

00323



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

17

FACULTAD DE CIENCIAS

ELABORACION DE HOLOGRAMAS EN PELICULAS DELGADAS HECHAS A BASE DE CROMATO DE POTASIO, AZUL DE METILENO Y CRISTAL DE VIOLETA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C A

P R E S E N T A :

MARIANA ESPINOSA ALDAMA

DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE ALFONSO GARCIA MACEDO



DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2003 FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas o la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo académico.

NOMBRE: Mariana Espinosa Aldama

FECHA: 24 marzo 2003

FIRMA: [Firma]

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito: "Elaboración de Hologramas en Películas Delgadas Hechas a base de Cromato de Potasio, Azul de Metileno y Cristal de Violeta."

realizado por Espinosa Aldama Mariana

con número de cuenta 9135803-9, quien cubrió los créditos de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario Dr. Jorge Alfonso García Macedo

Propietario Dra. María del Pilar Segarra Alberu

Propietario Dr. Roberto Ortega Martínez

Suplente M. en C. Luis Manuel León Rossano

Suplente Dr. Pablo Samuel Schabes Retchkiman

[Firma]
[Firma]
[Firma]
[Firma]
[Firma]

Consejo Departamental de Física

[Firma]

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENACHE

**ELABORACIÓN DE HOLOGRAMAS EN
PELÍCULAS DELGADAS HECHAS A BASE DE
CROMATO DE POTASIO, AZUL DE
METILENO Y CRISTAL DE VIOLETA**

Mariana Espinosa Aldama

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

A mis padres

Agradecimientos

A mis padres por su constante e incondicional apoyo y paciencia. A mi padre, por ayudarme a demostrar y a mi madre, por ayudarme a valorar.

A Juan Claudio, por su amor y confianza, y por el estilo.

A Jorge García Macedo, mi asesor, por darme la oportunidad de realizar este trabajo y de descubrir las maravillas de la holografía.

A Roberto Ortega, Pilar Segarra, Luis Manuel León y Pablo Schabes, por sus valiosos comentarios.

A Lupita, Alfredo, Federico, Jorge y Daniel, por su apoyo en el laboratorio.

A Carlos Magaña, por su ayuda con el microscopio electrónico.

Al Dr. Cordero y a Enrique por apoyarme en el laboratorio de rayos-x.

A los tíos y primos, por su interés.

A Emilio, Gabriela, Ana Paula, y Fernando, por las porras.

A Luis, Daniel, Oliva, Anselmo y demás exiliados, por el apoyo virtual.

A mis cuñados, por su entusiasmo y a Pili por su preocupación.

Y a Nina y Lola por su compañía.

Contenido

Resumen	2
Introducción y objetivos	3
Capítulo I Holografía	
1.1 Introducción a la holografía	5
1.1.1 Propiedades de la luz	9
1.1.2 Luz láser	14
1.1.3 Distintos hologramas	16
1.1.4 Reconstrucción del patrón de interferencia	18
1.2 Elaboración de hologramas	23
1.2.1 Vibraciones	23
1.2.2 Reveladores y Blanqueadores	24
1.2.3 Configuraciones	26
Capítulo II Películas Delgadas	
2.1 Películas Delgadas	32
2.1.1 La emulsión	34
2.1.2 La gelatina y el tamaño de grano	34
2.1.3 El cromato de potasio y la sensibilidad al ultravioleta	35
2.1 Absorción óptica	36
2.2.1 Los colorantes y el corrimiento de la longitud de onda	37
2.2.2 El azul de metileno	38
2.2.3 El cristal de violeta	39
2.3 La receta de Jeff Blyth	41
2.3.1 Proceso fotosensible	43
2.3.2 Proceso de revelado	44
2.3.3 Secado y conservación de los dicromatos	45
Capítulo III Resultados y Conclusiones	
3.1 Resultados	46
3.1.1 Elaboración de hologramas	46
3.1.2 Recubrimiento por inmersión	51
3.1.3 Dicromatos	56
3.2 Conclusiones	64
Bibliografía	66

Resumen

En la presente tesis se describe el montaje de un laboratorio para holografía en el Instituto de Física de la UNAM: un cuarto oscuro, en el que se armó una mesa holográfica y un dispositivo para la elaboración de películas delgadas. Se hicieron hologramas de transmisión de efecto Bragg y reflexión con película *Slavich* y *Red Star Ultra*. Se probó como revelador el Dektol, pero se lograron mejores resultados con revelador pyrochrome. Se obtuvieron hologramas de modulación de amplitud, y se transformaron en hologramas de modulación de fase mediante un proceso de blanqueo a base de ácido sulfúrico. Mediante el proceso de inmersión (*dip coating*) se elaboró película delgada con un espesor de $18 \pm 3 \mu\text{m}$ (medida obtenida con un microscopio electrónico de barrido). La película dicromatada fue sensibilizada con cromato de potasio y azul de metileno, colorante utilizado para correr la sensibilidad de la película al rojo. Mediante pruebas de absorción óptica con un espectrofotómetro se observó el corrimiento de la longitud de onda del máximo de sensibilidad a través de cambios en el pH de la emulsión en los colorantes azul de metileno, cristal de violeta y tianina. Se elaboraron hologramas de reflexión y de volumen tipo Denisyuk en películas dicromatadas con cromato de potasio y azul de metileno. Se demostró que es posible grabar hologramas en películas dicromatadas con cromato de potasio y cristal de violeta utilizando una mayor concentración molar a las de las películas con azul de metileno.

Objetivos e Introducción

Esta tesis, además de sentar las bases en el Instituto de Física de la UNAM para la investigación en películas holográficas, tiene como objetivo principal reproducir y ampliar los experimentos de Jeff Blyth, proponiendo el método de inmersión para producir emulsiones, y el cristal de violeta como un sensibilizador alternativo para longitudes de onda en el rojo, el naranja y el amarillo.

Además de las razones académicas para realizar este trabajo, no se puede dejar de mencionar las motivaciones personales. La holografía constituye la combinación ideal entre la fotografía y la ciencia. Ha resultado ser la ventana a un futuro lleno de posibilidades dentro de la ciencia, el arte y la divulgación, en un campo que se ha explorado poco en nuestro país.

En el primer capítulo, dedicado a la holografía, se ofrece una introducción a esta ciencia a través de una breve semblanza de la historia de la holografía y de sus múltiples aplicaciones. Mediante el entendimiento de conceptos básicos de la luz —como lo son las propiedades físicas de las ondas planas, la interferencia y la difracción— y la luz láser, se hace una caracterización general de los hologramas y de los modelos de reconstrucción de imágenes.

En la segunda parte de este primer capítulo, dedicada a la elaboración de hologramas, se presentan las condiciones necesarias para elaborar un holograma, como lo son la estabilidad, los reveladores y blanqueadores y las configuraciones utilizadas para hacer hologramas de transmisión, reflexión y cilíndricos.

El segundo capítulo está dedicado a la elaboración de películas dicromatadas delgadas. Se describen, primeramente, las características básicas de una emulsión dicromatada y de sus componentes: la gelatina y el cromato de potasio. Mediante un análisis de absorción óptica descrito también en este capítulo, se estudian las propiedades de absorción de distintas películas. Esto permitió la optimización de dichas películas; se presenta en seguida la receta de Jeff Blyth y el proceso fotosensible, de revelado y secado de las emulsiones dicromatadas resultantes de este trabajo.

En el capítulo de resultados y conclusiones, se presenta el desarrollo experimental para la elaboración de hologramas: la fabricación de una mesa antivibraciones, el uso de películas, reveladores y blanqueadores, y los hologramas de transmisión obtenidos con la configuración de dos haces. Seguidamente se describe el proceso de recubrimiento por inmersión (*dip coating*) y el dispositivo respectivo, armado para este proyecto. Se explica cómo fue medido el espesor de las películas obtenidas y la apariencia de la superficie de la emulsión, vista con un microscopio electrónico de barrido.

Los resultados de los análisis de absorción óptica hechos a las películas con azul de metileno, cristal de violeta y tianina son, también, presentados en este capítulo; así como las fotografías de los hologramas de reflexión tipo Denisyuk grabados en película dicromatada delgada a base de cromato de potasio y azul de metileno. Por último, se presentan las conclusiones a las que ha conducido este trabajo.

Capítulo I Holografía

1.1 Introducción a la holografía

En este primer capítulo se hablará grandes rasgos de la holografía 3-D y de lo que es un holograma; de los distintos hologramas que existen y de las técnicas necesarias para hacer hologramas.

La holografía es un método basado en la interferencia de la luz para procesar señales ópticas y obtener imágenes de objetos. En un intento por mejorar la resolución del microscopio electrónico en 1947, el físico inglés Dennis Gabor concibió la holografía como una posibilidad de la teoría ondulatoria de la luz mientras trabajaba en el Research Laboratory de la British Thompson-Houston Company. Si bien Gabor nunca llegó a cumplir su objetivo original, su descubrimiento lo hizo merecedor del premio Nobel de 1971.¹

A grandes rasgos, un holograma puede describirse como una imagen en tres dimensiones. Es una placa fotográfica que contiene la información de la luz reflejada por el objeto holografiado. Dicha información, a diferencia de la de una fotografía —que reproduce una imagen bidimensional del objeto—, se registra como un patrón de interferencia entre la luz reflejada por el objeto y un haz de referencia. Si uno observa directamente la placa holográfica no encontrará nada en ella que refiera a algún objeto, pues para observar el holograma es necesario recomponer dicho patrón de interferencia. Al recomponerlo, el resultado es una imagen virtual y/o real, completamente tridimensional.

Etimológicamente, *holograma* significa “escritura completa” y proviene de los vocablos griegos *holos*, que significa todo, entero, y *grama*: letra. Cada uno de los puntos en la placa contiene toda la información del objeto, pero registrado desde un ángulo propio. Es por esto que, al recorrer con nuestra mirada todo el holograma desde distintos ángulos, es posible ver el objeto desde distintos puntos de vista. Sin embargo, al recortar el holograma en pequeños pedazos y observar a través de uno de ellos, sólo aparecerá el objeto desde la perspectiva registrada en ese pedazo de holograma... como si fuera una pequeña ventana. Esta propiedad se llama *redundancia*.²

En 1947 y 1948, Gabor e Ivor Williams sentaron las bases de la holografía. Sus primeros hologramas fueron registrados en un plano, con la luz monocromática, extremadamente colimada, de una lámpara de mercurio. La placa fotográfica fue expuesta a la luz durante varias horas, y el holograma fue reconstruido con la misma fuente luminosa. Este sistema inicial presentaba varias desventajas, como la interferencia, al ser reconstruido el holograma, entre la imagen virtual y la imagen real. Asimismo, requería que el objeto fuera semitransparente para que no obstruyera el paso

¹ Leith, E. N., *The Legacy of Dennis Gabor*, Optical engineering, oct 1980, Vol. 19, No. 5, p. 633

² Kasper J. E. y Feller S. A., *The complete book of holograms*, Wiley Science Editions, 1987, p. 1

del haz de referencia. Este problema fue solucionado por el mismo Gabor, quien introdujo la idea de las configuraciones fuera de eje con la utilización de divisores de haz; sin embargo, este trabajo no atrajo la atención de firmas comerciales o institutos de investigación y no fue publicado hasta 1966.³

Tras el descubrimiento de Gabor, la holografía tomó muchas direcciones. M. E. Haine y J. Dyson continuaron con el objetivo original de mejorar la óptica del microscopio electrónico.⁴ G. L. Rogers reportó en 1952 una serie de experimentos hechos con una lámpara de mercurio que sentaron las bases para hacer hologramas de hologramas (un método ahora utilizado para copiar hologramas), sustracción de imágenes por la superposición de hologramas "negativos" y "positivos", hologramas de fase e inició los trabajos para generar hologramas por computadora. Más aún, fue el primero en considerarlos como una zona de placa de Fresnel, una zona de placa con un patrón complejo.⁵ Por otro lado, llevó la holografía a la región de las ondas de radio en sus trabajos de dispersión de la ionosfera.⁶ Kirkpatrick, H. M. A. El-Sum y A. V. Baez, motivados por la falta de lentes para rayos-x, hicieron experimentos en dicha región de longitudes de onda, en 1952 generaron una imagen visible de un alambre delgado al iluminar un patrón de difracción de rayos-x que había sido grabado por P. Kellstrom veinte años antes.⁷ Para ese año, la de El-Sum era la tesis más extensa en la materia.⁸

En los años cincuenta, la mayor parte de los avances en la holografía se debieron a las aplicaciones en los sistemas de radar. Sin embargo, tras la invención del rayo láser, en 1960, la investigación en el área de holografía visual en tres dimensiones (3D) creció de manera explosiva. Los experimentos de los físicos norteamericanos Emmett Leith y Juris Upatnieks inauguraron una nueva era en la holografía. Separaron espacialmente el haz de referencia del haz del objeto e hicieron desaparecer por completo la interferencia que ocurría entre la imagen virtual y la imagen real. Un año más tarde, produjeron la primera imagen tridimensional, haciendo realidad las predicciones de Gabor. El mismo Gabor, cercano ya a los sesenta y cinco años de edad, retomó la holografía para seguir contribuyendo con nuevas ideas, artículos y libros.

En la actualidad, la holografía se ha diversificado enormemente. La posibilidad de reconstruir así ondas de luz como de sonido (holografía acústica) ha sido clave para el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la industria. Las posibles aplicaciones de esta técnica pueden clasificarse dentro de las siguientes categorías: imágenes en 3D, reconocimiento de imagen, los hologramas de volumen, óptica, interferometría, microscopía, cinematografía (proyección de sistemas tridimensionales) y televisión (transmisión de hologramas a distancia).

³ Soroko L. M., *Holography and coherent optics*, New York, Plenum Press, 1980, p.33.

⁴ Haine, M. E., y Dyson, J., *A modification to Gabor's Proposed Diffraction Microscope*, Nature 166, 312, 1950. Cit. por Leith.

⁵ Collier R. J., Burckhardt C. B. y Lin L.H., *Optical Holography*, Academic Press, New York, 1971, p. 42.

⁶ Rogers, G. L., *A new Method of Analysing Ionospheric Movement Records*, Nature 177, 613, 1950. Cit. por Leith.

⁷ Collier, Burckhardt, y Lin, p. 41.

⁸ El-Sum, H. M. A., *Reconstructed Wavefront Microscopy*, Ph.D thesis, Stanford Univ., Stanford, California, 1952. Cit. por Leith.

La categoría de imagen 3D incluye la imagen en placa holográfica, el contorno fotográfico, las imágenes con láser pulsado de objetos en movimiento, las imágenes submarinas, la visión con ondas sonoras de radio y microondas.

Estas técnicas son ideales para archivar y grabar objetos valiosos, antiguos o frágiles. Un ejemplo de ello es la reconstrucción de un hombre que vivió hace aproximadamente 2300 años —cuyos restos fueron encontrados en Lindow Moss, Inglaterra—, registrada por investigadores del Departamento de Ciencia Forense de Scotland Yard con un láser pulsado.

En la holografía acústica se recurre a una onda sonora de frecuencia ultraalta (ultrasonido) para grabar el patrón de interferencia. Las ventajas de las técnicas acústicas estriban en el hecho de que las ondas sonoras pueden propagarse por distancias considerables en líquidos densos y sólidos contrariamente a la luz. Por consiguiente, los hologramas acústicos son capaces de registrar cosas tan diversas como submarinos sumergidos y órganos internos del cuerpo.

