

POSIBILIDADES DE LA HOLOGRAFÍA COMO TÉCNICA APLICADA A LA ÓPTICA OFTÁLMICA

I. Pascual, A. Beléndez y A. Fimia

Laboratorio de Óptica
Departamento Interuniversitario de Óptica
Universidad de Alicante

La holografía comenzó a desarrollarse en los años sesenta con la aparición del láser, y actualmente resulta imprescindible en muchas parcelas de la tecnología pues permite analizar los avances técnicos desde una nueva perspectiva. Por otra parte, el método holográfico ha aportado un nuevo enfoque a diferentes problemas que las Ciencias de la Visión vienen planteando en su continua evolución. La posibilidad de almacenar todo el frente de onda en un medio fotosensible y su posterior reproducción, ha hecho que la holografía entre de lleno en el campo del diseño óptico y del control no destructivo que, en determinados casos, presentaba problemas imposibles de soslayar.

Este trabajo presenta un resumen de las posibilidades que la holografía tiene dentro del campo de la Óptica Oftálmica desde dos de las vertientes que más han evolucionado últimamente: Los Elementos Ópticos Holográficos y la Interferometría Holográfica.

Primeramente se hará una breve introducción a la holografía, comentándose los dos aspectos antes mencionados, para después in-

dicar las posibilidades reales de aplicación de la técnica holográfica a sistemas que en este momento son de suma actualidad para la Óptica Oftálmica.

1. Introducción: holografía

Cuando se forma una imagen en un punto del espacio determinado, mediante la utiliza-

ción de un sistema óptico, se establece fundamentalmente una relación punto a punto entre los elementos del objeto y sus correspondientes elementos en la imagen. Todos los intentos de optimización de los sistemas ópticos van encaminados a intentar hacer que dicha relación objeto-imagen sea «lineal».

Desde el punto de vista energético, la luz que parte de un punto objeto va a parar a un punto imagen, de esta forma, y dado que los sistemas de almacenamiento responden a intensidades, se encuentra que sólo es posible, en el marco de la teoría ondulatoria de la luz, almacenar la intensidad de la luz, es decir, el cuadrado de la amplitud de la onda objeto. De esta forma, se pierde información referente a la onda luminosa que representa al punto objeto, pues ésta consta de dos partes, la amplitud y la fase. Es decir, se ha perdido información de la sensación espacial que se percibe cuando se analiza dicho punto objeto.

La Holografía es una técnica que, desde 1947¹ hasta nuestros días, permite almacenar y reproducir todos los aspectos de una onda: Su amplitud y su fase. El método consiste en no almacenar sólo la onda de

interés sino la figura de interferencias correspondiente a dicha onda cuando interfiere con otra denominada «onda de referencia». Esta etapa de almacenamiento de la figura interferencial en determinados medios fotosensibles recibe el nombre de registro (figs. 1a y 2a). El medio fotosensible ya impresionado (y procesado en algunos casos), soporte de esta información (figura interferencial), es lo que constituye el holograma. Al analizar la distribución espacial en intensidad que da una figura interferencial se encuentra que, en las ecuaciones matemáticas que describen dicho proceso, existe un término, una función sinusoidal, que conduce a una distribución no uniforme de dicha intensidad. Ahora bien, en dicha distribución, es el término de diferencia de fase, entre la onda objeto y la onda de referencia, el que hace de «modulador». El resultado es que, cuando se ilumina la figura interferencial almacenada en una película fotográfica, por ejemplo, con la onda de referencia, ésta es modulada por dicha figura de interferencia, reconstruyéndose la onda objeto deseada (figs. 1b y 2b).

