



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

Holografía: almacenamiento de imágenes en 3D

Autor: Pablo Álvarez López

Tutores: Jose Ignacio Martín Carbajo
Julio Ruiz García

Índice general

Introducción	1
1. Conceptos previos	5
1.1. La luz como onda electromagnética	5
1.1.1. Interferencia de la luz	5
1.1.2. Luz monocromática.	5
1.1.3. Coherencia espacial y temporal	5
1.1.4. Polarización de la luz	6
1.2. Difracción de Bragg	7
2. Principios de la holografía	9
2.1. Interferencia de la luz y la holografía	10
2.2. Holograma como red de difracción.	19
2.3. Reconstrucción del frente de ondas.	21
2.4. Hologramas tridimensionales.	23
3. Tipos de hologramas	25
3.1. Hologramas de transmisión	26
3.2. Hologramas de reflexión	26
3.2.1. Hologramas de Denisyuk	27
3.3. Hologramas de imagen plana	27
3.3.1. Hologramas de imagen enfocada	28
3.3.2. Hologramas transferidos de apertura total	29
3.4. Hologramas de arco iris	29
3.5. Holografía de Fourier	30
3.6. Hologramas de 360°	31
3.6.1. Hologramas cilíndricos	32
3.6.2. Hologramas cónicos	33
3.6.3. Hologramas de 360° con placas holográficas.	34
3.6.4. Hologramas de 360° planos	35
3.7. Holografía de láser pulsado y retratos holográficos	35
4. Aplicaciones de la holografía.	37

5. Proceso de grabado de un holograma de Denisyuk	39
5.1. Dispositivo experimental	40
5.1.1. Láser	40
5.1.2. Placas holográficas	40
5.1.3. Disposición de la figura.	41
5.1.4. Disposición de los elementos ópticos	41
5.1.5. Preparación del proceso de revelado.	43
5.2. Proceso de grabado	43
5.2.1. Placas BB520. $10000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$	45
5.2.2. Placas VRP-M. $3000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$	45
5.3. Resultados finales.	47
5.4. Cálculo de la red de difracción formada por nuestro patrón de interferencia.	48
6. Conclusiones.	51
Bibliografía	52

Introducción

En el siglo XIX, la invención de la fotografía, una técnica capaz de grabar imágenes en dos dimensiones, permite al ser humano plasmar lo que ve con sus ojos. Esta técnica fue avanzando con los años, pasando de fotos en blanco y negro a fotos a color y de lo analógico a lo digital. Sin embargo, esta técnica no recoge toda la información acerca del objeto que se fotografía. Vivimos en un mundo en tres dimensiones, pero una foto solo puede captar dos. En términos físicos, una foto capta la distribución bidimensional de la irradiancia de una imagen. Es decir, solo guarda información acerca de la amplitud de la onda de luz que forma la imagen, no de su fase. El siguiente paso sería poder grabar una imagen tridimensional, una imagen que tenga profundidad y se vea igual que lo hacemos con nuestros ojos. En esto consiste la holografía, en grabar una imagen de un objeto de manera que al observarla notemos lo mismo que si este estuviera realmente ahí, con profundidad y pudiendo verlo desde cualquier perspectiva.

Hoy en día la gente asocia el término holograma con algo futurista o la ciencia-ficción y se imaginan un rayo de luz que emerge de la nada formando una imagen en directo del capitán Spock que te da instrucciones sobre qué hacer con tu nave. Esto también hace que mucha gente piense que ciertas imágenes son hologramas cuando no es así. Que un vídeo se introduzca en un ambiente en tres dimensiones dando la sensación de que lo que se proyecta está ahí o que aparezca Harry Potter en una pantalla transparente de un parque temático, no hace que lo que veamos sea un holograma. La imagen, en esos casos, sigue siendo bidimensional, sin profundidad, por lo que no podemos estar hablando de hologramas. La realidad es que la holografía se desarrolló a mediados del siglo XX y hoy en día se pueden ver hologramas en sitios más comunes de lo que se piensa, como puede ser en una tarjeta de crédito o en cualquier billete.

La holografía surge en 1948 gracias al trabajo de Dennis Gabor, un ingeniero eléctrico que ganó el premio Nobel de física en 1971 por su trabajo en la creación de un método capaz de crear imágenes en tres dimensiones, es decir, por inventar la holografía. Gabor explica en su conferencia tras recibir el premio Nobel [6] los conceptos más importantes de la holografía y cómo fue evolucionando la holografía desde sus inicios. Gabor comenta cómo acabó descubriendo la holografía de manera indirecta. Este trabajaba en el microscopio electrónico y buscaba aumentar su poder de resolución para poder resolver distintas redes atómicas. Gabor se dio cuenta de una manera de conseguir su objetivo, tomar una imagen mala de los electrones, pero una que contuviera toda la información y después

corregirla por medios ópticos. Gabor confiaba en que hacer esto era posible utilizando luz coherente, pero la fotografía solo permite captar información de la amplitud de las ondas. Entonces pensó que la única manera de recordar la fase de la onda sería comparándola con otra. Así se le ocurrió hacer interferir con la onda del objeto una fuente de luz coherente o haz de referencia. De esta manera se formaría un patrón de interferencia en el que los máximos estarían donde las fases de las dos ondas fuesen idénticas. Si grabamos este patrón y lo iluminamos con el haz de referencia el haz objeto es reconstruido.

Esto le llevó a completar su esquema del microscopio electrónico por reconstrucción de frentes de ondas. Este microscopio producía la interferencia entre el haz del objeto y el fondo coherente, es decir, la parte no difractada del haz de iluminación. A este patrón de interferencia lo llamó “holograma”, del griego “holos-” que significa “todo”, haciendo referencia a que capta toda la información de la onda. Después se reconstruía el holograma y se corregían las aberraciones de la imagen por medios ópticos.

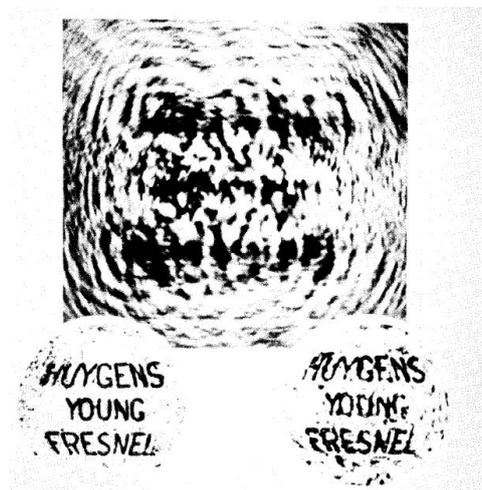


Figura 1: Primer holograma grabado por Dennis Gabor. Abajo a la izquierda está el objeto original, en el centro el holograma (patrón de interferencia) y abajo a la derecha la reconstrucción de la imagen. [6]

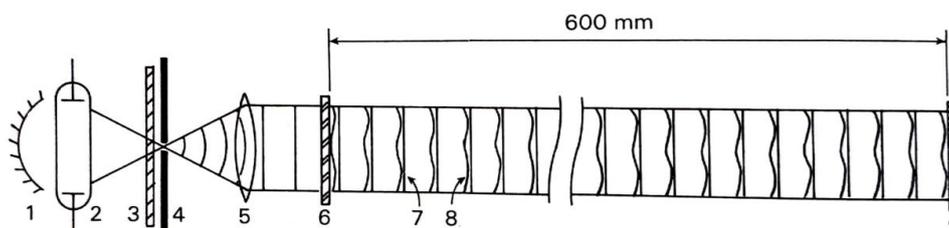


Figura 2: Sistema holográfico “en línea” de Dennis Gabor. 1, Reflector; 2, lámpara de mercurio; 3, filtro verde de banda estrecha; 4, pinhole; 5, lente o colimador; 6, transparencia; 7, frente de ondas plano de referencia; 8, frente de ondas del objeto; 9, placa holográfica que graba las diferencias de fase entre 7 y 8 en forma de patrón de interferencia. [2]

Aunque su trabajo inicialmente consistía en el microscopio electrónico, más tarde también investigó el campo de la holografía óptica. El mayor problema que encontró fue el conseguir una fuente de luz con la suficiente coherencia. Gabor grabó sus primeros hologramas usando una lámpara de mercurio, que tenía una longitud de coherencia de 0.1 mm. Para conseguir coherencia espacial hizo pasar la luz por un orificio de $3\mu\text{m}$ de diámetro. Así consiguió hacer hologramas de objetos de 1 cm de diámetro, con tiempos de exposición de pocos minutos, en las emulsiones más sensibles que había disponibles. La poca longitud de coherencia le forzó a que la disposición de los distintos elementos fuese en un solo eje. A esto se le llama holografía “en línea” (figura 2) y era la única posible en esos tiempos. Gabor se encontró que todos los hologramas aparecían con el mismo defecto, la imagen virtual que se reconstruía del objeto se veía superpuesta a otra imagen real que también surge al reconstruir el haz.

En 1962, con el descubrimiento del láser, la holografía experimentó un desarrollo exponencial. La gran longitud de coherencia del laser de He-Ne permitió a Leith y Upatnieks separar el haz de referencia del haz que iluminaba el objeto. En vez de atravesar el objeto, lo rodeaba. De esta manera las dos imágenes se separaban no solo en profundidad, sino también angularmente. Además, la intensidad del láser era tremendamente superior a la de la lámpara de mercurio, lo cual permitió hacer hologramas de objetos más grandes con tiempos de exposición asequibles.

A partir de ahí la holografía ha ido evolucionando, apareciendo nuevas técnicas para conseguir mejores hologramas, como pueden ser los hologramas de reflexión o los hologramas transferidos, que son hologramas que toman como objeto la imagen real que forma otro primer holograma.

En este trabajo daremos una introducción a la holografía, hablaremos sobre los principios físicos detrás de ella, así como de los distintos tipos de hologramas y consideraciones prácticas para llevar a cabo su grabación. Por último describiremos el proceso de grabación de un holograma de Denisyuk que hemos llevado a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología (CINN).

Capítulo 1

Conceptos previos

A lo largo del trabajo hablaremos de muchos conceptos físicos ya estudiados a lo largo de la carrera que son muy importantes en el estudio de la holografía. En este capítulo lo que haremos es recordar los que son más importantes y están más presentes en la holografía.

1.1. La luz como onda electromagnética

Para entender todos los fenómenos físicos que tienen que ver con la luz se necesita considerarla como una onda electromagnética.

Dentro de la teoría ondulatoria de la luz debemos destacar los siguientes conceptos.

1.1.1. Interferencia de la luz

El fenómeno de interferencia ocurre cuando dos o más ondas se superponen unas a otras, dando lugar a una onda resultante con mayor, menor, o igual amplitud. Este fenómeno es clave en la holografía. Un holograma necesita grabar tanto la amplitud como la fase del frente de ondas proveniente del objeto, para ello se hace interferir con un haz de referencia conocido. El holograma es un patrón de interferencia que forman estas ondas.

1.1.2. Luz monocromática.

Un haz de luz, al ser radiación electromagnética, está formado por distintas ondas que pueden tener distintas frecuencias. Es la frecuencia la que determina el color de la luz, la luz blanca tiene componentes de todo el espectro visible, mientras que la luz monocromática (de un solo color) tiene una única frecuencia.

1.1.3. Coherencia espacial y temporal

La coherencia es una propiedad de la luz láser que es crucial en la holografía. Hay dos tipos de coherencia:

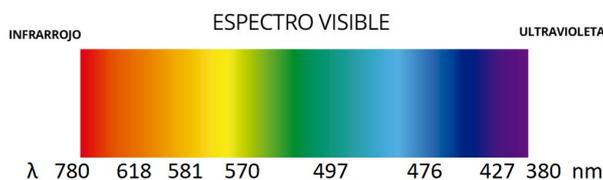


Figura 1.1: Espectro visible

- **Coherencia temporal:** Se dice que un haz de luz tiene coherencia temporal cuando la fase de la onda en un tiempo t es la misma que en un tiempo $t + \Delta t$. El tiempo durante el cuál se puede considerar que un haz de luz es coherente se denomina tiempo de coherencia τ_c y la longitud de coherencia se define como $L_c = c\tau_c$. Es decir, el tiempo de coherencia nos da el tiempo durante el cual la fase de la onda es “predecible”. La coherencia temporal está relacionada por tanto con la monocromaticidad de la luz.

En holografía la longitud de coherencia es muy importante, cuanto mayor sea, mayor será el tamaño posible de los objetos a capturar.

- **Coherencia espacial:** Se dice que un haz de luz tiene coherencia espacial cuando la diferencia de fase entre dos puntos en el espacio se mantiene constante en el tiempo. La coherencia espacial está relacionada con la direccionalidad de la luz, es inversamente proporcional al diámetro aparente de la fuente luminosa. Es decir, a mayor coherencia espacial la fuente de luz será más cercana a un punto en el espacio.

Se dice que la luz es coherente cuando lo es espacial y temporalmente.

Se puede profundizar en estos conceptos en [3], [4] y [5]

1.1.4. Polarización de la luz

Otra propiedad necesaria para la formación de patrones de interferencia en la holografía es la polarización de la luz. La polarización hace referencia a la manera en la que oscila el campo eléctrico con el tiempo. Si este oscila siempre en un mismo plano paralelo a la dirección de propagación se dice que la polarización es **lineal**. Si oscila de manera que forma un círculo en un plano normal a la dirección de propagación se dice que la polarización es **circular** y si forma una elipse se dice que es **elíptica**.

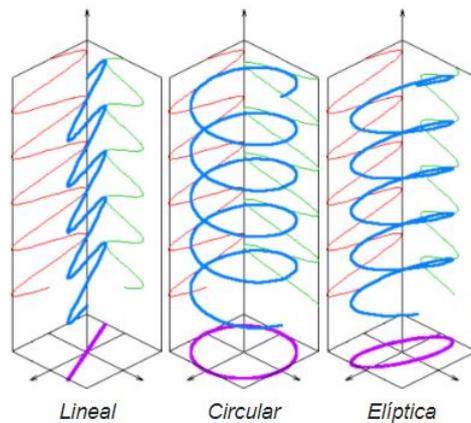


Figura 1.2: Tipos de polarización.[8]

1.2. Difracción de Bragg

La difracción de Bragg es un fenómeno que ocurre cuando la luz pasa a través de un medio hecho de capas uniformemente espaciadas (normalmente una red cristalina) una distancia del orden de la longitud de onda de la luz incidente. La manera de comprenderlo es pensando en la difracción como una reflexión de los rayos originada por planos de átomos de la red cristalina (llamados planos de Bragg) separados una distancia d entre ellos. En la figura observamos que para que las dos ondas sigan en fase y se produzca interferencia constructiva, las diferencias de caminos ópticos deben ser un número entero de veces la longitud de onda de la luz. De ello se obtiene la ley (o condición) de Bragg.

