

# Holografía: Generalidades

## 1.- INTRODUCCIÓN

La forma clásica de producir y almacenar imágenes permanentes de objetos que emiten o difunden luz ha sido la *fotografía*, sin embargo a partir de 1948 las investigaciones llevadas a cabo por Gabor dieron lugar al nacimiento de una técnica de almacenamiento de imágenes, la *holografía*, cuyo desarrollo continúa en la actualidad. 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.

Para obtener una fotografía se ilumina el objeto con luz del Sol o artificial y se recoge la luz difundida por este objeto sobre una placa fotográfica con ayuda de una lente. En la Figura 1 se ha representado de forma esquemática el proceso correspondiente a la realización de la fotografía de un objeto.

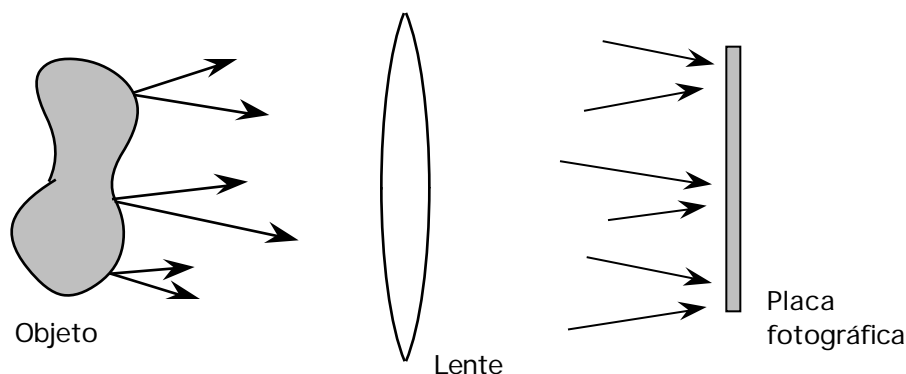


Figura 1.- Esquema correspondiente a la realización de una fotografía de un objeto.

Al emitir el objeto con distinta intensidad en cada uno de sus puntos, la emulsión aparece después de ser sometida a los procesos de revelado, positivado y fijado con una distribución relativa de zonas claras y oscuras semejante al objeto. Aun cuando el objeto tenga un cierto relieve, la fotografía es una reproducción plana del objeto, de modo que se pierde el carácter tridimensional del objeto.

La *holografía*, sin embargo, es un método de producción de imágenes tridimensionales en dos etapas, denominadas *registro* y *reconstrucción*. Mediante el proceso de registro se almacena en determinados materiales fotosensibles, y en forma de franjas de interferencia, la información necesaria para posteriormente reconstruir un frente de onda idéntico al que dió lugar a esa información. El material fotosensible ya impresionado y procesado, soporte de esta información, constituye el *holograma* (del griego "holos" que significa la totalidad). Así pues, en la Holografía se almacena la imagen permanente de un objeto con la ayuda de placas fotográficas como receptores, aunque no emplea lentes para formar imágenes sobre ellas. La diferencia básica con la fotografía es que ahora en vez de registrar la imagen de un objeto se registra la onda objeto misma.

Puede decirse que la Holografía es un método para "congelar" la onda que procede del objeto y posteriormente "ponerla otra vez en marcha". Como consecuencia, no se pierde el carácter tridimensional de los objetos y las diferentes perspectivas que se pueden observar a través del holograma sólo están limitadas por su tamaño. Además, si el holograma se divide en trozos, cada parte, por pequeña que sea, es capaz de reproducir completamente el objeto. Esto es debido a que, como en general no se utilizan lentes, a cada punto del holograma llega información de todos los puntos del objeto. En la etapa de registro se hacen interferir las ondas emitidas por cada uno de los puntos del objeto con una onda de referencia. Este patrón de interferencia se almacena en el medio de registro dando lugar al holograma. En la segunda etapa, la reconstrucción, se ilumina el holograma con un haz de luz similar al haz de referencia empleado en el registro, obteniéndose la imagen tridimensional del objeto.

En la Figura 2 se han representado de forma esquemática el frente de onda procedente de un objeto (a), así como las etapas de registro (b) y reconstrucción (c) del holograma de ese objeto.

Al hablar del proceso holográfico se ha considerado la interferencia de dos o más ondas, por tanto, en éste se tendrán que satisfacer las condiciones de coherencia necesarias para la formación de dichas interferencias. Por otra parte, el poder de resolución del material de registro debe ser elevado, pues las franjas de interferencia suelen tener separaciones del orden de  $1\ \mu\text{m}$ , es decir,  $10^{-6}$  m. Estos órdenes de magnitud exigen 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 la mejora de los existentes. El desarrollo del láser a

partir de 1962 resolvió la primera de estas dificultades, mientras que la segunda se fue superando con la utilización de la emulsión fotográfica, las fotorresinas, las gelatinas dicromatadas, los fotopolímeros, los fototermoplásticos, los cristales ferroeléctricos, etc.

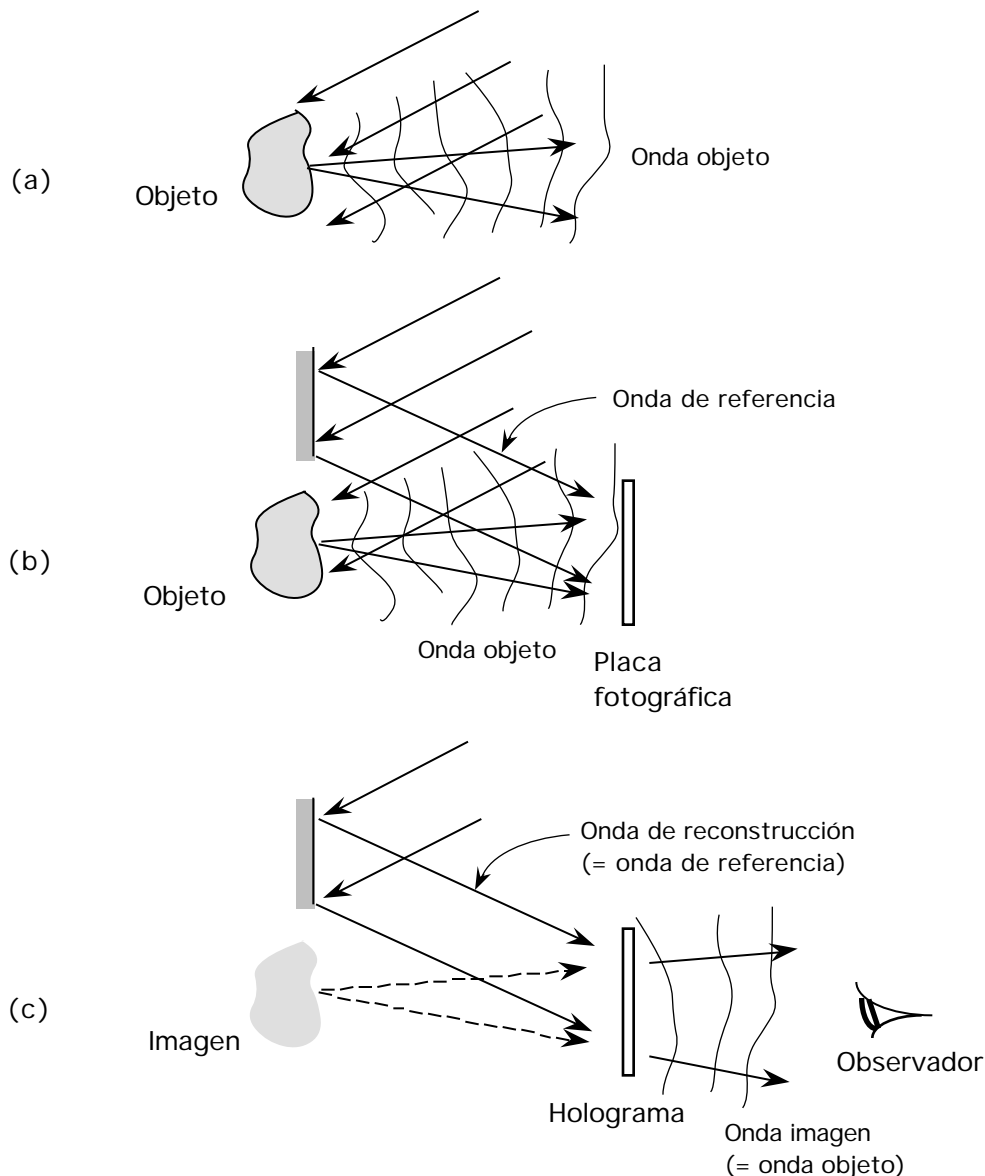


Figura 2.- (a) Onda proveniente de un objeto. (b) Esquema del registro de un holograma. (c) Reconstrucción de un holograma.