Los prototipos de computadoras ópticas que utilizan hologramas como material de almacenamiento (hologramas de volumen) podrían crear un impacto dramático en el mercado de la holografía y la informática. Hoy en día existen tecnologías con las que es posible guardar datos grabando un holograma tridimensional con densidades tan altas como un terabyte (8×10^{12} bits) por centímetro cúbico. Esto equivale al almacenamiento de información proporcionado por mil discos duros de computadora, cada uno con un gigabyte de capacidad.⁹

En el área de la óptica la holografía se ha vuelto indispensable. Los elementos ópticos holográficos (EOH) son cualquier dispositivo de difracción compuesto de un sistema de “franjas” creado bien sea directamente por interferometría o por simulación computarizada. Por ejemplo: un holograma de un espejo cóncavo se comporta como una lente. Estas lentes holográficas se utilizan en los aviones de combate y permiten al piloto observar la instrumentación de vuelo sin dejar de ver través del parabrisas. Un holograma de un espejo plano produce patrón de interferencia que actúa como una rejilla de difracción.

Hoy en día, gran parte de los sistemas de identificación depende de los códigos de barras. Los escaners que leen este tipo de códigos, impresos en productos, credenciales, gafetes y otros objetos, utilizan sistemas de lentes holográficos para dirigir la luz láser directamente a la etiqueta que contiene el código impreso. Un haz láser pasa a través de un disco de rotación compuesto de varias facetas holográficas de lentes-prisma. Éstas vuelven a enfocar, se mueven y barren rápidamente el haz a lo largo de un volumen del espacio, asegurándose de que la lectura del código ocurra a la primera pasada sobre el dispositivo.¹⁰

⁹ Maldonado J.L., García-Macedo J., Los polímeros fotorrefractivos, física y aplicaciones fotónicas de estos nuevos materiales, Revista Mexicana de Física, 47, 6, dic. 2001, p.582

¹⁰ Hecht, p. 648

Los hologramas de doble exposición (interferometría holográfica), por ejemplo, proveen a los investigadores de información crucial sobre los procesos de transferencia de calor, información que hace posible el diseño de contenedores seguros para transportar y almacenar material nuclear radioactivo.

En la aeronáutica y el diseño industrial, la holografía es utilizada para representar las ondas de choque producidas por bandas de aire y localizar, de este modo, áreas de alto estrés. Esta técnica es fundamental para el mejoramiento y optimización de las alas de aviones y hélices de turbinas. Sistemas similares están siendo probados en automóviles prototipo.

En el área de oceanología y biología marina, la holografía en el área de microscopía es un auxiliar para comprender la diversidad del fitoplancton marino. Los investigadores han desarrollado cámaras marinas que generan hologramas de los organismos; de este modo, los estudios pueden realizarse en un laboratorio, gracias a una estación controlada por computadora que mueve ya sea una cámara de video o un microscopio a través de las imágenes.

Investigadores de la Universidad de Alabama en Huntsville están desarrollando subsistemas de proyección holográfica computarizada. Actualmente, el trabajo se limita a proveer paneles de control remoto para manejar simuladores de entrenamiento, pero los investigadores creen que en los próximos diez años habrá televisores con imágenes tridimensionales disponibles en el mercado.

En México también se hace holografía. Hologramas de México es una de las compañías más grandes del mundo en el ramo; además de producir la mayor parte de los hologramas utilizados en tarjetas de crédito, sellos oficiales y de seguridad, distribuye sus productos en Estados Unidos y América Latina. De manera más experimental, en institutos como el INAOE (Instituto Nacional de Astronomía, Óptica y Electrónica) se desarrollan técnicas de animación holográfica, algoritmos para procesamiento de imágenes, polímeros fotocromáticos como materiales holográficos, filtros holográficos y holografía en cristales.

1.1.1 Propiedades de la luz

La física de la holografía está bien entendida hoy en día y, aunque la teoría completa comprende el análisis matemático de los patrones de interferencia, de los estados de coherencia y de la teoría electromagnética de la luz, para los intereses de esta tesis sólo serán necesarios unos cuantos conceptos básicos sobre la teoría ondulatoria de la luz; sobre todo, lo relacionado con las propiedades de las ondas planas.

La luz puede ser descrita como paquetes de energía llamados *fonones* o como ondas electromagnéticas. La teoría electromagnética de Maxwell predice la presencia de dos campos de fuerza vectoriales en las ondas de luz: el campo eléctrico y el campo magnético. Estos campos se propagan a través del espacio sin necesidad de un medio que los sustente y solamente pueden ser observados al interactuar con la materia. En 1890, Wiener demostró que una emulsión fotográfica era ennegrecida por las regiones antinodales del campo eléctrico de la luz, no así las del campo magnético (la relación entre la intensidad de las interacciones de los dos campos con la materia es del orden de mil). Esto también es cierto para la mayoría de las emulsiones fotosensibles utilizadas en la holografía. Es por esto que en la descripción de los fenómenos involucrados en la formación de hologramas se procede como si solamente el campo eléctrico de la luz estuviera presente. En la reconstrucción de hologramas formados en materiales no magnéticos la situación es la misma.¹¹

En 1802, Thomas Young demostró que la luz se propagaba en forma de ondas. Una onda es una perturbación autosustentada que se propaga a través de un medio. La luz es una perturbación del campo electromagnético en forma de ondas. La forma o perfil de la perturbación, ya sea bidimensional o tridimensional, puede ser descrita en cualquier instante, digamos $t = 0$, si se mantiene el tiempo constante en dicho valor.

$$\psi(x,t)|_{t=0} = f(x,0) = f(x) \quad (1.1)$$

Entre las ondas que no cambian su perfil en el tiempo están las ondas esféricas, las cilíndricas y las planas.

El ejemplo más sencillo de una onda tridimensional es una onda plana, cuyos frentes de onda (el lugar geométrico de los puntos en el espacio a los que la onda llega al mismo tiempo) son planos. La luz láser puede describirse como una onda plana. Al incidir sobre un objeto y reflejarse o transmitirse, cambian las propiedades físicas de las ondas —su amplitud, su fase—; las ondas planas se transforman en ondas esféricas que viajan en direcciones asociadas con las diferentes frecuencias espaciales del campo de luz del objeto.

Una onda plana tridimensional se representa matemáticamente de la siguiente manera:

¹¹ Collier, Burckhardt, y Lin, pp. 5-6.

$$\Psi(r,t) = A e^{i2\pi(x/\lambda \pm vt + \epsilon)} \quad (1.2)$$

donde la longitud de onda (λ) es la distancia que tiene que recorrer la onda para repetirse exactamente de la misma forma, la frecuencia (ν) es el número de oscilaciones por unidad de tiempo y la amplitud (A) es la distancia entre la cresta y el valle de la onda. Estas propiedades de las ondas, en el caso de la luz, corresponden a características específicas de ella. Así, la longitud de onda se relaciona con el color, la frecuencia, con la energía (a mayor frecuencia, mayor energía) y el cuadrado de la amplitud, con la intensidad de la luz (a mayor amplitud, mayor intensidad).

Al argumento ($x/\lambda \pm vt + \epsilon$) se le llama fase, donde ϵ es la fase inicial de la onda. Es decir, ϵ es un factor que compara la traslación de una onda con respecto a otra onda de referencia.

A diferencia de la fotografía, que registra las variaciones en la intensidad (y por lo tanto la amplitud) de la luz reflejada por un objeto, un holograma registra además las variaciones en la fase.

La velocidad de la luz v , aunque constante, depende de el índice de refracción del medio en el que se propague.

$$v = c/n \quad \text{y} \quad n = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}}$$

donde n es el índice de refracción del medio, c la velocidad de la luz en el vacío, $\epsilon/\epsilon_0 = K_\epsilon$ es la permitividad relativa y $\mu/\mu_0 = K_\mu$ es la permeabilidad relativa entre el medio y el vacío. En materiales no magnéticos $K_\mu = 1$, por lo que

$$n = \sqrt{K_\epsilon} \quad (1.3)$$

Como se explicará más adelante, existen emulsiones que registran los patrones de interferencia como cambios en el índice de refracción.

Interferencia

La interferencia es la superposición de dos o más ondas en una región del espacio en la que se propagan simultáneamente. Esta superposición puede ser constructiva o destructiva.

En la holografía, la información acerca de las distancias relativas entre los puntos de un objeto es registrada como retrasos o desfases en los rayos de luz provenientes de tales puntos. Estas distancias son registradas en virtud de una comparación correlativa entre un haz de referencia y el haz del objeto. A diferencia de otros métodos de comparación correlativa de señales, en el método holográfico, que se

basa en la interferencia de la luz, las señales son comparadas en un primer momento y luego registradas. La razón de esto es que la frecuencia de las oscilaciones electromagnéticas de la luz es tan alta (10^{14} - 10^{15} Hz) que ningún detector puede seguirlas; por lo tanto, sólo la luz misma, al ser comparada con una señal óptica similar (el haz del objeto), puede ser utilizada como una referencia de comparación. Esta comparación se logra al dirigir el haz del objeto y un haz de referencia hacia una placa fotográfica en la que los dos haces se intersectan formando un patrón de interferencia. El patrón puede ser registrado solamente si, durante la exposición, éste se mantiene completamente fijo con respecto a la placa, y si está bien definido por un alto contraste, requerimientos que se cumplen al utilizar un haz de luz monocromático altamente colimado. La Figura 1.1 muestra la apariencia de un patrón de interferencia. Las curvas mapean las regiones de amplitud máxima producidas por las fuentes A y B.

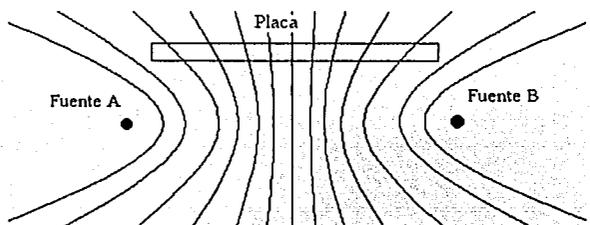


Figura 1.1 Una placa holográfica es colocada en el patrón de interferencia producido por las fuentes de luz coherentes A y B.

El fenómeno de interferencia es una consecuencia de la suma vectorial de los campos eléctricos de dos haces en la zona de su intersección. La intensidad de la luz aumenta en aquellos puntos y momentos en que la suma resulta constructiva y los campos coinciden en dirección. De manera inversa, la intensidad disminuye cuando la suma de los campos es destructiva.¹²

Coherencia

La capacidad de producir un patrón de interferencia estático en tiempo y espacio se llama *coherencia*; esto quiere decir que la relación entre las ondas superimpuestas es la misma en todo momento y en todos los puntos. Se pueden distinguir tres tipos distintos de coherencia: la coherencia temporal de corta duración (coherencia espectral de tiempo o fase), la coherencia temporal de larga duración (estabilidad de amplitud y de

¹² Soroko L.M., p. 3-5

frecuencia en el tiempo) y la coherencia espacial.¹³ La coherencia temporal está relacionada con las condiciones a lo largo de la onda, mientras que la coherencia espacial se refiere a las condiciones transversales de la onda (véase Figura 1.2). Sin embargo, toda fuente de luz que no sea perfectamente monocromática tiene una longitud de coherencia —la extensión del tiempo o el espacio en la que la fase de la onda puede predecirse con seguridad— temporal o espacial limitada, ya que existen componentes en su luz que se desfasan a lo largo del haz. Esto también es cierto para el láser rojo de Helio-Neón —que emite en más de una longitud de onda—, cuya longitud de coherencia (por lo general, de unos cuantos decímetros) depende de la longitud del tubo del láser; cuando el láser emite una luz verde, la longitud de coherencia es mayor, pues ésta también depende de la longitud de onda del haz (a menor longitud de onda mayor coherencia). Algunos láseres cuentan con dispositivos que suprimen ciertas longitudes de onda, aumentando considerablemente la longitud de coherencia; existen láseres de costos muy elevados con longitudes de coherencia de hasta un kilómetro. Como puede suponerse, en la holografía, las dimensiones de los objetos a holografar son determinadas por la longitud de coherencia del láser. En general los hologramas tienen una corta profundidad de campo;¹⁴ si la longitud de coherencia es de medio metro, por ejemplo, el objeto deberá ser significativamente menor (unos cuantos centímetros).¹⁵

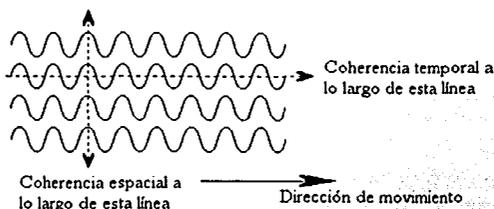


Figura 1.2 Representación de la coherencia espacial y temporal de un haz de luz.

Para optimizar la profundidad de campo de un holograma es necesario minimizar al máximo la diferencia entre los caminos ópticos recorridos por el haz del objeto y el haz de referencia, o en dado caso, que la diferencia sea un múltiplo entero de la longitud de coherencia del láser.

¹³ Stroke, George W., *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, New York, 1969, p.38

¹⁴ Entiéndase por profundidad de campo la extensión de la escena a holografar que resulta en una imagen en foco.

¹⁵ Kasper J. E., p. 30, 63-67

Difracción

Cuando la luz se encuentra con un obstáculo — partículas o aberturas — de tamaño comparable a la longitud de la onda, la luz lo “rodea”, reconstruyéndose del otro lado del obstáculo. A éste fenómeno se le llama difracción. Se le llama rejilla de difracción a un arreglo de elementos difractores, aperturas y obstáculos, que produce alteraciones periódicas en la amplitud y/o la fase de un frente de onda.

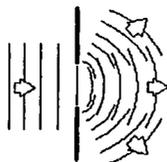


Figura 1.3 Un frente de onda plana se difracta al pasar por una apertura.

Un frente de onda que pasa por un sistema de rejillas múltiples con regiones opacas y transparentes sufre una modulación de amplitud. A este sistema se le llama *rejilla de transmisión de amplitud*. Cuando la rejilla es totalmente transparente las variaciones regulares en la densidad óptica a lo largo de la rejilla producen una modulación en la fase del frente de onda. A esta rejilla se le llama *rejilla de transmisión de fase*.¹⁶ De forma análoga, existen rejillas de difracción que reflejan la luz incidente, a las cuales se les llama *rejillas de reflexión*, de fase o de amplitud. Los patrones de interferencia grabados en las placas holográficas funcionan como rejillas de difracción, ya sea de transmisión o reflexión, de amplitud o de fase.

La eficiencia de difracción de un holograma está definida como la fracción de la luz incidente que es utilizada para reconstruir el holograma. Un holograma con una rejilla de amplitud, ya sea de transmisión o de reflexión, como los hechos con emulsiones de haluros de plata, tienen una menor eficiencia de difracción que los hologramas con rejillas de fase, ya que al absorber parte de la luz incidente, requieren de una mayor cantidad de luz para formar la imagen.