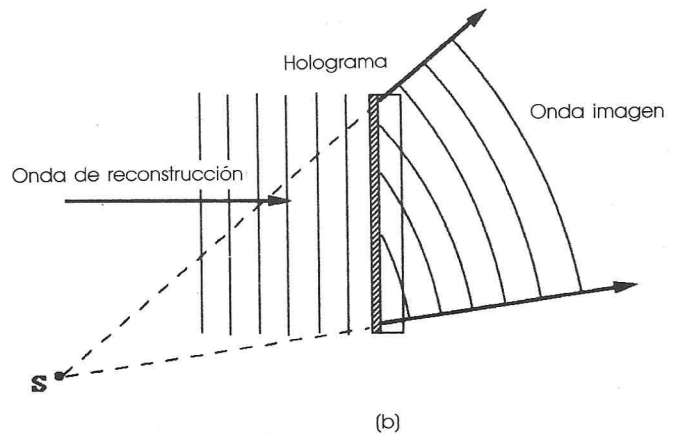
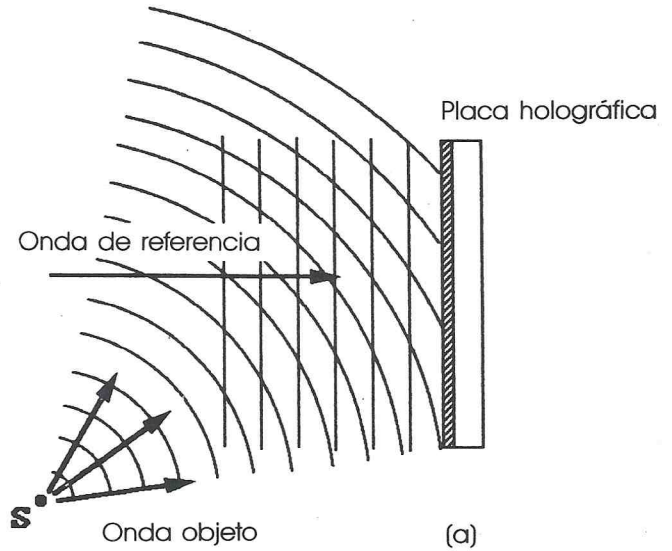
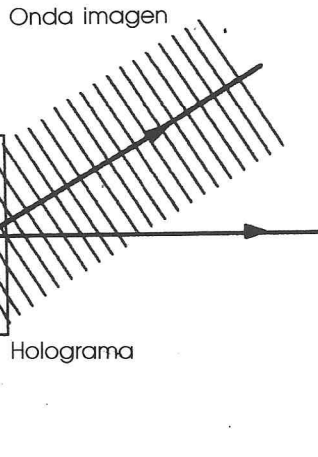
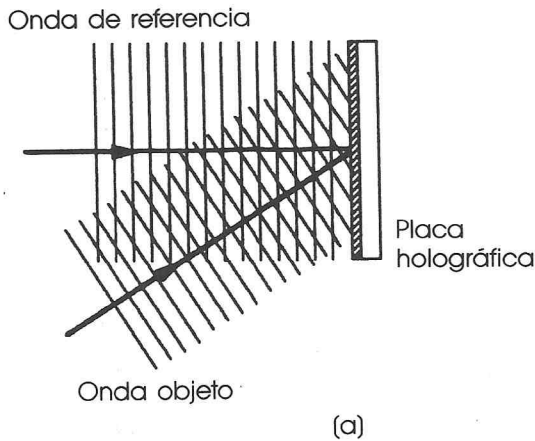


Fig. 1 (a) Almacenamiento de la figura de interferencia producida por el frente de onda de interés y una onda denominada de «referencia», (b) Reconstrucción del frente de onda de interés al iluminar con la onda de referencia.

Fig. 2 (a) Almacenamiento del frente de onda objeto. (b) Reconstrucción del frente de onda imagen.