Tal y como se ha indicado anteriormente, la Holografía incluye el registro y la reconstrucción de ondas luminosas de modo que se puede decir que un holograma es una transparencia que contiene el registro codificado de una onda. El registro tiene lugar mediante un proceso interferencial mientras que la reconstrucción se lleva a cabo mediante procesos de difracción.

## 2.- EL CÓDIGO HOLOGRÁFICO

Consideremos una onda plana monocromática de longitud de onda  $\lambda$  y cuya amplitud compleja en un plano determinado, digamos el plano  $z = 0$ , es  $U_o(x,y)$ . Si pudiera fabricarse de alguna manera un elemento óptico de espesor despreciable (denominado transparencia) con transmitancia compleja  $t(x,y)$  igual a  $U_o(x,y)$ , este elemento proporcionaría un registro completo de la onda. La onda podría reconstruirse simplemente iluminando la transparencia con una onda plana uniforme de amplitud unidad que se propagará en la dirección del eje  $z$ . La onda transmitida por el elemento tendría una amplitud compleja en el plano  $z = 0$ :

$$U(x,y) = 1 \cdot t(x,y) = U_o(x,y) \quad (1)$$

La onda original sería entonces reproducida en todos los puntos del plano  $z = 0$  y, por tanto, reconstruida en cualquier lugar del semiespacio  $z > 0$ .

Por ejemplo, una onda plana uniforme que se propaga a lo largo de la dirección que forma un ángulo  $\alpha$  con el eje  $z$  (en el plano  $xz$ ) tiene en el plano  $z = 0$  una amplitud compleja:

$$U_o(x,y) = \exp(-jk \sin \alpha x) \quad (2)$$

donde  $k = 2\pi/\lambda$ . Para registrar esta onda sería necesario disponer de una transparencia con transmitancia compleja:

$$t(x,y) = \exp(-jk \sin \alpha x) \quad (3)$$

Una transparencia de este tipo actuaría como un prisma que deflectaría un ángulo  $\alpha$  una onda plana incidente del tipo  $\exp(-jkz)$ .

La cuestión es cómo fabricar una transparencia de transmitancia  $t(x,y)$  igual que la onda original  $U_o(x,y)$ . Un problema importante es que los detectores ópticos utilizados para fabricar transparencias responden a la intensidad óptica,  $|U_o(x,y)|^2$ , y son insensibles a la fase de la onda,  $\arg\{U_o(x,y)\}$ . La información de la fase es obviamente importante y, sin embargo, no puede ser tenida en cuenta al no poder ser almacenada. Por ejemplo, si la fase de la onda plana oblicua anterior  $U_o(x,y) = \exp(-jk \sin \alpha x)$  no puede registrarse o almacenarse, tampoco lo será la dirección de propagación de la onda. Para registrar la fase de la onda  $U_o(x,y)$  es necesario encontrar un código que transforme la fase en intensidad. La información registrada podría ser decodificada ópticamente para reconstruir la onda original. En el ejemplo considerado, la fase es  $(-jk \sin \alpha x)$ , es decir:

$$\phi_o(x,y) = \arg\{U_o(x,y)\} = -k \sin \alpha x \quad (4)$$

pues en general la onda sería de la forma:

$$U_o(x,y) = A_o \exp[-j \phi_o(x,y)] \quad (5)$$

y en el caso analizado en el ejemplo, la amplitud era la unidad.

## 2.1.- Codificación de la información

El *código holográfico* está basado en "mezclar" la onda original  $U_o$  (denominada *onda objeto*) con una *onda de referencia* conocida  $U_r$ , y registrar su diagrama interferencia en el plano  $z = 0$  donde se sitúa el material fotosensible. La intensidad correspondiente a la suma de las dos ondas se registra fotográficamente de manera que se puede hacer una transparencia (holograma) de la amplitud compleja  $t(x,y)$  deseada. El proceso de registro se muestra en la Figura 3 (a).

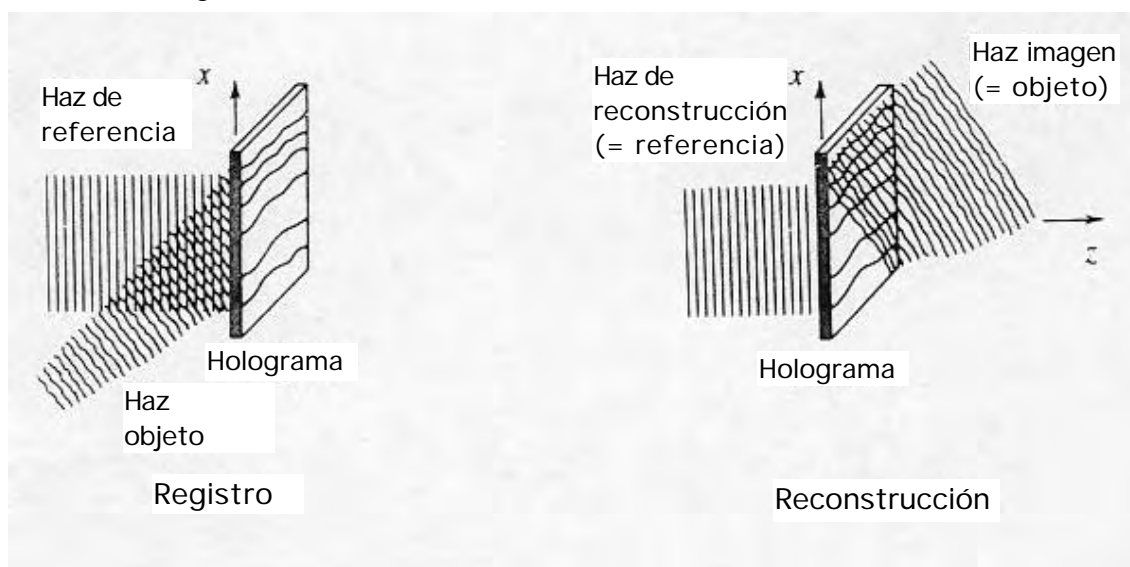


Figura 3.- (a) Registro de un holograma mediante la interferencia de la onda objeto y la onda de referencia. (b) Reconstrucción de un holograma iluminando con una onda de reconstrucción similar a la onda de referencia. La onda imagen es, entonces, similar a la onda objeto.

Si las ondas objeto y referencia en el plano  $z = 0$  (plano del holograma) tienen la forma:

$$U_o(x,y) = \sqrt{I_o} \exp[-j \phi_o(x,y)] \quad (6)$$

$$U_r(x,y) = \sqrt{I_r} \exp[-j \phi_r(x,y)] \quad (7)$$

entonces la transmitancia del holograma,  $t$ , es proporcional a la intensidad del diagrama

interferencial (suponiendo que el medio de registro tiene una respuesta lineal). Se tendrá que:

$$\begin{aligned} t |U_r + U_o|^2 &= |U_r|^2 + |U_o|^2 + U_r^* U_o + U_r U_o^* = \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\phi_r - \phi_o) \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $I_r = |U_r|^2$  e  $I_o = |U_o|^2$  son las intensidades de las ondas de referencia y objeto, respectivamente, en el plano  $z = 0$ .

La transparencia, que constituye el *holograma*, tiene información codificada tanto de la amplitud como de la fase de la onda objeto  $U_o$ . De hecho, como cualquier diagrama interferencial la transmitancia  $t$  es muy sensible a la diferencia entre las fases  $\phi_o$  y  $\phi_r$  de las dos ondas.

## 2.2.- Decodificación de la información

Para *decodificar* la información almacenada en el holograma y reconstruir la onda objeto original, se utiliza otra vez la onda de referencia  $U_r$  para iluminar el holograma, tal y como se ve en la Figura 3 (b). El resultado es que emerge del holograma una onda de amplitud compleja  $U$  en el plano del holograma ( $z = 0$ ):

$$U = t U_r + U_r I_r + U_r I_o + I_r U_o + U_r^2 U_o^* \quad (9)$$

El tercer término  $I_r U_o$  corresponde a la onda objeto original  $U_o$  multiplicada por  $I_r$ , es decir, la intensidad de la onda de referencia. Si  $I_r$  es uniforme (independiente de  $x$  e  $y$ ), este término constituye la onda reconstruida deseada. Pero esta onda debe separarse de los otros tres términos. El cuarto término  $U_r^2 U_o^*$  es la versión conjugada de la onda objeto original modulada por  $U_r^2$ . Los dos primeros términos  $U_r I_r + U_r I_o$  representan la onda de referencia  $U_r$  modulada por la suma de las intensidades de las dos ondas,  $I_r + I_o$ .

