

*Las principales aplicaciones de la Holografía, junto con una sencilla presentación de los conceptos básicos y una descripción de los medios del registro holográficos.*

# HOLOGRAFIA: CONCEPTOS BASICOS, MATERIALES DE REGISTRO Y APLICACIONES

A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia

## ABSTRACT

In last years the scientist have been interested in Holography. For this reason, in this paper we briefly develop the essential concepts, holographic recording materials and main applications of Holography. References included permit to introduce to interested reader in each of the treated topics.

## RESUMEN

La Holografía ha despertado en estos últimos años un gran interés en la Comunidad Científica. Por este motivo, en este artículo se presentan, brevemente, los conceptos básicos, los materiales de registro holográficos y las principales aplicaciones de la Holografía. Las referencias que se incluyen pretenden ser una introducción a cada uno de los temas tratados.

## 1.- INTRODUCCION

La fotografía era hasta 1948 la forma clásica de registrar imágenes permanentes de objetos luminosos. A partir de ese año las investigaciones llevadas a cabo por Gabor [1] en el "Research Laboratory" de la "British Thompson-Houston Company" dieron lugar al nacimiento de una técnica, la Holografía, cuyo desarrollo continúa en la actualidad. La investigación de Gabor, por la que recibió el Premio Nobel de Física en 1971, tuvo como motivación una mejora en la microscopía electrónica. Aunque su trabajo generó en principio mucho interés, permaneció casi inadvertido durante casi quince años, y fue a principio de la década de los sesenta cuando resurgió el interés por esta "técnica de la reconstrucción del frente de onda", gracias a la invención del láser la Holografía se transformó en un tema de investigación prioritario y con múltiples aplicaciones científicas y tecnológicas.

La Holografía es un método de producción de imágenes tridimensionales en dos etapas (registro y reconstrucción). Mediante el proceso de registro se almacena en determinados medios fotosensibles la información ne-

cesaria, en forma de franjas de interferencia, para posteriormente reconstruir un frente de onda idéntico al que dio lugar a esa información. El medio fotosensible ya impresionado (y procesado en algunos casos), soporte de esta información, constituye el holograma (del griego "holos" que significa la totalidad).

En la primera etapa del método holográfico (el registro) se hacen interferir las ondas emitidas por cada uno de los puntos del objeto, con un haz de referencia. Debido a esta interferencia se produce una distribución de amplitud o fase (según los casos) quedando la placa transformada en un holograma. En la segunda etapa (la reconstrucción) se ilumina el holograma con un haz similar al de referencia empleado en el registro, obteniéndose la imagen tridimensional del objeto.

Al hablar del proceso holográfico nos hemos referido a la interferencia entre dos o más ondas, por tanto, en éste se tendrán que satisfacer las condiciones de coherencia necesarias para la formación de dichas interferencias, tanto coherencia espacial como temporal. Por otra parte, el poder de resolución del medio de registro debe ser elevado, pues las franjas de interferencia suelen tener separaciones del orden de  $1 \mu\text{m}$ . Estos órdenes de magnitud implican una ausencia total de movimientos y vibraciones de los elementos que intervienen en la formación del holograma.

Todos estos requisitos han condicionado los avances de la Holografía a la aparición de fuentes de luz suficientemente coherentes, y nuevos materiales de registro para la realización de hologramas, así como el perfeccionamiento de los existentes.

El desarrollo del láser a partir de 1962 resolvió la primera de estas dificultades, mientras que la segunda se fue superando paulatinamente con la utilización de la emulsión fotográfica, las fotorresinas, las gelatinas dicromatadas y diversos fotorpolímeros; medios estudiados, optimizados y utilizados en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Alicante. También se han ensayado como medios de registro los cristales ferroeléctricos, los fototeroplásticos y los materiales fotocromáticos inorgánicos. Es precisamente una descripción de los medios de registro holográficos junto con una sencilla presentación de los conceptos básicos y las principales aplicaciones de la Holografía, los aspectos que se van a tratar en este trabajo.

## 2.- EL PROBLEMA DE LA RECONSTRUCCION DEL FRENTE DE ONDA

Como ya se ha mencionado, puede decirse de forma sencilla, que el método holográfico consta de dos operaciones bien diferenciadas: el **registro** o almacenamiento de la información en el material holográfico, basado en un proceso interferencial, y la **reconstrucción** de dicha información, realizada mediante procesos de difracción.

El registro del holograma [2] consiste en el almacenamiento de la figura interferencial correspondiente a la interferencia de dos ondas, una que recibe el nombre de "onda objeto", y es la que en realidad transporta toda la información que se desea almacenar, y la otra, la "onda de referencia", la cual no guarda ninguna relación con esta información, y en general es una onda plana o esférica.

Para un análisis simple, consideremos un objeto iluminado mediante un haz de luz coherente (figura 1). Este objeto difunde parte de la luz incidente y esta luz dispersada constituye la onda objeto que puede caracterizarse mediante la función compleja (campo eléctrico de la onda objeto):

$$E_O = E_O \exp(-i\phi_O) \quad (1)$$

donde  $E_O$  es la amplitud de la onda y  $\phi_O$  su fase. Esta onda objeto se hace interferir con la onda de referencia:

$$E_R = E_R \exp(-i\phi_R) \quad (2)$$

En la superficie de la placa fotosensible:

$$E = E_O + E_R = E_O \exp(-i\phi_O) + E_R \exp(-i\phi_R) \quad (3)$$

La intensidad resultante en cada punto del plano del holograma, correspondiente a la suma de ambas ondas, puede escribirse como:

$$I = |E_O + E_R|^2 \quad (4)$$

Sustituyendo en esta expresión las ecuaciones (1) y (2) queda:

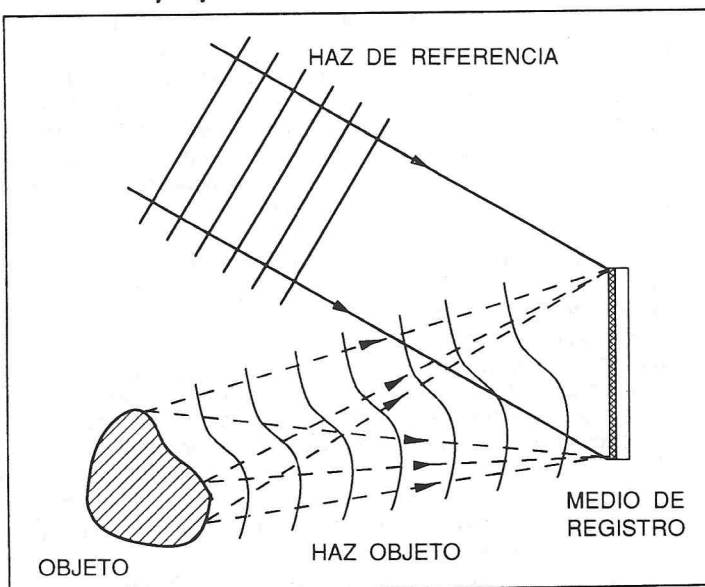
$$I = |E_O|^2 + |E_R|^2 + E_O E_R [\exp i(\phi_O - \phi_R) + \exp i(\phi_R - \phi_O)] \quad (5)$$

y finalmente:

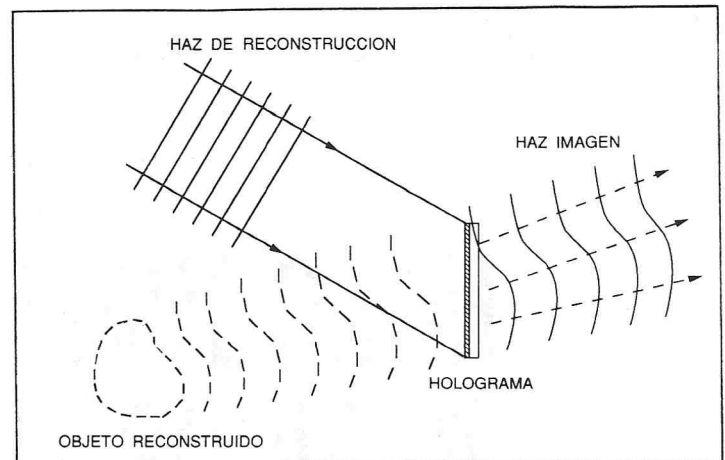
$$I = |E_O|^2 + |E_R|^2 + 2 E_O E_R \cos(\phi_R - \phi_O) \quad (6)$$

Mientras que los dos primeros términos de esta expresión dependen solamente de las intensidades de estas ondas, el tercero depende de la diferencia de sus fases. La ecuación (6) confirma que la distribución de

**Figura 1.- Registro de un holograma mediante la interferencia de una onda objeto y una onda de referencia.**



intensidades en el medio de registro no es uniforme sino que está modulada por el término " $\cos(\phi_R - \phi_O)$ ", es decir, se tiene una figura interferencial. Esta distribución de energía impresiona el material fotosensible, quedando grabado en éste el patrón de interferencia de los dos frentes de onda.



**Figura 2.- Reconstrucción de la imagen holográfica iluminando el holograma mediante una onda de reconstrucción similar a la onda de referencia utilizada en la etapa de registro.**

En el proceso fotográfico la imagen de un objeto se focaliza sobre la placa fotográfica, y se registra sólo información sobre la amplitud, perdiéndose el carácter tridimensional de los objetos, sin embargo en la Holografía, al registrarse la amplitud y la fase, puede observarse el objeto en tres dimensiones. La diferencia básica con la fotografía es que ahora en vez de registrarse la imagen de un objeto se registra la onda misma. Además, mientras que en la fotografía existe una correspondencia punto a punto entre el objeto y la imagen, en Holografía, como en general no se utilizan lentes, a cada punto del holograma llega información de todos los puntos del objeto. Cada uno de los puntos de un holograma recibe información de todo el objeto, por lo que una pequeña porción del holograma es suficiente para reproducirlo en su totalidad. Observado con luz incoherente, un holograma aparece como una superficie uniforme con estructura microscópica irregular; el sistema de franjas de interferencia es de hecho extremadamente apretado y complejo.

El proceso de registro, sin embargo, no es tan sencillo pues entran en juego muchos factores tales como la respuesta del medio fotosensible (en general "no lineal"), así como el procesado (químico o físico) necesario en algunos materiales y que puede alterar en gran medida la estructura interna de franjas.

En la etapa de reconstrucción se ilumina el holograma adecuadamente con una onda similar a la de referencia empleada en su registro. La difracción de esta onda a través del sistema de franjas originará una serie de ondas iguales a las provenientes del objeto original tal y como si estuvieran saliendo de éste (figura 2). Si se utiliza como medio de registro una emulsión fotográfica, 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 -y por tanto proporcional a la intensidad  $I$  que impresionó la placa durante el registro-, al iluminar el holograma con la "onda de reconstrucción", idéntica a la de referencia dada en la ecuación (2), el holograma transmitirá una onda de amplitud compleja  $T \cdot E_R$ , y teniendo en cuenta de ecuación (6), queda:

$$\begin{aligned} T \cdot E_R &\propto I \cdot E_R \exp(-i\phi_R) = \\ &= |E_O|^2 E_R \exp(-i\phi_R) + |E_R|^2 E_R \exp(-i\phi_R) + \\ &+ (E_O E_R) E_R \exp i(\phi_O - 2\phi_R) + (E_O E_R) E_R \exp(-i\phi_O) \end{aligned} \quad (7)$$

Al campo resultante contribuyen cuatro términos de los cuales el cuarto,  $(E_O E_R) E_R \exp(-i\phi_O)$ , es proporcional a la onda objeto original. Entonces, mirando por detrás del holograma se verá una imagen igual a la del objeto situada en la misma posición en la que estaba originalmente ese objeto, y además se ve en relieve, lo que no ocurre con la imagen obtenida por medio de una cámara fotográfica usual.

### 3.- TIPOS DE HOLOGRAMAS

Pueden hacerse varias clasificaciones en función de los distintos parámetros que intervienen en la realización del holograma.

Desde un punto de vista puramente geométrico se habla de **hologramas en eje** (Gabor), en los cuales la dirección de los haces objeto y referencia es la misma, y **hologramas fuera de eje** (Leith-Upatniecks) [3] donde las direcciones entre estos haces forman un cierto ángulo.

Si además de la dirección de los haces se considera el sentido de los mismos, se puede hablar de **hologramas por transmisión** y **hologramas por reflexión**. En los primeros, el sentido de los haces es el mismo, es decir, las dos ondas inciden sobre la misma cara del material (figura 3). En cambio, si al incidir sobre el material, los haces entran desde lados opuestos (distinto sentido), el holograma resultante se dice que actúa por reflexión (figura 4).