¹⁶ Hecht E., p. 392,424

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.1.2 Luz láser

El término *LASER* es el acrónimo de la expresión inglesa "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Desarrollado por Theodore H. Maiman en 1960, el láser es un dispositivo que produce un rayo de luz coherente, intenso, concentrado y altamente paralelo.¹⁷ Para obtener un haz de luz lineal espacialmente coherente (todos sus fotones tienen exactamente la misma frecuencia, dirección, polarización y fase) se recurre a la emisión estimulada; al irradiar con luz blanca un gas confinado se modifica el estado de energía de los electrones, los cuales pasan de un estado base a un estado excitado. Al regresar a su estado base, muchos quedan atrapados en estados metaestables. Si hay más electrones en el estado excitado que en el estado base, entonces se dice que hay una inversión de población entre estos dos estados. Al caer al estado base el electrón emite un fotón de energía $h\nu$; cuando éste pasa cerca de un electrón en estado metaestable, por efecto de resonancia, se produce una emisión estimulada. Los fotones obtenidos de esta manera son totalmente coherentes. Bajo condiciones adecuadas del gas, esta emisión estimulada puede producir una radiación coherente de gran intensidad.¹⁸

Para producir el láser, hay que colimar la emisión estimulada. Para esto se crea una cavidad con espejos sumamente reflejantes en sus extremos. La cavidad tiene un largo $L = n\lambda/2$, de tal manera que L funciona como un modo vibracional amplificando la luz láser y absorbiendo las emisiones con otras λ . Al mantener la radiación paralela con respecto a la cavidad —que a su vez estimula más radiación en la misma dirección—, se obtiene una luz extremadamente monocromática.

El láser de helio-neón, desarrollado en 1961, es un láser de gas de onda continua que opera entre 1 a 50 mW de potencia. La longitud de onda más común en la que emite equivale a 632.8 nm, aunque hoy en día existen láseres de He-Ne que emiten en los 543 nm., 594 nm. y 612 nm. Las ventajas que ofrecen se deben primordialmente a su estabilidad en altas frecuencias, además de que son fáciles de construir, relativamente baratos, muy confiables y en la mayoría de los casos es posible operarlos mediante un simple interruptor. Por lo general, el bombeo se logra por medio de una descarga eléctrica; los electrones libres y los iones se aceleran con un campo aplicado y, como resultado de las colisiones con los átomos de helio, éstos son excitados a los niveles 2^1S y 2^3S (Figura 1.4). La excitación de los átomos de neón se logra debido a colisiones de éstos con átomos excitados de helio. Como resultado de dichas colisiones, los átomos de helio pasan a su estado base y los átomos de neón pasan del estado base a los estados $3s$ y $4s$, creando una inversión de población entre estos niveles y los niveles $4p$ y $3p$. Entre estos niveles energéticos puede ocurrir la oscilación láser. A partir de los niveles $4p$ y

¹⁷ En los años cincuenta, el trabajo de investigadores como el estadounidense Charles Hard Townes y los soviéticos Alexandr Mikhailovich Prokhorov y Nikolai Gennadievich Basov condujo a la invención del *maser* (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), un amplificador de microondas de bajo ruido. Los tres científicos compartieron el Premio Nobel en 1964 y, para 1960, ya habían sentado las bases teóricas que serían utilizadas por Maiman para hacer funcionar el primer dispositivo láser (Hecht, pp. 577 y 578).

¹⁸ Hecht, p. 578.

3p, los átomos de neón decaen espontáneamente al nivel inferior 3s, de donde pasan al estado base debido a colisiones con otros átomos o con las paredes del tubo láser.

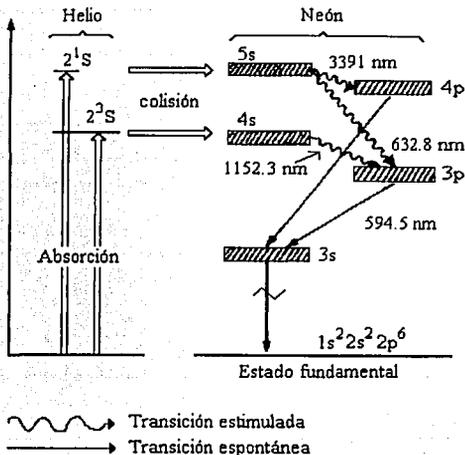


Figura 1.4 Excitación de los átomos de helio e inversión de población en el láser de Helio-Neón

En 1960, Maiman desarrolló el láser de rubí pulsado. Este sistema (a diferencia de los láseres de onda continua, más comunes en holografía) emite un poderoso destello de luz que dura sólo unos cuantos nanosegundos, congelando el movimiento y haciendo posible producir hologramas de eventos a altas velocidades, como el vuelo de una bala o de objetos animados. El primer holograma de una persona fue hecho en 1967 y trazó el camino para una aplicación especializada: el retrato holográfico pulsado.¹⁹

Algunos láseres muy potentes, como el de argón, utilizan un sistema de refrigeración por bombeo de agua que hace vibrar al rayo de luz, lo cual dificulta enormemente la realización de hologramas y de otras aplicaciones.

¹⁹ http://ftp.rli.com/pub/RLI/laser_tutor

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.1.3 Distintos hologramas

Existen muchos tipos de hologramas, dependiendo del material, la configuración y el proceso de revelado con que son fabricados y de la luz con la que pueden ser vistos. A grandes rasgos se pueden distinguir seis tipos: de superficie y de volumen, de transmisión y de reflexión, y de amplitud y de fase.

Hologramas de superficie

Un holograma es considerado grueso cuando el grosor de la emulsión (de unas décimas de micras) es suficiente para contener un substancial número de superficies difractoras de Bragg (más de 50); por el contrario una emulsión con un grosor menor a 15 micras que contiene unas pocas superficies difractoras es considerado delgado. Los hologramas delgados son hologramas de superficie. Éstos se caracterizan por tener el patrón de interferencia grabado en la superficie de la placa (en el caso de las películas a base de haluros de plata ocurre un oscurecimiento de la plata en las zonas de alta exposición). Los de superficie son los hologramas más sencillos y los que menos información almacenan, pues lo hacen de manera bidimensional.

Hologramas de volumen

En 1891, Gabriel Lipmann desarrolló una placa fotográfica con un recubrimiento de mercurio en el respaldo que funcionaba como espejo. Al momento de tomar una fotografía se creaban patrones de interferencia entre el haz incidente y el haz reflejado, los cuales quedaban registrados en una emulsión de gelatina y bromuro. Al observar la placa con luz de día los colores originales eran recreados. Lipmann recibió el premio Nóbel en 1908 por su método de interferencia.²⁰

En 1962 el soviético Uri N. Denisjuk utilizó el método de Lippman para crear un holograma que registraba el patrón de interferencia a lo largo de todo el espesor de la placa.²¹ En otras palabras, un arreglo periódico de objetos difractoros de fase o amplitud, modulado y tridimensional, que representa información. De este modo, al grabar las líneas de interferencia en volumen se logró un método para obtener un holograma de color cuya reconstrucción podía hacerse, por primera vez, con la luz de un foco incandescente.²² Los hologramas de volumen tienen propiedades muy interesantes, pueden ser grabados en distintos materiales: en fotoemulsiones gruesas, en las que los objetos de amplitud son haluros de plata;²³ en cristales fotocromicos; en cristales de halógeno, como el KBr, que responden a la radiación vía variaciones de color; en cristales ferroeléctricos como el niobato de litio, que sufre alteraciones locales en el

²⁰ Michel Frizot (Ed.), *A new history of photography*, Könemann, 1998, pp.413,414.

²¹ Denisjuk, Yu. N., *Photographic Reconstruction of the optical properties of an object in its own scattered radiation field*, *Sov. Phys.-Dokl.* 7, 543, 1962. Cit por Leith.

²² Leith, p. 634.

²³ Se le llama objeto de amplitud a los objetos que modifican la amplitud (intensidad) de la luz incidente al absorber parte de ésta. Así mismo, los objetos de fase modifican la fase de la luz incidente.

índice de refracción, dando lugar a un holograma de fase.²⁴ La cantidad de información que pueden almacenar es mucho mayor a la de los hologramas de superficie; pueden ser usados como colimadores ópticos, como monocromadores, pues actúan como filtros de coherencia que seleccionan sólo la componente monocromática coherente del haz incidente.²⁵

Una característica importante de los hologramas de volumen es la interdependencia (vía la ley de Bragg, $2d \sin \theta = m\lambda$) entre la longitud de onda y el ángulo de dispersión; esto significa que cada color es difractado en un ángulo distinto por el holograma.

Hologramas de transmisión y de reflexión

Lo que distingue a los hologramas de transmisión de los de reflexión es la manera en que pueden ser observados. Los primeros son visibles cuando la placa está entre la fuente de luz láser y el observador, de manera que la luz es transmitida a través de la placa. Los segundos son visibles cuando la luz se refleja en la placa (el observador y la fuente de luz se encuentran del mismo lado de la placa). Por otro lado, al exponer la placa, la manera en que se dispone el haz del objeto del haz de referencia determina qué tipo de holograma se obtendrá: en los hologramas de transmisión ambos haces, el de referencia y el del objeto, llegan a ésta por el mismo lado (véase Sección 1.2.3), mientras que para hacer un holograma de reflexión los dos haces deben llegar desde puntos opuestos de la placa.

En contraste a los hologramas de transmisión que sólo pueden ser vistos con luz láser, los hologramas de reflexión pueden ser vistos, en su mayoría, con luz natural y por eso son los más comunes; son utilizados en calcomanías, tarjetas de crédito, envolturas y otros artículos de la vida diaria. Es recomendable que estos hologramas sean gruesos para obtener un fuerte efecto de Bragg.

Los hologramas de reflexión necesitan de 10 a 100 veces más energía que los de transmisión para ser grabados. Esto se traduce en la necesidad de un sistema de mucha mayor estabilidad (véase Sección 1.2.1). La gran eficiencia de difracción de este tipo de hologramas puede aproximarse al 100%.

Hologramas de amplitud

En este caso, las rejillas difractoras están formadas por franjas de alta y baja absorción. Por ello estos hologramas también son conocidos como de absorción. Los hologramas de absorción modifican la amplitud de el rayo que incide para reconstruir el holograma (parte del rayo incidente es absorbido y otra parte es empleada en la reconstrucción). En general estos hologramas no son muy luminosos, ya que la mayoría afecta la amplitud al absorber luz. Su eficiencia llega a ser de 2 o 3 % para hologramas de transmisión y de 5 a 7% para los hologramas de reflexión. Para aumentar la eficiencia de difracción de

²⁴ Hecht, p.607.

²⁵ Soroko L.M. p. 37.

estos hologramas se busca transformar los elementos difractores opacos en elementos transparentes que no absorban luz, transformándolos en hologramas de fase.

Hologramas de fase

A diferencia de los hologramas de absorción, que registran los patrones de interferencia al oscurecerse la plata en las regiones de mayor intensidad, los hologramas de fase registran los patrones cambiando el índice de refracción del material. Estos materiales transparentes, modulan la fase del haz incidente sin absorber luz, por lo que la eficiencia para los hologramas tanto de transmisión y de reflexión llega a ser del 100%. Esto hace deseable transformar todos los hologramas en hologramas de fase. Las películas dicromatadas (compuestas de gelatina y dicromato de potasio) y los medios termoplásticos que reaccionan con el calor de la energía del haz incidente son un buen ejemplo de estos hologramas.²⁶

1.1.4 Reconstrucción del patrón de interferencia

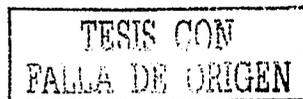
Para observar un holograma es necesario reconstruir el patrón de interferencia. Con este fin, se hace incidir luz en la placa en el mismo ángulo en que incidió el haz de referencia en el momento de la exposición, de manera que se transmita o refleje según sea el caso. En el caso de los de transmisión la luz debe ser láser, mientras que muchos hologramas de reflexión pueden ser vistos con luz blanca. Existen varios modelos que explican el proceso de reconstrucción del patrón de interferencia, entre ellos el modelo geométrico de Jeong y el modelo de zona de placa.

El modelo geométrico²⁷

Las franjas de interferencia grabadas en un holograma (Figura 1.1) son en realidad superficies hiperboidales. La Figura 1.5 representa una superficie de máxima intensidad creada por una interferencia constructiva que interseca una sección de la placa. Estas superficies pueden ser pensadas como superficies hiperbólicas parcialmente reflejantes, y toda la placa, como un conjunto de superficies moduladas por el grado de interferencia constructiva o destructiva.

²⁶ Kasper, p. 88

²⁷ Cf. Kasper, p 33-45



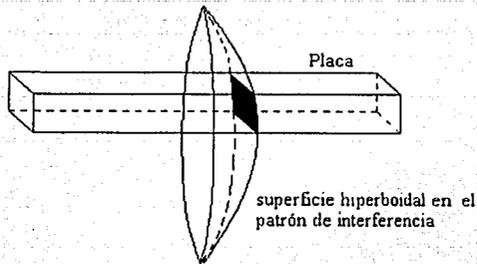


Figura 1.5 Parte de una de las superficies hiperbolicas en el patrón de interferencia. El segmento oscurecido representa la parte de la emulsión sensibilizada.

Al hacer incidir un rayo de luz sobre estas superficies en el ángulo apropiado, parte de este rayo se refleja parcialmente como se muestra en la Figura 1.6; de tal manera que los rayos parecen venir de la fuente virtual B. La otra parte del rayo se transmite; una parte tal vez será reflejada en la siguiente superficie, o absorbida por ésta.

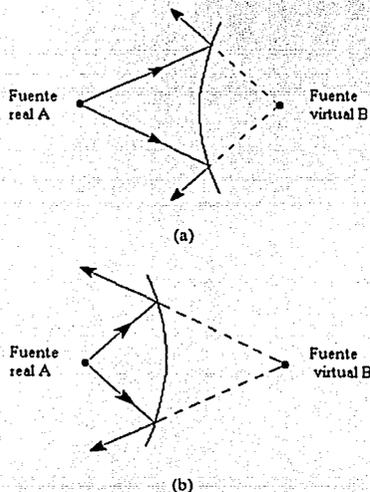
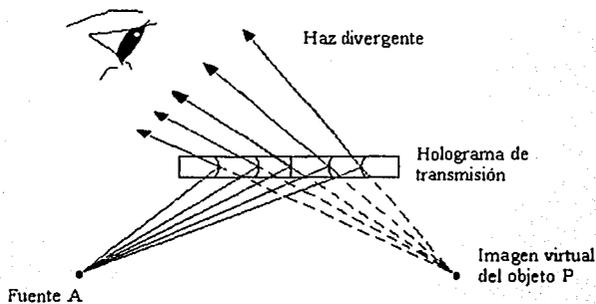
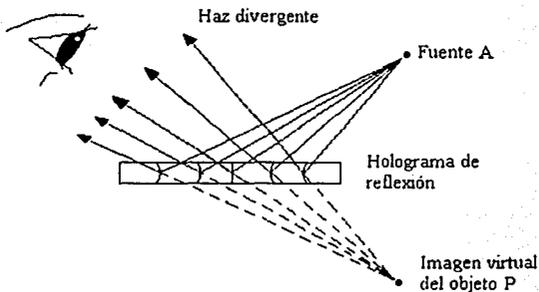


Figura 1.6 Los rayos provenientes de la fuente de luz A parecen venir de la fuente virtual B tras la reflexión. (a) superficie convexa. (b) superficie cóncava.

El holograma de un objeto contiene una colección muy complicada de estas superficies, cada una con un grado de reflexión o transmisión que modula la intensidad de la luz que llega al observador. Cada conjunto de franjas reproduce la imagen de un punto del objeto, de manera que la escena adquiere verdadera profundidad.



(a)



(b)

Figura 1.7 Visualización del holograma. (a) Holograma de transmisión. (b) Holograma de reflexión.

Al utilizar el modelo geométrico podría pensarse en las franjas como superficies continuas de espejos pulidos, pero esto sería tomar el modelo de manera literal, yendo demasiado lejos. Por un lado, las emulsiones fotográficas son granulares, lo cual impide que se formen superficies continuas. Por otro lado, los patrones de interferencia son tan complejos que ni siquiera observando microscópicamente una emulsión sin grano se podrían distinguir superficies continuas. Este hecho hace pensar como imposible el funcionamiento del modelo geométrico; sin embargo, si los "pedacitos de espejo" tienen suficiente organización, como de hecho sucede, varios conjuntos de espejos pueden funcionar como espejos continuos.