Para describir matemáticamente² el proceso anteriormente descrito, sean:

$$E_o(x, y, z, t) = \text{Re} [\sqrt{2} O(x, y, z) e^{j\omega t}]$$

$$E_R(x, y, z, t) = \text{Re} [\sqrt{2} R(x, y, z) e^{j\omega t}]$$

los campos eléctricos que representan las ondas objeto y referencia. En el plano del holograma la intensidad $I(x, y)$, correspondiente a la suma de ambas ondas, vendrá dada por:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_o(x, y, 0, t) + E_R(x, y, 0, t)|^2 = \\ &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 = \\ &= |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + R^*O + RO^* \end{aligned}$$

Donde la barra corresponde al cálculo del promedio temporal y el* corresponde al símbolo de complejo conjugado.

Si se separa ahora la amplitud de la fase en la representación matemática:

$$O(x, y) = O_o(x, y) e^{j\Phi(x, y)}$$

$$R(x, y) = R_o(x, y) e^{j\Phi_R(x, y)}$$

La distribución de intensidades sobre la placa, $I(x, y)$, se convierte en:

$$I(x, y) = [O_o(x, y)]^2 + [R_o(x, y)]^2 + 2 R_o(x, y) O_o(x, y) \cos(\Phi_o - \Phi_R)$$

Esta ecuación confirma que la distribución de intensidades en el medio de registro no es uniforme al estar modulada por el término « $\cos(\Phi_o - \Phi_R)$ », es decir se tiene una figura interferencial. Si se utiliza como medio de registro una emulsión fotográfica, una vez revelada y fijada, se obtiene una variación de transmitancia correspondiente a la variación de intensidades antes calculada. Suponiendo que la función transmitancia T de dicha emulsión es lineal, es posible representar esta transmitancia mediante una ecuación de la forma:

$$T(x, y) = T_o + K I(x, y)$$

donde K es una constante relacionada con la sensibilidad de la emulsión y T_o es una transmitancia constante promedio.

Si a continuación se utiliza para iluminar el holograma una «onda de reconstrucción» representada por la función:

$$R'(x, y) = R'_o(x, y) e^{j\Phi_R(x, y)}$$

justo detrás de la emulsión que ha sido iluminada con esta onda se presenta la siguiente situación:

$$\begin{aligned} R'(x, y) T(x, y) &= T_o R' + K R' I = T_o R' + K R' |O|^2 + K R' |R|^2 + K R' R^* O + K R' R O^* = \\ &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 \end{aligned}$$

Cada una de las W_i representa una onda que sale del holograma, las tres primeras no contienen información alguna, salvo la de representar la luz transmitida; sin embargo, el término W_4 es muy importante pues si la onda de reconstrucción es similar a la onda de referencia, es decir si $R' = R$, entonces este término W_4 será proporcional a la onda objeto y, por tanto, representará la onda objeto reconstruida, dado que:

$$W_4 = K |R|^2 O \propto O(x, y)$$

El holograma ha difractado una onda idéntica a la onda objeto.

Observando a través del holograma se verá una imagen igual a la del objeto situada en la misma posición en la que estaba originalmente este objeto.

Por tanto, en holografía se combinan dos procesos físicos diferentes, la interferencia durante el almacenamiento y la difracción en la reconstrucción. Desde un punto de vista conceptual, la diferencia entre la óptica convencional y la holográfica, es que en la primera las leyes de la refracción y de la reflexión son las que gobiernan el comportamiento y trayectorias de la luz, mientras que en la segunda, es la ley de la difracción la que gobierna dicho comportamiento (fig. 3).

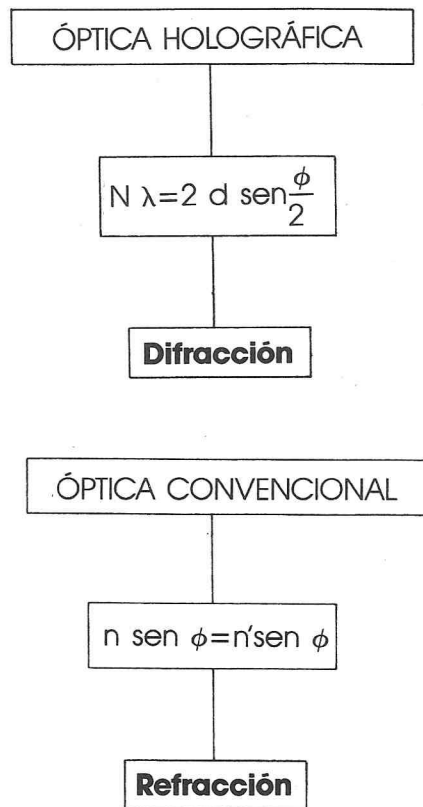


Fig. 3 La óptica convencional se rige por la refracción mientras que la óptica holográfica lo hace por difracción.

