EXPERIMENTO 17

OPTICA V: HOLOGRAFÍA

1. Objetivo

Comprensión del principio básico para realizar y reproducir un holograma y familiarizarse con la reproducción experimental de imágenes y sus propiedades.

2. Bases teóricas

La holografía es un método fotográfico para grabar y reproducir imágenes tridimensionales.
En la fotografía ordinaria, sólo la intensidad de la luz proveniente de cada pequeña porción del objeto ("punto") fotografiado es registrada sobre una placa sensible. No se registra ninguna información referente a la posición relativa de los puntos y por lo tanto la imagen aparece como plana.

¿Que es lo que nos puede dar información sobre la posición relativa de los diferentes puntos en un objeto?. La respuesta es simple: la diferencia de fase entre las ondas provenientes de esos puntos.
Ahora el problema es: a) como registramos esa diferencia de fase y luego, b) como reconstruimos la imagen del objeto?.

a) Registro del holograma

Consideremos la Fig.1, donde un haz de luz de un láser es separado en dos: una parte incide directamente sobre una placa fotográfica y la otra parte lo hace después de reflejarse en el objeto que queremos fotografiar.

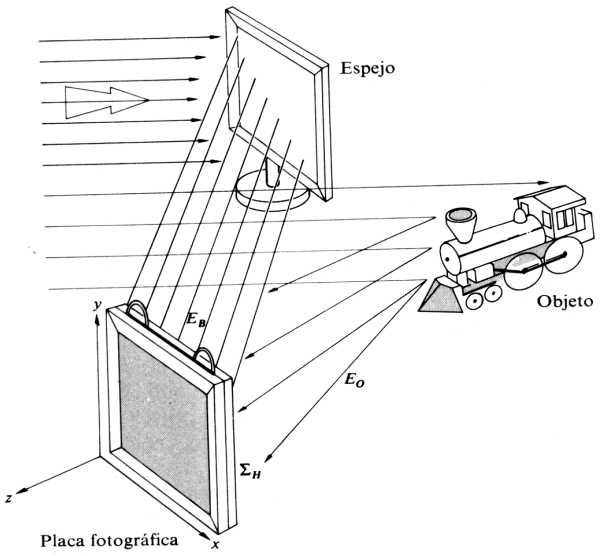
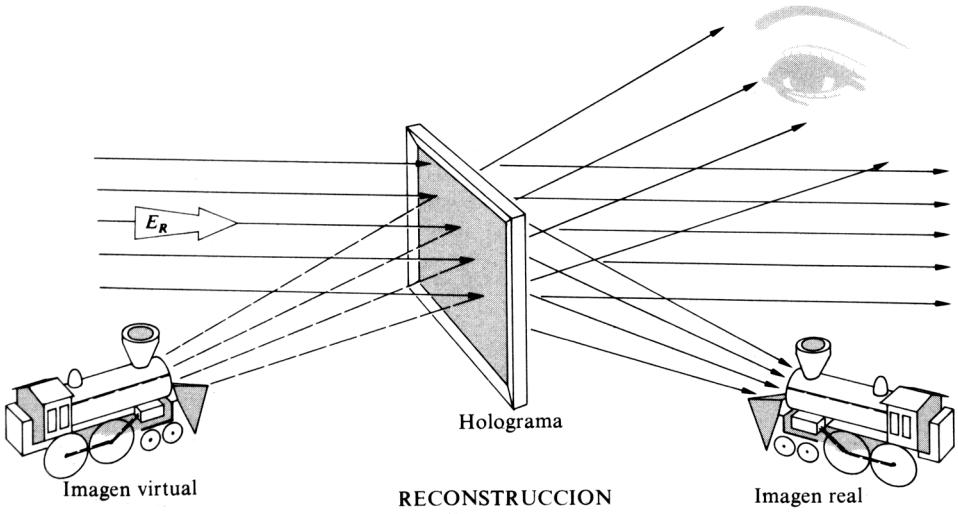


Figura 1

Dado que la luz del láser es monocromática y coherente, la superposición de las dos ondas (onda base o de referencia y onda proveniente del objeto) sobre la placa fotográfica formará

allí un patrón de interferencia que contiene tanto información sobre la intensidad proveniente de cada punto del objeto (mayor o menor brillantez) como sobre la diferencia de fase entre las ondas provenientes de distintos puntos (distribución espacial de las intensidades)
El revelado de este patrón de interferencia constituye un holograma

b) Reconstrucción de la imagen
Consideremos ahora la Fig. 2, en la que hacemos pasar un haz de luz de láser de referencia a través del holograma. El haz se difractará en el holograma(que se comporta como un conjunto complejo de rendijas) produciendo dos haces: uno convergente que formará una "imagen real", pero distorsionada, del objeto, y uno divergente, tal que la prolongación de sus rayos formará una "imagen virtual" muy precisa del objeto original. La precisión en la reconstrucción dependerá de la finura y sensibilidad de los granos de la placa fotográfica y de la monocromaticidad y coherencia de la luz del láser.



Registro holográfico (banda lateral) y reconstrucción de una imagen.