Modelo de zona de placa

Los hologramas tienen ciertas propiedades que el modelo geométrico no puede explicar, como la existencia de una imagen virtual y otra real. El modelo de placa, basado en la difracción de la luz, explica este fenómeno.

Al hacer interferir las ondas planas del haz de referencia con las ondas esféricas reflejadas por un punto en el objeto se crean patrones en forma de franjas circulares concéntricas o elípticas, dependiendo del ángulo entre los dos haces. A estos patrones de círculos —los cuales forman una rejilla difractora— se les llama *zona de placa de Fresnel*. A diferencia de la zona de placa de Fresnel, la zona de placa grabada en la placa fotográfica tiene un perfil *senoidal cuadrático* (Figura 1.8 b). A las zonas de placa con este perfil se les llama *zona de placa senoidal* o de Gabor. Un holograma consiste en una complicada colección de zonas de placa de Gabor, cada una correspondiente a un punto distinto del objeto.²⁸

Una zona de placa funciona como una lente que difracta un haz colimado, haciéndolo converger en un punto R al mismo tiempo que produce una onda divergente que parece provenir de un punto V, el cual constituye una imagen virtual.

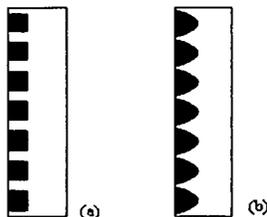


Figura 1.8 Perfiles de la zona de placa de transmisión de Fresnel y de Gabor. (a) La zona de placa clásica de Fresnel tiene cambios abruptos de cero a una transmitividad completa. (b) La zona de placa de Gabor tiene un perfil senoidal.

²⁸ Kasper J.E., p.121-123

Al iluminar una zona de placa de Fresnel con una onda plana se produce una infinidad de imágenes virtuales y reales. La confusión de imágenes que esto conlleva, como puede suponerse, es contraproducente para la holografía. Por su parte, la zona de placa de Gabor tiene la propiedad de difractar solamente una imagen virtual (la cual aparece justamente donde se encontraba el objeto originalmente) y una real (Figura 1.9).

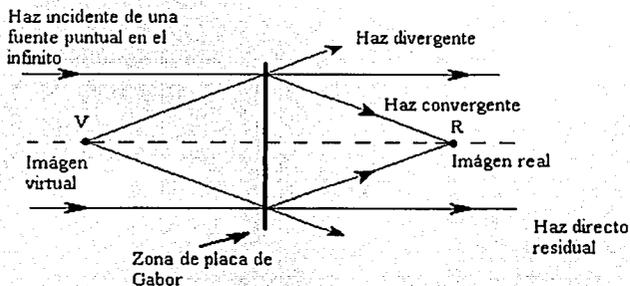


Figura 1.9 La zona de placa de Gabor produce una imagen real y otra virtual. (Modelo para hologramas de transmisión)

1.2 Elaboración de hologramas

1.2.1 Vibraciones

Para hacer un holograma es fundamental aislar el dispositivo (el láser, las lentes, el objeto, la placa...), de manera que el patrón de interferencia no vibre mientras se expone la película. La distancia entre las líneas del patrón de interferencia de un holograma es menor a una micra, y cualquier vibración hace que estas líneas se muevan, destruyendo así la información.

Un factor resulta determinante para exponer correctamente una placa: el tiempo que la luz láser incide sobre la película. Este tiempo depende de la clase de película que se utilice, la intensidad del láser, la amplitud del haz y el tipo de holograma que se desea realizar; los tiempos de exposición pueden variar de un segundo a varios minutos. Ahora bien, el exponer la placa durante un periodo de tiempo prolongado implica un riesgo mayor de que el dispositivo vibre y el holograma se destruya. Con una mesa holográfica especializada, con colchones de aire que elevan su superficie, el factor tiempo deja de ser un impedimento y la duración de la exposición depende únicamente del resultado que se desee obtener.

Es posible observar si existen vibraciones en la mesa y cuánto tiempo tardan en dispersarse mediante un interferómetro. A este tiempo se le llama tiempo de relajación. Además de medir el tiempo de relajación de la mesa, el interferómetro también permite saber qué tipos de vibración afectan al dispositivo, como lo es hablar, caminar, etc.

El interferómetro mejor conocido e históricamente más importante es el de Michelson, un interferómetro de espejos de división de amplitud. La Figura 1.10 representa un interferómetro tipo Michelson visto desde arriba. La luz láser viaja hacia un divisor de haz O , colocado a 45° , que la divide en dos. Uno de los haces sigue de frente, mientras el otro viaja hacia un lado. Los dos haces son reflejados por los espejos E_1 y E_2 y enviados de regreso al divisor de haz, el cual los redirige a través de un lente L hacia la pantalla P , donde es posible observar la interferencia. Los espejos deben ser colocados de manera que los caminos ópticos de los dos haces sean iguales. En la pantalla, el patrón de interferencia se observa como un círculo con franjas oscuras y brillantes, las cuales se mueven o desaparecen cuando vibra la mesa sobre la cual está colocado el interferómetro.

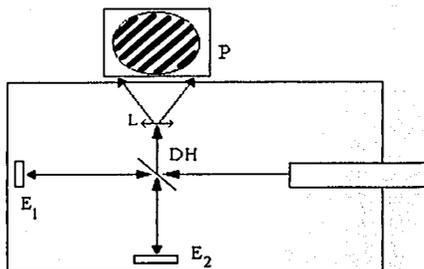


Figura 1.10 Un interferómetro de Michelson es utilizado para medir el tiempo de relajación de la mesa antivibraciones. En la pantalla se observan las franjas de interferencia producidas por los dos haces.

1.2.2 Reveladores y blanqueadores

Cuando se revela una emulsión fotográfica hecha con haluros de plata, todos los cristales que contenían la imagen latente son convertidos en granos de plata opacos que reproducen el patrón de interferencia producido por el haz del objeto y el haz de referencia. Los agentes de revelado son virtuales "dadores de electrones" que dan sus electrones a los granos de bromuro de plata. Si los granos llevan átomos de plata (formados por la acción de la luz) que forman la imagen latente, estos actúan como "catalizadores" y atraen electrones con mucha más facilidad que las partículas sensibles de los granos no expuestos. Al acumularse los electrones, la carga negativa formada atrae los iones plata del interior del cristal para formar átomos de plata metálica negra.²⁹

Mediante un proceso de blanqueo, es posible rehalogenizar la plata metálica por un proceso de oxidación producido por algún agente como el ferrocianuro de potasio. Con esto, la plata reacciona con el bromuro y vuelve a convertirse en haluro de plata con un alto índice de refracción. Esto hace que se reduzca la cantidad de luz absorbida, obteniendo así una considerable mejoría en la eficiencia de difracción. El proceso de revelado (reducción) se lleva a cabo en una solución alcalina, mientras que el de blanqueo (oxidación) sólo puede realizarse en un ambiente ácido.

La conversión de hologramas de amplitud grabados en materiales de haluros de plata en hologramas de fase fue realizada por primera vez por Rogers y Denisyuk. En los años setenta una gran cantidad de investigaciones se dirigió a la búsqueda de procesos de blanqueo capaces de producir una alta eficiencia en la difracción en imágenes con poco ruido.

²⁹ Langford, Michael J., Tratado de Fotografía, Ediciones Omega, S.A., España 1972, p.192.

El blanqueo constituye la única manera de producir hologramas con una alta eficiencia de difracción en las películas hechas a base de haluros de plata. Al blanquear las franjas de interferencia grabadas en la emulsión, la luz utilizada para reconstruir la imagen es modulada por un retraso en el frente de onda, en lugar de ser atenuada como en el caso de los hologramas de amplitud. Teóricamente esto se traduce en un aumento de la eficiencia de difracción de hasta 100%. El retraso en el frente de onda es causado por variaciones en el índice de refracción o por variaciones locales en el grosor de la emulsión.³⁰

Existen varios blanqueadores basados en distintos oxidantes como lo son el ácido sulfúrico, el ferrocianuro de potasio y el cloruro de mercurio. Este último, muy tóxico, promete excelentes resultados para los hologramas de reflexión, pero no fue utilizado debido a su alta peligrosidad.³¹

³⁰ Olsen, K. E., Holographic multi-stereogram constructed from computer images: Applied 3-D printer
Cand.scient. thesis in Optics and Laser physics, Department of Physics, UoB, May 1996

³¹ Dr. Tung H. Jeong & C. Harry Knowles, pp.41-42

1.2.3 Configuraciones

Existen muchas maneras para hacer llegar a la película los haces de luz que van a interferir. Incluso es posible hacer llegar más de dos haces. La forma en que éstos inciden sobre la placa determina el tipo de holograma resultante. Por ejemplo, si el haz de referencia llega de un lado de la placa y el haz del objeto del otro, resultará un holograma de reflexión; por el contrario, si ambos haces provienen del mismo lado de la placa, el holograma será de transmisión. Asimismo, el ángulo en que los haces inciden en la placa determina el ángulo en que el holograma podrá ser visto. A la manera en que se disponen el láser, el objeto, los lentes, espejos y divisores para lograr cierto efecto se le llama *configuración*.

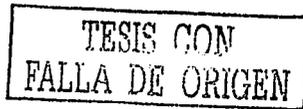
Simbología

	-----	laser
	-----	espejo (E)
	-----	bandera
	-----	objeto
	-----	lente
	-----	placa
	-----	divisor de haz. (DH)
	-----	cúpula

Para mostrar cómo la configuración afecta las propiedades de difracción del holograma, consideremos la interferencia de una onda esférica derivada de una fuente puntual S a una distancia finita de la placa con la de una onda plana. La fuente S es un objeto puntual y la onda esférica es el haz del objeto. (Objetos más complicados pueden ser vistos como un conjunto de muchos objetos puntuales, cuyos haces interactúan con el haz de referencia, pero sus interacciones mutuas pueden ser despreciadas por el momento). La Figura 1.11 muestra la sección transversal de la familia de las superficies parabólicas de máxima intensidad resultantes de la interferencia entre el haz de referencia y el haz del objeto S . En cualquier pequeña porción de esta interferencia, el espaciado entre las superficies de máxima intensidad satisfacen la ecuación:

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

(1.4)



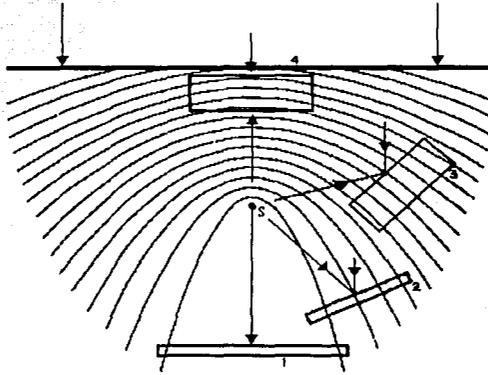


Figura 1.11 Una onda esférica de una fuente puntual S interfiere con una onda plana que viaja de arriba abajo. Las distintas posiciones posibles de la placa holográfica definen el tipo de holograma que se obtiene. (1) Holograma en línea de Gabor. (2) Holograma fuera de eje. (3) Holograma de Efecto Bragg. (4) Holograma de Denyskyk u Holograma de luz blanca.

Los rectángulos 1, 2, 3 y 4 representan las posibles posiciones de la placa holográfica. Sin la ayuda de un láser, Gabor (1948) realizó sus hologramas en la posición 1. En esta posición la dirección de ambos haces es colineal y los hologramas formados pueden ser llamados *hologramas en línea*. Un objeto colocado en el punto S puede producir la deseada onda esférica al dispersar la onda plana. El resto del haz no dispersado funciona como haz de referencia. Para las ondas que interfieren de esta manera, la posición 1 minimiza la diferencia en los caminos ópticos de ambos haces, maximizando el resultado de la luz de baja coherencia utilizada por Gabor. El espaciamiento relativamente grande entre las franjas de interferencia disminuye los requerimientos de la capacidad de resolución del medio fotosensible.

En 1962 Leith y Upatnieks formaron lo que se conoce como *hologramas fuera de eje* con una configuración que coloca a la placa en la posición 2. Ya que utilizaban luz láser, podían tolerar mayores diferencias en la longitud de los caminos ópticos. Esta configuración resolvió los problemas asociados con la holografía en línea como lo es la utilización de objetos no traslúcidos y de mayor tamaño, además de que la utilización de la luz láser permitió la reconstrucción de imágenes 3D. Posiblemente este último resultado de Leith y Upatnieks es el que más haya contribuido a la revitalización de la holografía. En la posición 2, la dirección principal del haz del objeto hace un ángulo menor a 90° con la dirección del haz de referencia. Si comparamos el grosor de la placa con el espaciamiento entre las franjas de interferencia, éste resulta pequeño, por lo que el

holograma formado en esta posición actúa como una rejilla de difracción plana. Al recomponer el holograma, el haz incidente se encontrará con solamente una franja antes de pasar a través de la placa, por lo que el grabado del patrón de interferencia ocurre en la superficie de la placa. Esto también es cierto para los hologramas en línea de Gabor.

Para los hologramas formados en la posición 3, el ángulo entre la dirección principal del haz del objeto y el haz de referencia es apenas mayor a 90° , y el espaciamiento entre las franjas de interferencia es menor según la ecuación (1.4). Suponiendo que el grosor C de la película sea mayor al espaciamiento entre las franjas, el grabado debe considerarse como una rejilla de difracción de volumen. En 1963, Van Hereden describió las propiedades de difracción de los hologramas de volumen como una serie de planos parcialmente reflejantes que responden selectivamente a la luz incidente según la ley de Bragg. Los hologramas formados en la posición 3 son llamados *Hologramas de efecto Bragg*. En 1965 Pennington y Lin utilizaron las propiedades de la difracción de Bragg selectiva para superar los problemas de modulación de color y formaron la primera imagen holográfica multicolor.

En la posición 4, donde la placa holográfica recibe la onda plana por un lado y la onda esférica por el otro, la separación entre las franjas de interferencia es casi $\lambda/2$, y las franjas se aproximan a ser planos paralelos a la superficie de la placa. Denisyuk fue el primero en describir, en 1962, los hologramas con esta configuración. El grabado de los patrones de interferencia en emulsiones de haluros de plata resulta en un conjunto muy unido de superficies de plata parcialmente reflejantes. Incluso para placas con un grosor de entre $12\text{-}15\mu\text{m}$ se pueden encontrar unos 50 a 100 planos. Ya que los planos son similares a los formados con los métodos de fotografía a color de Lippmann y ya que difractan la luz según la ley de Bragg, estos hologramas de reflexión son llamados *Hologramas de Lippmann-Bragg*, aunque también se les conoce como *Hologramas tipo Denisyuk*. En 1966 Stroke y Labeyrie demostraron que, como filtros de longitud de onda, son suficientemente selectivos como para permitir la reconstrucción con luz blanca, lo que ha llevado al término de *hologramas de luz blanca*.³²

En la práctica, hay configuraciones que dan mejores resultados que otras según lo que se deseen obtener. A continuación se describen solamente las más básicas, ya que con un poco de creatividad es posible idear cualquier combinación.

³² Collier, Burckhardt, y Lin, pp. .

