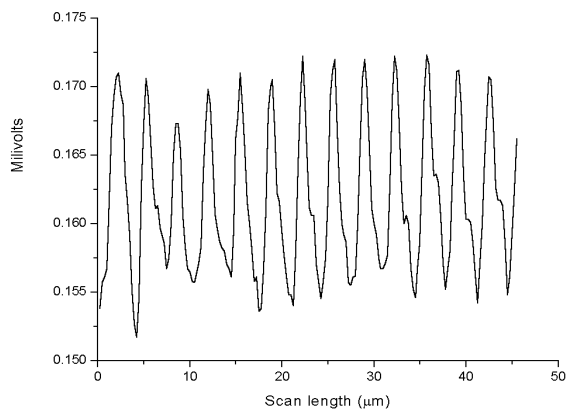


Fig. 8 Medición de una rejilla de fase

CONCLUSIONES

Se muestra un sistema capaz de medir rugosidades superficiales muy pequeñas o índices de refracción y de grosor de objetos. La medición de estas variables depende si el sistema analiza el objeto bajo prueba por reflexión o por transmisión. El sistema utiliza el principio de heterodinización óptica para el haz de luz proveniente de un láser. El haz se

modula en frecuencia con la información de las irregularidades de la superficie o la información que contiene el índice de refracción o grosor del objeto bajo prueba, y se suma coherentemente con un haz de referencia en un detector colocado en el plano de observación del interferómetro propuesto. Los resultados de las mediciones tanto por reflexión como por transmisión fueron satisfactorios.

REFERENCIAS

- [1] R. Artigas, A. Pinto, and F. Laguarta, "Three-dimensional micromasurements on smooth and rough surfaces with a new confocal optical profiler", *Proc. SPIE* **3824**, 93-104 (1999).
- [2] B. Hopp, A. Nogradi, K. Revesz, Z. Bor, and L. Kolozsvari, "Surface roughness investigations of excimer-laser-ablated cornea," *Proc. SPIE* **3423**, 441-445 (1998).
- [3] G. Nomarski, "Microinterféromètre différentiel à ondes polarisées," *J. Phys. Rad.* **16**, 9S-13S (1955); G. Nomarski and A.R. Weill, "Application à deux ondes polarisées," *Rev. Metall. (Paris)* **52**, 121-134 (1955).
- [4] E. Buseck, J. Cowley, and L. Eyring, eds., *High-Resolution Transmission Electron Microscopy* (Oxford University Press, London, 1988).
- [5] L. Reimer, *Scanning Electron Microscopy*, 2nd ed., Vol. 45 of Springer Series in Optical Sciences (Springer-Verlag, New York, 1985).
- [6] G. Binnig and H. Rohrer, "Scanning tunneling microscopy," *Helv. Phys. Acta* **55**, 726-735 (1982).
- [7] D. Rugar and Paul Hansma, "Atomic force microscope," *Physics Today* **43**(10), 23-30 (1990).
- [8] R. Baltazar, C. Solano, G. Martinez-Ponce, Alma A. Camacho, "Optical Heterodyne Perfilometer to Scan Irregularities in Reflective Objects", Artículo aceptado en la revista *Optics Communications*.
- [9] R. Baltazar, C. Solano, G. Martinez-Ponce, Alma A. Camacho, "Optical Heterodyne method to Measure Phase Objects", Artículo enviado a la revista *Optics Communications*.
- [10] A. Hirai and H. Matsumoto, "High Sensitivity Surface-Profile Measurements by Heterodyne White Light Interferometer," *Opt. Eng.* **40**, 387-391 (2001).
- [11] T. Suzuki and R. Hioki, "Translation of light frequency by a moving grating," *J. Opt. Soc. Amer.* **57**, 1551 (1967).