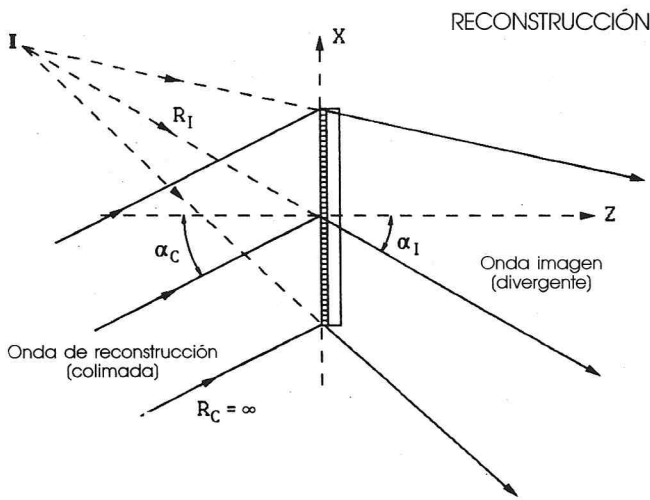


Fig. 4b Reconstrucción de una lente holográfica.

Los EOH pueden analizarse exactamente igual que los convencionales. Es posible establecer ecuaciones que indiquen cuál es la posición de la imagen, una vez conocida la posición del objeto, tal y como sucede en la óptica convencional con la ecuación de Gauss para las lentes delgadas (fig. 5).

Sistema convencional	Sistema holográfico
$-\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$	\downarrow
$P = \frac{1}{f}$	$\frac{1}{f'} = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \pm \mu \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_0} \right)$
$f\# = \frac{f}{D}$	$P = \frac{1}{f'}$
$q = \frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}$	$f\# = \frac{f'}{D}$
	$q = \frac{R_0 + R_0}{R_0 - R_0}$
a)	b)

Fig. 5. (a) Ecuaciones que rigen el comportamiento de una lente convencional. (b) Ecuaciones que rigen el comportamiento de una lente holográfica.

Los elementos ópticos holográficos pueden además realizar el mismo trabajo que los convencionales: Elementos que hacen converger o diverger los haces de luz, como son las lentes holográficas y los espejos holográficos. Por otro lado, la dispersión de luz que producen los prismas en la óptica convencional se consigue con las redes de difracción en la óptica holográfica. Además, y como ya se ha mencionado, pueden realizarse elementos ópticos holográficos que, al tiempo que llevan a cabo funciones de lente, también hacen de espejos. Otra característica importante de los EOH es que, al ser fabricados en un soporte plano (que en ocasiones puede ser de acetato como el soporte de una película convencional fotográfica), el peso de los mismos puede reducirse de forma significativa. Sin embargo, el gran inconveniente que presentan es que tienen una fuerte aberración cromática, si los comparamos con los convencionales, no obstante el diseño de EOH está evolucionando de forma rápida y continuamente se están encontrando sistemas holográficos que están corregidos para esta aberración de forma significativa.

3. La interferometría holográfica

La base de la interferometría holográfica (IH) es la posibilidad de almacenar dos frentes de onda diferentes en un mismo holograma^{4,5}. Si estos dos frentes de onda pertenecen a dos estados de deformación diferentes de un objeto, en el momento de la reconstrucción interferirán entre sí, dando lugar a una figura de interferencias que pondrá de manifiesto las deformaciones de forma cuantitativa, así como los posibles puntos débiles de dicha estructura. En la figura 6 se ha representado una esquematización de la técnica y una figura característica de lo que puede obtenerse en un caso real.