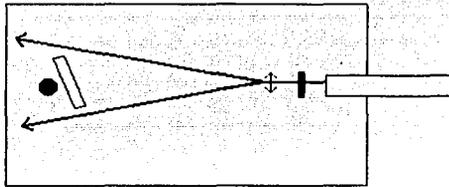


Figura 1.12 Configuración para holograma de reflexión simple

La configuración para holograma de reflexión simple es la más sencilla de todas, ya que sólo requiere de un haz de luz, el cual ilumina primero la placa y, luego de atravesarla, el objeto. La luz que llega al objeto se refleja nuevamente hacia la placa e interfiere con el haz de referencia. Para ello se requiere que el objeto esté prácticamente pegado a la placa, de manera que la diferencia entre los caminos ópticos recorridos no sea mayor a un par de centímetros. Es recomendable que el haz llegue ligeramente inclinado a la placa, con el fin de facilitar la observación del holograma. Esta configuración da como resultado un holograma de luz blanca.

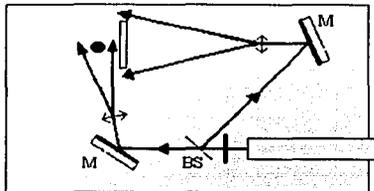


Figura 1.13 Configuración para holograma de reflexión de dos haces

En la configuración para holograma de reflexión de dos haces, que cuenta con un divisor de haz y un juego de espejos (Figura 1.13), el objeto es iluminado de frente y de un lado, por lo tanto, la imagen adquiere mayor volumen y profundidad. No es necesario que el objeto esté tan cerca de la placa como en la configuración anterior.

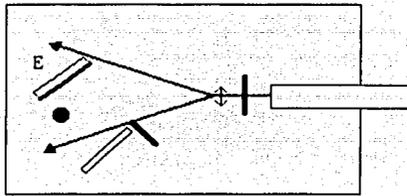


Figura 1.14 Configuración para holograma de transmisión simple

En la Figura 1.14 la luz del láser es reflejada así en el espejo como en el objeto, de tal modo que ambos haces (el de referencia y el del objeto) llegan a la placa de un mismo lado de la misma; esto da como resultado un holograma de transmisión simple tipo Gabor. Si el objeto es traslúcido puede colocarse al centro del espejo, ya que no hará sombra sobre la placa. Aquí el objeto debe estar lo más cerca posible del espejo y no ser demasiado grande. Los hologramas de transmisión simples con objetos pequeños son fáciles de lograr, ya que la diferencia en los caminos recorridos es mínima; sin embargo, si se desea un holograma con mayor profundidad u holografar objetos más grandes es recomendable emplear una configuración de haces múltiples.

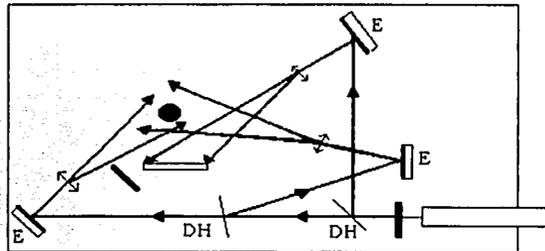


Figura 1.15 Configuración para hologramas de transmisión de múltiples haces

Los hologramas de transmisión de dos o más haces son los de mayor profundidad y volumen, como resultado de que el objeto sea iluminado desde distintos ángulos. Es importante que los caminos ópticos de los todos los haces sean iguales, ya que de lo contrario puede ocurrir interferencia destructiva. Cabe señalar que, al dividir el haz, la intensidad de la luz disminuye y el tiempo de exposición aumenta. La Figura 1.15

muestra una configuración de tres haces con dos divisores de haz, donde el objeto es iluminado por ambos lados. Esta configuración dará como resultado un holograma fuera de eje.

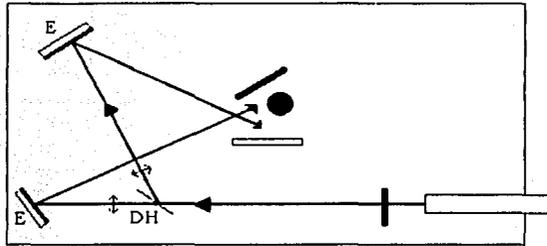


Figura 1.16 Configuración para holograma de transmisión de dos haces

La Figura 1.16 muestra la configuración de dos haces que se utilizó regularmente en este trabajo. Aunque el objeto es iluminado solamente en una de sus caras, con esta configuración se logró una vista frontal del objeto, gran volumen y profundidad ya que el ángulo entre los haces es mayor a 90° , dando como resultado un holograma de efecto Bragg.

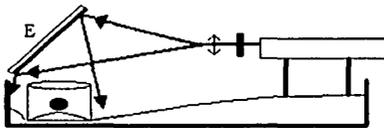


Figura 1.17 Configuración para hologramas cilíndricos

Para lograr un holograma cilíndrico es necesario colocar el objeto sobre un espejo convexo dentro de un envase, sobre cuya superficie lateral es colocada la placa (Figura 1.17). Éste es un holograma de transmisión, ya que el haz de referencia y el haz del objeto provienen del mismo lado de la placa. Es una de las configuraciones más peculiares, ya que crea una imagen de 360° . Al observar el holograma a través de las paredes del envase, pareciera que el objeto se encuentra encerrado en el interior.

Capítulo II Películas delgadas

2.1 Películas Delgadas

Las primeras investigaciones sobre películas delgadas de las que se tiene registro **datan** del siglo XVII; publicadas, junto con una gran variedad de experimentos, en el libro *Opticks* de Sir Isaac Newton. Aunque los mecanismos de propagación de la luz en los tiempos de Newton eran inciertos, las observaciones hechas sentaron las bases de ciertos métodos para medir el grosor de dichas películas.

Una película delgada es un recubrimiento de grosor milimétrico o menor de cierta sustancia que se deposita sobre un sustrato, ya sea de vidrio o de otro material. Si se desea elaborar una película delgada para grabar hologramas, es de suma importancia poder controlar tanto las propiedades de la emulsión como las características de la película como lo es su grosor. Existen distintos métodos para formar películas delgadas con los cuales se pueden regular estas características en mayor o menor grado. Ejemplos de esto son el método de recubrimiento por inmersión (*dip coating*), el de recubrimiento por gravedad (*vail coating*), el de recubrimiento por centrifugado (*spin coating*), etc.

El uso de las películas dicromatadas en fotografía se remonta a finales del siglo XIX. Alphonse-Louis Poitevin descubrió, en 1855, la propiedad que tienen algunas gomas naturales o sintéticas de endurecerse por acción de la luz en presencia de dicromato amónico o potásico. El año siguiente éste descubrimiento aplicado por John Pouncy, quien obtuvo las primeras imágenes; sin embargo este proceso no alcanzó reconocimiento hasta el fin de siglo.³³

La combinación de materiales fotosensibles a la luz ultravioleta, como el dicromato de amonio y el cromato de potasio, con la goma arábiga o la gelatina dicron como resultado una emulsión eficiente y de bajo costo que involucraba un proceso de revelado sencillo a base de lavados de agua. No es de extrañarse que tras el invento del rayo laser en 1960 y la posibilidad real de hacer hologramas ópticos, se iniciara la búsqueda de materiales fotosensibles capaces de registrar patrones de interferencia y que entre estos materiales se encontraran las películas dicromatadas. La ausencia de grano, o superficie tersa que presentan estas películas permite distinguir líneas con una separación de hasta 0.5 micras, suficiente para reproducir patrones de interferencia. Sin embargo el uso de estas películas estaba limitado a longitudes de onda menores a los 520 nm y en el ultravioleta. Otros tipos de emulsiones holográficas también han sido desarrolladas, a saber: las emulsiones a base de haluros de plata, las fotoresistivas, los fotopolímeros, los materiales fototérmicos, los fototermoplásticos, los fotocromáticos y

³³ Fontcuberta Joan, Fotografía: Conceptos y Procedimientos, una propuesta metodológica, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1990, p. 52.

los cristales fotorefractivos;³⁴ cada uno con sus ventajas y desventajas según la clase de holograma y el uso que se le quiera dar a éste.

En particular, los dicromatos se presentan como un material ideal para hologramas de fase. Tienen una alta resolución, poco ruido y absorción, y una alta capacidad de modulación del índice refractivo. Sin embargo, la dificultad para obtener resultados reproducibles, la baja sensibilidad de la película y el intervalo limitado de longitudes de onda al que reacciona se presentan como una gran desventaja. Se han hecho diversos estudios buscando eliminar o disminuir dichas desventajas. La sensibilización al rojo fue estudiada en sus inicios por Graube utilizando violeta ácida en 1973.³⁵ El interés por este color, en específico los 633nm, se debe al láser de Helio-Neón, el cual emite en esta longitud de onda y es de los más comunes, seguros, fáciles de operar, de larga vida, económicos y accesibles hoy en día. Así, el azul de metileno fue estudiado por Akagi en 1974,³⁶ y por T. Kubota, T. Ose, M. Sasaki y K. Honda en 1976.³⁷ Desde entonces el azul de metileno ha seguido siendo utilizado como sensibilizador al rojo para los dicromatos. Uno de los últimos reportes que se tienen sobre la técnica para aplicarlo fue hecho por Jeff Blyth³⁸ en 1991, la cual sigue siendo, actualmente, la más popular entre los holografos. Blyth logró superar inconvenientes que presentaba la utilización de este colorante como su precipitación en soluciones ácidas, agregando la amina tetrametilguanidina como donador de electrones. Aun así la receta de Blyth tiene sus desventajas: sugiere un método para emulsionar bastante rupestre que resulta en una película irregular en espesor y superficie; la emulsión resultante es sensible a las condiciones de humedad y temperatura, lo que la vuelve inestable. El tiempo de vida de los dicromatos depende en gran medida de que tan bien aislados de la humedad sean mantenidos.

³⁴ cfr., P. Hariharan, "Holographic recording materials: recent developments" en *Optical engineering*, vol 19, No. 5, oct. 1980

³⁵ A. Graube, *Opt. Commun.* 8, 251, 1973. Cit. por T. Kubota, p.556

³⁶ M. Akagi, *Photographic Science Engineering* 18, 248, 1974. Cit. por Kubota, p.556

³⁷ T. Kubota, Hologram formation with red light in methylene blue sensitized dichromated gelatin, *Applied Optics*, Vol. 15, No. 2, 1976

³⁸ J. Blyth, *Methylene blue sensitized dichromated gelatin Holograms: a new electron donor for their improved photosensitivity*. *Applied Optics*, Vol. 30, No. 13, 1991

2.1.1 La emulsión

La obtención de una emulsión dicromatada efectiva para esta tesis se inició de manera un tanto empírica, mezclando los químicos utilizados para hacer fotografías dicromatadas como el dicromato de amonio y la gelatina, y jugando con las proporciones. El proceso que llevó de mezclar químicos al tanteo a encontrar las proporciones correctas, el pH indicado, las condiciones de humedad, secado, etc. fue de más de 8 meses. El punto clave para llegar a un resultado satisfactorio se dio cuando un hológrafo danés Ton Sijm proporcionó un artículo por correo electrónico, respondiendo a algunas preguntas que se habían colocado en un foro virtual de holografía. Dicho artículo era la receta de Jeff Blyth para la elaboración de dicromatos.

Los dos componentes básicos de la emulsión dicromatada son la gelatina (que actúa como base o soporte) y el cromato de potasio (el elemento fotosensible). Sin embargo, ya que el dicromato de potasio solamente es sensible a la luz ultravioleta, la utilización de un colorante que absorba en el visible es imprescindible para este experimento y justamente es el elemento a estudiar. El proceso fotosensible de la emulsión es descrito en la Sección 2.4.1

2.1.2 La gelatina y el tamaño de grano

La gelatina es una sustancia compuesta por docenas de aminoácidos ordenados en largas cadenas polipeptídicas. Se extrae de los huesos o tendones del ganado vacuno o porcino y varía apreciablemente según los lotes. Se ha visto que la gelatina es de considerable importancia en la sensibilidad de las emulsiones y que las gelatinas de diferentes procedencias (o incluso de las de distintos lotes de la misma procedencia) tienen propiedades fotográficas bien diferenciadas. Estas diferencias se deben a la presencia de sensibilizadores en proporciones variables (de 1/200 000 a 1/1 000 000), entre los que se cuentan los tiosulfatos y otras sales tío, la tiosamina (aliltiúrea) y el aceite de mostaza (alilisotiocianato).³⁹

Pura y seca, la gelatina es transparente e incolora; se hincha y reblandece en agua fría, en la cual es escasamente soluble; pero se disuelve fácilmente a 46° C. No la disuelven el alcohol ni el éter; y se precipita por el primero en una disolución acuosa. Se ca se conserva indefinidamente sin alteración alguna; pero húmeda se descompone, se vuelve ácida y pierde sus propiedades gelatinosas, produciendo el mismo efecto la ebullición prolongada.⁴⁰ En las películas fotográficas se le trata para resistir el fuego y la humedad, evitando que se suavice y sea atacada por microorganismos.

La gelatina, en la película delgada, se presenta como una superficie tersa, sin grano, lo cual es una enorme ventaja para grabar patrones de interferencia, cuyas líneas están separadas por décimas de micras. El grado de dureza de la gelatina juega un papel

³⁹ Clerc J.R., *Fotografía, teoría y práctica*, Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 1975, p. 317-318.

⁴⁰ Towler J. *El Rayo Solar tratado teórico y Práctico de Fotografía*, NY, D. Appleton y Cia, 1890 p. 174 - 175.

clave al determinar la claridad del gel tras una rápida deshidratación. El proceso de endurecimiento comprende los siguientes pasos: 1) Se le calienta (o cocina) en presencia de vapor de agua; 2) Se produce una reacción en la oscuridad con los iones crómicos; 3) Se expone a la luz, la cual grabará el patrón de interferencia. 4) Se somete a baños de alcohol, los cuales fijan el patrón. 5) Se realiza un secado rápido con aire caliente. 6) Se deja un periodo prolongado de tiempo dentro de un desecador (2 a 3 días) ó en un horno a un máximo de 120°C por varios minutos.

2.1.3 El cromato de potasio y la sensibilidad al ultravioleta

Aunque inicialmente se trabajó con dicromato de amonio, se han encontrado complicaciones producidas por la presencia de amonio libre liberado por éste en soluciones alcalinas. El amonio se evapora de la película cuando ésta se seca, dejándola muy ácida y desprovista de colorante activo. Como se verá más adelante, los colorantes necesitan de una solución alcalina con pH de 9.2 para no precipitarse y mantenerse activos. Por lo tanto se utilizó el cromato de potasio, una sal más alcalina.

El cromato de potasio (CrO_4K_2) —sensible a la luz ultravioleta— es el elemento fotosensible en nuestra emulsión. Son cristales amarillos, que generalmente se utilizan para la obtención de tintes. La proporción utilizada de cromato de potasio es mucho más baja que la de las formulaciones convencionales con dicromato de amonio, y aumentar la cantidad significativamente no da ningún beneficio ni aumenta la sensibilidad de la película.

Hacer un holograma con luz ultravioleta, aunque perfectamente factible, resulta en cierto sentido menos comercial. Obtener una película sensible al rojo nos da el beneficio de poder utilizar un láser rojo de HeNe, que como ya se indicó, es de los más comunes y menos costosos. Para ello se agrega un colorante que corre la sensibilidad de la película a otra longitud de onda. Este punto será explicado con detalle más adelante.