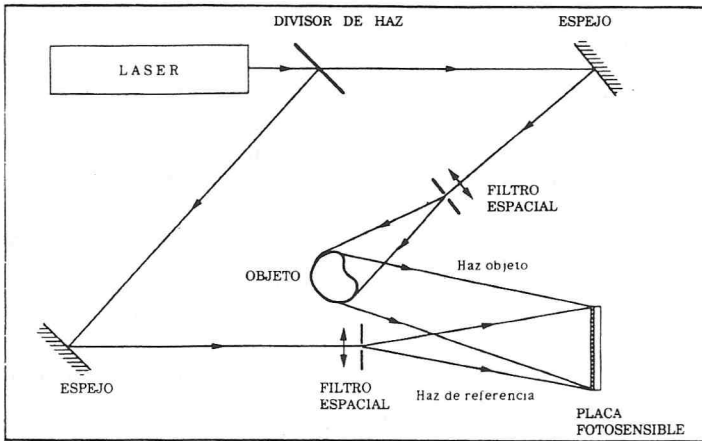


Figura 3.- Registro y reconstrucción de un holograma por transmisión. La situación esquematizada también corresponde a un holograma de volumen en el que la distancia entre los planos de interferencia es del mismo orden de magnitud que el espesor del medio de registro.

Desde el punto de vista del medio de registro pueden establecerse clasificaciones diferentes. Se habla de hologramas de amplitud y de fase. Un **holograma de amplitud** modifica la amplitud de la onda de reconstrucción que incide sobre el mismo, mientras que un **holograma de fase** modifica la fase de dicha onda.

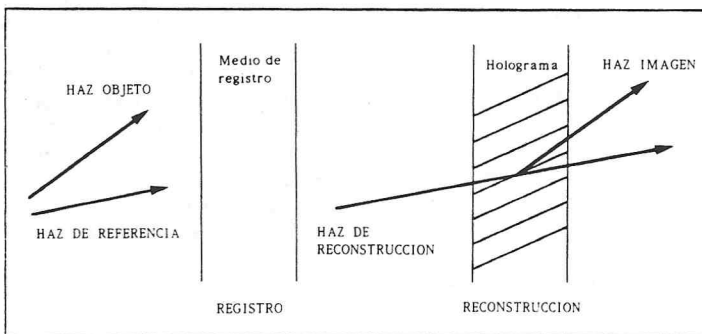


Figura 4.- Registro y reconstrucción de un holograma por reflexión. La situación esquematizada también corresponde a un holograma de volumen en el que la distancia entre los planos de interferencia es del mismo orden de magnitud que el espesor del medio de registro.

Si se tiene en cuenta el espesor del medio de registro y el espaciado entre las franjas de interferencia registradas en dicho medio, podemos distinguir entre **hologramas planos**, en los que dicho espaciado es despreciable frente al espesor del holograma (en esta situación el holograma se comporta como un medio de dos dimensiones), y **hologramas de volumen**, cuando este espaciado no puede despreciarse frente al espesor del material, apareciendo efectos de selectividad angular y espectral en la reconstrucción. Esta diferencia se hace nítida si utilizamos para caracterizar-

los el factor adimensional  $Q$  definido mediante la relación [4]  $Q = 2\pi\lambda d/n\Lambda^2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío,  $d$  es el espesor del medio de registro,  $n$  su índice de refracción y  $\Lambda$  el espaciado de las franjas de interferencia en el medio medido normalmente a las superficies de éstas. Cuando un holograma posee un factor  $Q \geq 10$  se considera de volumen. El haz difractado depende en gran medida del incidente debiéndose cumplir la ley de Bragg [5], similar a la que gobierna los fenómenos de difracción de rayos X por estructuras cristalinas.

Estas clasificaciones no son excluyentes, así, por ejemplo, puede tenerse un holograma fuera de eje de volumen por transmisión y de fase.

### 4.- FUENTES DE ILUMINACION

Un problema importante de la Holografía reside en la dificultad que existe para obtener una onda de referencia capaz de producir unas interferencias con la onda objeto que sean contrastadas y al mismo tiempo estables, al menos durante el tiempo que dura el proceso de registro. Si esto no es así, la imagen será de calidad deficiente y de pobre luminosidad. En la época en que Gabor descubrió la Holografía las fuentes luminosas disponibles tenían poca coherencia. Los primeros hologramas se obtuvieron utilizando una lámpara de vapor de mercurio con un filtro que sólo dejaba pasar radiación correspondiente a un pequeño intervalo de longitudes de onda. Los resultados iniciales no fueron muy espectaculares, y sólo a partir de 1962, fecha en la que aparecieron los primeros láseres comerciales, la Holografía empezó a desarrollarse en forma acelerada.

El láser [6] constituye el único dispositivo capaz de generar un haz de luz intenso con un alto grado de coherencia, tanto temporal como espacial, lo que le convierte en el elemento fundamental de cualquier dispositivo holográfico.

En la figura 5 se muestra un montaje típico de registro de un holograma utilizando como fuente de luz un láser.

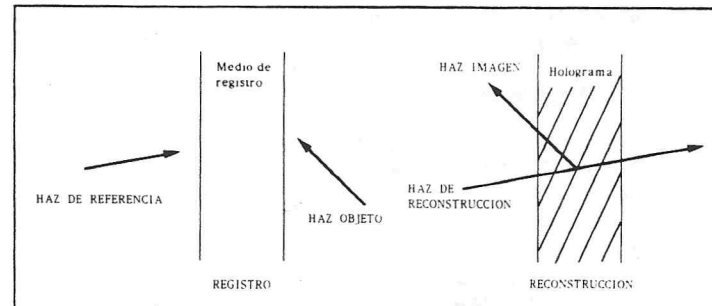


Figura 5.- Esquema de un montaje típico para el registro de un holograma.

### 5.- MEDIOS DE REGISTRO HOLOGRAFICOS

Los medios de registro susceptibles para la formación de hologramas [7] deben ser tales que la exposición, y el posterior revelado (en caso de que lo haya), de dichos materiales, altere las propiedades ópticas de los mismos. En el caso más general, el material de registro debe responder a la exposición con un cambio en su constante de absorción,  $\alpha$ , en su índice de refracción,  $n$ , o en su espesor,  $d$ . Teniendo esto en cuenta, pueden considerarse tres tipos de materiales de registro: absorción, índice y espesor, al ser estas propiedades físicas las que responden en cada uno de los casos cuando se expone a la luz el medio de registro. Al material ya impresionado y procesado (lo que constituye el holograma) se le denomina holograma de amplitud y holograma de fase, según varíe la amplitud o la fase, respectivamente, de una onda que incidiera sobre el mismo.

#### 5.1.- Materiales de absorción

La constante de absorción  $\alpha$  depende de la exposición de modo que las franjas de interferencia se registran como una variación espacial de su absorción de luz. Como ejemplos podemos citar las emulsiones fotográficas de haluro de plata y los cristales fotocromáticos.