Si la onda de referencia es una onda plana uniforme propagándose a lo largo del eje  $z$ , entonces  $U_r(x,y,z) = (I_r)^{1/2} \exp(-jkz)$ , y en el plano  $z = 0$  toma la forma  $U_r(x,y) = U_r(x,y,0) = (I_r)^{1/2}$ , que es una constante independiente de  $x$  e  $y$ , por lo que dividiendo la ecuación anterior por  $U_r = (I_r)^{1/2}$ , queda:

$$U(x, y) = I_r + I_o(x, y) + \sqrt{I_r} U_o(x, y) + \sqrt{I_r} U_o^*(x, y) \quad (10)$$

que es la onda reconstruida en el plano del holograma. Generalmente las ondas de referencia y objeto reconstruida que aparecen en la etapa de reconstrucción, reciben los nombres de *onda de reconstrucción* y *onda imagen*, respectivamente.

### 3.- HOLOGRAMA DE UNA ONDA PLANA OBLICUA

Si la onda de referencia es una onda plana que se propaga según el eje  $z$  y la onda objeto es una onda plana oblicua que forma un ángulo  $\alpha$  con el eje  $z$ , tal y como muestra la Figura 4 (a), entonces:

$$U_r(x, y) = \sqrt{I_r} \quad (11)$$

$$U_o(x, y) = \sqrt{I_o} \exp(-jk \sin \alpha x) \quad (12)$$

Y de la ecuación (10) queda para  $U(x, y)$  la expresión:

$$U(x, y) = I_r + I_o + \sqrt{I_r I_o} \exp(-jk \sin \alpha x) + \sqrt{I_r I_o} \exp(jk \sin \alpha x) \quad (13)$$

Los dos primeros términos son constantes y corresponden a una onda que se propaga en la dirección del eje  $z$  (la continuación de la onda de reconstrucción que se ha tomado idéntica a la onda de referencia). El tercer término corresponde a la onda objeto original y es la onda imagen, mientras que el cuarto término representa la onda conjugada de la onda objeto, es decir, una onda plana propagándose formando un ángulo  $-\alpha$  con el eje  $z$ .

Este holograma, -que es el registro del diagrama de interferencia formado por dos ondas planas, una de ellas incidiendo según el eje  $z$  y la otra formando un ángulo  $\alpha$  con dicho eje-, corresponde a una red de difracción sinusoidal que desvía la onda de referencia incidente en la etapa de reconstrucción entres ondas que forman ángulos  $0$ ,  $\alpha$  y  $-\alpha$  con el eje  $z$ , como se ve en la Figura 4 (b). El período de la red  $\Lambda$  y su frecuencia  $f$  a lo largo del eje  $x$  se obtienen mediante:

$$\Lambda = \frac{\Lambda}{\sin \alpha} = \frac{\Lambda}{\sin \alpha} = \frac{1}{\sin \alpha} \quad (14)$$

Por ejemplo, para  $\lambda = 633 \text{ nm}$  (láser de He-Ne) y  $\alpha = 30^\circ$ , entonces se tiene  $\Lambda = 1.266 \mu\text{m} = 1.266 \times 10^{-6} \text{ m}$  y  $f = 790 \text{ líneas/mm}$ .

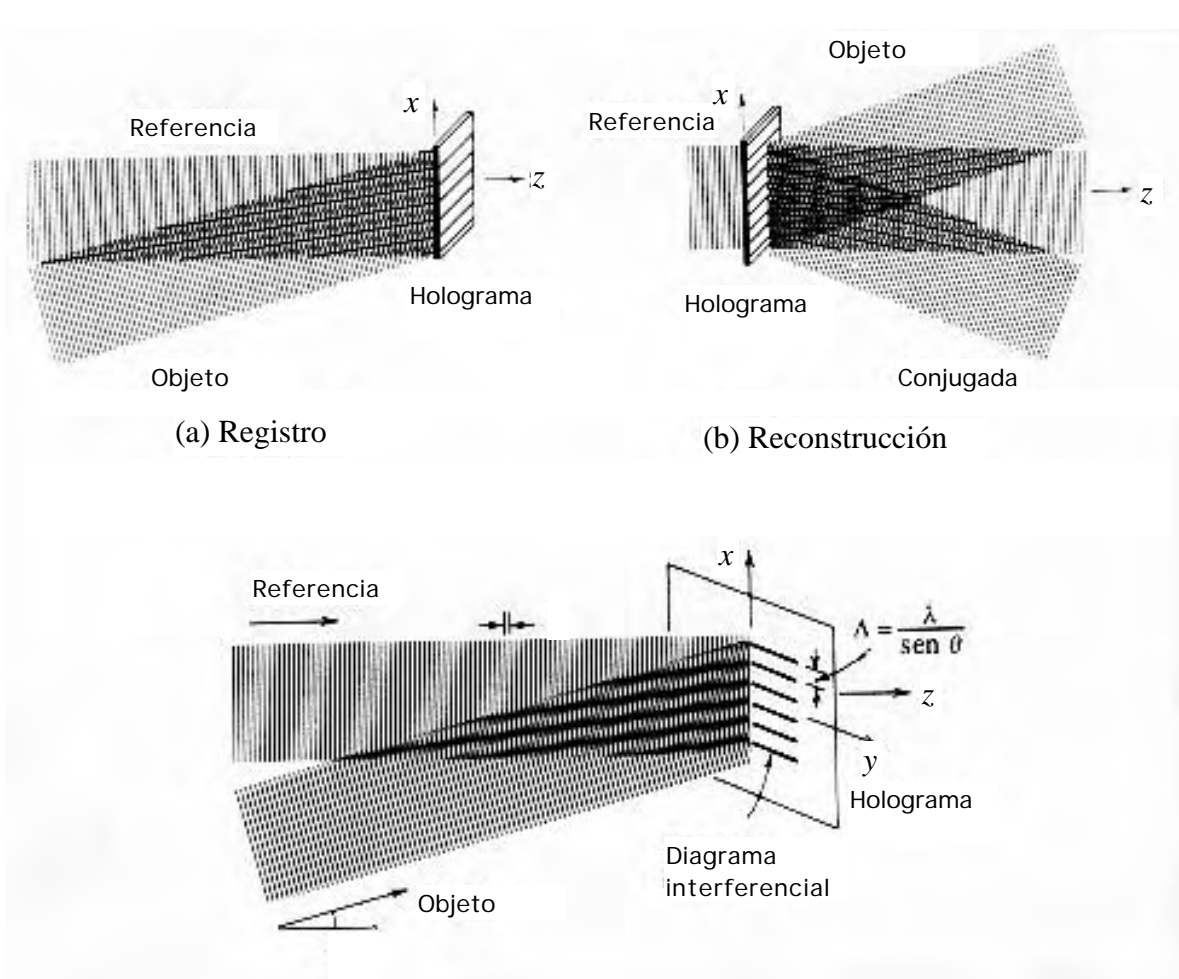


Figura 4.- (a) Registro y (b) reconstrucción del holograma de una onda plana oblicua.

#### 4.- HOLOGRAMA DE UNA FUENTE PUNTUAL

Si la onda objeto es una onda esférica originada en el punto  $\mathbf{r}_o = (0,0,-d)$ , como se ve en la Figura 5 (a), entonces:

$$U_o(x,y) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|} \exp(-jk |\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|) \quad (15)$$

donde  $\mathbf{r} = (x, y, 0)$ .

En esta situación, en la ecuación (10) ahora el primer término corresponde a una onda plana que se propaga en la dirección del eje  $z$ , mientras que el tercer término es proporcional a la amplitud de la onda esférica original cuyo origen se encuentra en el punto de coordenadas  $(0,0,-d)$ . El cuarto término es proporcional a la amplitud de la onda conjugada de la onda objeto, es decir:



$$U_o^*(x,y) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|} \exp(jk |\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|) \quad (16)$$

que corresponde a una onda esférica convergente hacia el punto  $(0,0,d)$ . El segundo término es proporcional a  $1/|\mathbf{r} - \mathbf{r}_o|^2$  y su correspondiente onda viaja en la dirección del eje  $z$  con una dispersión angular muy pequeña pues su amplitud varía lentamente en el plano transversal. La onda conjugada  $U_o^*(x,y)$  forma una imagen real del punto (Figura 5 (b)). Este holograma recibe el nombre de *holograma de Gabor*.