2.2 Absorción Óptica

Para saber en qué longitud de onda está absorbiendo la película se empleó la técnica de absorción óptica utilizando un espectrofotómetro, el cual cuenta con dos lámparas que emiten radiación electromagnética dentro de una región seleccionada del espectro (en este caso de los 300nm a los 680nm) y detecta la luz que atraviesa la muestra a estudiar, infiriendo así las longitudes de onda que son absorbidas por ella. El espectro de absorción es la región del espectro electromagnético que resulta absorbida. Un esquema del modo en que opera un espectrofotómetro aparece en la figura 2.1

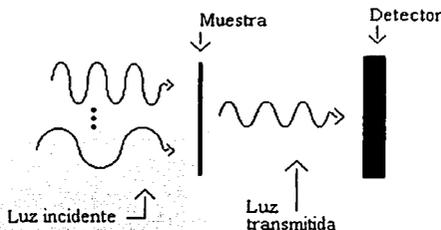


Figura 2.1 Un espectrofotómetro detecta la radiación electromagnética que atraviesa una muestra, infiriendo así las longitudes de onda que son absorbidas por ésta.

Un espectro de absorción se presenta usualmente como una gráfica de *densidad óptica* (O.D., también mal llamada *absorbancia*) vs *longitud de onda de la iluminación*. La densidad óptica es un parámetro cuyo significado puede aclararse al considerar el siguiente modelo para la absorción: supóngase que una muestra de cierto material es iluminada con luz que tiene una intensidad I_0 . Parte de la luz es reflejada y parte transmitida a través de la muestra. La intensidad de cualquier onda electromagnética incidente en un medio sigue la ley de Bouguer-Lambert-Beer⁴¹, donde el haz transmitido por la muestra disminuye con la distancia d debido a la absorción, de la siguiente manera:

$$I = I_0 e^{-\alpha(\lambda) d} \quad (2.1)$$

Donde $I_1 = I_0 (1 - R^2(\lambda))$ (con R el coeficiente de reflexión del material) es la intensidad que logra penetrar en la muestra, $\alpha(\lambda)$ es el coeficiente de absorción óptica que depende de la longitud de onda λ , I_0 que es la intensidad inicial del haz y d es el espesor de la muestra.

⁴¹ Cruz Vázquez D. Efecto de la orientación de DRI en la fotoconductividad de películas mesoestructuradas de SiO_2 . Tesis para obtener el título de Físico, Facultad de Ciencias, UNAM 2002

La razón entre la intensidad I_1 que penetra en el material y la intensidad I que se observa después de recorrida una distancia d es un parámetro que revela la cantidad de luz absorbida por el objeto iluminado. La densidad óptica ($O.D.$) es el logaritmo en base 10 de este cociente, utilizado por razones de escala. Puede entonces verse fácilmente que la densidad óptica está dada por

$$O.D. = \log_{10} [I_1 / I] = \alpha d \log_{10}(e) \quad (2.2)$$

La película en cuestión se encuentra depositada sobre un sustrato de vidrio, de tal manera que para determinar la densidad óptica de la película es necesario hacer una medición de referencia de un sustrato sin película.

En la Figura 2.2 aparece el espectro de absorción de una película con gelatina y cromato de potasio.

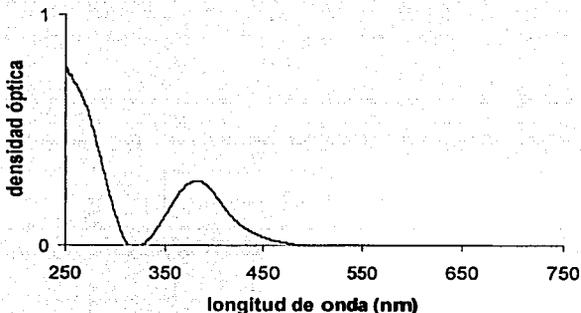


Figura 2.2 Absorción óptica del cromato de potasio

2.2.1 Los colorantes y el corrimiento de la longitud de onda

Al añadir un colorante a la emulsión, la longitud de onda en la que ésta absorbe luz cambia. Este corrimiento de la longitud de onda varía dependiendo del colorante. La posibilidad de extender la sensibilidad espectral al rojo en películas holográficas fue explorada inicialmente por Graube⁴², quien usó gelatina dicromatada sensibilizada con el colorante triifenilmetano. La elección del colorante está relacionada directamente con el

⁴² A. Graube, Opt. Commun. 8, 251, 1973. Cit. por Hariharan p. 638

láser que se deseé emplear y con el color final del holograma que se quiera obtener. Un holograma hecho con luz roja producirá una imagen amarilla o verdosa; un holograma hecho con luz verde, producirá una imagen azul. Uno esperaría que el holograma hecho con luz roja fuera rojo, sin embargo un encogimiento de la emulsión tras el proceso de revelado hace que las líneas de interferencia se acerquen más, reduciendo el índice de refracción.

2.2.2 El azul de metileno $C_{16}H_{18}ClN_3O_5S$

Se eligió el azul de metileno (MB) como primer colorante con el cual trabajar por la amplia bibliografía que existe respecto a su funcionamiento con los dicromatados desde los años setenta. En 1976, Kubota mostró que la gelatina puede ser sensibilizada al rojo de manera muy efectiva con azul de metileno en una solución dicromatada cuyo pH haya sido ajustado a 9 mediante una amina, ya que es insoluble (se precipita) cuando el pH es menor a 8.⁴³ El azul de metileno es actualmente el colorante más socorrido para hacer hologramas, además de que es accesible y económico.

El azul de metileno o cloruro de metiltionina es un colorante que se presenta en forma de cristales o polvo de color verde oscuro, con brillo bronceo. Su estructura cristalina es monoclinia y se encuentra bien caracterizada.⁴⁴ Es inodoro, estable en el aire, soluble en agua, alcohol y cloroformo. Las soluciones en agua presentan un color azul intenso. Se obtiene por oxidación de la para-aminodimetilanilina con cloruro férrico en presencia de ácido sulfúrico. Es moderadamente tóxico por ingestión. Se le utiliza para teñir el algodón y la lana, para coloraciones biológicas y bacteriológicas, como reactivo en titulaciones de oxidación-reducción en análisis volumétricos, en la medicina para detectar la presencia de bacterias y como indicador.⁴⁵ Su estructura molecular se muestra en la Figura 2.3.

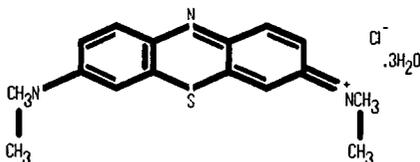


Figura 2.3 Estructura molecular del azul de metileno

⁴³ T. Kubota. Op Cit.

⁴⁴ International Centre for Diffraction, Powder Diffraction File, Sets 21 to 22, Organic Vol. PDIS-22oRB, Compiled by the JCPDS, USA, 1980, p81, reg. 21-1754.

⁴⁵ Gessner G. Hawley *Diccionario de Química y de Productos Químicos*, Ediciones Omega S.A., 1975

2.2.3 El cristal de violeta $C_{25}H_{30}N_3Cl$

Una parte importante de esta investigación es probar que con otros colorantes también es posible grabar hologramas. En este caso el cristal de violeta (CV), del que no se encontró registro alguno sobre su utilización para grabar hologramas, es sensible tanto al rojo, como al naranja y amarillo como se puede ver en la gráfica (3.6). En teoría el cristal de violeta es mucho más sensible que el azul de metileno.

El cristal de violeta (hexametil pararosanilina) o violeta de metilo es un derivado de la pararosanilina, un colorante del tipo trifenilometano. Se le llama también violeta de genciana (cristal de violeta y dextrosa) para designar el producto medicinal. Se le utiliza en la medicina como antialérgico y bactericida específico. Es también un indicador ácido-base, un desnaturalizante para el alcohol, un colorante para textiles y pigmento. Tiene una estructura cristalina, aunque esta, según los datos compilados por el JCPDS, no está caracterizada.⁴⁶ Es irritante y tóxico. Su estructura molecular se muestra en la Figura 2.4.

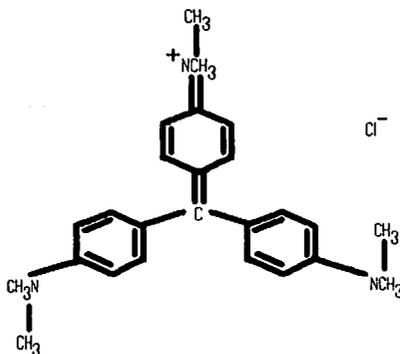


Figura 2.4 Estructura molecular del cristal de violeta.

De entre los muchos colorantes que se pudo haber elegido como la tianina o el verde malaquita, se eligió trabajar con el cristal de violeta por varias razones:

1. Es sensible al rojo al igual que el azul de metileno.

⁴⁶ International Centre for Diffraction Data, Vol. 2.1, JCPDS, USA 2000, reg. 05-0322

2. Genera radicales libres fácilmente.
3. Tiene una alta sensibilidad en el naranja (láser disponible en el laboratorio)
4. Estaba disponible en el laboratorio.
5. No existe registro alguno sobre su utilización para grabar hologramas

La tianina podría generar mejores resultados que el azul de metileno, aunque se necesita de un laser amarillo, ya que absorbe en esa longitud de onda. Sin embargo la tianina no es muy estable y parece decolorarse después de unas pocas horas.

2.3 La receta de Jeff Blyth

Jeff Blyth es reconocido internacionalmente por sus trabajos en holografía, entre otros. En 1991 publicó en la revista *Applied Optics* un estudio sobre las películas dicromatadas sensibilizadas con azul metileno y la receta para crear dichas películas.⁴⁷ Dicha receta sigue siendo hoy en día la más popular entre los hológrafos para crear dicromatos por su sencillez y efectividad. Siguiendo la receta de Blyth, que a continuación se describirá brevemente, y tomándola como base para hacer las demás emulsiones fue que se obtuvieron avances concretos en la investigación.

Solución A

0.4 mol de 1.1.3.3 tetrametilguanidina (TMG)
agregar 8.3 mol agua deionizada

Solución B

0.348 mol de la solución A
0.14 mol Ácido acético glacial (aproximadamente)
(agregar muy lentamente mientras se agita dentro de la campana del extractor, manteniendo el pH en 7)

Solución C

0.026 mol de cromato de potasio
agregar 5.3 mol de agua deionizada

Solución D

5.3×10^{-3} mol de azul de metileno
27.7 mol de agua deionizada

Estas cuatro soluciones son soluciones stock, esto hace que el preparar la emulsión en ocasiones posteriores sea muy sencillo y rápido.

Preparación de la emulsión

A 4.4 mol de agua deionizada a temperatura ambiente (18°-22° C) se le agregan 12 gr. de grenetina de vaca. Se calienta a baño maría hasta los 45°-50° C mientras se agita lentamente hasta que toda la gelatina esté disuelta. En este punto se puede observar como la emulsión dicromatada será básicamente gelatina, ya que la solución está completamente saturada.

⁴⁷ J. Blyth, *Methylene blue sensitized dichromated gelatin Holograms: a new electron donor for their improved photosensitivity*. *Applied Optics*, Vol. 30, No. 13, 1991

Manteniendo la temperatura entre los 40° y 45° C se agregan 0.09 mol de la solución B y 0.05 mol de la solución C. En este punto hay que mantener el pH entre los 9.0 y los 9.5 antes de agregar el azul metileno. Esto se logra agregando gotas de la solución A mientras se agita. Si el pH sube a más de 9.5 puede ser bajado con una gota de ácido acético.

Finalmente, bajo luz verde de seguridad se agregan 0.33 mol de la solución D. En este punto la emulsión está lista y se vierte dentro del recipiente de teflón para aplicar el método de dip coating. Todo el proceso, desde la limpieza de los sustratos, hasta el almacenamiento de las placas puede tomar hasta 8 horas de trabajo continuo. Una vez almacenadas las placas, es recomendable dejarlas reposar un mínimo de 24 horas antes de intentar hacer un holograma. Se hicieron pruebas con placas de hasta 2 semanas de viejas sin que se notase una diferencia notable en su eficiencia.

Después de tan sólo dos meses de trabajo con esta emulsión el ph-metro comenzó a quebrarse. Fue evidente que la tetrametilguanidina comenzó a corroer el plástico del aparato. Es importante hacer hincapié en las precauciones que se deben tomar al manejar estos químicos.

2.3.1 El proceso fotosensible

La imagen latente (los patrones de interferencia) de un holograma grabado en una gelatina dicromatada está dada como un diferencial en la dureza entre las partes altamente expuestas y las subexpuestas de la emulsión. Durante el proceso de revelado, donde la película es sumergida en agua, las partes altamente expuestas absorberán menos agua que las ligeramente expuestas. En este punto se tiene una amplificación dimensional del patrón de franjas original. Si fuera posible secar la película en este punto sin que cambiara de dimensiones, existiría una gran diferencia entre las densidades de las áreas claras y las oscuras, lo que se traduciría en un alto diferencial en la permitividad o índice de refracción a lo largo del medio, el cual permanece transparente. Ésta es la característica básica de un holograma de fase. Desafortunadamente, la tensión superficial del agua provoca que la estructura se colapse a un menor diferencial en el índice de refracción si se le seca a presión y temperatura ambiente.

El mecanismo de endurecimiento por la reacción fotoquímica entre el dicromato y la gelatina no ha sido explicada aún satisfactoriamente, sin embargo se cree que durante la exposición el cromo hexavalente Cr(VI) es directa o indirectamente fotoreducido al estado trivalente Cr(III). Esta unión endurece la gelatina creando un diferencial en la dureza que forma la imagen latente. Luego del proceso de revelado con agua, la cual retira los residuos químicos no expuestos, la película de gelatina se vuelve incolora e insensible a la luz.⁴⁸

El efecto de la absorción de luz roja por el azul de metileno es hacerlo una molécula excitada con una vida transitoria como un oxidante en busca electrones. Algunos tipos de aminas pueden proveer de electrones a las moléculas de MB fotoexcitadas vía la formación transitoria de un complejo de transferencia de carga que se cree que es producido durante el proceso. El azul de metileno (MB) obtiene entonces una forma incolora llamada azul leucometileno. Éste es un agente reductor reactivo capaz de regresar gradualmente a la forma coloreada del MB al reaccionar con el oxígeno del aire.

Una característica general en las aminas es que producen un rápido efecto de fotoblanqueo en el azul de metileno. Contienen un átomo de nitrógeno adherido a dos o tres grupos alcalinos y estos grupos tienen un efecto de donación inductiva de electrones al átomo de nitrógeno. La eficiencia de varias aminas como la TMED (N,N,N,N-tetrametilenediamina), la EDTA (etilenediamina tetraacética ácida) y la TEA (trietanolamina) ha sido probada por Kayser y Young, y por Changkakoti; sin embargo en un estudio comparativo hecho por Blyth, la de mayor eficiencia resultó ser la TMG (tetrametilguanidina) con un pH cercano a 13.⁴⁹

⁴⁸ Chang B. J., Dichromated gelatin holograms and their applications, Optical Engineering, Vol 19 No. 5, 1980

⁴⁹ Blyth J.