La **emulsión de haluro de plata** [7] consta de granos extremadamente pequeños de haluro, dispersos en una base de gelatina. Dicha emulsión se extiende sobre un sustrato transparente que puede ser una placa de vi-

drio o una película de acetato flexible. El espesor de la emulsión suele ser del orden de 10  $\mu\text{m}$ .

Cuando incide sobre la emulsión una distribución de irradiancia no uniforme, los cristales que absorben luz quedan marcados formándose una imagen latente. Posteriormente esta imagen latente se procesa químicamente en varios baños, apareciendo una imagen visible. El procesamiento químico del material impresionado se lleva a cabo en varias etapas. En la primera, o revelado propiamente dicho, los granos de haluro de plata impresionados se convierten en plata metálica, produciendo una imagen visible. A continuación, y mediante un baño de paro, se neutraliza la acción del revelador. Seguidamente, el baño fijador disuelve los haluros de plata que no se impresionaron. Finalmente se lava bien la placa con agua corriente.

Los hologramas obtenidos en emulsiones fotográficas absorben gran cantidad de luz del haz de reconstrucción y en consecuencia la luminosidad de la imagen es baja. Por contra, las emulsiones fotográficas tienen una gran sensibilidad tanto energética como espectral y una resolución elevada, de hasta 5000 líneas/mm.

Los **materiales fotocromicos** [8] cuando reciben luz evolucionan entre dos estados de diferente coeficiente de absorción. De entre los materiales que exhiben esta propiedad destacan los cristales inorgánicos, formados por materiales aislantes o semiconductores con gran diferencia de energía entre los estados de valencia y de conducción. La presencia de impurezas hace que aparezcan defectos en la red cristalina que actúan como centros de color responsables de la absorción de radiación visible. Los más utilizados en Holografía son el fluoruro de calcio y los haluros alcalinos. No necesitan ningún tipo de procesamiento para poner de manifiesto la imagen almacenada, pues la distribución de irradiancia se traduce directamente en variaciones del coeficiente de absorción. Poseen una resolución de unas 3000 líneas/mm y son reutilizables, ya que al absorber la radiación pasan a un estado excitado, siendo la vuelta al estado fundamental espontánea. Sin embargo, son de difícil fabricación, pues hay que obtener cristales grandes (de algunos centímetros) y controlar el tipo y la distribución homogénea de las impurezas por todo el cristal. Son muy sensibles a las condiciones ambientales, sobre todo a la humedad.

## 5.2.- Materiales de índice

El índice de refracción  $n$  depende de la exposición y las franjas de interferencia se registran como una modulación espacial del mismo. El material de índice suele ser casi transparente por lo que  $\alpha \approx 0$ .

Materiales de índice son las gelatinas dicromatadas, los fotopolímeros y los cristales ferroeléctricos. También pueden considerarse en este apartado las emulsiones fotográficas blanqueadas y las gelatinas sensibilizadas de haluro de plata en las que, partiendo de un material de absorción se obtiene finalmente un holograma de fase.

La **gelatina dicromatada** se viene utilizando para obtener hologramas de volumen y de fase [9] por su gran rendimiento en difracción (relación entre las intensidades difractada e incidente) y su bajo ruido (luz parásita que se superpone a la imagen, disminuyendo el contraste) [10].

El proceso de obtención de la gelatina dicromatada [7, 8] consiste en sensibilizar las gelatinas en un baño de dicromato amónico. Cuando sobre el material incide una distribución de irradiancia no uniforme, los  $\text{Cr}^{+6}$  de la gelatina dicromatada impresionados pasan a  $\text{Cr}^{+3}$  que se enlazan fuertemente a la gelatina (entrelazado de cadenas), lo que da lugar a una modificación del endurecido de la capa y a una variación del índice de refracción. El proceso de amplificación consiste, fundamentalmente, en un lavado en agua que favorece la eliminación de los iones  $\text{Cr}^{+6}$  (débilmente ligados). El agua es absorbida por la gelatina dando lugar a un aumento de volumen. Esta expansión, sin embargo, no es uniforme, sino que es mayor en las zonas donde no se han enlazado los iones  $\text{Cr}^{+3}$ . Los pasos posteriores de deshidratación en baños de alcohol isopropílico completan el proceso de amplificación de la modulación de índice, recuperándose un espesor uniforme de la capa.

La gelatina dicromatada se emplea según convenga en capas cuyo espesor oscila entre 100  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ . La modulación de índice (variación del valor del índice de refracción respecto al valor medio) puede alcanzar valores altos (0'08) o muy bajos (0'001) según convenga. La resolución de las gelatinas dicromatadas es de unas 5000 líneas/mm. Presentan la ventaja de su reproducibilidad hasta obtenerse los resultados deseados. En este medio se pueden obtener imágenes holográficas con una luminosidad muy alta. Sin embargo, presentan el inconveniente de tener baja sensibilidad energética (unas mil veces menor que la correspondiente a las emulsiones

fotográficas). Además, su sensibilidad espectral está prácticamente limitada a las radiaciones de longitudes de onda inferiores a los 550 nm.

Los **fotopolímeros** [11] son sistemas que tienen incorporados en su composición química monómeros que pueden encadenarse para formar polímeros de mayor peso molecular. Sus componentes son el monómero y el fotocatalizador.

Cuando sobre un fotopolímero se hace incidir una distribución de irradiancia no uniforme, los polímeros se generan preferentemente en las zonas de máxima irradiancia, originándose directamente (sin ningún tipo de procesamiento). Esta distribución de polímeros da lugar a una modulación del índice de refracción que es causante del almacenamiento de la información. De entre los compuestos que se emplean como monómeros destacan los acrílicos que utilizan para iniciar la reacción distintos sistemas: generación directa de radicales libres, catálisis foto-redox, etc. Para hacer estos sistemas sensibles a la radiación visible se emplean colorantes apropiados. Su resolución es de unas 3000 líneas/mm y su sensibilidad energética es superior a la de las gelatinas dicromatadas (unas 20 veces más sensible).

Los **materiales ferroeléctricos** [8] basan su funcionamiento en una combinación de fotosensibilidad y efectos electroópticos.

Cuando se irradian con una distribución de luz no uniforme, las zonas de mayor intensidad generan electrones (en casi todos los casos por la presencia de  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{+3} + e^-$ ), que migran a las zonas de menor intensidad. Esta distribución de carga resultante origina una distribución no uniforme de índice de refracción en el seno del cristal. El efecto de cambio de índice es lineal respecto a la irradiancia cuando estos materiales operan cerca de una determinada temperatura, que varía según el material de que se trate.