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

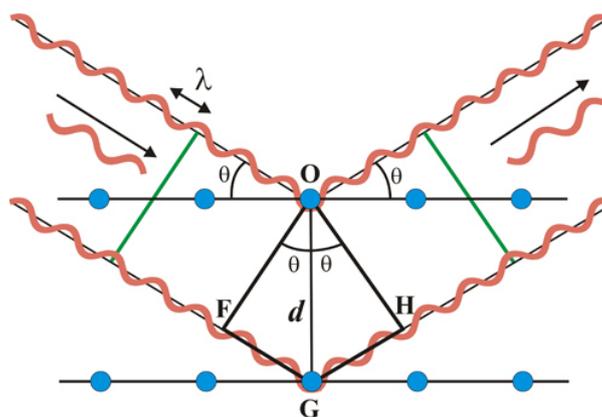


Figura 1.3: Condición de Bragg.[7]

Capítulo 2

Principios de la holografía

El objetivo de la holografía es conseguir captar imágenes en 3 dimensiones, de manera que podamos reconstruirlas y ver una imagen igual al objeto que hemos grabado desde cualquier ángulo, pero ¿cómo podemos hacer esto?

La manera de plantearse este problema es considerando la luz como una onda electromagnética y pensando en qué le ocurre a estas ondas cuando nosotros “vemos” un objeto. Cuando la luz incide en un cuerpo, la luz transmitida y reflejada ve alterado su frente de ondas. Es este frente de ondas el que llega a nuestros ojos y nos hace ver la imagen del objeto, sin embargo, nuestro ojo solo ve una porción del mismo y si nos movemos iremos viendo trozos distintos. Por tanto la única manera de obtener toda la información del objeto es reconstruyendo por completo el frente de ondas. De este modo, si hacemos esta reconstrucción, una persona vería exactamente lo mismo que si el objeto estuviese realmente allí.

Un holograma es una grabación de toda esta información que al ser iluminado correctamente genera una réplica del frente de ondas del objeto. Algo importante a destacar es que habrá que tener especial cuidado con la fuente de luz, pues el frente de ondas da información no solo del objeto, sino también de la fuente luminosa. Para ello se necesita un frente de ondas plano, lo cual se puede conseguir usando luz monocromática desde una fuente de luz puntual en el “infinito”.

Para captar la información del objeto y crear el holograma se necesitan al menos dos rayos de luz, uno que se llamará haz objeto, el cual incide en la pantalla de la placa holográfica tras ser reflejado por el objeto, y otro que llamaremos haz de referencia que incide directamente en la placa. De la superposición de los dos haces se forma un patrón de interferencia que tiene toda la información necesaria para recrear el frente de ondas del objeto. Este patrón de interferencia se graba en la emulsión fotosensible y luego se somete a esta a un proceso químico de revelado por el que se realza el patrón y hace que la placa se vuelva insensible a más exposición. En las dos últimas décadas también se han desarrollado nuevos materiales fotosensibles los cuales ya no necesitan el clásico revelado por un proceso químico, simplemente con un choque de calor en un horno a una temperatura elevada es suficiente para revelar el holograma.

Tras el procesado de la placa holográfica ya tendremos grabado nuestro holograma pero, ¿cómo se hace para ver la imagen plasmada en el holograma? La respuesta es simple,



Figura 2.1: Esquema de cómo se graba un holograma.

basta con iluminar el holograma con el haz de referencia desde la misma posición con la que se grabó (haz que llamaremos ahora haz de reconstrucción). Al hacer esto emerge una réplica del haz objeto (que llamaremos haz imagen), por lo que si un observador mira al holograma sus ojos captarán este haz y verá como si el objeto estuviese realmente allí, en 3 dimensiones y pudiendo verlo con distintas perspectivas si el observador se mueve.

2.1. Interferencia de la luz y la holografía

Como hemos explicado, un holograma consiste en el registro de un patrón de interferencia, por ello hablaremos sobre el fenómeno de interferencia de la luz y cómo se aplica a la holografía siguiendo lo que se explica en [1]. También explicaremos con más detalle los conceptos de coherencia de la luz. Debemos resaltar que, de momento, estamos considerando el holograma como un objeto bidimensional.

Consideramos primero el caso más sencillo, dos ondas luminosas que emergen de dos fuentes monocromáticas puntuales O_1 y O_2 en un medio isótropo (Figura 2.2).

Supongamos que las ondas están polarizadas linealmente (el vector de campo eléctrico es perpendicular al plano de la figura) y que tienen la misma frecuencia ν y frecuencia angular $\omega = 2\pi\nu$. Consecuentemente, las oscilaciones de la onda de luz en un punto arbitrario M vendrán dadas por las ecuaciones

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases} \quad (2.1)$$

donde A_i es la amplitud de la onda que llega a M desde O_i y $\varphi_i = \varphi_{0i} - \frac{2\pi r_i}{\lambda}$, siendo φ_{0i} el desfase inicial de la onda, $\frac{2\pi r_i}{\lambda}$ el que ocurre al trasladarse la onda desde O_1 hasta M y λ la longitud de onda.

La onda resultante que aparece en el punto M se obtiene de la suma de x_1 y x_2 :

$$x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (2.2)$$

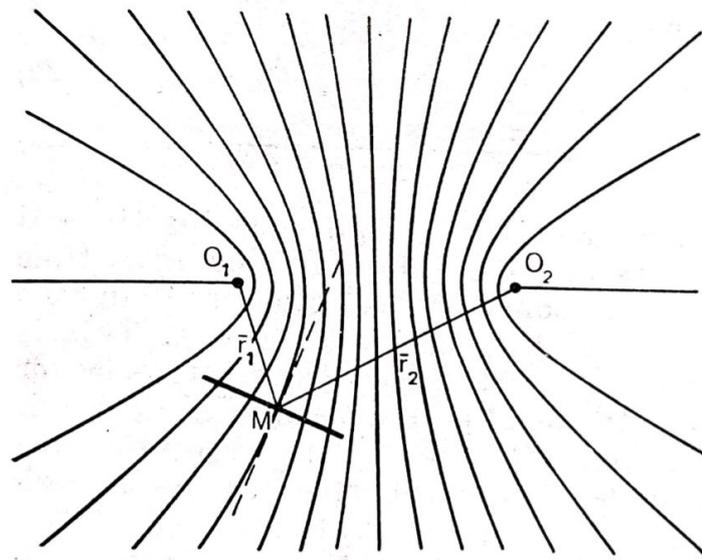


Figura 2.2: Ondas estacionarias formadas en el espacio alrededor de dos fuentes puntuales coherentes.[1]

Cuya fase y amplitud cumplen:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2.3)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \right) \quad (2.4)$$

Cualquier fotoreceptor (la placa holográfica) puede someterse a una exposición durante un tiempo que es mucho mayor al periodo de oscilación de la onda. Es por esto que siempre se graba el valor medio de la intensidad a lo largo de muchos periodos. Si las fuentes O_1 y O_2 son completamente independientes, el valor medio de $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ durante el tiempo de grabado será cero. Si es así, la ecuación (2.3) se convierte en

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 \quad (2.5)$$

En este caso se dice que las ondas son **incoherentes**.

De esta última ecuación deducimos que, al superponer dos ondas incoherentes, conseguimos que se sumen sus intensidades.

Si el valor de $\varphi_{01} - \varphi_{02}$ no cambia con el tiempo se dice que las ondas son **coherentes**. En este caso, la ecuación (2.3) no nos dice que las intensidades se sumen. En concreto, si las ondas están en fase, es decir,

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \pm 2k\pi, \quad (2.6)$$

con k un entero cualquiera, lo que se suman son las amplitudes:

$$A = A_1 + A_2.$$

Cuando las ondas están en oposición de fase,

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \pm(2k + 1)\pi \quad (2.7)$$

sus amplitudes se restan:

$$A = A_1 - A_2.$$

De esta forma se genera un sistema de ondas estacionarias en el espacio. Sus máximos (antinodos) corresponden a la condición (2.6) y sus mínimos (nodos) a la condición (2.7).

Lo siguiente que uno se pregunta es cuál es la forma de los frentes de ondas de nodos y de antinodos. Es fácil observar que si $\varphi_{01} = \varphi_{02} = 0$ la condición (2.6) se convierte en

$$r_1 - r_2 = \pm k\lambda \quad (2.8)$$

Esta ecuación corresponde a un sistema de hiperboloides (un hiperboloide para cada k) de revolución cuyo eje de rotación es O_1O_2 .

Teniendo en cuenta que $r_1 - r_2$ no puede exceder la distancia a entre las fuentes O_1 y O_2 , podemos calcular cuál es el número total de estos hiperboloides N_{an} . Obtenemos

$$k_{max} = \frac{a}{\lambda} \implies N_{an} = 2\frac{a}{\lambda} + 1.$$

Análogamente la ecuación de la familia de hiperboloides para las superficies de nodos es

$$r_1 - r_2 = \frac{\pm(2k + 1)}{2}\lambda, \quad (2.9)$$

y el número total de estos hiperboloides es

$$N_n = 2\frac{a}{\lambda}.$$

Los planos tangentes a las superficies de nodos y antinodos dividen el ángulo entre los vectores r_1 y r_2 (llamémoslo 2α) a la mitad. La distancia entre hiperboloides adyacentes será menor en la línea que une O_1 y O_2 . En esta región las superficies de antinodos son equidistantes, y la distancia d que los separa se obtiene de la ecuación (2.8) y es

$$d = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.10)$$

La correspondiente frecuencia espacial del patrón de interferencia será

$$f = \frac{1}{d} = \frac{2}{\lambda}. \quad (2.11)$$

En el caso general la distancia que se obtiene es

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \quad (2.12)$$

y

$$f = \frac{2 \sin \alpha}{\lambda}. \quad (2.13)$$

Las ecuaciones (2.12) y (2.13) determinan la frecuencia espacial del patrón de interferencia y por tanto establecen la resolución espacial necesaria del receptor. Visto de otro modo, la resolución del medio receptor determina la región del campo producido por la interferencia en la que el patrón se puede resolver.

El **contraste** del patrón de interferencia se define a partir de las amplitudes de las ondas:

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{(A_1 + A_2)^2 - (A_1 - A_2)^2}{(A_1 + A_2)^2 + (A_1 - A_2)^2}. \quad (2.14)$$

Manipulando esta ecuación se obtiene

$$K = \frac{2\sqrt{p}}{1+p}, \quad (2.15)$$

donde $p = \frac{A_1^2}{A_2^2}$ es el cociente de las intensidades de las ondas que interfieren. Salta a la vista que el contraste de un patrón es máximo e igual a uno cuando $p = 1$, es decir, cuando las intensidades de las fuentes son iguales.

Por consiguiente, para el caso ideal mostrado en la figura 2.2, solo se deben tener en cuenta ciertas condiciones espaciales del receptor cuando se grabe el patrón.

Debemos hacer notar que en este análisis simplificado no estamos teniendo en cuenta la naturaleza vectorial de las ondas electromagnéticas. Este tratamiento, estrictamente hablando, solo se satisface para el plano mostrado en la figura 2.2, donde las direcciones del campo eléctrico de las dos ondas coincide. Un análisis vectorial más riguroso no cambiará la configuración de máximos y mínimos de la interferencia, solo cambiará la distribución espacial del contraste del patrón. De hecho, el contraste será igual a cero en los puntos en los que los vectores de campo eléctrico sean perpendiculares.

Consideramos ahora un caso menos ideal, en el que O_1 y O_2 son fuentes puntuales que emiten la misma cantidad de luz pero a frecuencias distintas ν' y ν'' (con longitudes de onda λ' y λ'' respectivamente). Seguimos suponiendo que emiten luz con una diferencia de fase constante e igual a cero para cada frecuencia.

Es evidente que dos sistemas de hiperboloides estacionarios, uno correspondiente a λ' y otro a λ'' , se observarán en el espacio que rodea O_1 y O_2 (Figura 2.3). Sin embargo, solo la posición de la superficie de antinodos correspondiente a $k = 0$ coincidirá para ambas longitudes de onda. El resto de superficies tendrán una separación entre sí que crece con valores crecientes de k y $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda''$. Consecuentemente, a medida que crece k , el contraste de las franjas observadas disminuirá y se hará cero cuando la superficie de antinodos de una longitud de onda coincida con la de nodos de la otra. Las ecuaciones (2.8) y (2.9) proporcionan la condición

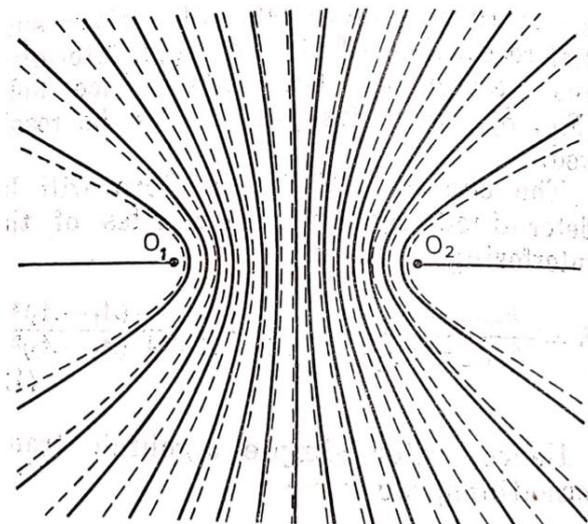


Figura 2.3: Fuentes luminosas emitiendo luz a dos frecuencias distintas.[1]

$$k\lambda' = \frac{2k+1}{2}\lambda'',$$

donde

$$k = \frac{1}{2} \frac{\lambda''}{\lambda' - \lambda''} \approx \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (2.16)$$

Si seguimos aumentando la diferencia de caminos ópticos el patrón de interferencia volvería a aparecer, alcanzar contraste máximo en $k = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, volver a desaparecer en $\frac{3}{2} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$, etc.

La condición (2.16) es determinante a la hora de calcular cómo de monocromática se necesita que sea la fuente luminosa, la diferencia máxima de caminos permitida cuando se instala una fuente y también la resolución espectral del receptor necesaria para poder grabar el patrón de interferencia.

Si asumimos que las fuentes de luz O_1 y O_2 emiten un espectro continuo en el intervalo entre λ' y λ'' , entonces el patrón de interferencia desaparecerá cuando las superficies de antinodos formadas por las componentes monocromáticas en las que se puede dividir el intervalo $[\lambda', \lambda'']$ llenen completamente el espacio entre superficies de antinodos formadas por λ' . Para que esto ocurra, es esencial la condición

$$k\lambda' = (k+1)\lambda''.$$

Por tanto,

$$k = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (2.17)$$

No es difícil ver, a partir de las ecuaciones (2.8) y (2.17), que la diferencia de caminos $r_1 - r_2$ a la que el patrón de interferencia desaparece es

$$r_1 - r_2 = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (2.18)$$

A esta cantidad se la llama **longitud de coherencia** de una fuente luminosa.

En principio, no hay diferencia entre observar un patrón de interferencia formado por unas fuentes luminosas que emiten en un espectro muy corto de longitudes de onda $\Delta\lambda$ y uno formado por otras que emitan en un espectro mucho más amplio mientras el receptor capte solo la misma banda corta $\Delta\lambda$. Consecuentemente, la ecuación (2.18) también determina la resolución espectral necesaria por el receptor para poder grabar el patrón de interferencia,

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{r_1 - r_2}{\lambda}. \quad (2.19)$$

Ahora asumamos que las fuentes puntuales O_1 y O_2 emiten líneas monocromáticas ideales a dos frecuencias cercanas ν_1 y ν_2 . En ese caso llegamos a una suma de oscilaciones con frecuencias muy cercanas y se observa un batimiento con una frecuencia de

$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2. \quad (2.20)$$

Los planos tangentes a las superficies de nodos y antinodos ya no tendrán su vector director en la bisectriz de r_1 y r_2 , sino que estarán desplazados de esa posición por un ángulo que crece según lo hace Δr .