2.3.2 Proceso de revelado

Este consta de los siguientes pasos:

1. Baño de agua corriente por 30 minutos o 5 baños a 30°C
2. Baño de isopropanol, con menos de 10% de agua durante un minuto
3. Baño de isopropanol, con menos de 1% de agua durante un minuto con fuerte agitación
4. Secado rápido con aire caliente

Existen muchas contradicciones en la bibliografía respecto al proceso de revelado. Kubota sugiere, por ejemplo, un lavado en agua corriente a 23° C, seguido de un baño de agua a 43° C y baños de alcohol⁵⁰. La sugerencia de Jeff Blyth fue la más convincente: encontrar el punto crítico de temperatura para la emulsión en el cual la eficiencia de difracción es máxima y el nivel de ruido es significativamente bajo. Mientras más alta es la temperatura del agua mayor será el ruido de el holograma. Esto se logra haciendo pruebas de exposición y revelado, subiendo lentamente cada vez la temperatura del agua, hasta que en algún momento el holograma se vea lechoso, significando esto un alto nivel de ruido. La temperatura del agua adecuada también depende de el tiempo que tengan las placas. Las placas recién hechas requieren de una temperatura menor, cercana a los 26° C. En general, la temperatura aplicada fue de 30° C. Algunas otras fuentes sugieren calentar el alcohol, ya que las altas temperaturas permiten una mayor difusión del alcohol en el gel, donde se puede diluir rápidamente, desplazando al agua y dejando una diferencial substancial entre las franjas claras y las oscuras; sin embargo esto pareció innecesario.

Ya que la gelatina no endurecida es soluble en agua el primer baño en agua está destinado a reblandecer esta gelatina y liberar los elementos fotosensibles. Un baño prolongado de agua (30 min) limpia la emulsión de cualquier rastro de TMG, el cual es un fuerte humectante que puede jalar agua dentro del dicromato y arruinar el proceso del alcohol. Este segundo proceso está dirigido a secar la emulsión, ya que la gelatina no es soluble en alcohol.

⁵⁰ T. Kubota, p. 557

2.3.3 Secado y conservación de los dicromatos

Las placas ya expuestas y reveladas deben ser almacenadas en un desecador, aislándolas de toda humedad. Hariharan (1980) comenta en un artículo de Optical Engineering⁵¹ que altos niveles de humedad pueden provocar un drástico decaimiento en la eficiencia de difracción de un holograma. Es indispensable sellar los dicromatos para protegerlos del medio, ya que, además de que se pueden rayar fácilmente, invariablemente serían afectados por la humedad del ambiente; incluso la humedad de las manos los afecta, borrando el holograma, mas no destruyéndolo. Un holograma que ha sido afectado por la humedad, puede ser revelado nuevamente, recuperando así la información; sin embargo la imagen aparecerá corrida hacia el verde o azul por un mayor encogimiento de la gelatina, y por lo tanto de las franjas de interferencia. Esto provoca que las longitudes de onda menores sean refractadas por la gelatina.

Todos los dicromatos hechos desde los años sesenta que mantienen sus propiedades originales de difracción han sido guardados bajo condiciones de humedad menores al 90% RH o han sido encapsulados con vidrio. Algunos plásticos gruesos también han funcionado, aunque la mayoría de los recubrimientos y laminados más bien actúan como esponjas y luego como bombas ósmicas que llevan moléculas de agua a través de su superficie hasta la gelatina, la cual rápidamente la acepta. En ambientes extremos es indispensable hornear los dicromatos antes de encapsularlos para asegurarse de que la cantidad de moléculas de agua atrapada en la cápsula sea tan pequeña que nunca se convierta en una amenaza para la frágil estructura. La gelatina comienza a quemarse a unos 60° C, pero un rápido calentamiento puede evaporar el agua en el interior de la gelatina antes de que esta se degrade. Hornear a 120° C es lo recomendable. La gelatina y las franjas de interferencia normalmente sobreviven a rápidos calentamientos de hasta 230° C, donde comienzan a oscurecerse y carbonizarse. Este oscurecimiento puede deberse a la liberación de cromo en las uniones de la gelatina y su subsecuente reducción junto con algunas sales crómicas que nunca fueron completamente enjuagadas durante el proceso de revelado. Un revelado prolongado con agua corriente remueve la mayor parte de los residuos de los compuestos crómicos y reduce enormemente el amarillamiento producido por el calentamiento o la radiación ultravioleta. Al parecer el gel no es afectado por temperaturas bajas, y la cobertura de vidrio funciona a cualquier temperatura, suponiendo que el vidrio está perfectamente limpio.

⁵¹ Hariharan, p. 638

Capítulo III

Resultados y Conclusiones

3.1 Resultados

3.1.1 Elaboración de Hologramas

Para entender cabalmente qué es un holograma, lo mejor es ver y hacer uno. Para ello esta tesis dio sus primeros pasos gracias a un sistema básico de holografía que consta de un divisor de haz de luz, dos espejos, dos lentes de 6 mm, película holográfica, un holograma de muestra. Se habilitó un cuarto oscuro con luz de seguridad verde, ya que la película disponible no era sensible a esta longitud de onda —la intensidad de la luz debe estar por debajo de la necesaria para leer—. Además de las mencionadas, se utilizaron una lente de 3 mm y otra de 5 mm y dos objetivos de microscopio que funcionaron como filtros espaciales.

Los objetos a holografar fueron seleccionados según tres criterios: su alta capacidad de reflexión de la luz, su volumen y su tamaño reducido, el cual facilita la exposición y la observación de los hologramas. Un dado blanco, unos cubos de vidrio, un arete de brillantes y una olla metálica de juguete fueron los primeros modelos reproducidos exitosamente. Fue necesario construir una mesa antivibraciones y un soporte para las placas, y contar con los químicos apropiados para revelar las películas.

La mesa antivibraciones se construyó como se indica más adelante. Se trata de una caja llena de arena sostenida por dos cámaras de llanta.⁵² Una mesa de arena no es lo ideal para aislar el dispositivo de las vibraciones. Existen mesas holográficas más especializadas, con colchones de aire que elevan su superficie, aislándola de todo contacto con el medio. En la actualidad, el Instituto de Física cuenta con una de estas mesas; sin embargo, por razones ajenas al proyecto, no ha sido instalada y continúa, después de año y medio, empolvándose en una bodega. Por este motivo, el proyecto hubo de conformarse con la mesa de arena, lo cual, como se explicará a continuación, resultó en algunas limitantes.

El tiempo de relajación de la mesa de arena —medido con un interferómetro tipo Michelson (Fig. 1.11)— resultó de 10 segundos en promedio, y se notó que en este caso, caminar, hablar, rozar la arena o la mesa causaban tal vibración que las líneas de interferencia desaparecían; iniciada la exposición, no había más que cruzar los dedos y esperar que ningún investigador vecino azotara su puerta. Por este motivo, los hologramas de más de 30 segundos de exposición realizados en la mesa de arena resultaron insatisfactorios.

Durante seis meses el proyecto se limitó a la producción de hologramas, y a probar distintos reveladores, películas, configuraciones y láseres. En el primer intento se obtuvo la

⁵² Dr. Tung H. Jeong & C. Harry Knowles, *Holography using a Helium-Neon Laser*, Metrologic Instruments, Inc., 1991, p.31.

imagen de un dado. Sin embargo, la calidad del holograma dejó mucho que desear; para conseguir un holograma de alta calidad se precisó de un periodo mayor de tiempo. Este primer holograma de transmisión —el del dado— fue realizado con la película holográfica que se tenía, sin marca en el empaque, y requirió de un tiempo de exposición de 2 segundos. El resultado fue un holograma de amplitud, poco uniforme, no muy brillante y manchado. Los siguientes intentos mejoraron considerablemente. Los hologramas de transmisión fueron cada vez más brillantes y con mejor definición, sobre todo cuando se les blanqueó, transformándolos así en hologramas de fase. Los hologramas de reflexión, no obstante, arrojaron resultados poco satisfactorios, ya que requerían de un tiempo de exposición mayor, cercano a los 30 segundos.

Antes de seguir trabajando con hologramas de reflexión, la película disponible se terminó y fue necesario adquirir otra. Hoy en día, la película holográfica sólo se consigue en el extranjero, principalmente en Estados Unidos, Canadá, Rusia y el Reino Unido. Existen varias marcas: la rusa *Slavich*, la inglesa *Red Star Ultra* y la *BB-640*. *AGFA* y *Kodak* solían producir sus propias películas hasta hace algunos años.

Con base en los costos, la accesibilidad del proveedor y las recomendaciones de otros hológrafos, se optó por la película *Red Star Ultra*. Es una película de reciente aparición, aunque algunas fuentes dicen que es la misma que la rusa *Slavich*. Esta película, más gruesa que la inicial, requirió de tiempos de exposición más prolongados: de 20 segundos para hologramas de transmisión con configuraciones de uno y dos haces y de hasta un minuto para hologramas de reflexión. Ningún holograma de reflexión resultó suficientemente satisfactorio con ésta película, que precisa de un revelador distinto, el *pyrochrome*, cuyo proceso se detallará mas adelante.

En la figura 3.1 y 3.2 se muestra las fotografías de los hologramas de transmisión realizados con película *Red Star Ultra*. **Estas dos fotografías se obtuvieron del mismo holograma observado desde ángulos distintos.**



*Fig. 3.1 Dado 1
Sólo se observa el lado 4*



*Fig. 3.2 Dado 2.
Se observan los lados 4 y 6*

Proceso de revelado con *Dektol*

Para este trabajo, el primer revelador que se utilizó fue el *Dektol*, muy común en fotografía, poco riesgoso y de bajo costo, el cual se consigue en cualquier casa fotográfica. Aunque es de uso común, los hológrafos no lo recomiendan. El revelador está relacionado directamente con la calidad del holograma.

El proceso de revelado con *Dektol* es muy sencillo. Es prácticamente el mismo que el que se emplea para papel fotográfico. Los productos químicos que a continuación se mencionan se mezclan con agua destilada como se indica en las envolturas de los mismos; el blanqueador es la única solución que no se consigue comercialmente, por lo que debe ser preparada.

Se colocan 6 charolas, cada una con las siguientes soluciones y se introduce la placa ya expuesta el tiempo indicado:

1. *Dektol* 3 minutos o hasta que la película se haya oscurecido
2. Baño de paro 30 segundos
3. Agua 15 segundos
4. Blanqueador hasta que desaparezcan las partes negras
5. Agua corriente 5 minutos
6. *Foto Flo* 1 minuto
7. Secado

Aunque el *Dektol* es recomendable en un primer acercamiento a la producción de hologramas, la calidad de éstos puede ser mejorada utilizando reveladores más especializados como el *pyrochrome*.

Proceso de revelado con *pyrochrome*

El *pyrochrome* es un revelador muy recomendado entre la comunidad hológrafa, pero requiere de muchos cuidados, ya que es venenoso y cancerígeno.

Se preparan dos soluciones que, al ser mezcladas, se mantienen activas por unos 20 minutos.

Sol A

- 0.1189 mol Pyrogallol ($C_6H_6O_3$)
0.0145 mol Metol (4-metilaminofenol sulfato) ($C_{14}H_{20}N_2O_6S$)
55.5 mol Agua (H_2O)

Sol B

- 0.2830 mol Carbonato de sodio (CNa_2O)
0.1782 mol Hidróxido de potasio (KOH)
55.5 mol Agua (H_2O)

Proceso

Ya que el *pyrochorme* tiene una vida de 15 a 20 minutos luego de ser mezcladas las soluciones, y no es reutilizable como el *Dektol*, debe usarse lo menos posible. Lo más recomendable es poner 20 ml. de la solución A en un vaso de precipitado y 20 ml. de la solución B en otro; una vez expuesta la película se mezclan las dos soluciones en la primera charola, en la que se introduce la placa durante 4 minutos agitando suavemente para lograr un revelado uniforme.

El resto del proceso continúa de la misma manera que el proceso con *Dektol*:

- | | | |
|----|-----------------|--|
| 2. | Agua | 15 segundos |
| 3. | Baño de paro | 30 segundos |
| 4. | Agua | 15 segundos |
| 5. | Blanqueador | hasta que desaparezcan las partes negras |
| 6. | Agua corriente | 5 minutos |
| 7. | <i>Foto Flo</i> | 1 minuto |
| 8. | Secado | |

Se comprobó que el revelador *pyrochorme* produce hologramas de mayor intensidad y eficiencia de difracción, no así el revelador *Dektol*.

De entre los dos blanqueadores que se probaron, el elaborado a base de dicromato de potasio, bromuro de potasio y ácido sulfúrico resultó muy efectivo y de larga vida, y es el que continuó empleándose. Por el contrario, el primer blanqueador que se probó, utilizado comúnmente en fotografía para virar luego al sepia, a base de ferrocianuro de potasio y bromuro de potasio, no arrojó resultados satisfactorios.

3.1.2 Recubrimiento por inmersión

El método de recubrimiento por inmersión o *dip coating* consiste en sumergir un sustrato de vidrio dentro de un recipiente de teflón que contiene la emulsión, y extraerlo a una velocidad controlada. De dicha velocidad, de la temperatura y las propiedades de gelación de la emulsión depende el grosor de la película.

Limpieza del material

Es de suma importancia que el portaobjetos y el recipiente de teflón estén perfectamente limpios para evitar cualquier contaminación de la sustancia y asegurar una perfecta adherencia de la emulsión al portaobjetos. Un lavado común resulta por lo tanto insuficiente. La limpieza debe hacerse con un ácido diluido que corroe ligeramente la superficie, deshaciendo cualquier impureza.

Precauciones en la limpieza

Los ácidos aquí utilizados son sumamente corrosivos. Pueden causar severas quemaduras, perforar papel, tela y otros materiales; por lo tanto es muy importante tomar las debidas precauciones: utilizar bata, guantes, goggles y siempre pinzas. El ácido Fluorhídrico ataca el vidrio, así que se recomienda usar envases de plástico cuando sea utilizado. Por el contrario, el ácido sulfúrico debe guardarse en envases de vidrio. Los vapores de los ácidos también son venenosos, así que es importante manejarlos dentro de una campana con extractor que retire dichos vapores y utilizar una mascarilla.

Utilizar siempre agua destilada.

Preparación de los ácidos

Solución A:

0.115 mol ácido fluorhídrico (HF)
1.443 mol agua destilada (H₂O)

Solución B:

3.830 mol ácido sulfúrico (H₂SO₄)
1.734 mol peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

En un vaso de precipitados grande se vierte el ácido sulfúrico, agitando magnéticamente con una mosca. Se agrega poco a poco el peróxido de hidrógeno. En este punto hay que tener mucho cuidado y hacerlo muy lentamente, ya que la reacción es muy violenta, se producen burbujas y el vaso de precipitados se calienta.

Procedimiento para limpiar los sustratos

Utilizando unas pinzas de plástico, los porta objetos se introducen durante media hora en el HF, previamente preparado. Pasada esta media hora se saca cada uno de los sustratos y se limpian con agua destilada, utilizando para ello una pizeta. El agua contaminada se echa en un vaso más pequeño y el sustrato se deposita en el segundo vaso que contiene la solución B. Una vez colocados todos los sustratos en este segundo vaso, se introduce otra mosca y se agita la solución nuevamente durante media hora al mismo tiempo que se calienta el ácido a unos 70° C, cuidando que no vaporice.

Después de esperar a que se enfríen los sustratos se vuelven a enjuagar con el agua de la pizeta y se introducen en un tercer vaso de precipitados lleno de agua. Se hierven por otra media hora a la vez que se agita el agua con una mosca.

Finalmente se enjuagan otra vez con agua y se guardan en un vaso cerrado, limpio y con agua destilada.

Dispositivo y Proceso de Inmersión

El dispositivo utilizado para la elaboración de las películas delgadas por el método de *Dip Coating*, al cual llamaremos "Sistema posicionador del portaobjetos, para la elaboración de la película delgada, del Dr. García Macedo" o para abreviar: Dispositivo 1, es realmente simple. Consiste de un hilo, que pasa por un par de poleas, sujetado en un extremo de un flotador, y del otro del portaobjetos que se introducirá en el recipiente de teflón que contiene la sustancia deseada. (Figura 3.3). El flotador, colocado dentro de un vaso de precipitados, sube y baja a gusto según se llene el vaso de agua a través de una manguera conectada a una bomba.

