

MÉTODO SIMPLE PARA MEDIR LA DISTANCIA FOCAL DE LENTES

Alma A. Camacho P. Cristina Solano, Geminiano Martínez-Ponce, Rosario Baltazar.

Centro de Investigaciones en Óptica A.C.

Loma del Bosque No. 115 Apartado Postal 1-948, 37100,

León Gto., México

Teléfono : (52-477)-773-10-19, 718-46-25 Fax: (52-477) 717-50-00, 718-46-25

alma@foton.cio.mx, csolano@foton.cio.mx

Resumen: Este trabajo reporta un método simple para medir la distancia focal de lentes de cualquier tamaño. Este método está basado en las propiedades de propagación del haz Gaussiano. En primer lugar, se mide la imagen de la mancha del haz Gaussiano transmitida por la lente que se desea medir. Posteriormente la lente se desplaza una pequeña cantidad y se mide el desplazamiento de la mancha transmitida. Se demuestra que el método es consistente y se puede utilizar para medir la distancia focal de lentes de cualquier tamaño. Las lentes que utilizamos para probar el método fueron microlentes de 100 μm de ancho y lentes macroscópicas de distancia focal de hasta 54.40 mm. El error de medición encontrado es del orden de 3%.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el campo de las tecnologías de fabricación de microlentes ha crecido considerablemente. Con nuevos métodos de fabricación a bajo costo y microlentes de alta calidad que se producen en masa. Sin embargo, este progreso requiere de pruebas disponibles y efectivas en microlentes. Los métodos simples tales como microscopía y barrido mecánico no están disponibles para sistemas micro-ópticos con muchas componentes. La aplicación de sistemas de microlentes para formación de imágenes requiere de pruebas de precisión.

Primero para caracterizar una microlente es necesario conocer su distancia focal, su forma y la calidad de su superficie para determinar el funcionamiento refractivo. Pero debido a sus pequeñas dimensiones y tolerancias de alineación tan precisas, la medición de los parámetros en una microlente es un proceso más complicado que para una lente normal [1-5].

En un trabajo previo se encontró un método para medir la distancia focal de las lentes de cualquier tamaño, él cual está basado en las propiedades de propagación del haz Gaussiano [1]. Se analizó la variación de los parámetros de entrada del haz gaussiano involucrados en la medición de la distancia focal. Estos son el semi-ancho del haz $r(z)$, la distancia de la segunda superficie al plano de

observación z_0 y el semi-ancho de la imagen de la mancha transmitida, R_0 . Además se calcularon los parámetros de incertidumbre y sensibilidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos se encontró un método más simple para medir la distancia focal de las lentes en la que solamente es necesario desplazar la lente una distancia Δx perpendicular al eje óptico y medir el desplazamiento de la mancha luminosa transmitida por la lente, $\Delta \xi$, a una distancia z_0 . Este método puede aplicarse para verificar la distancia focal de la lente en su proceso de fabricación.

TEORÍA

El diagrama del arreglo óptico se muestra en la Fig. 1. La fuente de luz es un láser con un perfil de amplitud Gaussiana $\Psi_0(\xi, \eta)$. El diámetro del haz láser se redujo usando un sistema óptico, él cual consiste de un expensor de haz y una lente menisco. Se coloca una lente en la cintura del haz, de un semiancho $r(0)$, la amplitud de la luz en la segunda superficie de una lente con distancia focal f , está dada por

$$\Psi_0(x, y) = A(z) \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{r(0)^2} \right] \exp \left\{ -\frac{ik(x^2 + y^2)}{2f} \right\}. \quad (1)$$

La exactitud del resultado dependerá de los métodos que se usan para medir los valores experimentales de los parámetros involucrados.

Este método es más exacto cuando la lente se coloca exactamente en la cintura del haz.

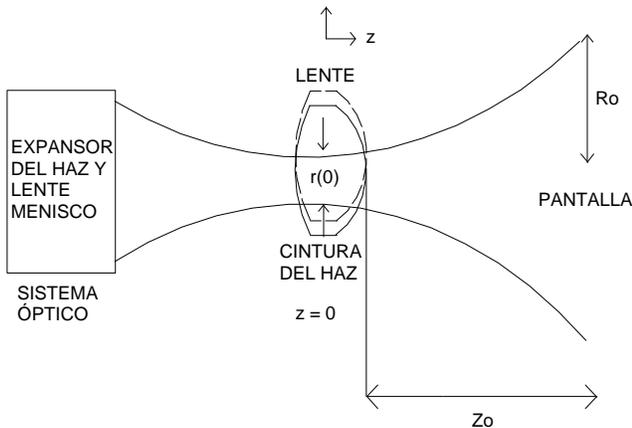


Fig. 1 Diagrama del arreglo óptico. La lente con líneas punteadas muestra la traslación de la lente.