El patrón de interferencia viajará por el espacio, siguiendo un camino igual a la distancia entre antinodos adyacentes en el tiempo

$$\tau = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (2.21)$$

La exposición permisible en el grabado de un patrón de interferencia no debería exceder

$$\tau = \frac{1}{4}\tau = \frac{1}{4} \frac{1}{\Delta\nu}. \quad (2.22)$$

Esto es porque en un tiempo τ la diferencia de fase cambiará $\frac{\pi}{2}$ en el periodo de grabado. Esto, aunque disminuye considerablemente el contraste del patrón, no lo hace indistinguible.

La condición (2.22) determina la resolución temporal que necesita un receptor para grabar el patrón de interferencia que forman fuentes con diferentes frecuencias. Esto ocurre, por ejemplo, tras la vibración o deformación de partes de la instalación holográfica o cuando se mueve el objeto del que se graba la imagen. La frecuencia de uno de las ondas que forman la interferencia se desplaza debido al efecto Doppler y por tanto vemos que el patrón de interferencia se desplaza con una velocidad correspondiente a la ecuación (2.21).

Consideremos ahora el patrón de interferencia que forman dos fuentes luminosas O_1 y O_2 que consistan en dos emisores monocromáticos independientes O'_1, O''_1 y O'_2, O''_2 teniendo la misma potencia y frecuencia. Supongamos que las parejas de ondas O'_1, O'_2

y O_1'', O_2'' tengan la misma relación de fase que consideramos previamente y estén en el mismo plano.

Mientras las fuentes O_1 y O_2 sigan siendo puntuales, nuestra asunción no cambia el patrón de interferencia resultante. Los patrones de interferencia de las parejas de fuentes coherentes O_1', O_2' y O_1'', O_2'' forman hiperboloides coincidentes de nodos y antinodos, que después de sumarlos con respecto a la intensidad crean el mismo patrón que si se dividiera cada fuente. Esa división puede continuar, y cada fuente puntual puede dividirse en tantas fuentes de luz mutuamente incoherentes como se quiera, manteniendo la coherencia mutua de las respectivas parejas de emisores de cada fuente.

Procedemos ahora a definir de manera más precisa el concepto de fuente “puntual”. El significado de este término está evidentemente relacionado con la forma de obtener un patrón de interferencia de contraste. La longitud de la fuente no será importante si el patrón de interferencia tiene suficiente contraste.

Para abordar esta cuestión, imaginemos que las fuentes O_1' y O_1'' coinciden en el espacio como antes, mientras que O_2'' se mueve de su posición original, donde coincidía con O_2' . El desplazamiento de O_2'' resultará en desplazamiento y deformación del sistema de nodos y antinodos que forman las fuentes O_1' y O_2'' . El contraste del patrón de interferencia resultante en el punto A (figura 2.4) desaparecerá cuando los antinodos de la onda estacionaria formada por una pareja de fuentes se superponga a la de nodos de la otra.

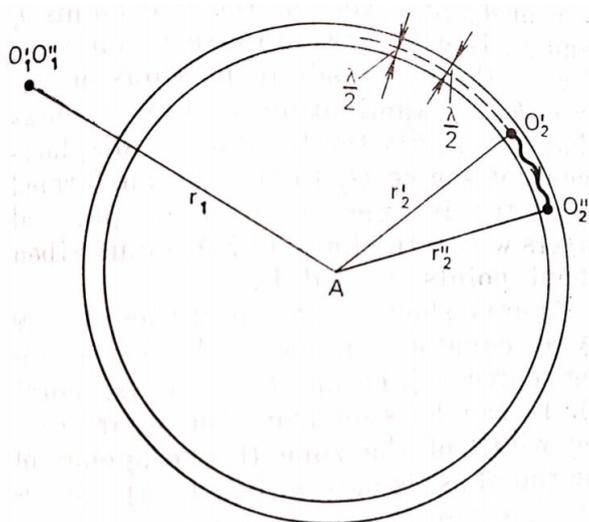


Figura 2.4: Región de desplazamiento permitida de O_2'' . [1]

Es bastante obvio que cualquier desplazamiento de O_2'' en la corona esférica formada por las esferas de radio $r_2' - \frac{\lambda}{2}$ y $r_2 + \frac{\lambda}{2}$ con centro en A no borrará por completo el patrón en A. En otras palabras, la condición para mantener el patrón en el punto A es

$$|r_2'' - r_1'| < \frac{\lambda}{2}. \quad (2.23)$$

Esta condición, sin embargo, asegura mantener el patrón de interferencia únicamente en el punto A, lo cual no es suficiente. Un patrón de interferencia (un holograma) se graba

en una cierta superficie con dimensiones finitas.

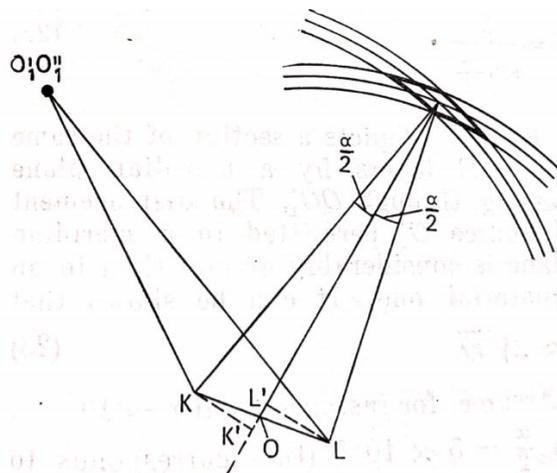


Figura 2.5: Cálculo de la anchura permitida de una fuente de luz.[1]

Sean K y L los extremos de la superficie fotosensible en la que se graba el patrón de interferencia y O el centro de esta. En ese caso, la condición 2.23 debe cumplirse tanto para el punto K como el L y, consecuentemente, se cumplirá para el resto de puntos de la superficie KL . Si observamos la figura 2.5 notamos que el desplazamiento permitido de O_2'' se limita al volumen formado por la intersección de dos coronas esféricas de anchura λ y centros en K y L .

La figura 2.5 muestra una sección de estas coronas en un plano conteniendo a O_1' , O_1'' , O_2' y O . Se puede ver que la anchura de la zona b (la diagonal del rombo) queda determinada por el ángulo α :

$$b = \frac{\lambda}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (2.24)$$

La figura 2.6 nos muestra otra parte de la corona esférica por un plano perpendicular al anterior que pasa por OO_2' . El desplazamiento permitido de O_2'' en este plano es considerablemente mayor que el permitido en el anterior. Se puede demostrar (ver [1]) que

$$a \approx 2\sqrt{r\lambda}. \quad (2.25)$$

Las expresiones (2.24) y (2.25) determinan aproximadamente las fronteras de la región permitida de desplazamiento de O_2'' en la que el patrón de interferencia se mantiene en la sección KL . Las mismas expresiones también dan los máximos límites permisibles de una fuente de luz extendida (no puntual) que consista de emisores elementales independientes que sean coherentes por parejas con los respectivos emisores concentrados en O_1 .

Un razonamiento similar se puede conducir para el caso en el que O_2 es una fuente puntual y O_1 una fuente extendida. Nuestras conclusiones también son válidas cuando ambas fuentes son extendidas. De hecho, este es el caso habitual (la longitud de ambas

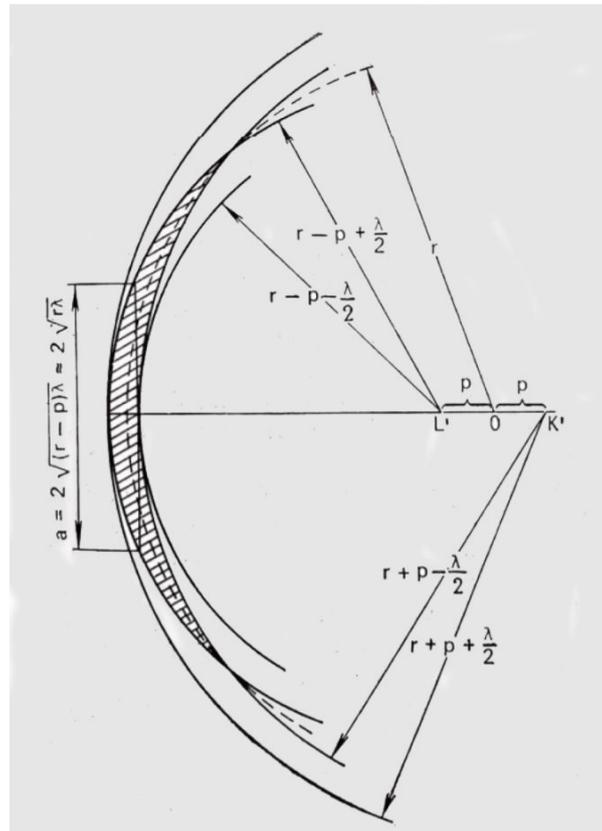


Figura 2.6: Cálculo de la altura permitida de una fuente de luz. [1]

fuentes O_1 y O_2 son las mismas normalmente pues son imágenes reales o virtuales de la misma fuente de luz).

Es por ello que aparece la posibilidad de obtener un patrón de contraste en las zonas donde los rayos emitidos desde los correspondientes puntos de ambas fuentes intersecan. Por esta razón, el contraste de un patrón en esa zona localizada no depende de las dimensiones de la fuente. La profundidad de esa zona, sin embargo, está directamente relacionada con la longitud de la fuente.

Resumiendo, las relaciones que hemos ido considerando caracterizan los requerimientos generales que deben tener las fuentes luminosas utilizadas para observar la interferencia de ondas luminosas.

- La coherencia temporal depende del grado de monocromaticidad de la fuente y determina la diferencia máxima de recorrido entre ondas que interfieren. (Ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.19))
- La configuración espacial y frecuencia del patrón de interferencia y, consecuentemente, la potencia de resolución espacial necesaria del receptor para grabar ese patrón depende de la disposición espacial entre las fuentes y el fotoreceptor. (Ecuaciones (2.12) y (2.13))
- La coherencia espacial de las ondas depende de las dimensiones de las fuentes y

determina las zonas en las que la interferencia deja un patrón con un contraste que excede un valor asignado. (Ecuaciones (2.24) y (2.25))

- La velocidad de desplazamiento del patrón de interferencia y, por tanto, la potencia temporal de resolución necesaria para grabar las franjas, depende de la diferencia entre las frecuencias de las fuentes luminosas. (Ecuación (2.22))

2.2. Holograma como red de difracción.

Un aspecto importante en la holografía es la consideración de un holograma como una red de difracción que forman las franjas del patrón de interferencia. Continuamos con el razonamiento de [1].

Supongamos que dos ondas planas convergen en un fotoreceptor. Cada una de las ondas lleva asociada un haz. Denotamos el ángulo de incidencia de uno de estos haces por φ_1 y el otro por φ_2 (ver figura 2.7). Supongamos también que estas ondas son coherentes. Con estas suposiciones, en el fotoreceptor se originará un patrón de interferencia. La condición (2.8) corresponde a las franjas “claras” y (2.9) a las “oscuras”. Por tanto podemos considerar este patrón como una red de difracción.

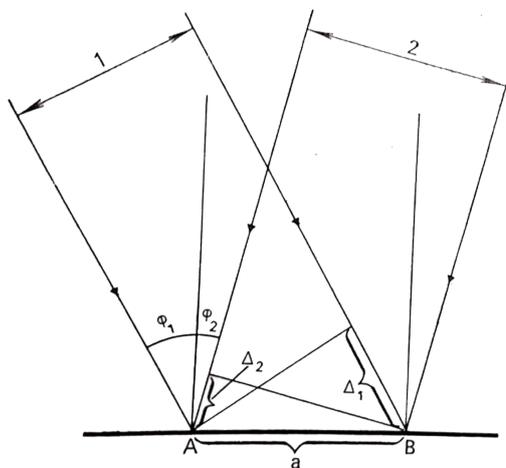


Figura 2.7: Formación de la red de difracción en un holograma.[1]

Si asumimos que el coeficiente de transmisión de la emulsión con respecto a la amplitud depende linealmente de la intensidad de la luz incidente, entonces el sistema de franjas obtenido tendrá una distribución sinusoidal, como se deduce de (2.3).

Si los puntos A y B corresponden a la posición de dos franjas adyacentes (siendo a la distancia entre ellas), entonces la diferencia de camino óptico entre los haces 1 y 2 tras la transición de A a B cambia por λ . En otras palabras, $\Delta_1 + \Delta_2 = \lambda$, y como $\Delta_1 = a \sin \varphi_1$ y $\Delta_2 = a \sin \varphi_2$ entonces

$$a = \frac{\lambda}{\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2}. \quad (2.26)$$

Supongamos ahora que iluminamos el holograma (visto ahora como una red de difracción de periodo a) con uno de los rayos que participaron en su formación, por ejemplo 1.

El ángulo de incidencia de la luz en una red de difracción α y el ángulo de difracción β están relacionados por la expresión

$$a(\sin \alpha + \sin \beta) = k\lambda \quad (2.27)$$

donde k es el orden de difracción ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). Un patrón sinusoidal solo deja ver el primer orden difracción. Asumiendo que $\alpha = \varphi_1$ y $k = 1$, encontramos $\sin \beta$, sin olvidar que el periodo a viene dado por (2.26):

$$\sin \beta = \frac{\lambda}{a} - \sin \alpha = \sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 = \sin \varphi_2 \longrightarrow \beta = \varphi_2 \quad (2.28)$$

Por tanto, al iluminar el holograma (la red de difracción) con uno de los haces con los que se formó, este hace emerger el otro haz que también participó en su formación.

Cualquier onda de cualquier complejidad se puede representar como superposición de ondas planas. Esto corresponde con la ruptura de un frente de ondas complejo en pequeñas áreas planas, cada una de ellas grabada en una pequeña sección del holograma. Por tanto, nuestras conclusiones se pueden extender a un haz objeto cualquiera.

Es natural preguntarse si estas conclusiones pueden ser aplicadas al caso de un haz de referencia arbitrario. Desafortunadamente, la respuesta es no.