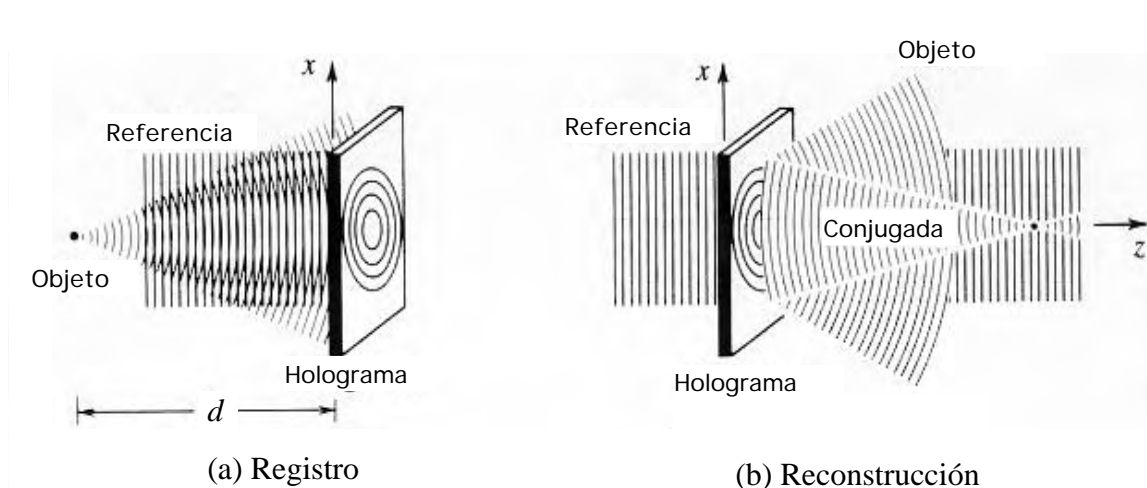


Figura 5.- (a) Registro y (b) reconstrucción del holograma de una fuente puntual.

## 5.- HOLOGRAFÍA FUERA DE EJE

Una forma de separar las cuatro componentes de la onda reconstruida es asegurar que viajan con frecuencias espaciales bien separadas, de modo que tengan direcciones diferentes. Esta forma de multiplexado de frecuencias espaciales está asegurada si las ondas objeto y referencia llegan al holograma con direcciones diferentes, como muestra la Figura 6 (a).

Si la onda objeto tiene una amplitud compleja:

$$U_o(x,y) = f(x,y) \exp(-jk \sin \alpha) \quad (17)$$

esta onda tiene una amplitud  $f(x,y)$  modulada por un factor de fase igual al que introduce un prisma con ángulo de desviación  $\alpha$ . Se supone que  $f(x,y)$  varía lentamente de modo que su frecuencia espacial máxima  $\sigma_s$  corresponde a un ángulo  $\alpha_s = \arcsin(\sigma_s)$  mucho más pequeño que  $\alpha$ . La onda objeto tiene entonces direcciones alrededor del ángulo  $\alpha$ .

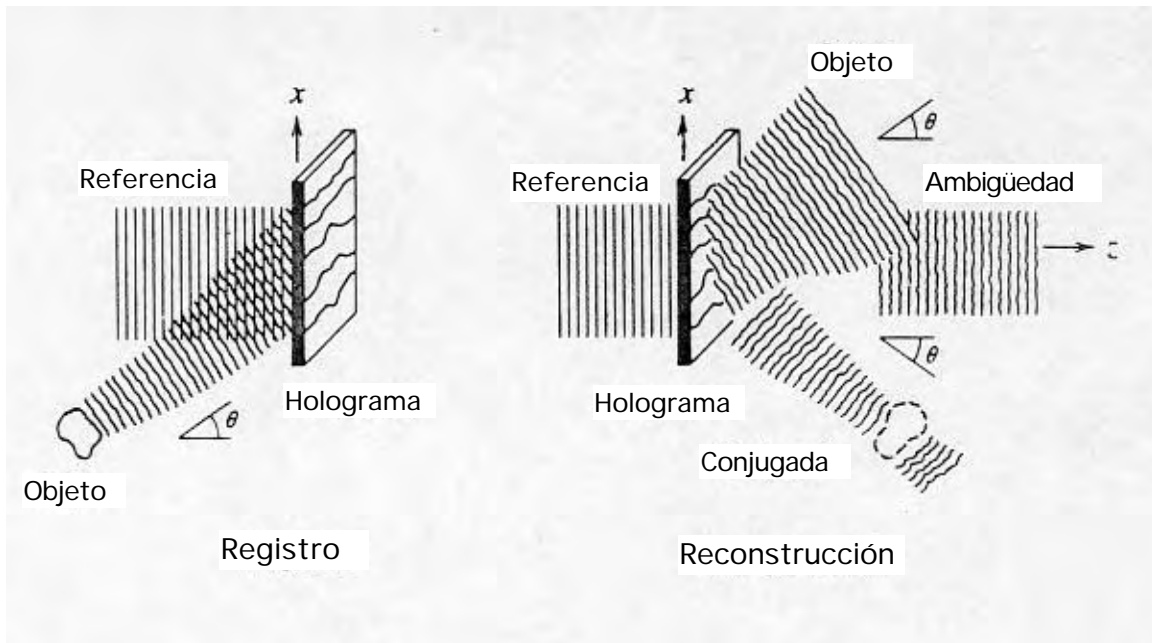


Figura 6.- (a) Registro y (b) reconstrucción de un holograma fuera de eje.

Si la onda de referencia es una onda plana que se propaga según el eje  $z$ , se tendrá la situación que se muestra en la Figura 6 (b), y de la ecuación (10) quedará:

$$U(x,y) = I_r + |f(x,y)|^2 + \sqrt{I_r} f(x,y) \exp(-jk \sin \theta) + \sqrt{I_r} f^*(x,y) \exp(+jk \sin \theta) \quad (18)$$

En esta ecuación el tercer término es la réplica de la onda objeto que se propaga según un ángulo  $\theta$ . La presencia del factor de fase  $\exp(+jk \sin \theta)$  en el cuarto término indica que esa onda es desviada en la dirección de  $-\theta$ . El primer término corresponde a una onda plana propagándose en la dirección del eje  $z$ . El segundo término, que se conoce como *término de ambigüedad*, corresponde a una onda plana no uniforme con direcciones según un cono de ángulo pequeño  $2\theta$  alrededor del eje  $z$ . Para reducir el efecto del término de ambigüedad puede hacerse que la intensidad de la onda de referencia sea mucho mayor que la de la onda objeto, de modo que la intensidad del término de ambigüedad sea despreciable.

## 6.- REGISTRO DE HOLOGRAMAS

Una condición esencial para el registro de hologramas es disponer de una fuente de luz monocromática con fluctuaciones de fase mínimas. Por esta razón, una fuente de luz coherente, normalmente un láser, es una parte fundamental de un montaje holográfico. Para poder tener un diagrama de interferencia entre dos o más ondas es necesario que las ondas sean tales que tengan la misma frecuencia y mantengan una diferencia de fase constante, es

decir, que provengan de fuentes de luz coherentes. La coherencia de la luz es una medida de su capacidad para producir interferencias. En una fuente de luz ordinaria, como por ejemplo el filamento de una bombilla, la luz se emite desde distintos átomos individuales que radian independientemente. En consecuencia, la relación de fase entre estas emisiones es totalmente arbitraria, no pudiéndose formar interferencias. Hay dos tipos de coherencia: temporal y espacial. La luz que no posee ambas no puede producir interferencias apreciables. La coherencia espacial está relacionada con la monocromaticidad, mientras que la coherencia espacial es en cierto modo una medida del tamaño del foco luminoso, siendo máxima si el foco luminoso es puntual.