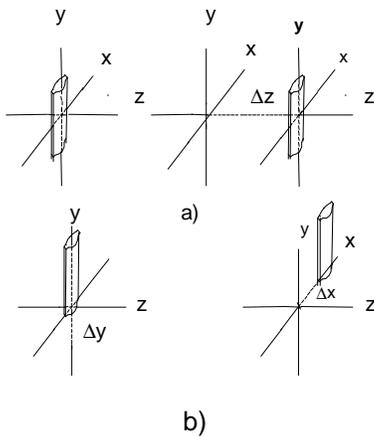


Fig. 2 Diferentes movimientos de traslación con la lente (preforma) en posición vertical.

- La lente está en la cintura del haz y su desplazamiento se lleva a cabo a lo largo de la dirección z.
- La lente está en la cintura del haz y su desplazamiento se realiza a lo largo del eje x.

Movimiento de Traslación Transversal

Se ha demostrado [1] que un pequeño desplazamiento de la lente en el eje óptico z del sistema, Fig. 2a, no afecta la medición de su distancia focal. En lo siguiente, nosotros analizaremos los casos cuando la lente se trasladó perpendicularmente al eje óptico como en la Fig. 2b.

Consideremos que la lente se colocó en la cintura del haz y se desplazó una pequeña distancia transversal Δx a lo largo del eje x, Fig. 2b. Sin restar generalidad, se usará solamente un eje coordenado en la Ec. (1). Esto es equivalente a una lente cilíndrica centrada en $(x+\Delta x, y)$. La fase del haz Gaussiano se modifica por un factor $\exp\left\{\frac{-ik(x+\Delta x)^2}{2f}\right\}$.

La distribución de amplitud de una lente cilíndrica (considerando por simplicidad $\eta = 0$) en el plano $z = z_0$ es

$$\Psi(x, z_0) = A(z) \exp\left\{\frac{-p^2 r(0)^2 f^2 \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{x}{z_0}\right]^2}{l^2 f^2 + p^2 r(0)^4}\right\} \times \exp\left\{\frac{ip^3 f r(0)^4 \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{x}{z_0}\right]^2}{\left[l^2 f^2 + p^2 r(0)^4\right] l}\right\}, \quad (2)$$

donde ξ es la coordenada de la distribución de intensidad, ésta es inversamente proporcional al semi-ancho del haz Gaussiano propagado. De la Ec. (2) se obtiene el semi-ancho del haz Gaussiano propagado en z_0 como

$$\frac{R_0^2}{(x')^2} = \frac{\left[l^2 f^2 + p^2 r(0)^4\right] z_0^2}{p^2 r(0)^2 f^2 \left[\frac{\Delta x z_0}{f} + x\right]^2}. \quad (3)$$

Comparando la Ec. (3) con la obtenida sin translación [1] obtenemos

$$\frac{R_0^2}{(x')^2} = \frac{[I^2 f^2 + p^2 r(0)^4] z_0^2}{p^2 r(0)^2 f^2 x^2}. \quad (4)$$

Se puede observar que la coordenada de origen se traslada a ξ' , el nuevo eje de coordenadas.

La distancia focal de la lente está en función de su desplazamiento Δx en el plano (x,y) como,

$$f = \frac{z_0 \Delta x}{\Delta \xi}, \quad (5)$$

midiendo el desplazamiento de la mancha transmitida $\Delta \xi$ en el plano ($\xi, z=z_0$) como se muestra en la Fig. (3).

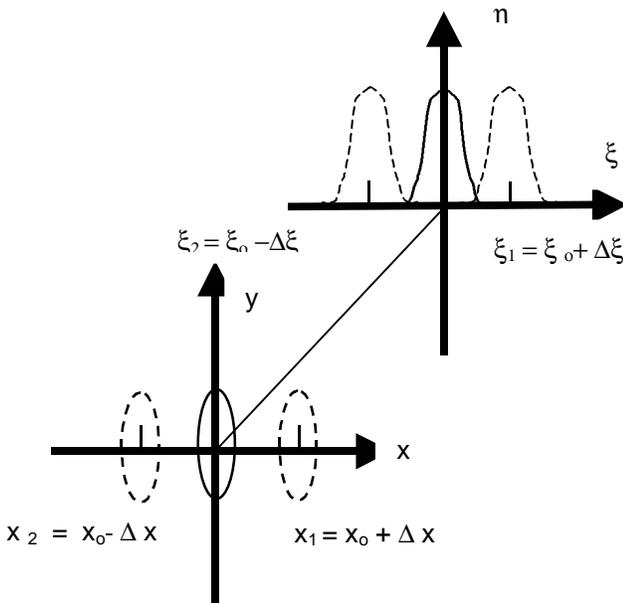


Fig. 3 Esta figura muestra la lente de prueba y el desplazamiento lateral de la mancha imagen (mancha transmitida).