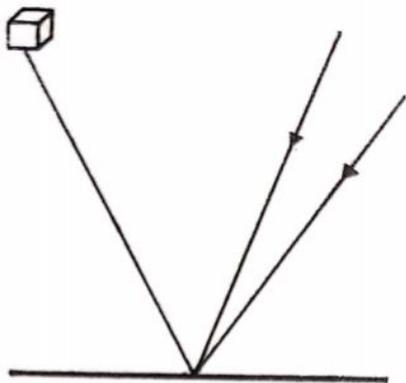


Figura 2.8: Grabación del frente de ondas del objeto. [1]

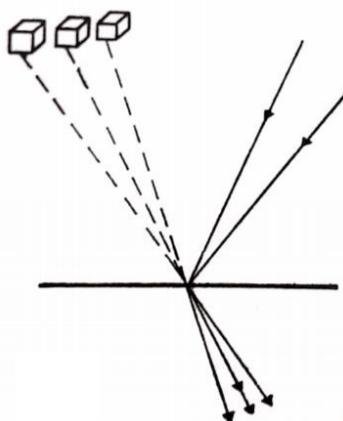


Figura 2.9: Reconstrucción del frente de onda por una fuente extensa.[1]

Veamos esto con un ejemplo; supongamos un haz de referencia que consista en dos rayos que formen cierto ángulo al incidir en el holograma (figura 2.8). En este caso, los dos patrones correspondientes a las dos componentes del complejo haz de referencia se grabarán en el holograma. Ahora iluminamos nuestro holograma con el haz de referencia. Ambos haces reconstruirán una imagen del objeto en cada uno de los dos patrones, un total de cuatro imágenes. Cada uno reconstruirá la imagen del objeto en su “propio”

patrón en el mismo lugar donde estaba cuando se formó el holograma. Estas imágenes reconstruidas por los dos rayos coinciden. Cada rayo reproduce el mismo objeto en el patrón “ajeno”, pero desplazadas un cierto ángulo. Obtenemos la imagen mostrada en la figura 2.9. Por tanto, además de la imagen virtual principal, se reconstruyen dos imágenes más débiles desplazadas de la principal. Estas pueden superponerse a ella y dificultar su observación.

Es evidente que, en el caso de un haz de referencia formado por una fuente extendida que se puede representar como una superposición de un gran número de haces paralelos, en la reconstrucción aparecerán entonces muchas imágenes secundarias. Esto es por lo que se suele usar una onda plana o esférica para grabar hologramas.

Podemos resumir todo lo dicho anteriormente en que, si se graba en una superficie fotosensible un patrón de interferencia formado por un haz objeto arbitrario y un haz de referencia coherente desde una fuente puntual, entonces al volver a iluminarla con el haz de referencia la difracción de la luz hace emerger el haz objeto.

Un patrón de interferencia puede ser grabado en un holograma no solo como variaciones del coeficiente de transmisión (hologramas de amplitud), sino que también como variaciones en la anchura o índice de refracción (hologramas de fase).

2.3. Reconstrucción del frente de ondas.

Para grabar un holograma, se hace incidir el haz de referencia y el haz objeto en la placa holográfica (figura 2.10), donde se guarda el patrón de difracción. Para recrear el frente de ondas del objeto y ver la imagen se vuelve a hacer incidir el haz de referencia desde el mismo ángulo sobre la placa holográfica (figura 2.11).

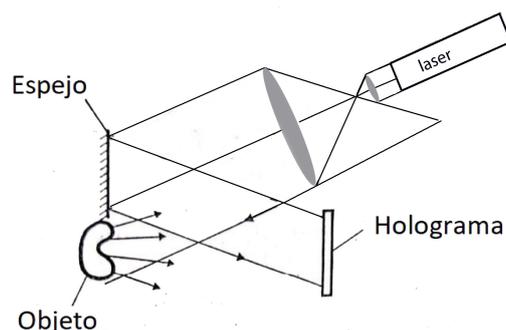


Figura 2.10: Disposición para la grabación de un holograma de transmisión. (Modificada de [1])

Al hacer esto veremos a través del holograma como si se tratara de una ventana por donde veremos la imagen del objeto grabado. Esta es una de las grandes diferencias entre la fotografía y la holografía, pues si nosotros partimos un holograma a la mitad seguiríamos viendo todo el objeto solo habremos partido a la mitad la ventana por la que

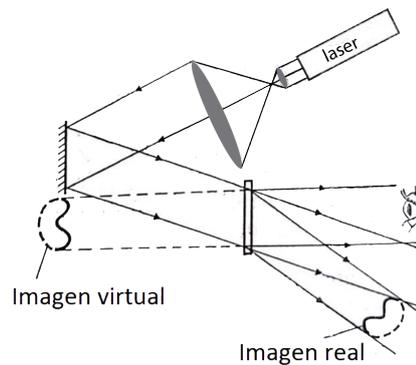


Figura 2.11: Disposición de las imágenes formadas al reconstruir el frente de ondas. (Modificada de [1])

lo podemos observar. Sin embargo, cuando se parte una fotografía a la mitad se pierde la mitad de la imagen.

Un holograma no reconstruye solo la onda original, sino también las ondas de orden cero y menos uno (la onda original es la de orden 1). En el caso de un holograma plano, es decir, cuando la placa holográfica tiene muy poco grosor y se puede considerar bidimensional, se obtiene la misma red de difracción en ambas disposiciones de las figura 2.12. Por tanto, un holograma grabado con cualquiera de estas disposiciones reconstruirá ambos haces objeto mostrados en las figura 2.12. Consecuentemente, la disposición de la figura 2.12 a), aparte de la onda original (la cual dará lugar a la imagen virtual del objeto grabado) también reconstruye un haz conjugado que produce una imagen real del objeto por la otra cara del holograma. Esta imagen será pseudoscópica (se invierten los mínimos y los máximos).

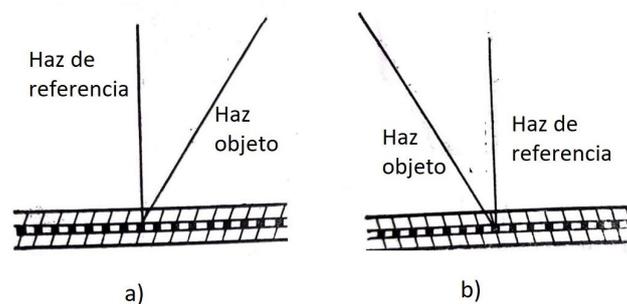


Figura 2.12: En un holograma plano es indiferente el lado por el que se graba. En un holograma tridimensional sí que hay diferencia entre la disposición a) y la b). (Modificada de [1])

2.4. Hologramas tridimensionales.

En los desarrollos anteriores hemos considerado la placa holográfica como un medio bidimensional. Esto solo es correcto si la anchura de la misma es compatible con la distancia entre franjas de interferencia adyacentes. Si el receptor es mucho más ancho, se empiezan a manifestar sus propiedades tridimensionales.

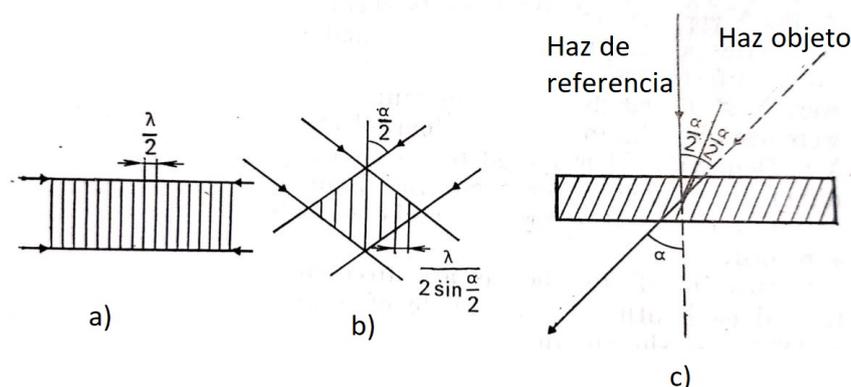


Figura 2.13: Formación de ondas estacionarias formadas por rayos opuestos (a) y rayos con un ángulo $\alpha \neq 180^\circ$ (b). Reconstrucción del frente de ondas en un holograma tridimensional (c). (Modificada de [1])

Si dos haces que interfieren son dirigidos el uno hacia el otro (con un ángulo de $\alpha = 180^\circ$, como se muestra en la figura 2.13 a)), aparecen ondas estacionarias en el espacio. Estas son sistemas de planos de nodos separados una distancia $\frac{\lambda}{2}$ y planos de antinodos separados la misma distancia. Si tomamos un caso más general, con $\alpha \neq 180^\circ$, es fácil observar que la distancia entre planos adyacentes de nodos (o antinodos) de las ondas estacionarias crece un factor de $\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}}$. Los planos de nodos y antinodos de las ondas de luz, como se ve en 2.13 b), son ortogonales a la bisectriz del ángulo α .

Si se introduce un fotoreceptor en la zona de intersección de los dos haces, entonces el sistema de nodos y antinodos se grabará en el en forma de capas reflectantes semitransparentes. Una red de difracción tridimensional de ese tipo tendrá las siguientes propiedades:

- La luz reflejada por las capas como si fueran espejos reconstruirá el haz objeto.
- Los haces reflejados por las distintas capas se verán amplificados mutuamente solo si están en fase, es decir, si su diferencia de camino óptico es igual a un número entero de longitudes de onda. Esta condición es la llamada **condición de Bragg**, de la cual hablamos en 1.2. Esta se observará solo cuando se utilice la misma longitud de onda con la que se grabó el holograma. Esto resulta en una selectividad del holograma con respecto a la longitud de onda de la fuente de luz que forma el haz objeto que es más tarde reconstruido. Consecuentemente, aparece la posibilidad de reconstruir una imagen con la ayuda de una fuente de espectro continuo.

- No se forma el rayo de orden 0 ni ninguna imagen real. Esto es debido a que el fenómeno que predomina es el de la difracción de Bragg, que solo se satisface para el rayo que reconstruye el haz objeto. Si giramos 180° el holograma (hacemos incidir el haz de reconstrucción en su otra cara) la condición de Bragg pasará a satisfacerse para la imagen real y será esta la que veamos al mirar el holograma. Esta imagen tiene unas características especiales, su perspectiva está al revés, es decir, las partes de la imagen que tendrían que estar detrás se ven delante y viceversa. Además, las partes que están al fondo proyectan su sombra sobre las que están delante y si giras la cabeza a la derecha no ves más de la parte derecha de la imagen, sino de la izquierda. Una imagen que tiene estas propiedades se denomina “pseudoscópica”.

Si un holograma fue hecho con luz de distintas líneas espectrales, entonces cada longitud de onda forma sus propias superficies. Las correspondientes longitudes de onda serán escogidas del espectro continuo cuando el holograma se ilumine y esto resulta en la reconstrucción no solo del patrón, sino también de la composición espectral de la fuente luminosa. Todo esto suponiendo que el procesado de la placa no cambie la disposición de los planos reflectantes. Normalmente, tras el procesado del fotoreceptor, este se contrae, haciendo que el patrón tenga más $\frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$. Equivalentemente, disminuye la distancia d entre las franjas y esto hace que la longitud de onda del haz de reconstrucción para la cual se satisface la condición de Bragg se desplace hacia el azul.

Capítulo 3

Tipos de hologramas

Según todo lo descrito en el capítulo anterior, hay varias condiciones que debe cumplir la fuente de luz con la que se graba un holograma. La fuente de luz más habitual que reúne todas esas características es la proveniente de un láser, por lo que la inmensa mayoría de hologramas se consiguen utilizando un láser, ya sea de onda continua, o un láser pulsado.

Hay muchos tipos de hologramas, una de las principales clasificaciones es si se pueden reconstruir con luz blanca o hace falta usar un láser.

Otra diferencia es según el tipo de procesado que haya tenido. Si un holograma sigue un procesado convencional, el mismo que en fotografía, es decir, pasa por un proceso de revelado y de fijación, se dice que es un **holograma de amplitud**. Estos hologramas se crean en un material que cambia su coeficiente de absorción como resultado de la exposición y al ser iluminado por el haz de reconstrucción, este se difracta por el patrón de interferencia que se encuentra grabado. El problema que tienen es que la plata que se encuentra en las placas holográficas absorbe casi toda la luz que recibe, por lo que la eficiencia de la difracción suele ser muy baja.

El otro tipo de hologramas son los llamados **hologramas de fase**, que se diferencian de los anteriores en que se añade una etapa al final de su procesado llamada blanqueo o depuración. Lo que se hace es poner la película en una solución que transforma la plata en una sal, como puede ser el AgBr, que sea transparente y su índice de refracción sea mucho mayor que el de la gelatina de la emulsión que la rodea. De esta forma la emulsión tendrá ahora dos patrones de franjas que se van intercalando y toda la luz incidente contribuirá a la formación de la imagen, por lo que este tipo de hologramas consiguen una imagen con mucha más claridad.

Cuando un holograma utiliza como objeto la imagen real que forma otro holograma se le llama holograma transferido y al que se usa como objeto se denomina holograma maestro.

Hablaremos más en profundidad de algunos tipos de hologramas siguiendo lo expuesto en [2].

3.1. Hologramas de transmisión

En el caso de los hologramas de transmisión, el haz objeto y el haz de referencia inciden en la película holográfica desde el mismo lado. La luz que se emite desde el láser se divide en dos en un divisor de haz, uno de los haces incide en el objeto y su reflexión es el haz objeto. El otro haz incide directamente en la película holográfica, es decir se convierte en el haz de referencia.

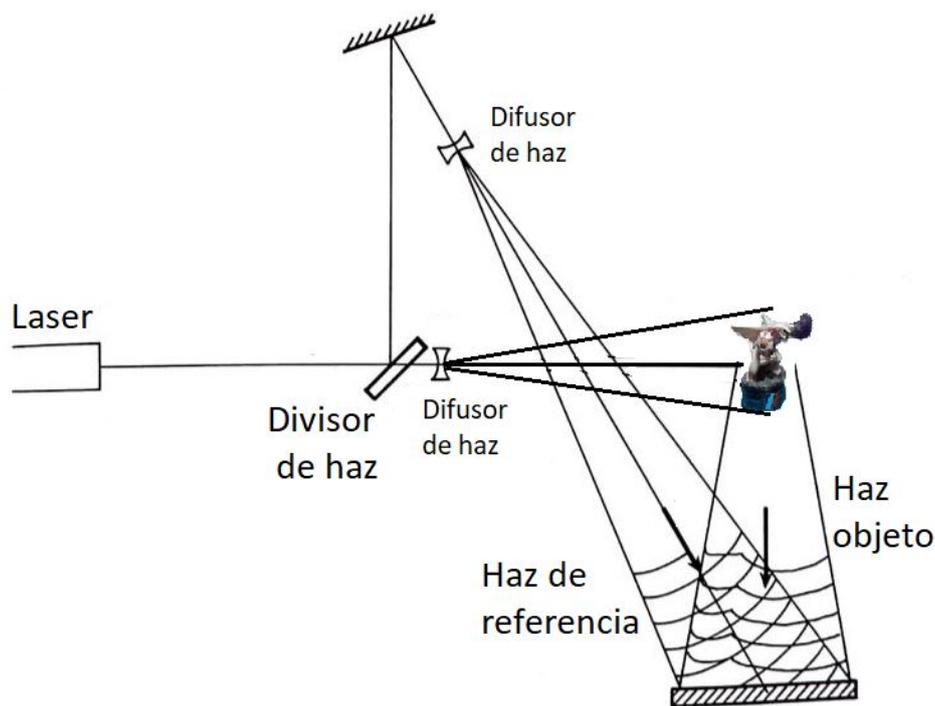


Figura 3.1: Disposición para un holograma de transmisión. (Modificada de [2]).