En la Figura 7 se muestra una configuración típica utilizada en el registro de la onda difundida por un objeto y la posterior reconstrucción del holograma. Haciendo uso de una lámina semitransparente la luz proveniente del láser se divide en dos partes, una de ellas se utiliza como onda de referencia mientras que la otra se usa para iluminar un objeto de modo que la luz difundida por éste da lugar a la onda objeto (Figura 7 (a)). La diferencia de camino óptico entre las ondas objeto y referencia debe ser lo más pequeña posible para asegurar que los dos haces de luz que van a interferir mantienen una diferencia de fase no aleatoria (el término  $\arg\{U_r\} - \arg\{U_o\}$ ).

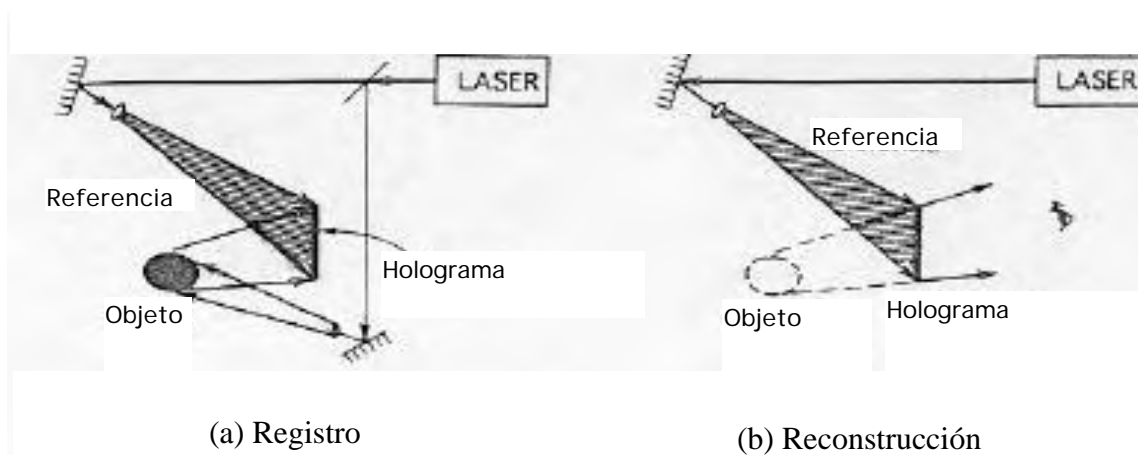
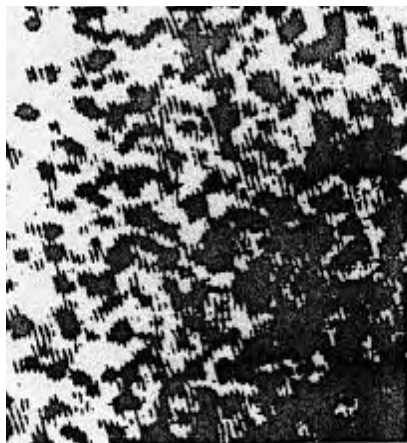


Figura 7.- (a) Configuración típica utilizada en el registro de la onda difundida por un objeto y (b) posterior reconstrucción del holograma.

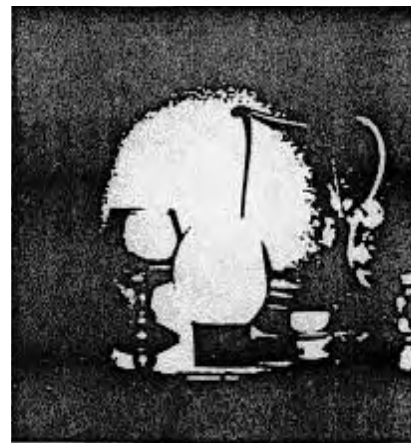
La interferencia de las ondas objeto y referencia da lugar a una estructura de franjas muy complicada sobre la placa holográfica (diagrama de interferencia) que da lugar al holograma. Este diagrama interferencial está compuesto por franjas separadas por distancias del orden de  $\lambda/\sin \theta$ , donde  $\theta$  es la separación angular entre las ondas objeto y referencia. Este hecho obliga a que el medio de registro utilizado tenga una alta resolución y el sistema completo no vibre durante la exposición. Cuanto mayor es el ángulo  $\theta$ , más pequeñas son las distancias entre las franjas sobre la superficie del holograma y más restrictivas son las condiciones bajo las que se debe registrar el holograma.

En la reconstrucción (Figura 7 (b)) es posible obtener la onda objeto iluminando el holograma con una onda similar a la onda de referencia. La luz difractada por la estructura de

franjas del holograma, una vez revelada la placa, es la que forma la imagen holográfica, de manera que mirando a través del holograma se observa el objeto, manteniendo su característica tridimensional, como si el objeto estuviera en realidad colocado ahí. Se podría mover la cabeza un poco y mirar alrededor del objeto para poder ver detrás de él, de modo que los efectos de paralaje son evidentes. La Figura 8 muestra la fotografía de un holograma (a) así como fotografías de tres vistas diferentes de la misma imagen holográfica, (b), (c) y (d), generada por ese holograma. (Fotografías de Smith, *Principles of Holography*).



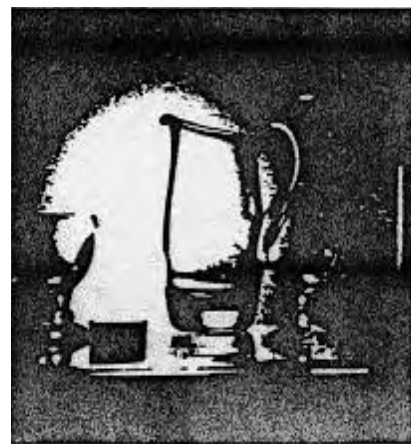
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8.- (a) Fotografía de un holograma y (b), (c), (d) fotografías de tres vistas diferentes de la misma imagen holográfica.

La Figura 9 muestra, con más detalle, el registro y reconstrucción de una imagen holográfica. La imagen virtual es la imagen verdadera, mientras que la imagen real es la imagen conjugada.