Figura 2

Todo el proceso puede ser formulado en forma mas o menos simple como sigue:

Sea (x,y) el plano del holograma Σ_H. El campo eléctrico de la onda base, o de referencia, sobre Σ_H puede ponerse como

$$E_B(x,y)=E_{0B}\cos[\omega t + \phi(x,t)] \qquad (1)$$

donde la fase ϕ depende (x,y) puesto que el haz incidente (aún siendo de ondas planas) puede estar inclinado con respecto a Σ_H.
Por otra parte, la onda esparcida por el objeto tendrá sobre Σ_H un campo eléctrico:

$$E_0(x,y)=E_{00}\cos[\omega t + \phi_0(x,t)] \quad (2)$$

donde tanto la amplitud como la fase son ahora funciones complicadas de la posición, pues corresponden a un frente de onda irregular. La modulación de esa amplitud y de esa fase lleva toda la información disponible sobre el objeto, la que está codificada en variaciones espaciales sobre Σ_H y no temporales.
La intensidad media sobre la placa, durante el tiempo T que dura el proceso de exposición, será:

$$I(x,y)=<(E_B + E_0)^2>$$

donde <·····> significa promedio temporal dado por

$$\frac{1}{T} = \int_0^T ..... \, dt$$

Con esto se obtiene:

$$I(x,y) = \frac{E_{0B}^2}{2} + \frac{E_{00}^2(x,y)}{2} + E_{0B}E_{00}(x,y)\cos[\phi - \phi_0(x,y)] \quad (3)$$

Esta función define el holograma. Observemos que la fase de la onda-objeto, ϕ_0, determina la ubicación de los máximos y mínimos sobre Σ_H. Además el contraste del patrón, que se define como $V=(I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$, viene dado por

$$V = \frac{2E_{0B}E_{00}^2(x,y)}{[E_{0B}^2 + E_{00}^2(x,y)]}$$

y contiene la información acerca de la amplitud de la onda-objeto.

El holograma se puede procesar (revelado positivo) de tal manera que, al iluminarlo, la onda emergente final $E_F(x,y)$ sea proporcional a $I(x,y)$.
O sea, que si $E_R(x,y)$ es la onda reconstructora incidente sobre el holograma,

$$E_F(x,y) \approx I(x,y)E_R(x,y)$$

Entonces, si la onda reconstructora de frecuencia ω incide sobre Σ_H en forma oblicua como lo haría la onda-base, podemos poner:

$$E_R(x,y)=E_{0R}\cos[\omega t + \phi(x,y)] \quad (4)$$

y

$$E_F(x,y) = \frac{1}{2}E_{0R}\left[E_{0B}^2 + E_{00}^2(x,y)\right]\cos[\omega t + \phi 9x,y)] +$$
$$+\frac{1}{2}E_{0R}E_{0B}E_{00}(x,y)\cos[\omega t + 2\phi - \phi_0(x,y)] + \quad (5)$$
$$+\frac{1}{2}E_{0R}E_{0B}E_{00}(x,y)\cos[\omega t + \phi_0(x,y)]$$

El primer término es simplemente una versión modulada en amplitud de la onda reconstructora

$$\left[\frac{1}{2}\left(E_{0B}^2 + E_{00}^2\right)E_R\right]$$

El segundo término es la onda que forma la "imagen real", la que contiene la fase 2ϕ-ϕ_0 y por lo tanto no reproduce correctamente al objeto (¿qué pasaría si el haz de referencia y reconstructor incidieran perpendicularmente a Σ_H?)
El tercer término, excepto por una constante multiplicativa, tiene precisamente la forma de la onda-objeto y es la onda que forma la imagen virtual que reconstruye el objeto original.
La reconstrucción de la imagen tridimensional de un objeto no es la única propiedad de la holografía. Otra propiedad fascinante es que cada fragmento del holograma total contiene información acerca de todo el objeto y puede reproducir, aunque con menor resolución, la imagen completa.
Esto se debe a que la luz reflejada por cada pequeña porción, o punto, del objeto no es enfocada sobre un sólo punto de la placa sino que se desparrama sobre una porción grande de la misma e interfiere con el haz de referencia en toda esa porción.

3. Procedimiento

i) Armar el sistema láser-lente-holograma como se indica en la Fig.3

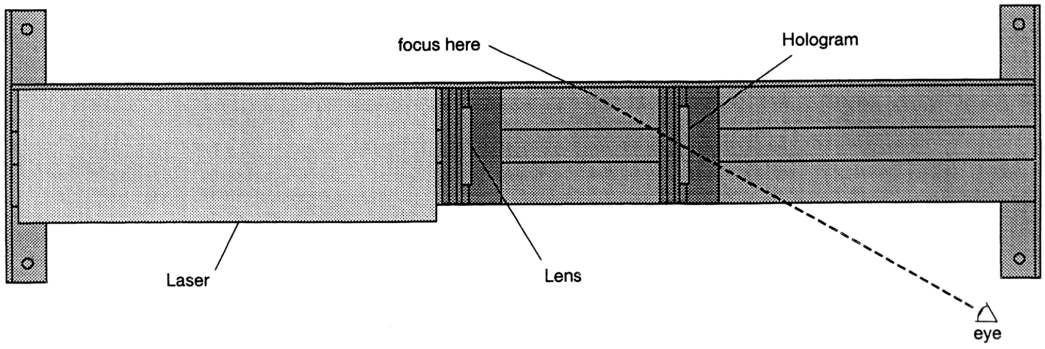


Figura 3

ii) Mirar a través del holograma en forma oblicua como lo indica la figura. Mover la cabeza hacia los lados observando el efecto de paralaje que es el que debe presentar toda imagen tridimensional.

iv)Tapar la mitad del holograma. Describir lo que ocurre.

v)Usar luz de la lámpara incandescente en lugar del láser, con y sin colimación del haz. Describir lo que ocurre.

vi)Colocar filtros de color y describir lo que ocurre.