Compuestos cristalinos que presentan estas características son:  $\text{Li Nb O}_3$ ,  $\text{Bi}_{12} \text{Si O}_{20}$  (BSO),  $\text{Li Ta O}_3$ ,  $\text{K Nb O}_3$ ,  $\text{Ba Ti O}_3$ , etc., destacando por su aplicación a la Holografía el niobato de litio que debe ser fotosensibilizado con impurezas de  $\text{Fe}^{+2}$ .

La información puede ser reconstruida sin necesidad de ningún tipo de procesamiento. Para poder reutilizar el cristal es necesario irradiarlo con luz de una determinada longitud de onda, que depende de cada tipo, para originar una distribución de carga uniforme en todo el cristal. Presentan una alta resolución, 3000 líneas/mm. Sin embargo existen dificultades en el crecimiento de cristales para poder alcanzar los tamaños necesarios (de unos centímetros). La sensibilidad energética es proporcional a la concentración de  $\text{Fe}^{+2}$ , y ésta no puede elevarse demasiado (es diez veces menos sensible que la gelatina dicromatada). La sensibilidad espectral es similar a las de las gelatinas dicromatadas.

Para obtener una **emulsión fotográfica blanqueada** se parte de una emulsión fotográfica; una vez revelada, se somete a un baño de blanqueo que reconvierte la plata precipitada en haluros de plata transparentes de índice de refracción muy superior al de la gelatina. Este procedimiento de blanqueo recibe el nombre de blanqueo de rehalogenación sin fijado [12]. También existen otros tipos de blanqueo sin fijado como es el solvente e incluso, en otros procedimientos de blanqueo, existe una etapa de fijado posterior a la de revelado y previa al blanqueo. La elevada transparencia de estos hologramas permite que la luminosidad de la imagen sea unas diez veces mayor que en los hologramas de amplitud. La desventaja principal es que aparece luz de fondo difundida por el propio holograma que resta calidad a la imagen.

Para una emulsión que se va a blanquear se necesita una exposición considerablemente mayor que en el caso en que no vaya a serlo. De esta forma se obtiene un holograma de fase, a partir de un medio de absorción, con una gran luminosidad, sin embargo presentan poca estabilidad a la luz, así como un alto nivel de ruido [13].

Las **gelatinas sensibilizadas de haluro de plata** constituyen un método híbrido en el cual se parte de un material de absorción, una emulsión fotográfica, para obtener finalmente una gelatina dicromatada [14]. En él se combina el blanqueo correspondiente a las emulsiones fotográficas con el procesamiento de las gelatinas dicromatadas. Se une así alta sensibilidad energética y espectral de la emulsión fotográfica con los altos rendimientos en difracción y bajos niveles de ruido de las gelatinas dicromatadas [15].

## 5.3.- Materiales de espesor

El espesor  $d$  del material depende de la exposición y las franjas de interferencia se registran como una modulación del mismo. En estos materia-

ies, como en los de índice, también la constante de absorción es prácticamente nula. Medios de espesor son las fotorresinas y los fototermoplásticos.

Las **fotorresinas** [7] son resinas sintéticas sensibles a la luz en determinadas condiciones de iluminación y de su estado físico. Sus propiedades ópticas se deben a la modificación que experimentan sus estructuras moleculares al polimerizarse o reticularse por acción de la luz. Debido a la existencia de esta estructura molecular las fotorresinas pueden alcanzar alto poder resolutivo (3000 líneas/mm).

Según sea su comportamiento frente a la luz pueden distinguirse dos tipos de fotorresinas: negativas y positivas. En las primeras, la parte expuesta a la luz permanece después del revelado. Mientras que en las positivas las partes que reciben energía luminosa rompen sus enlaces entre dos cadenas de polímeros, liberando radicales ácidos, de manera que después de la exposición el proceso de revelado, fundamentalmente básico, permite eliminar la fotorresina impresionada. Aprovechando esta propiedad se obtiene en las fotorresinas un registro de distribución de energía luminosa bajo la forma de diferencias de espesor. El rango de sensibilidad espectral es inferior a 500 nm, mientras que la sensibilidad energética es cinco veces menor que la correspondiente a la gelatina dicromatada.

En los **fototermoplásticos** [7] la distribución de irradiancia que reciben se transforma en una variación de espesor. El fototermoplástico se deposita sobre un sustrato transparente, generalmente vítreo. Sobre dicho sustrato se coloca una primera capa conductora, siendo el material más utilizado el óxido de indio. Sobre ésta, se sitúa el fotoconductor orgánico. El poli-n-vinil carbazol (PVK) sensibilizado con verde brillante (2,4,7 trinitro-9-fluorenona (TNF)), es el producto empleado más frecuentemente. El termoplástico es la capa más externa y uno de los que ofrecen mejores resultados es un copolímero de 85% de estireno y 15% de octil-decil-metacrilato.

| Medio de registro         | Sensibilidad energética relativa | Sensibilidad espectral (nm) | Resolución (líneas/mm) |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Emulsiones fotográficas   | 1                                | 400-700                     | 5000                   |
| Cristales fotocromicos    | $5 \times 10^{-3}$               | 300-700                     | 3000                   |
| Gelatines dicromatadas    | $10^{-3}$                        | 400-550                     | 5000                   |
| Fotopolimeros             | $2 \times 10^{-2}$               | 400-700                     | 3000                   |
| Cristales ferroelectricos | $10^{-4}$                        | 400-500                     | 3000                   |
| Fotorresinas              | $2 \times 10^{-4}$               | 400-550                     | 3000                   |
| Fototermoplásticos        | 0.2                              | 400-570                     | 2000                   |

**Tabla I.- Sensibilidad y resolución de los diferentes medios de registro holográficos.**

En primer lugar se coloca toda la superficie del termoplástico (capa más externa) a un potencial eléctrico constante respecto del conductor (proceso de carga). Cuando el fotoconductor se somete a una distribución de irradiancia no uniforme, en las zonas donde mayor es la intensidad el fotoconductor absorbe la radiación y se producen cargas eléctricas que originan respecto a la capa del termoplástico (cargada uniformemente) una distribución de tensiones electrostáticas. Cuando el sistema se lleva a una

|   | AMPLITUD       |           |             | FASE           |                |      |
|---|----------------|-----------|-------------|----------------|----------------|------|
|   | PLANO          | VOLUMEN   |             | PLANO          | VOLUMEN        |      |
|   | REFL. Y TRANS. | REFLEXION | TRANSMISION | REFL. Y TRANS. | REFL. Y TRANS. |      |
|   |                |           |             | Sinusoidal     | Blazed         |      |
| Máximo rendimiento en difracción teórico  | 6.25           | 7.2       | 3.7         | 33.9           | ~100           | 100  |
| Rendimiento en difracción experimental  | 4.0            | 3.8       | 3.0         | 33             | 73             | 85   |
| Ejemplos típicos de materiales de registro para estos hologramas  | A, B           | A, B      | A, B        | C, D, E        | E              | C, F |
| (A) Emulsiones fotográficas de haluro de plata (revelado convencional)<br>(B) Materiales fotocromicos<br>(C) Gelatina dicromatada, emulsiones blanqueadas, gelatinas sensibilizadas de haluro de plata<br>(D) Fototermoplásticos<br>(E) Fotorresinas<br>(F) Fotopolimeros |                |           |             |                |                |      |

**Tabla II.- Rendimiento en difracción (%) de los diversos tipos de hologramas.**

temperatura cercana al punto de fusión del termoplástico, éste se ablanda más o menos en cada punto en función de las tensiones electrostáticas generadas tras la exposición, lo que da lugar a las modificaciones en su espesor.