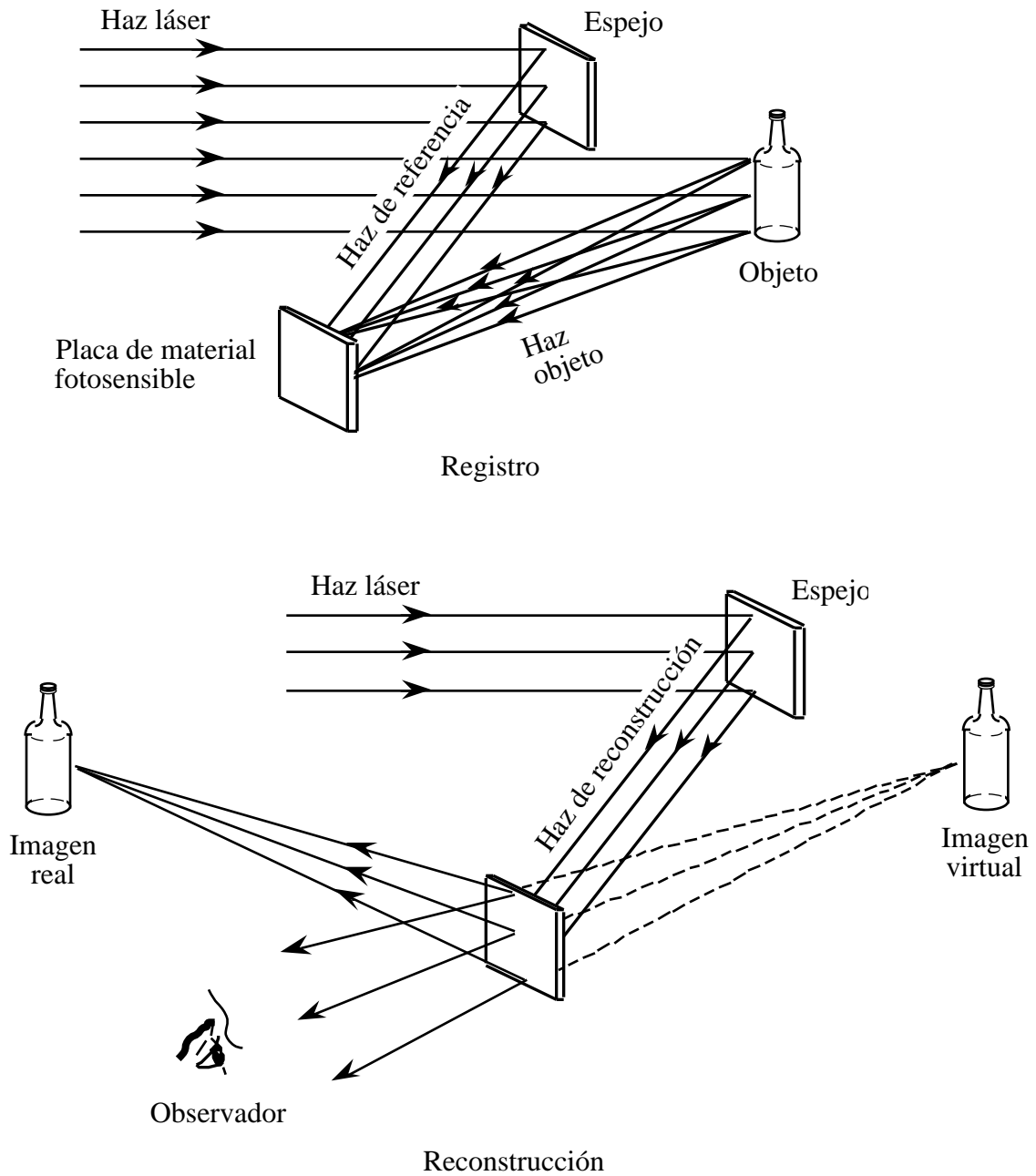


Figura 9.- Registro y reconstrucción de una imagen holográfica. La imagen virtual es la imagen verdadera, mientras que la imagen real es la imagen conjugada.

## 7.- REGISTRO HOLOGRÁFICO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

La transformada de Fourier  $F(x', y')$  de una función  $f(x, y)$  puede obtenerse ópticamente haciendo uso de una lente. Si  $f(x, y)$  es la amplitud compleja en el plano focal objeto de la lente, entonces la amplitud compleja en el plano focal imagen viene dada por la expresión  $F(x'/f', y'/f')$ , siendo  $f'$  la focal imagen de la lente y  $\lambda$  la longitud de onda de la luz monocromática utilizada. Como la transformada de Fourier suele ser una función que toma valores complejos, no es posible registrarla directamente, pues si se coloca, por ejemplo, una placa fotográfica en el plano focal imagen de la lente lo que se almacenaría en ella sería el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier, que es proporcional a la intensidad.

La transformada de Fourier  $F(x'/f', y'/f')$  puede registrarse holográficamente considerándolo como una onda objeto:

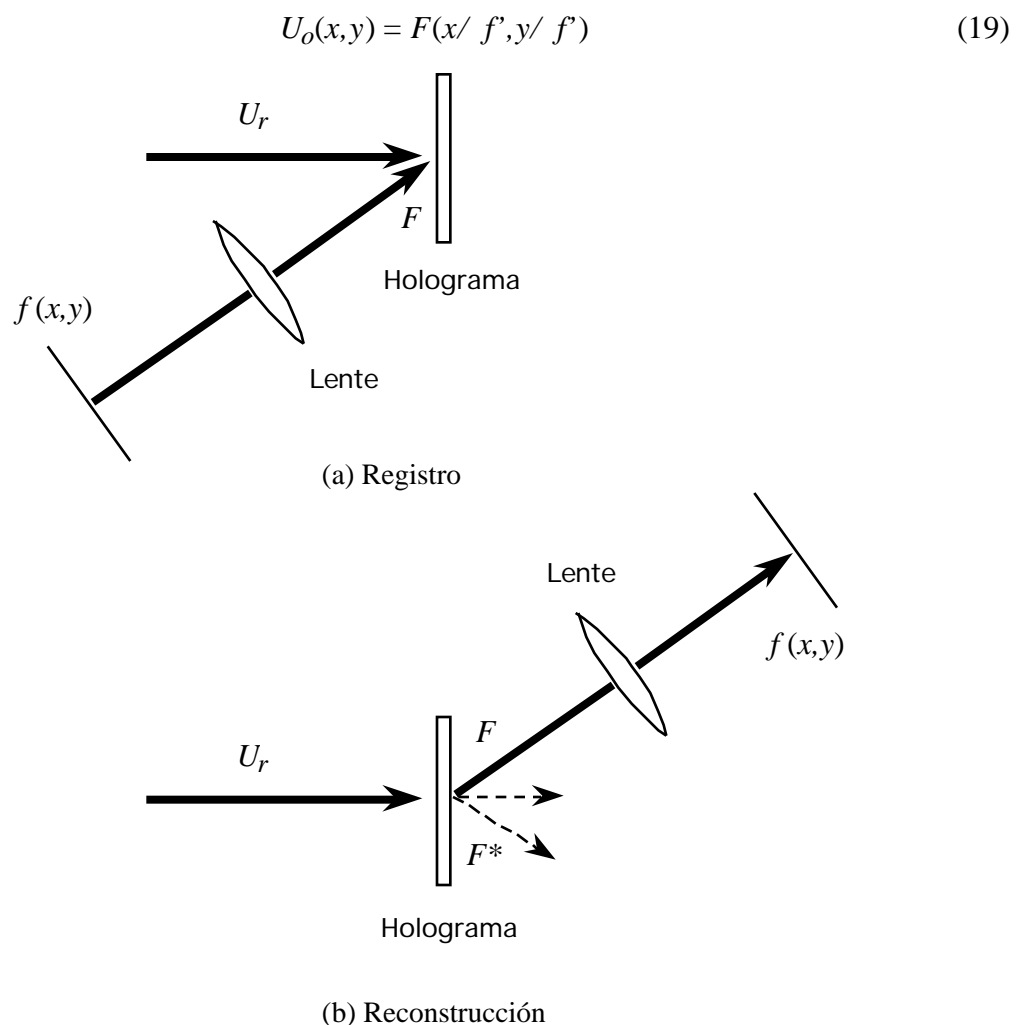


Figura 10.- (a) Registro y (b) reconstrucción de la transformada de Fourier de una función  $f(x, y)$ .

haciéndola interferir con una onda de referencia  $U_r(x,y)$ , y registrando la superposición como un holograma (Figura 10 (a)). La reconstrucción se lleva a cabo iluminando el holograma con una onda de reconstrucción idéntica a la onda de referencia  $U_r$  (Figura 10 (b)). Si a la onda reconstruida se le hace una transformada inversa de Fourier utilizando una lente, entonces es posible recuperar la función original  $f(x,y)$ .

## 8.- HOLOGRAFÍA DE VOLUMEN

Hasta el momento se ha supuesto que el holograma es una transparencia plana de espesor despreciable sobre la que se registra el diagrama interferencial de las ondas objeto y referencia. Ahora se va a considerar el registro de hologramas en medios de espesor no despreciable y que reciben el nombre de hologramas de volumen. Consideremos el caso sencillo en el que tanto la onda objeto como la onda de referencia son ondas planas con vectores de onda  $\mathbf{k}_o$  y  $\mathbf{k}_r$ , respectivamente. El medio de registro se extiende entre los planos  $z = 0$  y  $z = d$ , siendo  $d$  el espesor del material. El diagrama interferencial es ahora una función de  $(x, y, z)$  de modo que la intensidad  $I$  en cada punto del material viene dada por la ecuación:

$$\begin{aligned} I(x,y,z) &= |\sqrt{I_r} \exp(-j \mathbf{k}_r \mathbf{r}) + \sqrt{I_o} \exp(-j \mathbf{k}_o \mathbf{r})|^2 = \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\mathbf{k}_o \mathbf{r} - \mathbf{k}_r \mathbf{r}) = I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(\mathbf{k}_g \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (20)$$

donde:

$$\mathbf{k}_g = \mathbf{k}_o - \mathbf{k}_r \quad (21)$$

recibe el nombre de *vector de la red*. La intensidad  $I(x,y,z)$  corresponde a un diagrama sinusoidal de período dado por:

$$= \frac{2}{|\mathbf{k}_g|} \quad (22)$$

con las superficies de intensidad constante (franjas de interferencia) normales al vector de la red.