En cuanto a la reconstrucción del holograma, basta con, una vez procesado, iluminarlo con el mismo haz de referencia con el que fue grabado, así emergerá el haz imagen que será una replica del haz objeto y un observador verá lo mismo que si el objeto estuviera realmente allí. Como la luz no atraviesa la imagen realmente, sino que solo genera un frente de onda que parece que proviene del objeto, la imagen que vemos es una imagen virtual.

3.2. Hologramas de reflexión

Hemos visto que en los hologramas de transmisión el haz de referencia y el objeto inciden en el mismo lado de la placa holográfica, pero también es posible grabar un holograma incidiendo uno por cada cara. A esto se le llama **holograma de reflexión** y puede ser reconstruido con luz blanca.

3.2.1. Hologramas de Denisyuk

El tipo más simple de hologramas de reflexión son los llamados **hologramas de Denisyuk**. La disposición de estos consiste en colocar la película holográfica entre el haz de referencia y el objeto, de manera que este mismo haz al atravesar la placa incide sobre el objeto y se refleja de nuevo en la película, siendo este el haz objeto.



Figura 3.2: Disposición para un holograma de Denisyuk.

Las franjas del patrón de interferencia son creadas por las ondas estacionarias que se generan cuando dos haces de luz coherente viajan en sentidos opuestos. Estas franjas miden del orden de la mitad de la longitud de onda y es por eso que la difracción de Bragg es el fenómeno que controla la formación de la imagen y hace que la imagen real que genera el holograma, así como el rayo de orden cero, no tengan intensidad, es decir, no se vean. Además, al ser tan finas las franjas, se necesita una estabilidad mucho mayor en el soporte de la película que en un holograma de transmisión y se suele necesitar un tiempo de exposición más largo.

Otra característica a tener en cuenta es que estos hologramas reflejan solo una banda longitudes de onda, por lo que cuando se iluminen con luz blanca solo se reconstruirá la imagen con luz de esa determinada banda. El color del que veremos la imagen será entonces el que corresponda a las longitudes de onda que permita reflejar el holograma, pero este no tiene por qué ser exactamente el color del láser que se haya usado para su creación ya que tras el procesado de la película puede ocurrir que la imagen se reproduzca en una longitud de onda menor que la original. Normalmente se cubre la parte de atrás de estos hologramas de negro para absorber el exceso de luz.

Los hologramas de Denisyuk son bastante oscuros, por lo mejor es tratarlos como hologramas de fase, es decir, someterlos a un proceso de blanqueado. Sin embargo, para obtener resultados satisfactorios el objeto debe ser de color claro, con poca profundidad y se debe montar cerca de la película holográfica.

3.3. Hologramas de imagen plana

Se llama hologramas de imagen plana a aquellos en los que el objeto se encuentra contenido en el plano de la película. Este tipo de hologramas se pueden reconstruir con luz blanca, incluso si fueron hechos con la disposición de un holograma de transmisión. Esto es debido a que la longitud en la que las ondas de luz deben estar en fase es prácticamente cero y la imagen no cambia sin importar de donde viene la luz de reconstrucción. De hecho, no hace falta que la luz con la que se cree el holograma sea demasiado coherente, se puede hacer un holograma de Denisyuk de una imagen plana con una lámpara de sodio,

que tiene una longitud de coherencia de menos de 0.3 mm, pero este tipo de hologramas son en 2D y tienen poco interés.

Para poder aplicar esta técnica y generar imágenes tridimensionales necesitamos un modo de plasmar una imagen real de un objeto (que no tenga mucha profundidad) en el plano de la emulsión. Dos formas de hacer esto son, o bien usando una lente, o bien usando otro holograma, dando lugar a los llamados hologramas de imagen enfocada y hologramas transferidos de apertura total, respectivamente. En ambos casos, la imagen que forma o bien la lente o bien el holograma pasa a ser el objeto del holograma plano.

3.3.1. Hologramas de imagen enfocada

Para realizar este tipo de hologramas se necesita elegir adecuadamente la lente. Para empezar el objeto debe ser mucho más pequeño que el diámetro de la lente, además de tener poca aberración esférica. Una lente condensadora plano-convexa es una buena opción, así como una lente de Fresnel doble.

La imagen producida por una lente es real, ortoscópica e invertida pero para que la perspectiva de la imagen sea como la del objeto se necesita colocar la lente a 2 veces la distancia focal del mismo, formándose la imagen al otro lado de la lente a la misma distancia.

Otra opción es usar un espejo cóncavo en lugar de una lente, pero esto hará que la imagen sea pseudoscópica y si tras hacer el holograma este se ilumina desde el lado opuesto la imagen que veremos será especular, es decir, con la izquierda y la derecha invertidas.

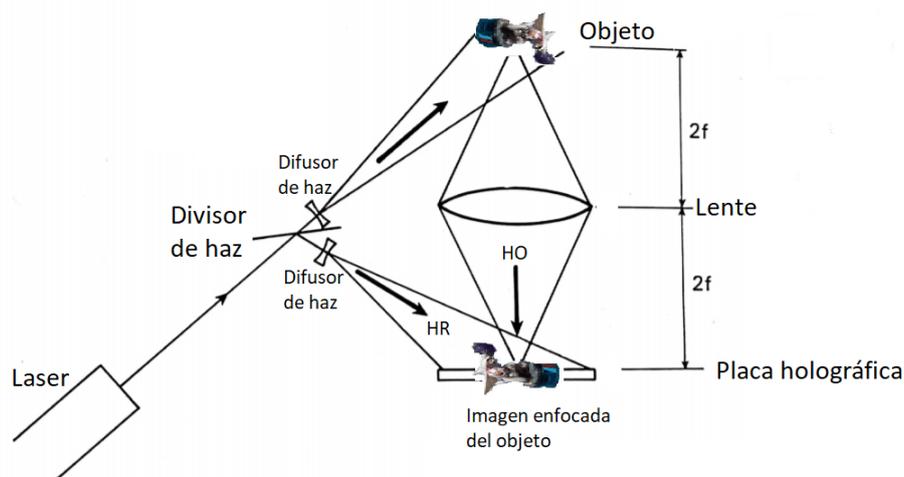


Figura 3.3: Disposición de un holograma de imagen enfocada. La imagen del objeto se proyecta en la placa usando una lente. (Modificada de [2]).

3.3.2. Hologramas transferidos de apertura total

Para usar como objeto del holograma transferido la imagen real que se forma de un holograma basta girar el holograma maestro y colocar la película holográfica en el plano en el que se forma la imagen real. Una vez procesado el holograma transferido, este se debe dar la vuelta también a la hora de su reconstrucción. Esto es debido a que la imagen pseudoscópica real que produce un holograma al invertirlo es también especular, por lo que si hacemos un holograma de esta imagen y lo invertimos, la imagen que observaremos será ortoscópica y con la misma perspectiva del objeto original.

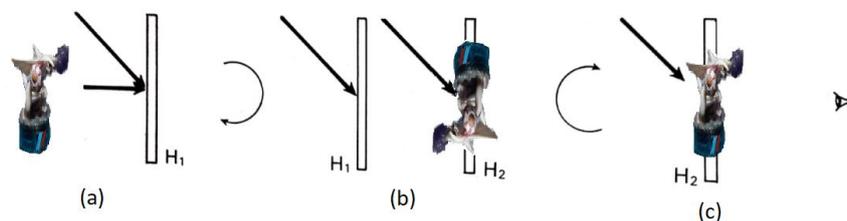


Figura 3.4: Holograma transferido de apertura total. (a) Primero se graba un holograma de transmisión H_1 . (b) Se gira y la imagen real pseudoscópica que se reconstruye se toma como objeto para un segundo holograma H_2 . (c) Por último, se gira también este holograma para ver correctamente la imagen en su reconstrucción. La imagen vuelve a ser ortoscópica. (Modificada de [2]).

3.4. Hologramas de arco iris

Un holograma transferido de apertura completa solo puede grabar objetos de 1 o 2 cm de profundidad, si son más profundos al mirar el holograma desde un costado se pierde casi todo el color. Los hologramas de arcoiris buscan solventar ese problema.

El ser humano ve a través de los ojos colocados en posición horizontal, por lo que somos menos sensibles al paralaje vertical. Es por esto que si lo eliminamos de una imagen la seguiremos viendo altamente realista. Esto es lo que se hizo, al hacer un holograma transferido a partir de un holograma maestro el cual estaba tapado salvo por una estrecha rendija se creó en su lugar una red de difracción holográfica y eliminó el paralaje vertical, puesto que al ver solo el objeto por la rendija, aunque se ven todos los puntos de vista horizontales solo se ve uno vertical.

Una vez procesado el holograma y dado la vuelta para ver la imagen ortoscópica, también se dará la vuelta la imagen de la rendija y si se ilumina el holograma con luz láser solo podremos ver la imagen si ponemos los ojos a la altura exacta de la rendija, si no, no veremos nada. Sin embargo, al iluminar con luz blanca el holograma, esta se difractará y al cambiar el punto de vista verticalmente lo que iremos viendo es un cambio

en el color de la imagen, yendo desde el rojo hasta el violeta pasando por todo el espectro visible progresivamente, de ahí viene el nombre de holograma de arco iris.

Este tipo de holograma es muy versátil, variando la distancia de la película del holograma transferido al holograma maestro se puede conseguir una imagen final real, virtual o a través del plano del holograma (medio real medio virtual). Además cambiando el ángulo del haz de referencia del holograma transferido se puede controlar el color con el que se ve la imagen a una determinada altura e incluso se pueden grabar varias imágenes en un mismo holograma y así poder mezclar los colores y controlarlos mejor.

Este tipo de holograma se puede modificar y conseguir utilizando la técnica de imagen enfocada, es decir, usando una lente.

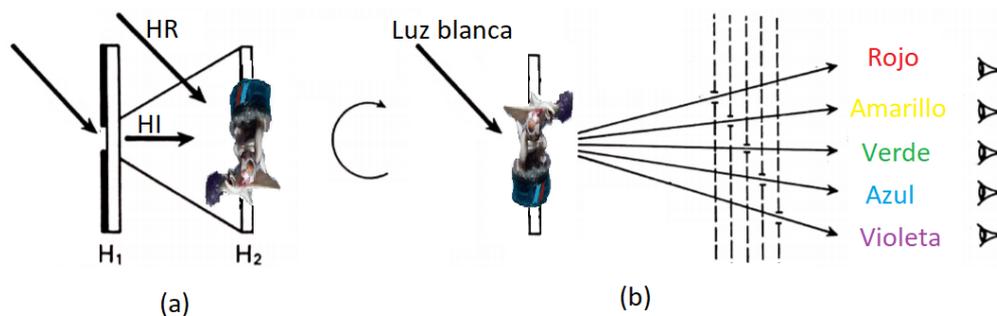


Figura 3.5: Creación de un holograma de arco iris. (a) El master H_1 se coloca tras una rendija. Este genera una imagen holográfica que se graba en un segundo holograma H_2 . En este la información vertical es reemplazada por una red de difracción (producida por la interferencia del haz imagen HI y el de haz de referencia HR). (b) Cuando se voltea H_2 , la imagen de la rendija se proyecta cerca del ojo y, cuando H_2 se ilumina con luz blanca, la imagen de la rendija varía su posición dependiendo de la longitud de onda. El observador ve la imagen de distinto color según su altura. (Modificada de [2])

3.5. Holografía de Fourier

Un holograma de Fourier es un tipo de holograma de imagen enfocada. Cuando la luz se refleja en un objeto o se difracta a través de él su frente de ondas se ve difractado. Si se coloca una lente adecuadamente de forma que el frente de ondas sea llevado a la placa holográfica, esta grabará el patrón de difracción. Si además añadimos el haz de referencia guardaremos así toda la información necesaria para recrear la imagen.

Para la reconstrucción se vuelve a hacer uso de la lente, y al hacer incidir el haz de reconstrucción se forman dos imágenes en el plano focal de la lente, una invertida y pseudoscópica y otra real y no invertida. Si no se utilizase la lente, ambas imágenes se formarían en el infinito.

Existe otro tipo de configuración que hace que no sea necesaria la lente para ver las dos imágenes. Con esta configuración, si se reconstruye con un haz colimado, la imagen

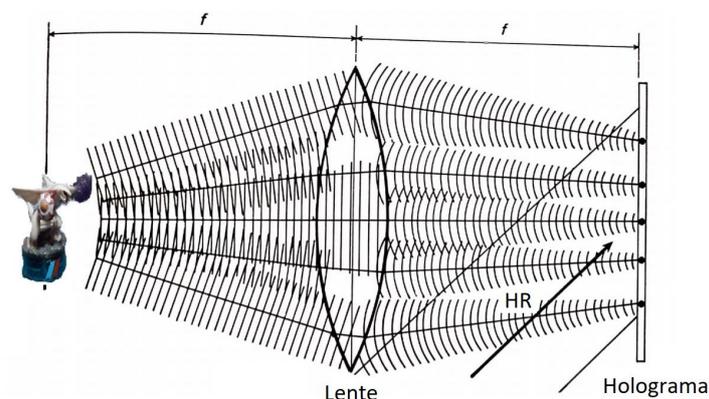


Figura 3.6: Disposición de un holograma de Fourier. (Modificada de [2]).

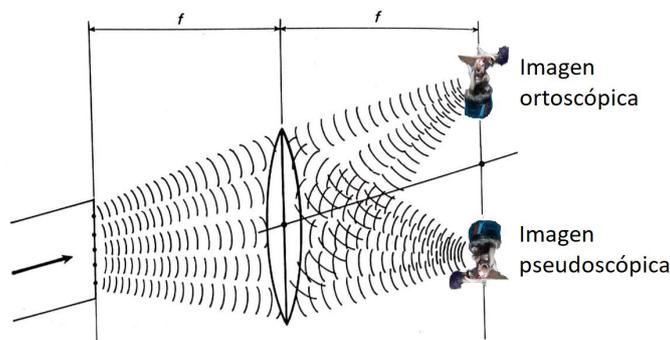


Figura 3.7: Reconstrucción de un holograma de Fourier. (Modificada de [2]).

ortoscópica se verá en $+\infty$ y la pseudoscópica en $-\infty$.

Una de las ventajas de los hologramas de Fourier es que no hace falta película holográfica. Otra es que la imagen no se mueve si el holograma se mueve en su propio plano. Debido a la naturaleza de como se guarda la información, la resolución del holograma no depende de la resolución de la emulsión, sino del tamaño del holograma. Esto es una gran diferencia con los hologramas de imagen enfocada, donde la resolución depende de la emulsión pues la información de la posición se graba de manera local.

3.6. Hologramas de 360°

Cuando hablamos de hologramas de 360° nos referimos a hologramas que podemos observar desde cualquier ángulo, es decir, podríamos rodearlos y siempre veríamos la imagen. Hay distintas maneras de conseguir este paralaje de 360°, aunque normalmente siempre es con técnicas de un solo rayo.

3.6.1. Hologramas cilíndricos

Estos son básicamente hologramas de transmisión, pero debido al amplio ángulo de incidencia ($65 - 85^\circ$) podemos conseguir una imagen lo suficientemente buena con reconstrucción por luz blanca. La película holográfica se coloca dentro de una tubo de plástico o cartón cuyas dimensiones variarán según el tamaño del film y del objeto que se pretenda capturar. Normalmente la base y la altura tendrá un diámetro y una altura de alrededor de 80mm y 204mm respectivamente.