Puede utilizarse de nuevo el sistema llevándolo a su temperatura de fusión durante un período de tiempo largo, lo que le hace perder esta distribución de espesores. Su resolución está por debajo de las 2000 líneas/mm y su sensibilidad energética es unas doscientas veces mayor que la de la gelatina dicromatada.

En las tablas I y II se han resumido las propiedades fundamentales de los distintos medios de registro que se han presentado.

## 6.- APLICACIONES DE LA HOLOGRAFIA

Los principios de la Holografía se han aplicado con éxito a campos muy distintos, e incluso han abierto nuevos caminos de investigación. Diversas son las aplicaciones que podrían llamarse clásicas de la Holografía. Estas, desarrolladas desde sus comienzos, no son otra cosa que la sustitución e introducción de métodos holográficos en distintos procesos de trabajo utilizados en diferentes áreas (microscopía, almacenamiento de la información, interferometría, elementos ópticos, etc.). Sin embargo, la Holografía ha sido motor del desarrollo de nuevas técnicas, y está sin duda llamada a desempeñar un importante papel en campos de aplicación relacionados con los ordenadores y los nuevos láseres de gran potencia. Este segundo grupo presenta, evidentemente, unas grandes perspectivas de futuro.

En la **microscopía** [16], aplicación para la cual se inventó la Holografía, es posible aumentar la profundidad de campo cuando se emplean grandes aumentos.

En las **memorias holográficas** [17] se almacena la información referida a un objeto, en forma de franjas de interferencia. Presenta ventajas frente a la microfilmación fotográfica, pues en esta última cualquier defecto local hace que se pierda parte de la información, mientras que las memorias holográficas no tienen este problema, ya que la información de cada punto del objeto se reparte en la totalidad del holograma.

La **interferometría holográfica** (IH) es otra de las aplicaciones importantes de la Holografía. Fue presentada por primera vez por Powell y Stetson [18] en 1965 y ha permitido extender el campo de acción de la interferometría clásica. La base de la IH es la posibilidad de almacenar dos frentes de onda diferentes en un mismo holograma. 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

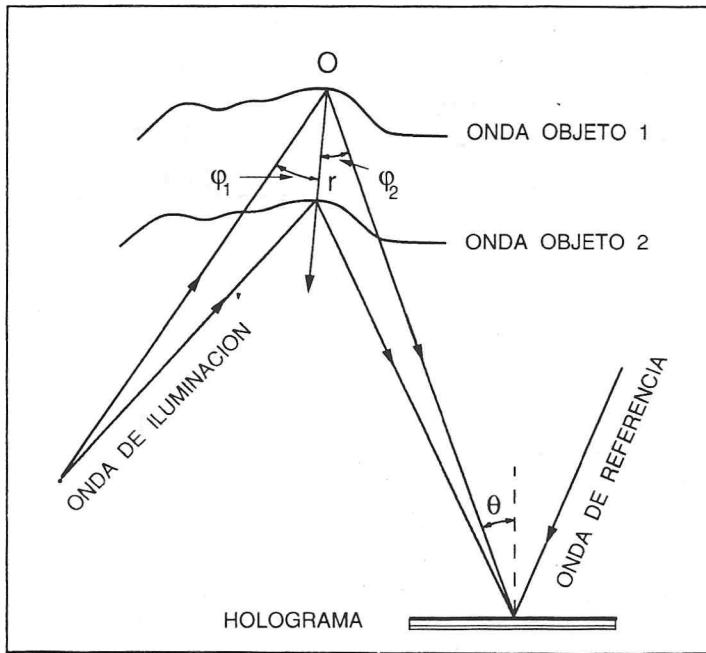


Figura 6.- Esquema de la técnica de interferometría holográfica.

de interferencias que pondrá de manifiesto las deformaciones de forma cuantitativa. En la figura 6 se ha representado una esquematización de la técnica de IH.

La IH presenta ciertas ventajas sobre la interferometría clásica. Puede destacarse la de su sensibilidad, que permite detectar desplazamientos que van desde  $0.1 \mu\text{m}$  hasta aproximadamente  $500 \mu\text{m}$ , así como la posibilidad de visualizar de forma continua las deformaciones que se están produciendo en el objeto a estudiar.

Las aplicaciones de esta técnica 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. Pueden analizarse, asimismo, las vibraciones de una membrana, la evolución de un plasma, las corrientes de convección en diferentes dispositivos de calefacción o enfriamiento [19] o las posibles deformaciones de un objeto debidas a la variación de la temperatura [20]. Es amplia, asimismo, la utilización de esta técnica en ensayos no destructivos que permiten detectar defectos en piezas, soldaduras, neumáticos, etc.

Cuando se analiza el comportamiento de un sistema óptico convencional, se encuentra que la función que realiza dicho sistema es la de transformar una onda entrante en otra saliente (figura 7). Con esta perspectiva, la Holografía permite realizar **elementos ópticos holográficos (EOHs)** [21] pues en la reconstrucción del holograma de un punto se hace una transfor-

Figura 7.- Esquema del funcionamiento de una lente convencional.