Por ejemplo, si la onda de referencia incide según la dirección del eje  $z$ , y la onda objeto incide en una dirección que forma un ángulo con el eje  $z$  (Figura 11), entonces se tiene que:

$$|\mathbf{k}_g| = 2k \sin \frac{\alpha}{2} \quad (23)$$

siendo  $k = 2\pi / \lambda$  el período de la red:

$$d \sin \theta = \lambda \tag{24}$$

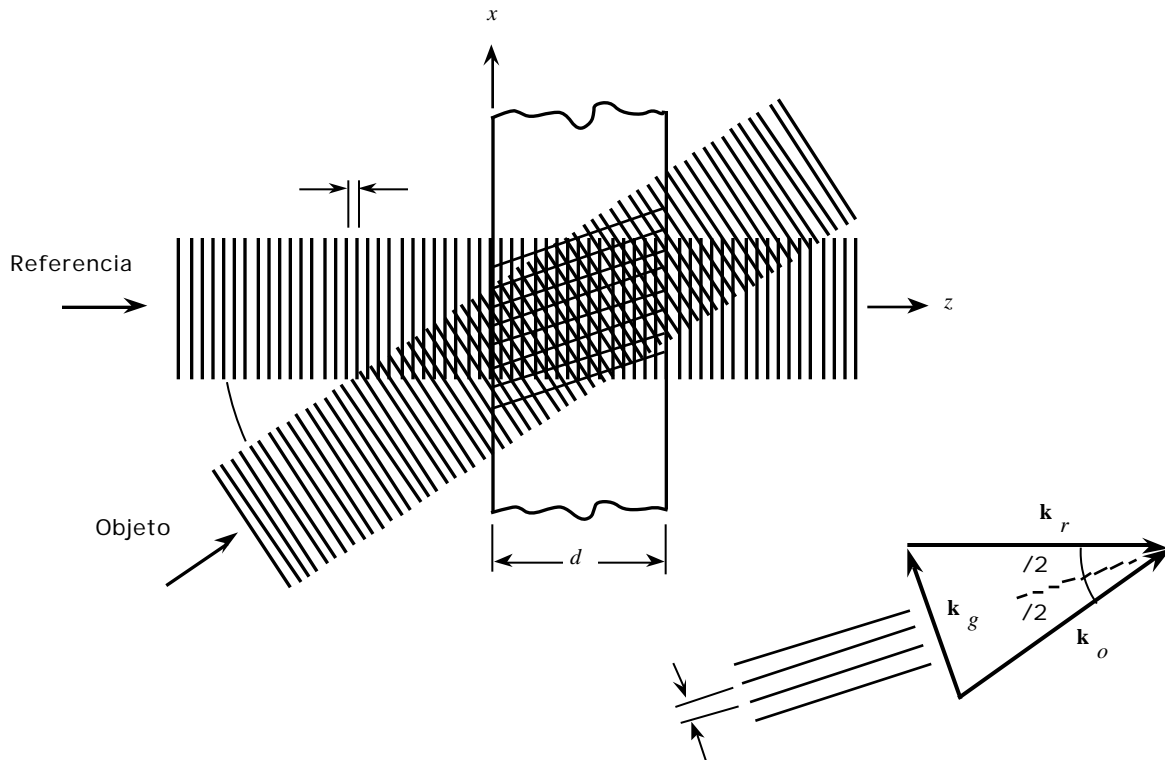


Figura 11.- Registro de un holograma de volumen con dos ondas planas. La onda de referencia incide normalmente sobre la superficie del medio de registro mientras que la onda objeto forma un ángulo con el eje z.

Este diagrama interferencial sirve como una red de difracción de volumen. Cuando se ilumina el holograma con una onda plana de reconstrucción, los planos paralelos de la red (franjas de interferencia) reflejan la onda sólo si se cumple la *Ley de Bragg*:

$$2d \sin \theta = \lambda \tag{25}$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre los planos de la red y la onda de referencia incidente. En el caso analizado como ejemplo se tiene que  $\theta = \pi/2$ , de modo que:

$$2d \sin \frac{\pi}{2} = \lambda \tag{26}$$



por lo que si se reconstruye el holograma con una onda de reconstrucción idéntica a la onda de referencia utilizada en el registro se cumplirá la Ley de Bragg, y esta onda de reconstrucción será reflejada por los planos de la red y se reconstruirá la onda objeto original tal y como se ha esquematizado en la Figura 12. Este tipo de holograma se conoce como *holograma de volumen por transmisión*.

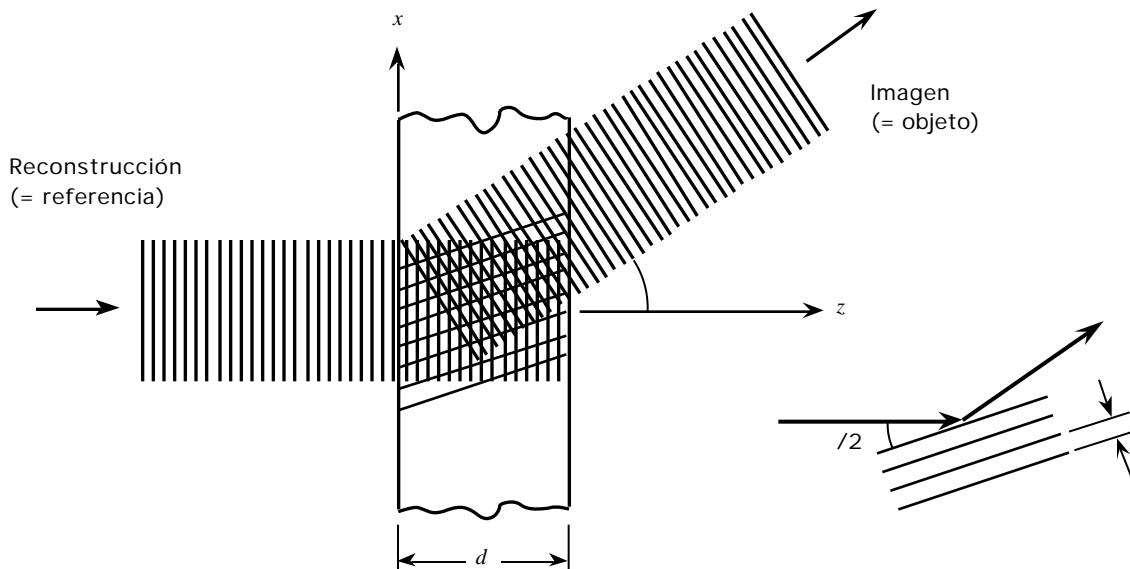


Figura 12.- Reconstrucción del holograma de volumen de la Figura 11.

Supongamos ahora que el holograma se ilumina con una onda de reconstrucción de longitud de onda  $\lambda'$  diferente de la longitud de onda  $\lambda$  utilizada en la etapa de registro. Evidentemente, la Ley de Bragg, que ahora tomará la forma:

$$\text{sen } \frac{\theta}{2} = \frac{\lambda'}{2d} \quad (27)$$

no se cumplirá y la onda no será reflejada por los distintos planos de la red. Se deduce que la onda objeto es reconstruida sólo si la longitud de onda utilizada en la etapa de reconstrucción es la misma que la utilizada en la etapa de registro. Si la luz de reconstrucción fuera policromática (por ejemplo, luz blanca), sólo la longitud de onda "correcta" sería reflejada y se produciría la reconstrucción para una onda con esa longitud de onda. Aunque el proceso de registro debe hacerse con luz monocromática, la reconstrucción puede llevarse a cabo con luz blanca. Esto proporciona una clara ventaja en muchas aplicaciones de la Holografía.

La Figura 13 muestra la misma geometría para el registro del holograma de volumen pero reconstruyendo con la onda conjugada de la onda de referencia. En esta situación la onda imagen reconstruida corresponde a la onda conjugada de la onda objeto.

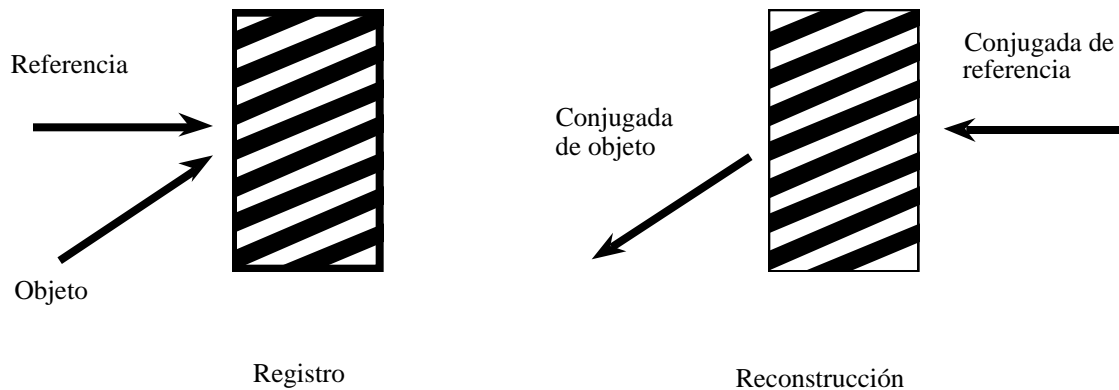


Figura 13.- Reconstrucción de un holograma de volumen por transmisión con la conjugada de la onda objeto.