Un caso más general, es cuando la lente está colocada fuera de la cintura del haz, la distribución de amplitud en el plano x,y para una lente cilíndrica es

$$\Psi_0(x, y) = A(z) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r^2}\right] \exp\left[-\frac{ik(x + \Delta x)^2 + y^2}{2f}\right] \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2P(z)}\right], \quad (6)$$

donde $P(z)$ es el radio de curvatura del haz Gaussiano cuando la lente está colocada fuera de la cintura del haz.

En el plano ($\xi, \eta, z = z_0$), se encuentra que el valor del semiancho del haz Gaussiano es

$$\frac{R_0^2}{(x')^2} = \frac{I^2 f^2 z_0^2 P^2(z) + p^2 r(z)^4 (fP(z) - z_0 P(z) - z_0 f)^2}{p^3 r(z)^2 z_0^2 f^2 P^2(z) \left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{x}{z_0}\right]^2}, \quad (7)$$

en donde el factor $\left[\frac{\Delta x}{f} + \frac{x}{z_0}\right]^2$, mismo de la Ec. (2), nos permite usar nuevamente la Ec. (5) para encontrar la distancia focal de la lente.

Nuestro análisis muestra que es posible calcular la distancia focal de la lente, midiendo el desplazamiento de la mancha con respecto a la mancha centrada transmitida cuando la lente está alineada con el haz Gaussiano.

Revisando la literatura se encontró que este resultado fue reportado anteriormente en la Ref. [6] usando trazo de rayos.

No obstante, el método propuesto muestra ventajas adicionales pues toma en cuenta el perfil de intensidad del haz. Por ejemplo es posible predecir o encontrar las variaciones del semi-ancho del haz incidente en función para diferentes distancias focales, como se muestra en la Fig 4.

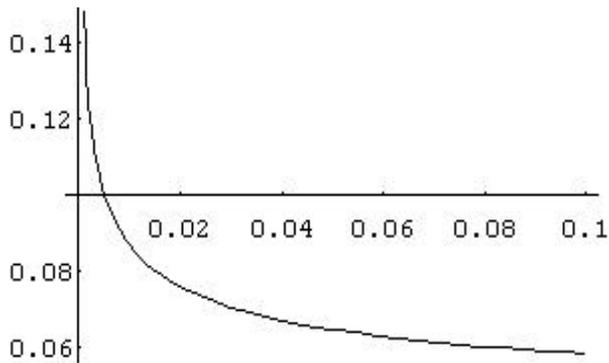


Fig. 4 Gráfica que muestra el cambio de los semi-anchos del haz gaussiano (R_0) para diferentes distancias focales f (m).

Tipo de la Lente	z_0 (mm)	Δx (mm)	$\Delta \xi$ (mm)	$f_{\text{experimental}}$ (mm)	$f_{\text{(otro método)}}$ (mm)	Error
Doble Convexa	106.00	1.00	3.00	35.30	36.00	1.86 %
Cilíndrica	106.00	1.00	2.50	42.40	44.00	3.60 %
Esférica	106.00	1.00	1.95	54.40	55.00	1.00 %
Preforma	106.00	1.00	20.50	5.17	5.32	2.80 %
Lente Ball	80.00	1.00	14.00	5.71	5.87	2.70 %
Microlente	80.00	1.00	126.00	0.125	0.127	1.50 %

Tabla 1 Comparación de resultados experimentales de la distancia focal de diferentes lentes utilizando el método simplificado de la Ec. (5) con los resultados experimentales obtenidos con otros métodos,

Como puede observarse, el semi-ancho del haz tiende a un valor constante cuando la distancia focal supera cierto valor. Lo anterior limita la aplicación de la aproximación de la Ec. (5). Sin embargo, con base en el análisis de la propagación del haz gaussiano, es posible inferir que mediante la traslación axial del plano del detector esta aproximación puede aplicarse nuevamente. También se puede observar de la misma figura que cuando la distancia focal del elemento bajo prueba es muy pequeña es posible exceder las dimensiones físicas del detector. La solución al problema anterior también se infiere del análisis propuesto y consiste, una vez más, en la traslación axial del plano del detector.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se utilizó un diodo láser polarizado linealmente de 5 mW, ($\lambda = 635\text{nm}$). El perfil del haz fue Gaussiano y se verificó utilizando un osciloscopio digital de doble canal Tektronix TDS 200-210 a una frecuencia de 500 MHz y un perfilómetro de haz Thorlabs omega meter. Se utilizó una potencia moderada de $P=4.48$ mW para evitar la saturación del detector. Se redujo el diámetro del haz usando un expansor del haz de 10X y una lente menisco de longitud de distancia focal de $f = 38.45 \pm 0.05$ cm, dando como resultado un haz de radio $r_0 = 19 \pm 0.95 \mu\text{m}$.