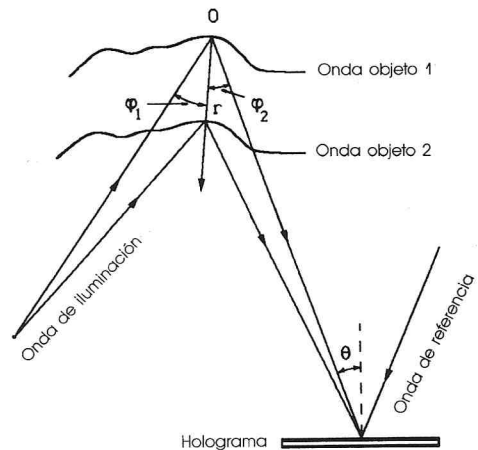


Fig. 6. (a) Esquema de la técnica de interferometría holográfica. (b) Figura representativa de lo que se puede obtener en un caso real.

Las aplicaciones de IH son innumerables, un ejemplo inmediato puede ser el análisis de la deformación mecánica en las cercanías del anclaje de un tornillo a cualquier pieza, como en las alas de un avión. El análisis interferométrico detecta, por simple visualización, los posibles puntos débiles de la estructura analizada.

En el caso del diseño óptico, la interferometría holográfica tiene una aplicación directa en el cálculo y control no destructivo de cualquier superficie óptica, así como de las posibles aberraciones que dicho sistema presente.

De las ventajas que presenta la interferometría holográfica sobre la interferometría convencional pueden destacarse tres: En primer lugar, no es necesario la utilización de superficies de referencia para tener «pruebas de nulo». En segundo lugar, es posible analizar sistemas de tamaños que con los sistemas interferométricos convencionales sería costosísimo. En tercer lugar, el análisis y procesado de la información puede llevarse a cabo en tiempo real y de forma no destructiva. Estas características hacen que la IH sea, en este momento, el método de control no destructivo que más se utiliza, pudiéndose aplicar desde al análisis de vibraciones de un altavoz hasta al de las deformaciones térmicas de planchas y objetos de cualquier tamaño.

El rango de eficacia de esta técnica va desde $0,1 \mu\text{m}$, hasta aproximadamente las $500 \mu\text{m}$, y la información que de ella se puede extraer va desde la simple inspección visual de grietas o puntos de rotura, hasta la forma de la superficie del objeto, con una precisión en algunos casos de $\lambda/200$, lo que nos lleva a errores despreciables en la medida.

4. Aplicaciones a la óptica oftálmica

Una vez descritos los elementos y técnicas holográficas que pueden ser útiles a la óptica oftálmica, resulta interesante centrarse un poco más en los casos particulares de aplicación a este campo, empezando por los elementos ópticos holográficos.

4.1. Aplicaciones de los elementos ópticos holográficos

Una de las aplicaciones importantes que presentan los EOHs es el poder ser utilizados como sistemas correctores de los sistemas ópticos convencionales, consiguiendo aumentar el campo o corregir aberraciones que con la óptica convencional plantearían nuevos problemas a corregir.

Pueden citarse también los sistemas de barrido⁶, capaces también de enfocar, los espejos⁷ que actúan como filtros, los concen-

tradores solares⁸, los filtros de anchura de banda controlable, los sistemas de colimación⁹, los acopladores de fibras¹⁰, y un largo etc. que hace que cada día se obtenga una nueva aplicación de los elementos ópticos holográficos.