Otro tipo de holograma que puede verse con luz blanca es el *holograma de volumen por reflexión*. Este holograma se registra haciendo interferir una onda objeto y una onda de referencia que inciden sobre el medio de registro por caras opuestas y con sentidos opuestos, como se ve en la Figura 14.

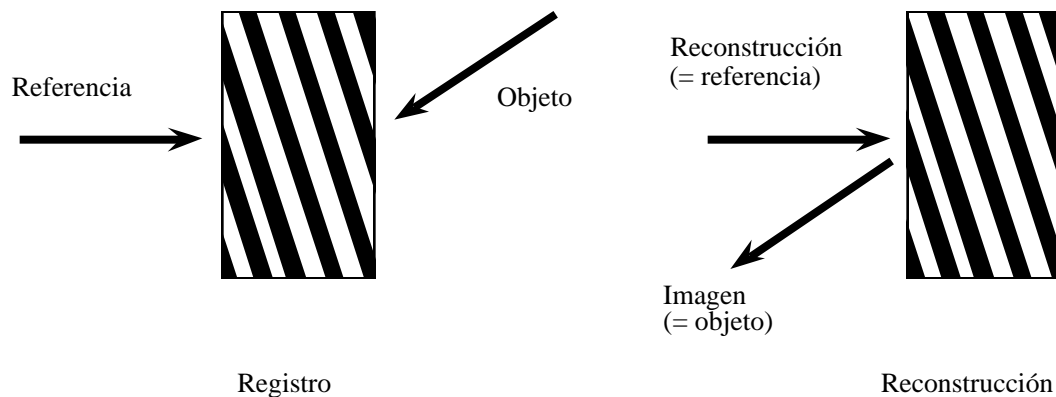


Figura 14.- Registro y reconstrucción de un holograma de volumen por reflexión.

En el holograma por reflexión, al iluminar el holograma con una onda de reconstrucción idéntica a la onda de referencia, la onda objeto es reconstruida por la reflexión de la onda de referencia por los distintos planos de la red (Figura 15).

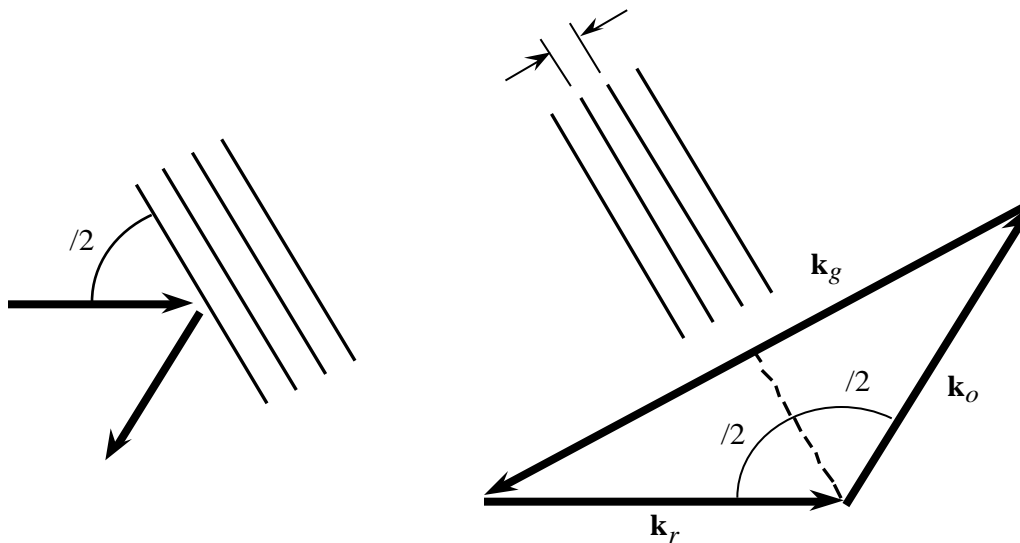


Figura 15.- Esquema correspondiente a la reconstrucción de un holograma de volumen por reflexión.

Es importante señalar que en un holograma de volumen el espaciado entre las franjas de interferencia,  $\Lambda$ , no es despreciable frente al espesor del holograma,  $d$ , y esto sucede siempre que el factor adimensional:

$$Q = \frac{2}{n} \frac{d}{\Lambda}$$

es mayor que 10, donde  $n$  es el índice de refracción del material de registro. Por ejemplo, para  $\Lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $\Lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$  y  $n = 1.6$ , se tiene obtiene  $Q = 25$ , y el holograma es de volumen. Sin embargo si  $\Lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $\Lambda = 5 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$  y  $n = 1.6$ , quedaría  $Q = 1$ , y el holograma no sería de volumen correspondiendo a lo que se conoce como *holograma delgado*.

La Figura 16 representa un esquema práctico de la obtención y reconstrucción del holograma por reflexión de un objeto. Para obtener una imagen nítida la fuente de luz blanca utilizada en la etapa de reconstrucción debe ser lo más puntual posible.

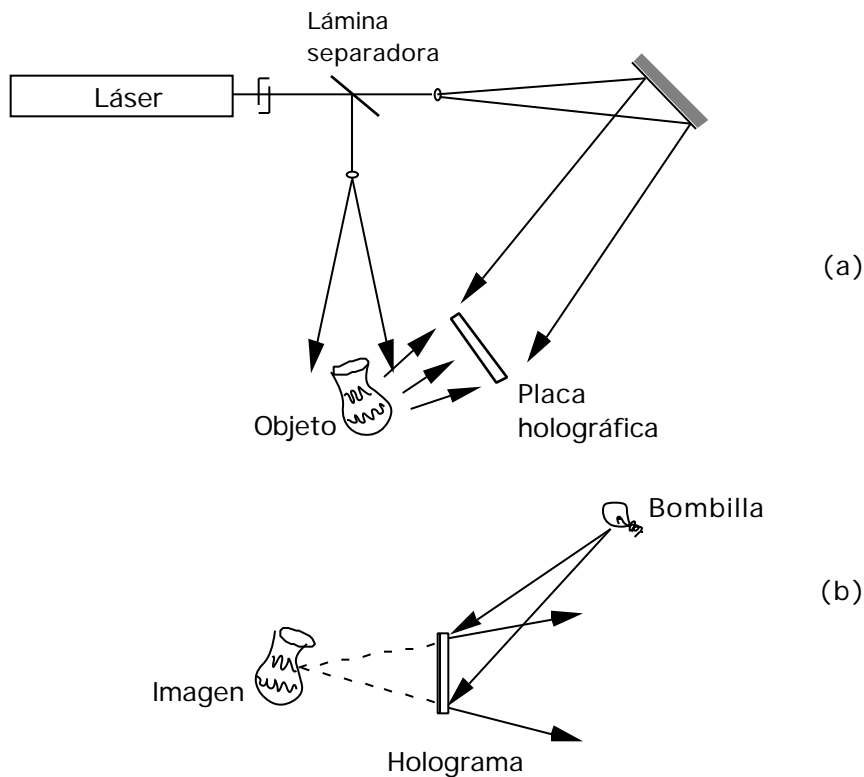


Figura 16.- Esquema práctico de la (a) obtención y (b) reconstrucción del holograma por reflexión de un objeto.

## BIBLIOGRAFÍA

1. “Fundamentals of Photonics”, *B. E. A. Saleh y M. C. Teich*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991, cap. 4.
2. “Óptica”, *J. Casas*, Librería General, Zaragoza, 1994, cap. 14.
3. “Óptica”, *E. Hecht y A. Zajac*, Addison Wesley, México, 1988, cap. 14.
4. “Holografía: Conceptos básicos, Materiales de Registro y Aplicaciones”, *A. Beléndez, I. Pascual y A. Fimia*, Revista Española de Física, Vol. 5, Nº 3, pp. 40-46 (1991).
5. “Volume Holography and Volume Gratings”, *L. Solymar y D. J. Cooke*, Academic Press, Londres, 1981.
6. “Principles of Holography”, *H. M. Smith*, Wiley Interscience, Nueva York, 1969.
7. “Engineering Optics”, *K. Iizuka*, Springer-Verlag, Nueva York, 1987, cap. 8.