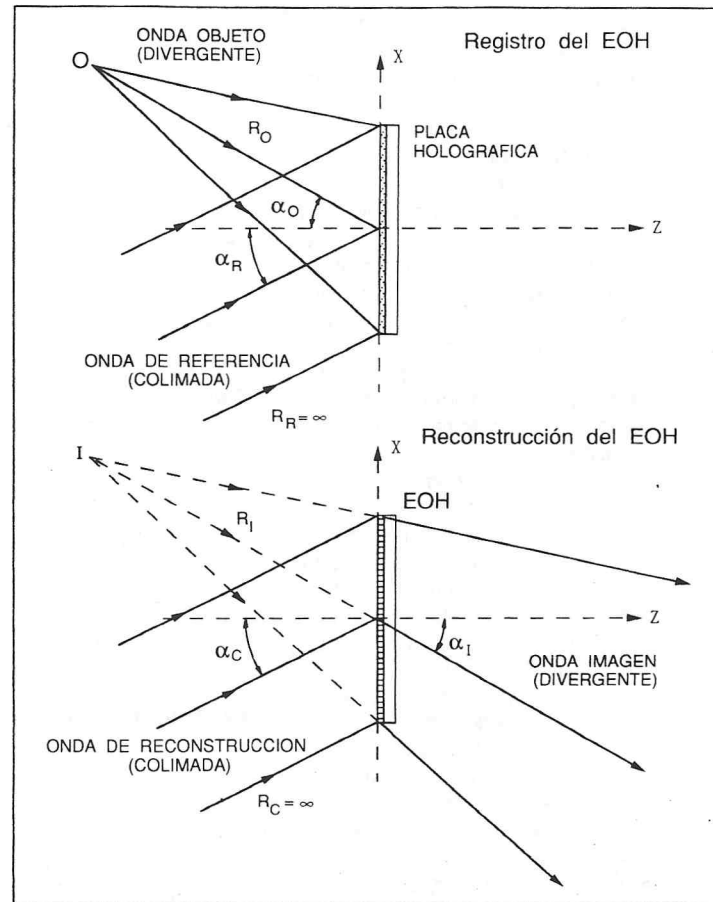
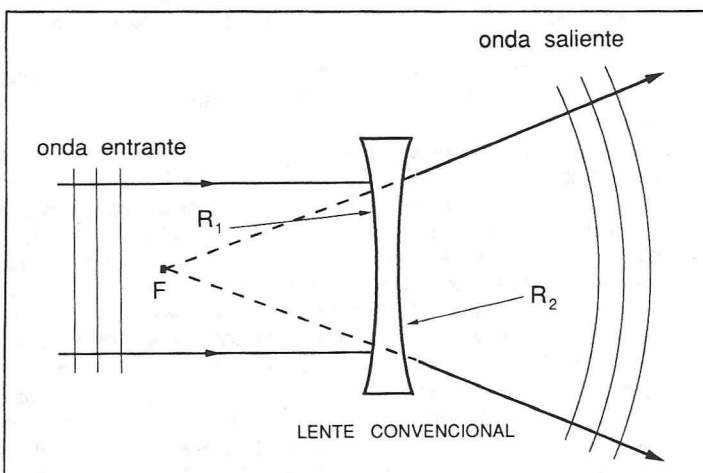


Figura 8.- Registro y reconstrucción de un elemento óptico holográfico (EOH) en particular, una lente holográfica. En la reconstrucción el EOH transforma una onda entrante en otra saliente.

mación entre la onda de reconstrucción y la onda difractada o imagen, almacenada previamente, y que se reproduce fielmente (figura 8).

Desde el punto de vista conceptual de funcionamiento de un EOH, la diferencia con los convencionales es que el primero lo hace fundamentalmente por difracción, en lugar de hacerlo por reflexión o refracción.

Pueden registrarse varios EOHs en una misma área de una placa fotosensible, permitiendo hacer varias funciones simultáneamente. Algunas ventajas respecto a los elementos convencionales son su reducido peso y volumen, así como su sencilla fabricación. Sin embargo, el gran inconveniente que presentan es que tienen una fuerte aberración cromática, si se les compara con los convencionales.

Estos EOHs pueden fabricarse en grandes cantidades mediante métodos de copia [22], en los cuales, a partir de un original registrado directamente, es posible obtener todas las réplicas que se deseen del mismo.

Ejemplos de sistemas ópticos abordados con éxito son las lentes empleadas como concentradores solares [23], las gafas protectoras para trabajos con láseres y visores [24] que adaptados al casco de los pilotos de aeronaves permiten simultáneamente ver el medio exterior y los datos de navegación, así como la realización de redes de difracción, espejos holográficos [25] y lentes holográficas de gran apertura [26]. Últimamente se están utilizando estos EOHs en interconectores de fibras ópticas [27] y en interconectores de sistemas VLSI [28]. Mención especial merecen los elementos de barrido holográfico [29] que se utilizan como lectores ópticos de los códigos de barras tan introducidos hoy en día en todos los productos de consumo, desde alimentos a libros y revistas. En el proceso de lectura del código de barras, se utiliza un emisor láser de baja potencia y un conjunto de lentes holográficas que focalizan el haz del láser. Este sale por la ventana del lector óptico, y la luz reflejada por los espacios blancos del código de barras recorre el camino inverso hasta un detector, donde las señales ópticas se transforman en pulsos eléctricos que van a parar a un ordenador. El sistema de barrido que incorporan estos scanners consiste en un disco de lentes holográficas, repartidas en unos veinte sectores del disco, que gira aproximadamente a 6000 revoluciones por minuto.

La Holografía se ha aplicado al **reconocimiento de formas** [30], donde se trata de localizar de forma automática una cierta letra o palabra de una página impresa o bien identificar huellas digitales. También se puede detectar la presencia de un microorganismo en una microfotografía en la que hay infinidad de detalles que hacen muy difícil su localización.

En los denominados **hologramas generados por ordenador** [31] se genera el fenómeno de interferencia con un ordenador y posteriormente se reduce el patrón fotográficamente, visualizándose como un holograma convencional. De esta forma pueden obtenerse imágenes de objetos que no existen físicamente, sino sólo matemáticamente. Tales hologramas pueden emplearse como EOHs y también usarse para corregir defectos ópticos de instrumentos. Asimismo, es posible realizar figuras geométricas en el espacio [32] o representar objetos en vías de fabricación sin que sea necesario construir modelos. Estos hologramas por ordenador aportan soluciones originales a los procedimientos de filtrado óptico, de almacenamiento de datos y, en general, en el tratamiento de la información.

En la **espectroscopia holográfica**, los métodos holográficos permiten investigar las propiedades fotofísicas y fotoquímicas de las moléculas (difusión, relajación rotacional, transporte, transferencia de energía,...) [33], presentando incluso ciertas ventajas sobre las técnicas convencionales de espectroscopia.

## 7.- AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud al Profesor D. Justo Oliva por las sugerencias y comentarios realizados.