En la figura 7 puede verse un sistema desarrollado en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante¹¹ y que sirve tanto de filtro como de colimador. Una de sus aplicaciones es su utilización como sistema óptico en el análisis de aberraciones de sistemas convencionales mediante el método de Ronchi¹². Este método consiste en situar, en las proximidades del foco del sistema óptico a analizar, una red de difracción de frecuencia espacial adecuada, apareciendo, justo detrás de la misma, la interferencia del orden cero de difracción con el orden $+1$, dando la figura de interferencias correspondientes. Esta figura, una vez analizada, proporciona información sobre la aberración de onda que dicho sistema posee. Además, como se puede deducir, en este caso es posible trabajar por completo con óptica holográfica, siendo el sistema a analizar un sistema convencional.

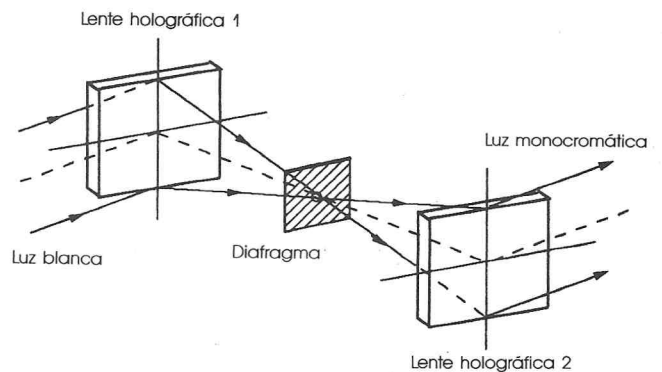


Fig. 7. Sistema óptico holográfico desarrollado en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante y que sirve tanto de filtro como de colimador.

Los EOH han hecho posible realizar sistemas ópticos que son difíciles de fabricar con la óptica convencional por su elevado coste. Este es el caso de los interferómetros. En la figura 8 se muestra un ejemplo de interferómetro holográfico que permite analizar campos de 5 cm de diámetro teniendo un coste muy pequeño¹³.

Se deduce que, donde en la actualidad se encuentra un sistema óptico convencional, es

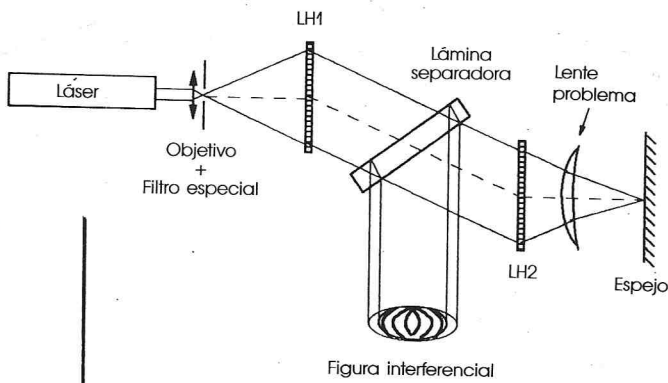


Fig. 8. Interferómetro holográfico.

posible realizar su sustitución por uno holográfico. Sin embargo, en algunos casos los sistemas holográficos han aportado nuevas posibilidades, tal es el caso de los visores holográficos¹⁴, sistemas que permiten en la actualidad presentar al piloto de un avión la imagen de sus paneles de mando e indicadores al tiempo que no necesita mover la cabeza para verlos, dado que se les presentan como imágenes virtuales en el campo propio de visión, lo que hace que el sujeto no se distraiga en ningún momento. Hoy en día estos sistemas se están desarrollando para ser colocados en coches. No obstante, estos conjuntos de sistemas están planteando nuevos problemas en la visión que no han sido analizados todavía en profundidad y que son un campo nuevo de actuación y estudio.

En el campo de la visión también existen aplicaciones holográficas, tal es el caso de las gafas protectoras que actúan como filtros para las radiaciones láser y que en este momento son una realidad¹⁵.

Desde el punto de vista de la formación de imágenes, los sistemas holográficos, como ya se ha mencionado, presentan una fuerte aberración cromática así como fuertes cantidades de aberración esférica, coma y astigmatismo¹⁶, no obstante, es posible diseñar sistemas que tengan corregidas algunas de estas aberraciones. Los EOH deben considerarse como una alternativa más a la solución de problemas que se encuentran en el diseño, cálculo y fabricación de instrumentos ópticos.