En el caso de usar un haz de referencia que incida desde arriba del objeto es importante que este se vea bien al recibir la luz desde ese ángulo. La luz reflejada por las paredes del cilindro ayudará a iluminar las sombras y se puede además añadir un espejo en la base para dar más iluminación.

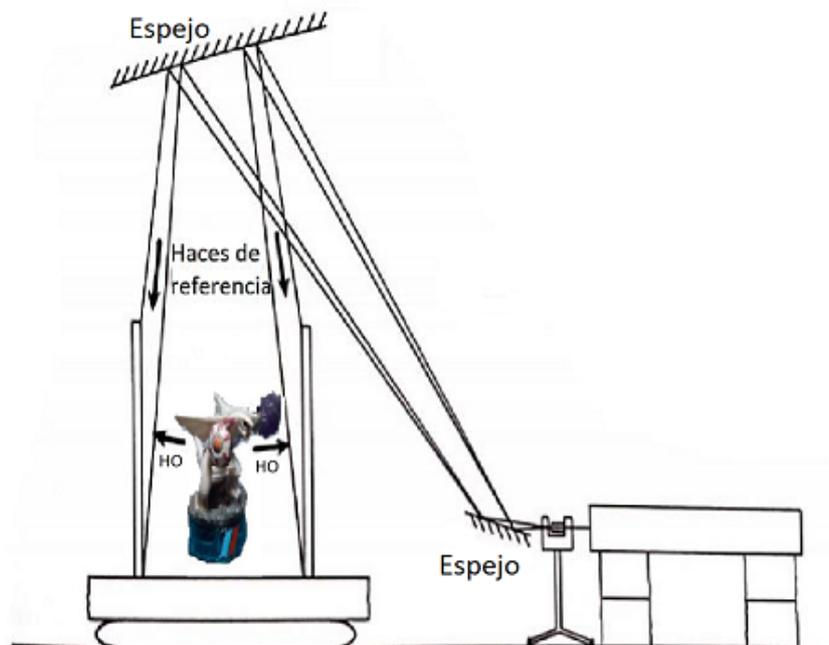


Figura 3.8: Disposición de un holograma cónico. (Modificada de [2])

Este tipo de iluminación proporciona mucha profundidad a la imagen, pues la diferencia de camino óptico entre el haz objeto y el haz de referencia es muy pequeña, cosa que suele ocurrir en hologramas de transmisión de un solo rayo.

Otra disposición posible sería haciendo incidir el haz horizontal directamente en el objeto, para lo cual habría que fijar el mismo y el cilindro de manera que la base quede perpendicular al suelo.

La mejor forma de exponer un holograma cilíndrico es en un pilar iluminado directamente desde encima con un filtro de ámbar, si se ilumina desde otra posición como si fuese un holograma de reflexión plano habitual se observan muchas distorsiones en la imagen.

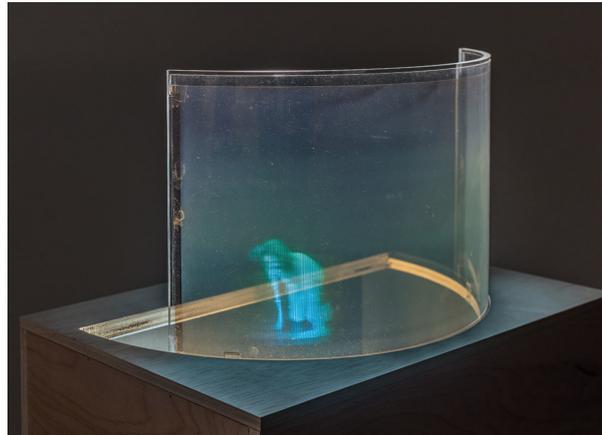


Figura 3.9: Holograma cilíndrico.

3.6.2. Hologramas cónicos

Este tipo de hologramas se obtienen colocando un cono de película holográfica sobre el objeto y exponiéndolo a la luz del láser desde encima, creando un holograma de reflexión de 360°. Se puede cambiar la disposición de la misma forma que en los hologramas cilíndricos para que el haz de referencia incida horizontalmente en vez de desde arriba.

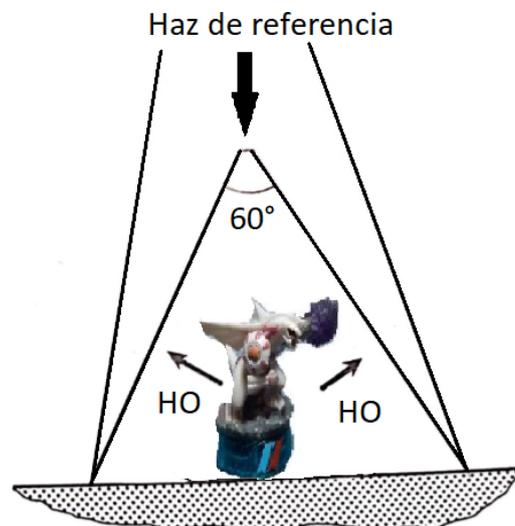


Figura 3.10: Disposición de un holograma cónico. (Modificada de [2])

Para la exposición, se coloca el cono sobre una base de madera o metal (fijado debidamente con masilla adherente) donde previamente se coloca el objeto en la posición para que reciba el rayo láser.

Una vez acabada la exposición se deshace el cono para procesar el film y una vez seco se vuelve a montar el cono y se fija a una base habitualmente de plástico negro.

En cuanto a la iluminación esta se realiza con luz blanca desde encima del cono. Se pueden ver efectos interesantes si se forma el cono al revés y se ilumina desde abajo.

3.6.3. Hologramas de 360° con placas holográficas.

Si se trabaja con placas holográficas se pueden conseguir variantes de los hologramas cónicos y cilíndricos.

El equivalente al holograma cilíndrico es el holograma cúbico, donde se usan cuatro placas cuadradas. Debido al peso de las placas solo es posible realizarlo con la disposición del rayo incidiendo desde encima del objeto. Las partes bajas de las placas se fijan con masilla y las partes altas con clips que las mantengan juntas.

Se puede añadir una placa más en la parte de arriba cerrando el cubo, de esta forma se grabaría un holograma de reflexión de Denisyuk en esta placa añadida, cuya imagen será continua con las demás. Al ser el procesado diferente al resto de placas es probable que a esta placa haya que darle una exposición distinta, además puede haber diferencias de color entre los dos tipos de holograma.

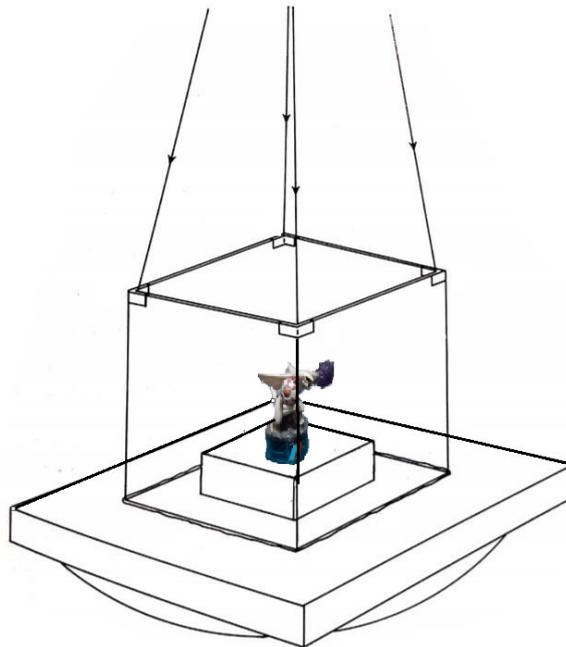


Figura 3.11: Disposición de un holograma cúbico.(Modificada de [2])

El equivalente a un holograma cónico es un holograma piramidal, para el cual se cortan las placas holográficas usando una plantilla para formar un tetraedro o una pirámide. Estas estructuras se deben fijar al igual que en el caso cúbico.

La desventaja de este tipo de hologramas es que es imposible evitar que aparezcan en la imagen sombras provenientes de los bordes de las placas.

3.6.4. Hogramas de 360° planos

Se puede obtener un holograma de 360° a partir de un objeto “pseudoscópico” haciendo un holograma de imagen real de la vista delantera del objeto en un lado de la película y uno de la vista trasera en el otro lado. Se pueden realizar dos exposiciones en la misma película tratándolo como si fueran dos hologramas separados, o se puede hacer cada holograma en una película distinta y después pegarlas con una capa de material negro entre ellas. De esta manera, por un lado se verá una vista del objeto y por el otro la contraria. Esta última opción elimina la posibilidad de que ambos hologramas se “solapen”, es decir que veamos los dos a la vez desde cada lado.

Iluminando estos hologramas por las dos caras podremos dar una vuelta a su alrededor y observar el objeto desde cualquier ángulo.

3.7. Holografía de láser pulsado y retratos holográficos

Al desarrollarse las técnicas de holografía surge la intención por parte de los artistas de realizar retratos holográficos, es decir, hacer hologramas donde se grabe la imagen de una persona.

El principal problema de un retrato holográfico es que cualquier pequeño movimiento arruinará la imagen. Es por esto que se necesita utilizar un láser pulsado, los cuales emiten pulsos de luz con una duración de nanosegundos, tiempo en el cual es imposible que algo se mueva lo suficiente como para que se note en la imagen.

Al ser un pulso de tan poca duración, aunque este lleve poca energía, la potencia que disipa llega a los 40 MW en un rayo de milímetros de diámetro, así que el rayo debe pasar por un difusor donde dentro de él el diámetro del haz sea de al menos 50 mm para un láser de 1J. Es muy importante asegurarse que en el camino óptico de la luz sin difundir no se cruce con el cuerpo.



Figura 3.12: Retrato holográfico de Dennis Gabor.

Otras consideraciones de seguridad son, a parte de tener cuidado con la fuente de alimentación, cuidar que el haz no se refleje y vuelva sobre su propio camino óptico, lo

que se denomina retroreflexión, pues puede destruir el láser. Esto no solo ocurre si hay mal colocada alguna superficie reflectante, sino también cuando hay algún divisor de haz o espejo con parte de aluminio, pues este se evapora instantáneamente y puede ocurrir este fenómeno por reflejarse el haz en el vapor.

Otra de las partes importantes a la hora de hacer un retrato holográfico es, al igual que en la fotografía, la iluminación. Hay distintas técnicas, todas muy parecidas a las que se usan en un retrato fotográfico, para conseguir realzar las características que se deseen del modelo del que se capta la imagen. Sin embargo, en la holografía hay algunas restricciones, la primera es que el haz de referencia o su reflexión en la placa no deben llegar a los ojos del modelo por su seguridad, para ello se suele utilizar una disposición en la que el haz incide desde encima del modelo con un ángulo entre 45° y 60° . Otra limitación es que no se puede aportar luz que venga frontalmente, pues la placa holográfica se encuentra en frente del cuerpo. Otra precaución que hay que tener es que la única luz que llegue a la película sea únicamente la que proviene del haz de referencia y del objeto, de ninguna otra fuente.

Capítulo 4

Aplicaciones de la holografía.

Las características de la holografía permite que esta tenga muchas aplicaciones más allá de poder hacer fotografías en tres dimensiones. Los principios de la holografía permitieron reenfocar muchos campos en los que la interferencia de ondas es muy importante.

La llamada interferometría holográfica es un método que permite medir con mucha precisión pequeños desplazamientos en objetos. Una de estas técnicas, la llamada interferometría a tiempo real, consiste en generar un holograma de transmisión de un objeto y, sin retirarlo de su posición, reconstruir la imagen holográfica. Si realmente el objeto no se ha movido, este coincidirá perfectamente con la imagen. Si ahora se deforma el objeto mínimamente, como ocurre al calentarse, aparece un patrón secundario de franjas en el objeto. Cuanto más distorsionado este el objeto más cerca estarán las franjas. El fenómeno que ocurre es que el frente de ondas del propio objeto está interfiriendo con el reconstruido por el holograma. Este tipo de técnicas permiten captar desplazamientos muy pequeños en objetos, por lo que sirven para medir la deformación de componentes que estén sometidos a mucho calor o tracción durante tiempos prolongados. Un ejemplo pueden ser piezas de un reactor nuclear.

Otra aplicación, que de hecho fue por ello que Dennis Gabor descubrió la holografía, es la de mejorar el microscopio. El uso de la holografía permite capturar toda la información que se ve a través de un microscopio. Esto quiere decir que, si usamos un láser pulsado para hacer un holograma habremos “congelado” las partículas que estábamos examinando y una vez reconstruido el holograma podremos examinar con todo detalle la imagen de la muestra original. Este tipo de técnicas son muy utilizadas para la observación de microorganismos como pueden ser bacterias.

Otro tipo de técnicas se pueden usar para el conteo de partículas como pueden ser partículas de aerosoles. También se puede aplicar la holografía en medidas de partículas atmosféricas o en estudios de cámaras de niebla.

Según se fue desarrollando la holografía, surgió la holografía digital. Un campo muy extenso que permite almacenar gran cantidad de información y reproducirla como hologramas digitales. Esto hace que se pueda almacenar en un ordenador la información necesaria para recrear un holograma. Las aplicaciones de la holografía digital son incontables. Si podemos grabar la información para generar un holograma de un objeto en un ordenador, se puede hacer un modelo un en tres dimensiones del mismo y volver

a recrearlo con una impresora 3D. Esto permite, por ejemplo, preservar para siempre artefactos históricos, pues, si estos se deterioraran o algo hiciese que se destruyeran, se podrían hacer réplicas exactas de los mismos.

En general, la holografía permite muchos avances en una inmensa cantidad de campos más allá de la óptica y abarca mucho más que ser simplemente una “mejora” de la fotografía. Las aplicaciones que tiene son muy amplias y aún están muchas en desarrollo, pero hoy en día ya es un método muy utilizado en muchos campos de la ciencia. De hecho, no solo de la ciencia, pues, por ejemplo, también es muy útil en el ámbito de la seguridad. Esto lo podemos notar en la banda brillante que tienen todos los billetes, la cual es un holograma que hace que sean muy difíciles de falsificar.

Capítulo 5

Proceso de grabado de un holograma de Denisyuk

En esta última parte explicaremos con detalle el proceso llevado a cabo en el Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología (CINN) para grabar un holograma de Denisyuk. Describiremos todos los pasos que hemos seguido, así como el equipo utilizado y los distintos problemas que nos fuimos encontrando y resolviendo.

El objeto que hemos decidido grabar es una figura de unos 4 cm de largo, 4 cm de profundidad y 6.5 cm de alto. Hemos escogido un objeto con este tamaño pues nos permite colocarlo fácilmente en el soporte y al no ser muy grande será posible obtener una buena resolución. En un holograma de reflexión la relación de intensidades entre el haz de referencia y el haz objeto óptima esta en torno al 1:1. En un holograma de Denisyuk, debido a la disposición, es imposible obtener esta relación, pues el haz objeto es el mismo que el de referencia solo que una vez transmitido por la placa y reflejado por la figura. Esto hace que siempre tenga menos intensidad. Una manera de maximizar la intensidad del haz objeto es, colocarlo cerca de la placa y que la figura sea lo más blanca posible, así reflejará más la luz. Por eso, otra ventaja de esta figura es que es de color claro, siendo gran parte blanca.