## 8.- ALGUNAS OBRAS DE CARACTER GENERAL SOBRE HOLOGRAFIA

CATHEY, W.T. "Optical Information Processing and Holography". John Wiley & Sons, New York, 1974.  
 CAUFIELD, H. J. "Handbook of Optical Holography". Academic Press, New York, 1979.  
 COLLIER, R.J., BURCKHART, C.B., LIN, L.H. "Optical Holography". Academic Press, New York, 1971.  
 FRANÇON, M. "Holografía". Paraninfo, Madrid, 1972.  
 HARIHARAN, P. "Optical Holography". Cambridge University Press, Cambridge, 1984.  
 KASPER, J.E., FELLER, S.A. "The Hologram Book". Prentice Hall, New Jersey, 1985.  
 SAXBY, G. "Practical Holography". Prentice Hall, New Jersey, 1988.  
 SMITH, H.M. "Principles of Holography". Wiley Interscience, New York, 1969.  
 SMITH, H.M. "Holographic Recording Materials", Topics in Applied Physics, Vol. 20. Springer-Verlag, Berlín, 1976.  
 SOLYMAR, L., COOKE, D. J. "Volume Holography and Volume Gratings" Academic Press, London, 1981.  
 SYMS, R.R.A. "Practical Volume Holography". Clarendon Press, Oxford, 1990.

## REFERENCIAS

[1] D. Gabor, "A New Microscopic Principle", *Nature*, **161**, 777 (1948).  
 [2] R. J. Collier, C.B. Burckhart and L.H. Lin, "Optical Holography" (Academic Press, New York, 1971).  
 [3] E.N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstruction Wavefronts and Communication Theory", *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 1123 (1962).  
 [4] T. K. Gaylord and M. G. Moharam, "Thin and Thick Gratings: Terminology and Clarification", *Appl. Opt.*, **20**, 3271 (1981).

[5] H. Kogelnik, "Coupled Wave Theory for Thick Holograms", *Bell. System Tech. J.*, **48**, 2909 (1969).  
 [6] O. Svelto, "Principles of Lasers" (Plenum Press, New York, 1982).  
 [7] H. M. Smith, "Holographic Recording Materials", *Topics in Applied Physics*, Vol. 20 (Springer-Verlag, Berlín, 1976).  
 [8] L. Solymar, D.J. Cooke, "Volume Holography and Volume Gratings" (Academic Press, London, 1981).  
 [9] B.J. Chang, C.D. Leonard, "Dichromated Gelatin for the Fabrication of Holographic Optical Elements", *Appl. Opt.*, **18**, 2407 (1979).  
 [10] J. Oliva, A. Fimia and J. A. Quintana, "Diffuse-Object Holograms in Dichromated Gelatin", *Appl. Opt.*, **21**, 289 (1982).  
 [11] J. B. Rust, L. J. Miller and J. D. Margerum, "Photolymerization Studies: I. Polymers from new Photoredox Catalyst System", *Pol. Eng. and Science*, **9**, 40 (1969).  
 [12] R.L. Lamberts, "Characterization of a Bleached Photographic Material", *Appl. Opt.*, **11**, 33 (1972).  
 [13] A. Fimia, M. Pardo and J. A. Quintana, "Improvement of Image Quality in Bleached Holograms", *Appl. Opt.*, **21**, 3412 (1982).  
 [14] W.R. Graver, J.W. Gladden and J.W. Eastes, "Phase Holograms formed by Silver Halide Gelatin Processing", *Appl. Opt.*, **19**, 1529 (1980).  
 [15] A. Fimia, I. Pascual and A. Beléndez, "Silver Halide Sensitized Gelatin as a Holographic Storage Medium", *Proc. SPIE*, **952**, 288 (1988).  
 [16] R. V. vanLigten and H. Osterberg, "Holographic Microscopy", *Nature*, **211**, 282 (1966).  
 [17] L. K. Anderson, "Holographic Optical Memory for Bulk Data Storage", *Bell. Lab. Rec.*, **46**, 318 (1968).  
 [18] R. L. Powell and K. A. Stetson, "Interferometric Vibration Analysis of Three-Dimensional Objects by Wavefront Reconstruction", *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 612 (1965).  
 [19] R. Diez, M. Dolz y M. Buendía, "Aplicación de la Interferometría Holográfica a la Determinación del Campo de Temperaturas alrededor de un Cilindro Metálico", *An. Fis. Serie B*, **77**, 87 (1981).  
 [20] R. Fuentes, F. Mateos and A. Fimia, "Real-Time Holographic Interferometry applied to Large Diffusely Reflecting Surfaces", *Exp. Mech.* (en prensa).  
 [21] D. H. Close, "Holographic Optical Elements", *Opt. Eng.*, **14**, 408 (1975).  
 [22] I. Pascual, A. Beléndez and A. Fimia, "Holographic Optical System to Copy Holographic Optical Elements", *Proc. SPIE*, **1507** (1991).  
 [23] W. H. Bloss, M. Griesinger and E. R. Reinhart, "Dispersive Concentrating Systems based on Transmission Phase Holograms for Solar Applications", *Appl. Opt.*, **21**, 3739 (1982).  
 [24] D. G. Mc Cauley, C. E. Simpson and W. J. Murbach, "Holographic Optical Elements for Visual Display Applications", *Appl. Opt.*, **12**, 232 (1973).  
 [25] J. R. Magariños and D. J. Coleman, "Holographic Mirrors", *Opt. Eng.*, **24**, 769 (1985).  
 [26] A. Beléndez, I. Pascual and A. Fimia "Holographic Collimator of 200 mm Diameter in Silver Halide Sensitized Gelatin", *J. Opt.*, **21**, 211 (1990).  
 [27] O.D.D. Soares, "Holographic Coupler for Waveguide Arrays", Ph. D. Thesis, University of London, 1976.  
 [28] J. W. Goodman, F. Lomberger, S. Y. Kung and R. Ahale, "Optical Interconnects for VLSI Systems", *Proc. IEEE*, **72**, 850 (1984).  
 [29] G.T. Sincerbox, "Laser Beam Scanning", (Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, 1985), Cap. 1.  
 [30] A.W. Lohman and H.W. Werlich, "Holographic Production of Spatial Filters for Code Translation and Image Restoration", *Phys. Letters*, **25A**, 570 (1967).  
 [31] S.H. Lee, Ed., "International Conference on Computer-Generated Holography", *Proc. SPIE*, **437** (1983).  
 [32] T. Navarro, J.J. Egozcue y A. Fimia, "Hologramas Generados por Ordenador de Segmentos", *Proc. II Reunión Nacional de Optica (Universidad de Santiago y S.E.D.O.)*, 53 (1990).  
 [33] C. Bräuchle and D.M. Burland, "Holographic Methods for the Investigation of Photochemical and Photophysical Properties of Molecules", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **22**, 582 (1983).

**A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia**  
 Laboratorio de Optica  
 Departamento Interuniversitario de Optica  
 Universidad de Alicante