4.2. Aplicaciones de la interferencia holográfica

En la figura 8 se ha representado una posible configuración para el cálculo del frente de

onda producido por un sistema multifocal, mediante interferometría holográfica en tiempo real, y con una precisión de $0,1 \mu\text{m}$. En este caso sería posible analizar las posibles deformaciones debidas a la variación de la temperatura¹⁷, así como la calidad de la imagen, una vez conocido el frente de onda y obtenidas las deformaciones. Aunque se específica que es un sistema multifocal, puede ser analizado cualquier sistema corrector. Los resultados de este estudio serían muy importantes para el posterior desarrollo de dichos sistemas ópticos correctores.

En la figura 9a se muestran un conjunto de fotografías de la forma del frente de onda de un sistema multifocal, obtenidas con el sistema interferométrico de la figura 8. El conjunto de fotografías corresponden a una zona de la lente cuando ésta se gira alrededor del eje óptico. Como puede verse, la forma e inclinación de las franjas de interferencia varía considerablemente debido a su no simetría de revolución (fig. 9b).

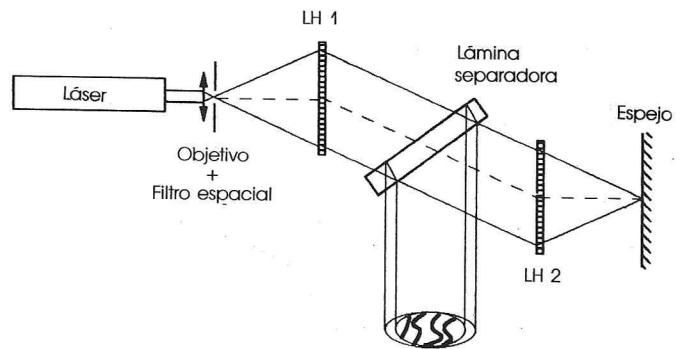
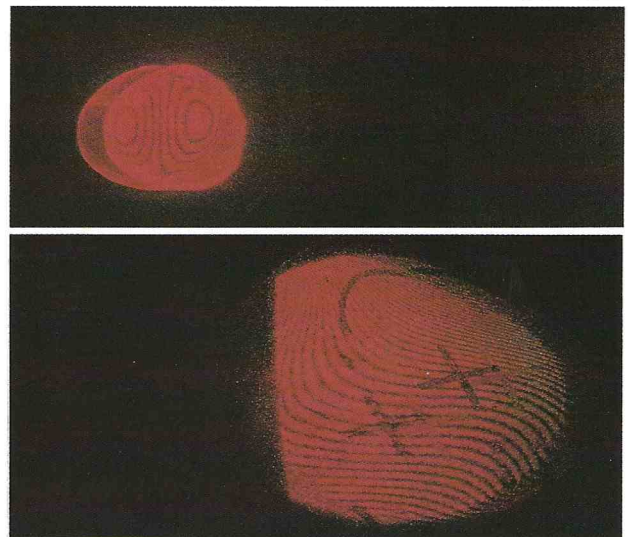


Figura interferencial

Fig. 9. (a) Fotografías de la forma del frente de onda de un sistema multifocal obtenidas mediante el sistema interferométrico de la figura 8. (b) Esquema del dispositivo interferométrico con la lente a analizar.

En la tabla I se presenta un resumen de un conjunto de aplicaciones que pueden tener, en general, tanto los sistemas que se obtienen de la Holografía como de ella misma.

La posibilidad de recubrir superficies ópticas convencionales con capas fotosensibles en las que se almacenen elementos ópticos holográficos que permitan la corrección de aberraciones en los sistemas convencionales, así como aumentar los campos de visión, es algo de lo que ya se está hablando y planteando y que sin duda abrirá un campo nuevo a la óptica oftálmica.