Figura 5.1: Objeto a grabar.

5.1. Dispositivo experimental

5.1.1. Láser

Para grabar el holograma hemos utilizado un láser de estado sólido Verdi V-10 que emite en una longitud de onda de 532 nm (verde) y tiene una longitud de coherencia de unos 10m. El perfil del láser es gaussiano y la luz está polarizada linealmente en vertical (polarización P) respecto a la placa holográfica.



Figura 5.2: Láser de estado sólido



Figura 5.3: Fuente de alimentación y refrigerador.

5.1.2. Placas holográficas

En cuanto a las placas holográficas, teníamos a nuestra disposición dos tipos:

- Placas BB520 de 2009 de la empresa “Colour holographics”, que permiten una red de difracción de $10000 \frac{\text{líneas}}{\text{mm}}$.
- Placas VRP-M de la empresa “Slavich” de 2017, las cuales permiten una red de difracción de $3000 \frac{\text{líneas}}{\text{mm}}$.

Estas placas no son sensibles a la luz roja, por lo que el espacio se alumbró con lámparas de este color que no velan la emulsión, de igual manera que se hace en fotografía. Cuanta mayor sea la red de difracción, más nítida se verá la imagen; sin embargo, hay que tener en cuenta que las emulsiones, con el tiempo, se van deteriorando. Si tienen varios años es normal que se necesite más tiempo de exposición del esperado para que se forme la imagen con una calidad aceptable. Es por ello que al escoger unas placas tan antiguas (12 años) nos arriesgamos a tener que aumentar mucho el tiempo de exposición o aún peor, que no reaccionen lo suficiente como para que se vea correctamente la imagen.

Finalmente decidimos tomar el riesgo y empezar probando con las placas de $10000 \frac{\text{líneas}}{\text{mm}}$ ya que si funcionaban correctamente la imagen se vería con mayor nitidez que con las otras.

5.1.3. Disposición de la figura.

Es importante tener en cuenta cómo se quiere exponer el holograma a la hora de decidir la posición en la que se coloca. Esto es debido a que cuando queramos ver el holograma deberemos hacer incidir la luz desde el mismo ángulo que se grabó. Tal como estaban colocados el láser y el soporte, el haz incidiría en la placa desde abajo, mientras que lo que queremos es iluminar el holograma desde arriba y ver la figura correctamente. Es por esto que lo que hacemos es colocarla invertida, de manera que, una vez grabada la imagen, si giramos la placa y la iluminamos desde arriba veremos el objeto al derecho. Fijamos el objeto con silicona al soporte y colocamos la placa de manera que el ángulo de incidencia del láser sea de 45° .



Figura 5.4: Figura fijada al soporte

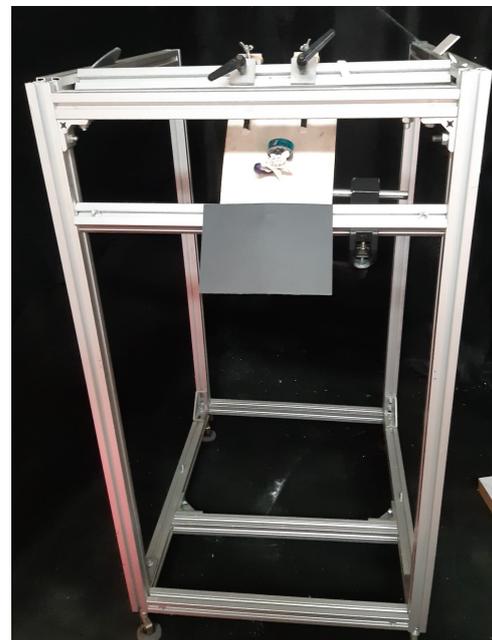


Figura 5.5: Soporte con la figura.

5.1.4. Disposición de los elementos ópticos

El haz de nuestro láser tiene un diámetro de 2.25 mm, por lo que se necesita hacerlo pasar por una lente que lo haga diverger y así el haz incida en toda la placa y la intensidad de la luz sea uniforme en toda ella. Para ello utilizamos un objetivo de aumento 10x. Detrás del objetivo, para eliminar impurezas se utiliza un pinhole. Siguiendo las indicaciones de [2], el diámetro mínimo del pinhole viene dado por la fórmula aproximada

$$D = \frac{0.6\lambda}{Md}$$

donde D es el diámetro requerido del pinhole en μm , M es la magnificación del objetivo, λ es la longitud de onda del láser en nm y d es el diámetro del rayo. Con nuestros

parámetros obtenemos un diámetro mínimo $D \simeq 14.18\mu m$. En base a ello decidimos utilizar un pinhole de $20\mu m$.

Resumiendo, colocamos en un banco óptico el láser, a continuación un obturador que controla el tiempo de exposición, después el objetivo 10x y por último un pinhole de $20\mu m$.

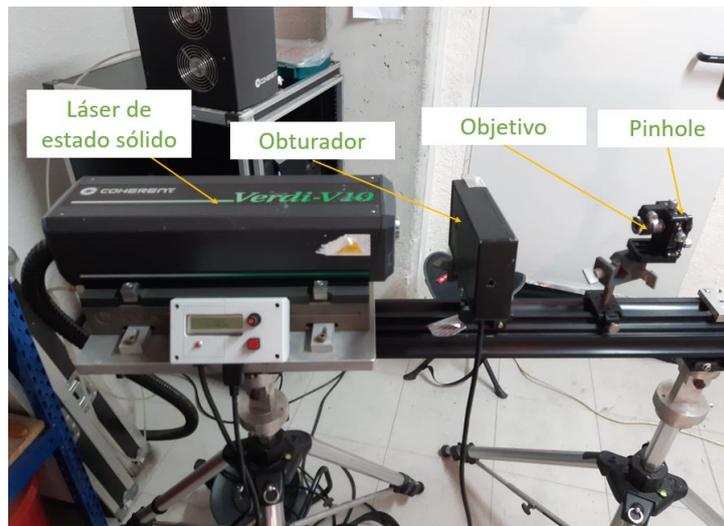


Figura 5.6: Dispositivo experimental.

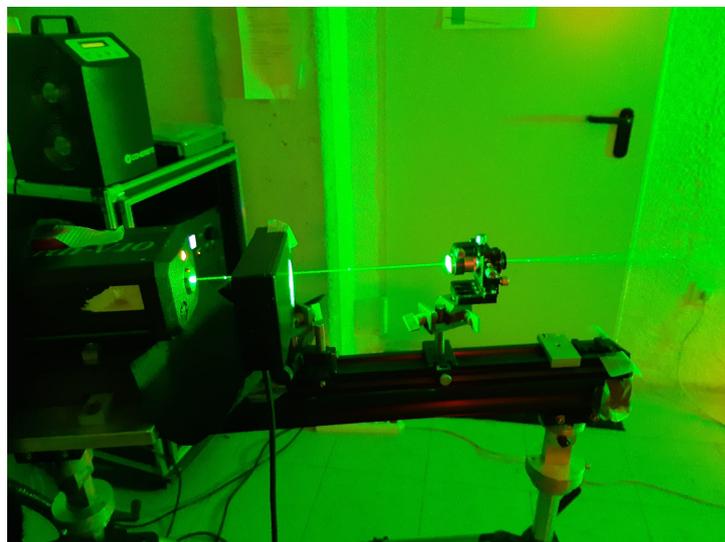


Figura 5.7: Dispositivo experimental en funcionamiento.

Lo óptimo sería disponer también de un colimador, para conseguir que el frente de ondas que llegase a la placa fuese plano. En nuestro caso no disponíamos de él, pero al ser placas no muy grandes en comparación con la distancia entre la placa y el láser, se puede considerar que los rayos que llegan a la emulsión son lo suficientemente planos.

5.1.5. Preparación del proceso de revelado.

En cuanto al proceso de revelado de un holograma, es bastante similar al de la fotografía. La placa tras la exposición se sumerge en un revelador y posteriormente en un blanqueador.

Las soluciones de las que se obtienen el revelador y el blanqueador son:

Para el revelador:

- 1L de agua destilada
- 60 g de carbonato sódico
- 0,5 g de Fenidona
- 18 g de Ácido Ascórbico
- 2 g de Metol

Para el blanqueador:

- 1L agua destilada
- 2 g de dicromato potásico
- 10 cm^3 de ácido sulfúrico

5.2. Proceso de grabado

Una vez colocados todos los elementos de manera adecuada pasamos a grabar el holograma. A continuación describiremos los pasos generales a seguir para grabar un holograma de reflexión.

Lo primero es decidir qué potencia del láser utilizamos y qué tiempo de exposición le damos a la emulsión. Para decidirlo, una vez fijado un valor de potencia del láser, medimos con un fotómetro la intensidad que llega a la placa. A partir de esta medida, el proveedor de cada placa proporciona una relación entre esta intensidad y el tiempo de exposición teórico al cual se debe someter a esas placas. Cuando se haya decidido ese tiempo, se coloca la placa en el soporte, enfrente de la figura, asegurándose de que el lado de la emulsión se encuentra mirando hacia el objeto. Una vez colocada, se esperan unos minutos antes de proceder con la grabación. Esto se hace para que la placa y el soporte se estabilicen ante cualquier pequeña vibración que haya podido suceder tras la colocación de la emulsión (recordemos que cualquier pequeño movimiento puede arruinar la imagen). La incidencia del láser fue de manera que la polarización fuese en vertical respecto a la emulsión (polarización P) para minimizar así las posibles franjas producidas por reflexiones interiores entre los dos planos del vidrio de la placa.

Una vez expuesta la placa, esta se somete al proceso de revelado. Este proceso, para un holograma de amplitud (sin fase de blanqueo) consiste en: sumergir la emulsión en el revelador durante 3 minutos, posteriormente se introduce en agua durante 5 minutos.

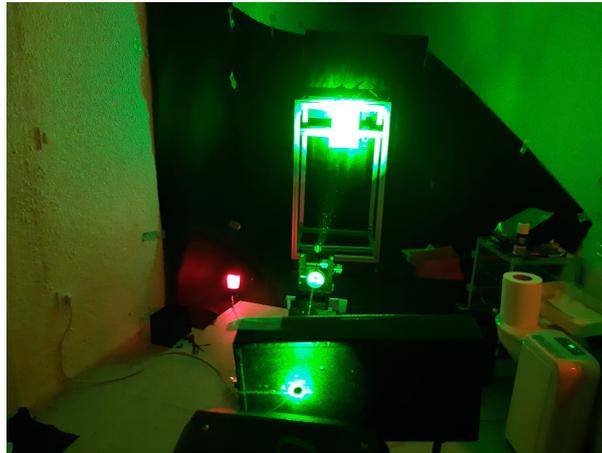


Figura 5.8: Vista desde el láser del haz impactando en el objeto.

Luego, se introduce en el fijador durante otros 3 minutos y después se lava de nuevo en agua corriente durante 5 minutos. Por último, se introduce en agua destilada con el paro (ácido acético) con unas gotas de humectador (jabón neutro) durante 2 minutos.

En nuestro caso, grabamos un holograma de fase, por lo que el proceso consiste en: Sumergir la placa en el revelador durante 3 minutos, a simple vista, lo que se ve es cómo la placa, al entrar en contacto con la solución, se va llenando de franjas negras hasta estar completamente oscura. Después se deja 5 minutos en agua corriente y posteriormente se introduce en el blanqueador. Aquí iremos viendo como el color negro va desapareciendo hasta que la placa queda transparente. En ese momento se saca y se lava en agua corriente durante 5 minutos. Por último, se deja dos minutos en agua destilada con ácido acético y humectador. Esto fija la emulsión y hace que no reaccione a la luz.



Figura 5.9: Placa sumergida en el revelador.

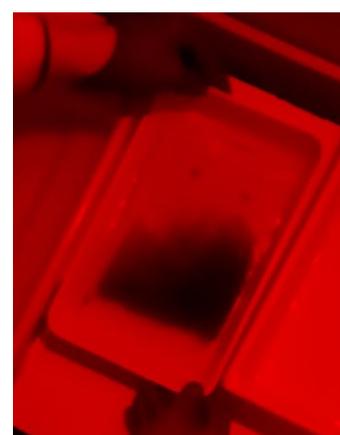


Figura 5.10: Proceso de blanqueo.

Antes de grabar el holograma definitivo hicimos pruebas con placas más pequeñas, sobre todo porque, al ser tan antiguas, el tiempo de exposición teórico será muy distinto del real.

5.2.1. Placas BB520. $10000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$

El primer holograma lo grabamos a una potencia de 3 W y un tiempo de exposición de 7s. El resultado no fue nada satisfactorio. Aunque se veía claramente la red de difracción, no se alcanzaba a ver la imagen de la figura.

Esto era una mala señal, pues, si habiendo aumentado el tiempo de exposición en varios segundos no se veía nada de la imagen era muy probable que las placas estuvieran demasiado deterioradas como para poder grabar correctamente el holograma.

Igualmente, sin perder la esperanza, decidimos aumentar la potencia del láser y hacer más pruebas a ver si conseguíamos un resultado decente. Por desgracia, esto no fue así y en las siguientes pruebas, hechas con 5 W y 7s, 7W y 7s y 9W y 8 s, tampoco se alcanzaba a ver correctamente la imagen. Esto es algo comprensible ya que las emulsiones tenían 11 años de antigüedad.

5.2.2. Placas VRP-M. $3000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$

Tras el fracaso con las placas anteriores procedimos a utilizar las otras placas disponibles. Estas tenían una resolución de $3000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$ por lo que la imagen no se verá tan nítida como si se hubiera grabado correctamente en las anteriores.

Para obtener el tiempo de exposición teórico para una energía por cm^2 E dada, la que proporciona el láser, la empresa proporciona como dato que para una energía de $75 \mu\text{J}$ el tiempo de exposición es de 1 segundo. Como el tiempo de exposición es inversamente proporcional a la energía bastará con dividir 75 por el valor que midamos de energía.

Con el láser a una potencia de 1W medimos con un fotómetro el valor de 230 J , que se corresponden con 0.3 segundos. Debemos notar que esto es solo una mera aproximación. Para ser más rigurosos deberíamos tener en cuenta que el haz incide con cierto ángulo en la placa. Tampoco estamos teniendo en cuenta al medir la parte que proviene del haz reflejado de la placa.

Como las placas tenían varios años decidimos hacer varias pruebas dando algo más de exposición, y según cómo saliesen, decidir el tiempo de exposición del holograma definitivo.

Grabamos 4 hologramas de prueba con 1W de potencia y distintos tiempos de exposición: 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9 segundos.

Observamos que la imagen se ve en los 4 casos. El color predominante es el azul.