Se utilizó la ecuación (5) para medir la distancia focal de varias lentes con diferentes características. Las lentes fueron colocadas en la cintura del haz y el detector a $z_o = 10.6 \pm 0.05$ cm. La lente se desplazó lateralmente una cantidad $\Delta x = 0.1 \pm 0.0005$ cm. Sin embargo el desplazamiento de la microlente fue de $\Delta x = 0.02 \pm 0.005$ cm. La incertidumbre del parámetro $\Delta \xi$ fue de ± 0.001 mm. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Las distancias focales de la lentes que se emplearon se midieron por varios métodos [7-12]. Los valores se muestran en la Tabla 1 en la columna $f_{(\text{otro método})}$. Se demostró que nuestro método proporciona resultados consistentes con un arreglo óptico simple.

CONCLUSIONES

Se describió un método para medir la distancia focal de lentes (microlentes). La distancia focal se calcula en función del desplazamiento de la mancha transmitida cuando la lente se ha desplazado con respecto a la mancha transmitida cuando la lente se encuentra alineada con el sistema de coordenadas. Además, se establece en forma analítica que el rango de medición del sistema propuesto puede ser extendido mediante el traslado axial del plano del detector. Lo anterior es resultado del análisis de la distribución de intensidad del haz gaussiano y los cambios en su valor en el rango de traslación para cada uno de los casos (macro o microlentes).

Este método tiene las siguientes ventajas. El arreglo óptico es extremadamente simple para las evaluaciones cuantitativas de la distancia focal. Además, es posible aplicarlo para la medición de la distancia focal de lentes macroscópicas y microscópicas. En la medición de estos parámetros, se utilizaron instrumentos de precisión. Como se demostró la posición de la lente en el eje z no es crítica (microlente). Sin embargo, este método se puede aplicar como un control de posición debido a su alta sensibilidad lateral.

AGRADECIMIENTOS

Los autores aprecian los comentarios del Prof. Orestes N. Stavroudis y Alfredo Hernández Vilches. Este trabajo fue apoyado por Consejo Nacional de

Ciencia y Tecnología (Conacyt) proyecto 33793-E y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del estado de Guanajuato (Concyteg) proyecto 010420305.

REFERENCIAS

- [1] A.A Camacho P., C. Solano, M. Cywiak, G. Martínez, and R. Baltazar, "Method for the determination of the focal length of a microlens" Opt. Eng. **39**, 2149 - 2152 (2000).
- [2] Lars Erdmann and Richard Kowarschik, "Testing of refractive silicon microlenses by use of a lateral shearing interferometer in transmission", Appl. Opt. **37**, 676 -682 (1998).
- [3] Juan Liu, Bi-Zhen Dong, Ben-Yuan Gu and Guo-Zhen Yang, "Entirely electromagnetic analysis of microlenses without a beam shaping aperture", Appl. Opt. **40**, 1686 – 1691 (2001).
- [4] Borrelli F. Nicholas, *Micro-Optics Technology Fabrication and Applications of Lens Arrays and Devices*, Marcel Dekker Inc (1999)
- [5] Herzig Peter Hans, *Micro-Optics, Elements, systems and applications*, Taylor & Francis (1997).
- [6] Bouchaud and J.A Cogno "Automatic method for measuring simple lens power" Appl. Opt. **21**, 17 (1982)
- [7] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc New York (1992).
- [8] D. Malacara and Z. Malacara. *Handbook of Lens Design*, Marcel Dekker Inc, "Optical Surfaces, Ray Tracing and Wavefront Shape calculation" 45, New York (1994).
- [9] Optics and Optical Instruments Catalog, Edmund Industrial Optics (2000).
- [10] D. Preston, E.R. Dietz, *The Art of the Experimental Physics*, John Wiley, N.Y. (1991).
- [11] Smith J. Warren, "Component Choices: Avoiding Tolerancing Mistakes" Kaiser Electro-Optics Inc., The Photonics Design and Applications Handbook (2000).
- [12] Smith J. Warren, "Component Choices: Avoiding Tolerancing Mistakes" Kaiser Electro-Optics Inc., The Photonics Design and Applications Handbook (2000).