Tabla I. Resumen de las operaciones de la holografía y de los sistemas holográficos

Hogramas decorativos
Lentes holográficas
Espejos holográficos
Redes de difracción
Filtros espectrales
Concentradores solares
Sistemas de barrido
Visores holográficos
Ensayos no destructivos
Interferómetros
Procesado de imágenes
Sistemas de seguridad
Interconectores ULSI
Ópticos
Interconectores de fibras ópticas

5. Conclusiones

Es posible decir que la holografía, como técnica que une los fenómenos de interferencia y difracción, permite realizar sistemas holográficos y analizar los convencionales de forma tal, que es posible el avance de la tecnología de los sistemas correctores de visión.

Se abre un campo nuevo en la fabricación y diseño de sistemas ópticos de corrección, que en este momento puede intuirse aunque no se conozca del todo, dadas las grandes posibilidades que se vislumbran.

Por último, parece evidente que la holografía debe entrar a formar parte de la formación básica de todo óptico que quiera vivir en los

momentos actuales de la técnica; eso sí, en su justa medida y entendiéndose que, comparativamente, es una técnica muy joven respecto de las convencionales tan extendidas y de probada valía que existen en la actualidad.

Agradecimientos

Parte de este texto fue presentado en el «XI Congreso Nacional de Óptica y Optometría y VIII Internacional de Lentes de Contacto» celebrado en Alicante en marzo de 1990. Los autores expresan su agradecimiento a la comisión organizadora de dicho Congreso.

BIBLIOGRAFÍA

- Gabor D, A New Microscopic Principle. *Nature* 1984; 161:777.
- Collier RJ, Burckhart CB, Lin LH. *Optical Holography*. Academic Press, New York, 1971 cap. 1 y 2.
- Close DH. *Holographic Optical Elements*. *Opt Eng* 1975; 14:408.
- Powell RL, Stetson KA. Interferometric Vibration Analysis of Three-Dimensional Objects by Wavefront Reconstruction. *J Opt Soc Am*; 1965; 55: 612.
- Vest CM *Holographic Interferometry* John Wiley & Sons, New York, 1979.
- Sincerbox G. *Laser Beam Scanning*. Ed Marshall GF. Marcel Dekker, Inc., New York, 1985, cap. 1.
- Magariños JR, Coleman DJ, *Holographic Mirrors*. *Opt Eng* 1985; 24: 769.
- Bloss WH, Griesinger M, Reinhart ER. Dispersive Concentrating Systems based on Transmissions Phase Holograms for Solar Applications. *Appl Opt*. 1982; 21: 3.739.
- Beléndez A, Pascual I, Fimia A. Holographic Collimator of 200 mm diameter in Silver Halide Sensitized Gelatin. *J Optics*. En prensa.
- Soares ODD. *Holographic Coupler for Waveguide Arrays*. Ph. D. Thesis, University of London, 1976.
- Beléndez A, Pascual I, Fimia A. Imaging in White Light with a Thick-Phase Transmissions Holographic Doublet. *J Optics* 1989; 20:263.
- Cornejo-Rodríguez A. *Optical Shop Testing*. Ed Malacara D. John Wiley & Sons, New York, 1979.
- Proyecto desarrollado en el «Laboratorio de Óptica» de la Universidad de Alicante.
- Mc Cauley, DG, Simpson, CE, Murbach WJ. *Holographic Optical Elements for Visual Display Applications*. *Appl Opt* 1973; 12:232.
- Magariños JR. *Espejos Ópticos Holográficos*, Tesis Doctoral. Universidad de Santiago, 1984.
- Latta JN, *Computer-Based Analysis of Hologram Imagery and Aberrations I: Hologram Types and Their Nonchromatic Aberrations*. *Appl Opt*. 1971; 10:599.
- Fuentes R. *Análisis de Deformaciones Térmicas por Interferometría Holográfica en Tiempo Real*. Memoria de Investigación, Departamento Interuniversitario de Óptica, Universidad de Alicante, 1990.