En general los resultados son satisfactorios, conseguimos ver la imagen claramente en los 4 casos. Aún así hay diferencias en cuanto a la claridad de la misma. La que se ve con más intensidad es la de 0.5s (figura 5.12), mientras que la se ve más tenue es la de 0.9s (figura 5.14). Vemos que en todas el color predominante es el azul. Esto es un efecto que suele ocurrir tras secar el holograma. La gelatina de la emulsión se contrae y las líneas se juntan, disminuyendo la distancia d entre franjas del patrón y por tanto la longitud de onda λ que verifica la condición de Bragg. Para conseguir un color más cercano al real necesitamos “hinchar” la emulsión, aumentando d y, consecuentemente, λ . Para ello le dimos un baño al holograma hecho a 0.3s (figura 5.11) en una solución de ácido cítrico y humectador durante un minuto. Con esto conseguimos que, aunque no se aprecie mucho



Figura 5.11: Holograma de prueba grabado con 1W de potencia y un tiempo de 0.3s.



Figura 5.12: Holograma de prueba grabado con 1W de potencia y un tiempo de 0.5s.



Figura 5.13: Holograma de prueba grabado con 1W de potencia y un tiempo de 0.7s.



Figura 5.14: Holograma de prueba grabado con 1W de potencia y un tiempo de 0.9s.

en la foto, el color predominante del holograma fuese el verde en vez del azul.

Una vez hechas estas pruebas decidimos hacer los hologramas definitivos (en unas placas más grandes) con un tiempo de exposición de 0.5s y una potencia de 1W del láser. Decidimos grabar dos hologramas, uno en el que se viera la imagen virtual (como habíamos hecho con las pruebas) y otro en el que se viera la imagen pseudoscópica. Para grabar este último lo único que hay que hacer es darle la vuelta a la placa y que el lado de la emulsión quede mirando hacia el láser.

También decidimos grabar uno en el que se viese la imagen virtual habiendo presensibilizado la placa. Este proceso de presensibilización consiste en introducir la placa antes de la exposición en el blanqueador; con esto se consigue que la emulsión sea mucho más sensible a la luz y, por ello, el tiempo de exposición se tiene también que reducir. Decidimos realizar este holograma a una potencia de 1W y tiempo 0.33s. Sin embargo los

resultados no fueron nada buenos, el holograma estaba completamente velado e inservible.

5.3. Resultados finales.

Una vez grabados los hologramas definitivos, los introdujimos en la solución de ácido cítrico e humectador, como hicimos con el holograma de prueba, para alejarnos del color azul. Esta vez les dimos un baño de 3 minutos. Una vez secos los pintamos de negro con pintura en spray por el lado de la emulsión para facilitar su visualización y que esta quede protegida por la capa de pintura. Para reconstruir correctamente la imagen ortoscópica

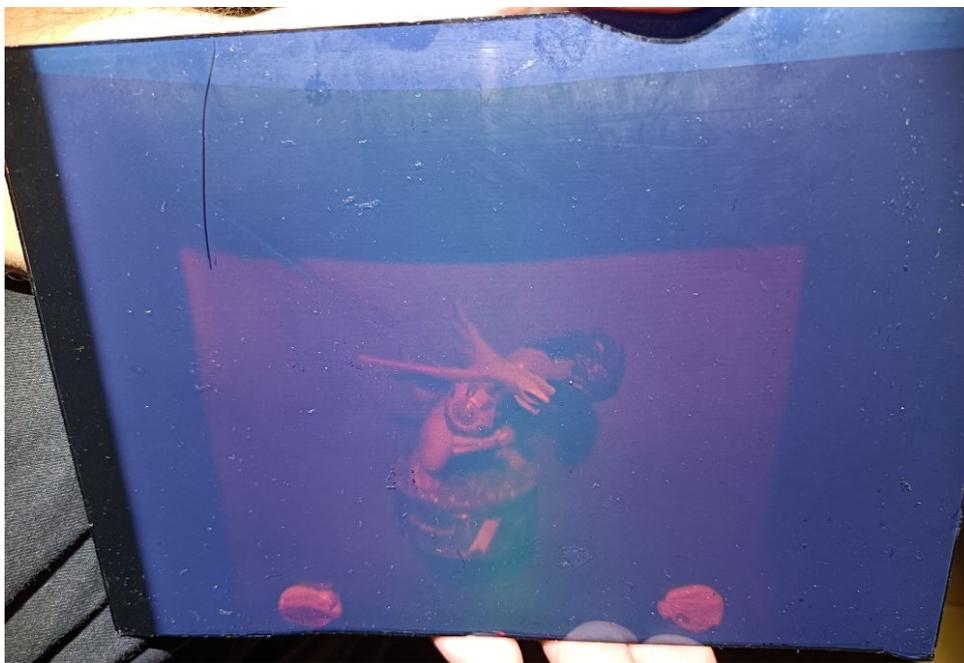


Figura 5.15: Holograma final grabado a 1W y 0.5 s. (Imagen ortoscópica)

debemos enfocar luz blanca en el holograma de manera que incida con unos 45° por el lado en el que se grabó, es decir, si ponemos la placa de tal manera que la figura se vea al derecho, tendrá que iluminarse desde arriba. Este holograma conseguimos que el color predominante fuese entre el naranja y rojo, por lo que los colores que se aprecian se acercan más a los reales. En realidad, si aumentamos el ángulo de incidencia del haz de reconstrucción, iremos viendo cómo el color se va desplazando hacia el azul hasta que deja de verse y, de la misma manera, si disminuimos el ángulo de incidencia veremos cómo se va desplazando hacia el rojo. Sin embargo, hacer esto, aparte de variar el color, también produce distorsiones en la imagen.

Notamos también que, aunque la imagen se ve con mucha nitidez, es algo más oscura que las que se veían en los hologramas de prueba. Esto no tiene porque significar que la luminosidad haya disminuido, puede deberse a que al tener color cerca del rojo nuestro ojo no lo percibe tan bien como el resto de colores del espectro.



Figura 5.16: Holograma final grabado a 1W y 0.5 s. (Imagen pseudoscópica)

En cuanto al holograma de la imagen pseudoscópica, al verse la imagen invertida, si se coloca la placa de manera que la figura se vea al derecho, se deberá iluminar con un ángulo de 45° desde abajo. La imagen se ve con nitidez, aunque da una sensación extraña por ser pseudoscópica. En este caso también predomina el color entre naranja y rojo.

5.4. Cálculo de la red de difracción formada por nuestro patrón de interferencia.

Sabiendo la disposición espacial del holograma y la longitud de onda del láser utilizado se puede calcular fácilmente la frecuencia espacial del patrón de interferencia usando (2.13). Reescribimos la ecuación como

$$f = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda}, \quad (5.1)$$

donde θ es el ángulo que forman el haz objeto y el haz de referencia. Este ángulo viene determinado entonces únicamente por la disposición con la que se graba el holograma. Según cómo sea este ángulo los planos de Bragg tendrán una inclinación y separación u otra. De hecho estos serán paralelos a la bisectriz del ángulo θ . Estrictamente hablando, son paralelos a la bisectriz del ángulo que forman los haces refractados al pasar por la emulsión. Por tanto, θ habría que hallarlo a partir de la ley de Snell

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (5.2)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción relativos a cada medio y α_1 y α_2 son los ángulos de incidencia y refracción respecto a la normal, respectivamente.

En el caso de un holograma de transmisión, donde tanto el haz objeto como el haz de referencia inciden sobre la misma cara de la emulsión, las franjas son más verticales. Sin embargo, en el caso de un holograma de reflexión, donde un haz incide por cada cara, las franjas son más horizontales. En el caso más extremo, siendo los dos haces en la misma dirección y sentidos opuestos ($\theta = 180^\circ$) los planos serán completamente horizontales y su separación será de $\frac{\lambda}{2}$.

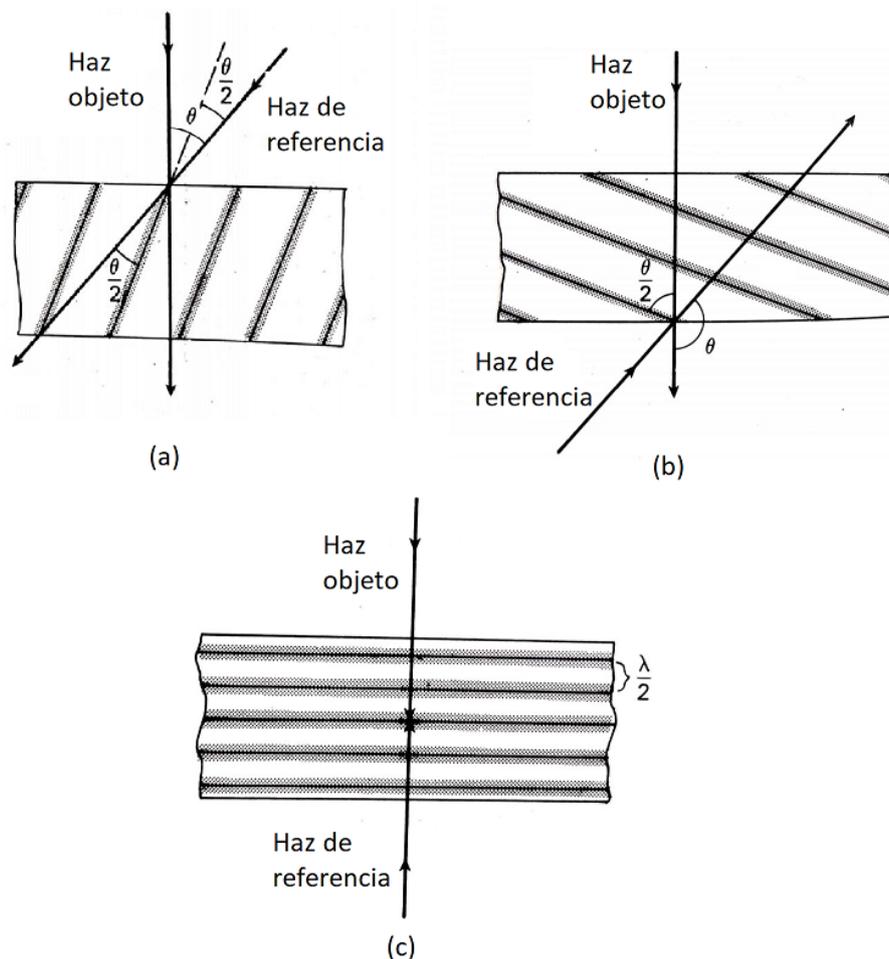


Figura 5.17: Franjas de la red de difracción de (a) un holograma de transmisión (b) un holograma de reflexión (c) un holograma de reflexión donde los haces son completamente opuestos. (Obviando el efecto de la refracción) (Figura modificada de [2])

El patrón de nuestro holograma, al ser de reflexión, se corresponde con el de la figura 5.17 (b).

Calcularemos la frecuencia f espacial del patrón en $\frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$ teniendo en cuenta la refracción de los haces.

Nuestro ángulo de incidencia del haz de referencia es de 45° , por lo que, tras aplicar la ley de Snell, obtenemos un ángulo de refracción de

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin 45^\circ\right) = 25.87^\circ.$$

Hemos considerado el índice de refracción del aire $n_1 \approx 1$ y el índice de refracción del vidrio $n_2 \approx 1.62$. Consecuentemente, al considerar el haz objeto en incidencia normal, el ángulo entre los dos haces es

$$\theta = 154.13^\circ.$$

Al tener en cuenta la refracción, no solo cambia el ángulo θ , sino que también lo hace la longitud de onda de la luz. Considerando que nuestro láser tenía una longitud de onda de $\lambda_1 = 532 \text{ nm}$ en el aire, al refractarse en el vidrio se convierte en

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n_2} = 328.40 \text{ nm}.$$

Con estos datos, aplicamos la fórmula (5.1) y concluimos que la red de difracción de nuestro patrón de interferencia es de

$$f = \frac{2 \sin \frac{154.13^\circ}{2}}{328.40} \cdot \frac{10^6 \text{ nm}}{1 \text{ mm}} = 5935 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}.$$

Debemos hacer notar que, aunque nuestro patrón sea de $5935 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$, como la resolución de las placas utilizadas es de $3000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$, por lo que las 2935 de más que forma nuestro patrón no aportarán nada al holograma. En este sentido, el usar estas placas nos hace perder definición y luminosidad de la imagen. Este era el motivo por el que intentamos usar las otras placas, que admitían hasta $10000 \frac{\text{lineas}}{\text{mm}}$ y por tanto en ellas no veríamos reducida la eficiencia.

Capítulo 6

Conclusiones.

La holografía es una parte de la física que ha revolucionado muchos aspectos de la ciencia. Hemos visto cómo esta surge aplicando, fundamentalmente, conceptos no muy complejos como son la interferencia y coherencia de la luz.

Un holograma no es más que un patrón de interferencia, el cual, al ser iluminado correctamente, se comporta como una red de difracción que reconstruye el frente de ondas que generaba el objeto grabado. También hemos visto cómo influye la disposición de los distintos elementos a la hora de realizar un holograma, siendo el ángulo de incidencia del haz de referencia el más importante. Esto es, entre otras cosas, porque determina (junto con la longitud de onda del haz) la frecuencia espacial del patrón de interferencia.

Hemos observado cómo la holografía tiene un gran potencial que permite abrir nuevos frentes de investigación y que ha supuesto grandes avances en muchas áreas de la ciencia. También hemos comprobado que, a pesar de su similitud con la fotografía, son muchas sus diferencias, como es, a parte del tipo de imagen que captan (una es en dos dimensiones y la otra en tres), la manera de obtener la información del objeto. De hecho, hemos visto que existen numerosas técnicas distintas para conseguir realizar un holograma, cada una de ellas con sus particularidades.

En cuanto a la parte práctica, hemos visto cómo se debe proceder a la hora de grabar un holograma de Denisyuk. Escogimos este tipo de holograma porque la disposición que hay que emplear en su grabado es sencilla y, al poder reconstruirse con luz blanca, es fácil de exponer.

Durante el proceso de grabado, hemos visto las consideraciones reales que hay que tomar y experimentando los distintos problemas que aparecen a la hora de realizar un trabajo experimental.

El resultado de la grabación de los hologramas es satisfactorio, habiendo conseguido que se vean las imágenes claramente y con nitidez. Sin embargo, aún tienen cosas mejorables, como es el color de las mismas, que se nos desplazó demasiado hacia el rojo.

En conclusión, la realización de este trabajo ha sido muy enriquecedora, tanto en la parte de investigación teórica, como en la experimental. La holografía me parece un campo muy interesante, del cual desconocía el nivel de desarrollo que tiene actualmente. Además, el haber participado en la realización de un holograma en unas instalaciones como las del CINN con ayuda de profesionales, me ha dado una visión de lo que es realmente un trabajo experimental.

Bibliografía

- [1] Yu. I. Ovstrovsky, *Holography and its application*, Mir Publishers Moscow, 1977.
- [2] Graham Saxby, *Practical holography*, Prentice Hall, 1988.
- [3] George W. Stroke, *An introduction to coherent optics and holography*, Academic Press, 1969.
- [4] W. Thomas Cathey, *Optical information processing and holography*, John Wiley & Sons, 1974.
- [5] H.J. Caulfield, *Handbook of optical holography*, Academic Press, 1979.
- [6] <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/gabor-lecture.pdf>
- [7] https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_05_5.html
- [8] https://es.wikipedia.org/wiki/Polarización_electromagnética