Inicialmente se trabajó con la solución a temperatura ambiente, sin embargo ésta se gelaba muy rápido, así que fue necesario colocar el recipiente de teflón dentro de un baño maría a 45° C durante todo el procedimiento.

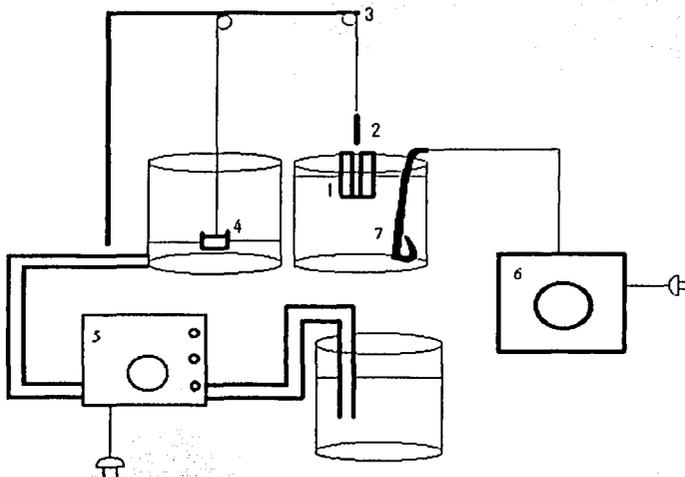


Figura 3.3 Dispositivo utilizado para emulsionar sustratos por Dip Coating. (1) recipiente de teflón, (2) portaobjetos, (3) poleas, (4) flotador, (5) bomba de agua, (6) variac, (7) baño maría.

El recipiente de teflón tiene una capacidad de 15 ml, y ya con el portaobjetos dentro de 13 ml. Su superficie de teflón es particularmente importante para el procedimiento, ya que impide que la sustancia se le adhiera y permite una fácil limpieza.

El primer vaso de precipitados tiene un orificio en su parte inferior, por el que se conecta una manguera, de manera que el agua, bombeada a pulsos, entra y salga por debajo del flotador, evitando así que este se llene de agua o roce con una manguera introducida por la parte superior.

Una vez que la temperatura del recipiente de teflón ha alcanzado el equilibrio en los 45° C se puede iniciar el proceso de inmersión. Se cubre una de la caras del sustrato limpio con una cinta adhesiva para impedir que ambas caras queden emulsionadas. Se sostiene el sustrato en el extremo del hilo y se enciende la bomba, haciendo bajar así el sustrato dentro del recipiente de teflón. Cuando el sustrato se ha sumergido casi por completo dentro de la solución se bombea en sentido contrario sustrayendo así el sustrato ya emulsionado del

recipiente. La velocidad de sustracción (en éste caso de 5 cm. por minuto) y la temperatura del baño maría (45° C) son claves para definir el grosor de la película que se desea formar. Mientras menor sea la temperatura y la velocidad, más gruesa será la película.

Ya que las películas dicromatadas son fotosensibles, es necesario prepararlas en condiciones muy bajas de luz. Se puede utilizar una luz de seguridad verde, en vista de que la película es menos sensible a esta longitud de onda. Así mismo deben ser almacenadas inmediatamente dentro de una caja oscura, evitando cualquier riesgo de que las películas se velen.

En las muestras emulsionadas con el método *vail coating*, sugerido por Jeff Blyth, se observó que los hologramas se formaban sólo en las orillas de la emulsión —donde ésta es más delgada— sugiriendo que una película más delgada proporcionaría mejores resultados.

Determinación del espesor de las películas delgadas

El espesor de las películas obtenidas con el método *dip coating* se determinó por medición óptica, empleando un Microscopio Electrónico de Barrido (JEOL, JSM, 5600 LV). La película fue colocada, de manera perpendicular, sobre cilindros de latón y fue pegada a éstos con cinta conductora, lo que favorece una conexión eléctrica para el bombardeo de electrones. Posteriormente se tomó una fotografía por electrones secundarios a una distancia de trabajo de 23mm., una aceleración de voltaje de 18 KV y un *spot size* de 33. La medición resultante, hecha de manera directa con el software del mismo equipo, presenta un espesor promedio de $18 \pm 3\mu\text{m}$. Este resultado es favorable para el experimento, ya que, como se explica en la Sección 1.2.3, una emulsión con un grosor mayor a los $15\mu\text{m}$. puede producir hologramas de volumen si se utiliza la configuración de Denisjuk.

La Figura 3.3 es una fotografía del canto de un sustrato y con ella se realizaron estas mediciones. Con un acercamiento de $\times 430$ se puede apreciar la estructura gelatinosa y aparentemente irregular de la emulsión. Al hacer estas mediciones se observó que la energía de los electrones directos provoca un cambio drástico en el espesor y estructura de la emulsión, por lo que medir por este método resultó inconveniente. Fue necesario recurrir a electrones secundarios para lograr un acercamiento suficiente. Aun así la película se deshinchó por factores de 10 y hasta 100 si la energía aplicada es muy alta y se vuelve a hinchar cuando ésta es retirada. Este efecto muestra el grado de sensibilidad que un dicromato puede tener.

Además de conocer el espesor de la película, se intentó fotografiar su estructura o grano. La Figura 3.4 es una fotografía de la superficie del sustrato, en la que no se observa ninguna estructura definida ni grano alguno. Se intentaron acercamientos mayores, sin embargo los altos niveles de energía provocan que la película se ilumine y se quemé. El hecho de no encontrar grano alguno en la película es consistente con la teoría que predice una superficie tersa en los dicromatos y, como consecuencia, una mayor resolución. Aún así, el hecho de no haber observado una estructura en la película no quiere decir que no la tenga.

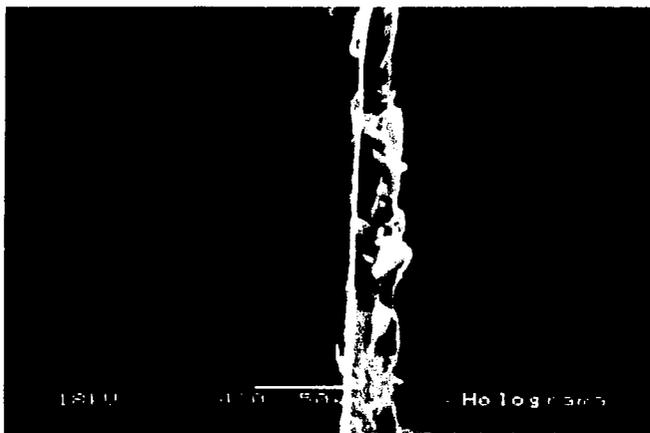


Figura 3.4 Fotografía tomada con el Microscopio Electrónico de Barrido del canto de una película hecha con el método de *Dip Coating* y la emulsión de Jeff Blyth. Presenta un espesor promedio de $18 \pm 3\mu\text{m}$.



Figura 3.5 Fotografía tomada con el Microscopio Electrónico de Barrido de la superficie de una película hecha con el método de *Dip Coating* y la emulsión de Jeff Blyth. No presenta grano.

3.1.3 Dicromatos

Antes de producir dicromatos con el método de *dip coating* y la receta de Blyth se hicieron varios intentos con el método de *vail coating*, ya que este método es mucho más sencillo y rápido. Inicialmente se trabajó con el azul de metileno, el cristal de violeta y la tianina de manera simultánea, buscando las mejores condiciones para obtener primero respuesta al ultravioleta y luego al rojo. Grabar fotografías con la luz del sol en películas de baja concentración de gelatina con 1×10^{-2} mol/litro, dicromato de amonio y con 1×10^{-3} mol/litro de colorante, resultó sumamente sencillo; especialmente las que contenían cristal de violeta, no así con la tianina.

Un análisis de absorción de estas películas con el espectrofotómetro mostraba una baja absorción en el rojo. Para correr la respuesta a longitudes de onda más largas se cambió el pH de las películas de 5.2 a 8.7 utilizando primero tris (hidroximetil aminometano),⁵³ y luego a 9.2 con tetrametilguanidina. La razón por la cual es necesario aumentar el pH es que estos colorantes se precipitan en soluciones no básicas. Las Figuras 3.5, 3.6, y 3.8 muestran el corrimiento y cambio en la absorción de los tres colorantes. Como se puede ver en la Figura 3.8 el corrimiento de la tianina no es tan significativo como el del azul de metileno y el cristal de violeta. Es por esta razón que se decidió no continuar con la tianina y concentrarse en los otros dos colorantes.

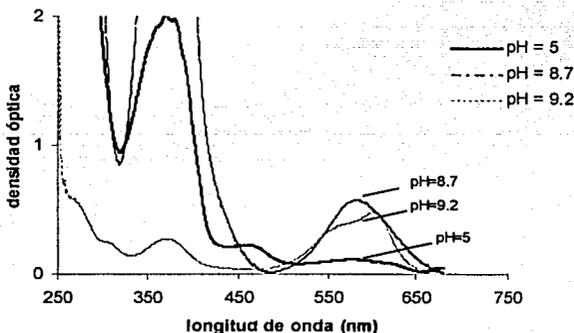


Figura 3.6 Cambio en la absorción óptica del cristal de violeta al correr el pH de 5 a 9.2

⁵³ tris: cristales incoloros solubles en agua, con pH = 10.4 utilizados para ajustar el pH.

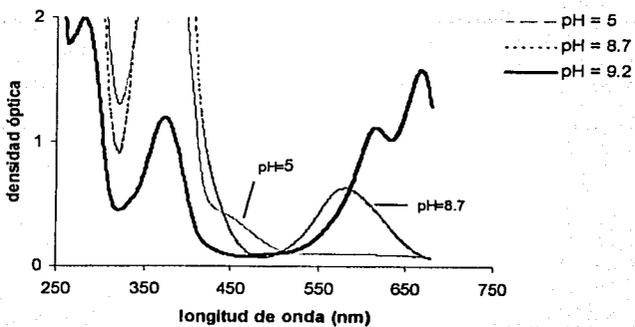


Figura 3.7 Cambio en la absorción óptica del azul de metileno al correr el pH de 5 a 9.2

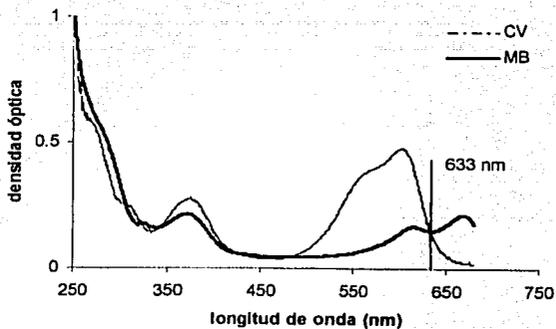
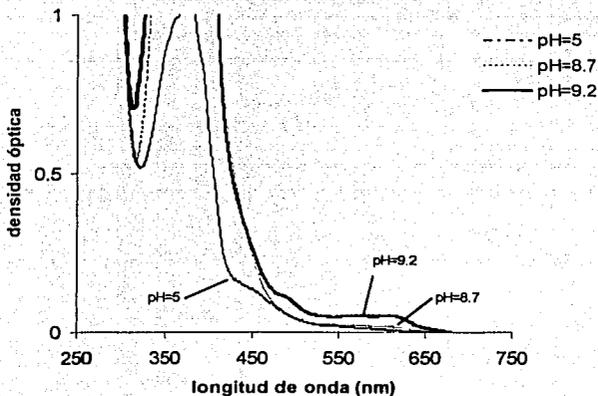
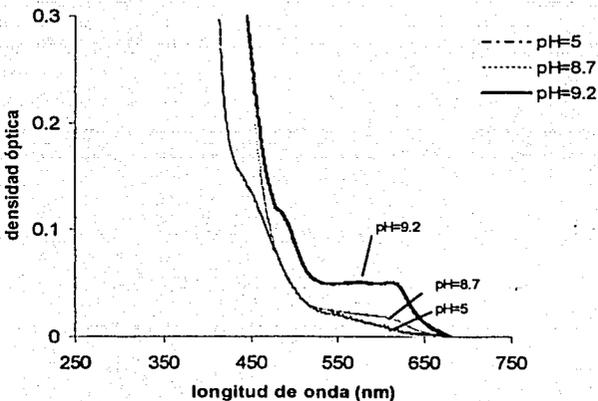


Figura 3.8 Comparación entre la absorción óptica del azul de metileno (MB) y el cristal de violeta (CV) con $\text{pH} = 9.2$. Nótese que la absorción en los 633nm es la misma para los dos colorantes.



(a)



(b)

Figura 3.9 Cambio en la absorción óptica de la tianina al correr el pH de 5 a 9.2. (a) Ningún cambio significativo es apreciable para la tianina. (b) Un análisis más detallado muestra el efecto del cambio en el pH.

Se encontró que para películas hechas con azul de metileno la máxima absorción se corre de los 450 nm a los 675 nm, con un incremento en su densidad óptica de un orden de magnitud para los 633 nm. Para el cristal de violeta, la longitud de onda para la que el máximo se registra se corre de los 475 nm a los 612 nm, con un incremento en la absorción en los 633 nm de un factor de 2.4. Para la tianina se observó un incremento de un factor de 1.4 en la absorción óptica a 633 nm, pero en este caso el coeficiente de absorción es muy pequeño (0.097).

En la gráfica 3.7 que compara la absorción entre el cristal de violeta y el azul de metileno, se puede apreciar que en los 633 nm. tienen la misma absorción, ya que son películas del mismo grosor. Al graficar la curva de la tianina en la Figura 3.7 ésta queda prácticamente como cero a 633 nm.

Una vez obtenidos estos resultados, el experimento se concentró en el azul de metileno siguiendo la receta de Jeff Blyth con el método de *vail coating*, el cual consiste en vaciar la emulsión sobre el sustrato sostenido verticalmente a unos 80°, así por gravedad, la solución baña al sustrato pero de manera no controlada, dejando un depósito grueso en la parte inferior. Se utilizó este sencillo método durante la investigación hasta que se obtuvo una emulsión que cumpliera con las características buscadas.

Solamente se observaron pequeños indicios del grabado de un holograma en forma de pequeños destellos multicolores y de un rallado en la superficie de la película. En las orillas de la película, donde el grosor de esta es menor los indicios eran mayores. Esto sugería que la emulsión utilizada sí reaccionaba a la luz láser, y que era capaz de grabar patrones de interferencia, pero que el método no era el adecuado.

Después de que se utilizó el método de *dip coating*, se obtuvieron películas delgadas, sumamente uniformes que también reaccionaban a la luz ultravioleta, pero fue hasta que estas películas fueron almacenadas en un ambiente con un 60% de humedad promedio cuando se logró grabar un holograma en ellas. En el laboratorio, en un día parcialmente nublado, a 26° C de temperatura, hay una humedad relativa del 32%, suficientemente seco, según Blyth para anular la fotosensibilidad de la emulsión para todo efecto práctico.

El asunto del secado de las placas no está aún claro. Hasta la obtención del primer holograma en un dicromato hecho con dip coating, las placas fueron secadas con nitrógeno en estado gaseoso, sin embargo, al tratar de repetir el proceso, las placas se secaron de manera desuniforme afectando la apariencia del holograma. Esto se relaciona también con el hecho de que estas últimas placas fueron mantenidas en el ambiente de 60% de humedad. Probablemente la temperatura del nitrógeno es demasiado baja (20° C). Es por eso que a partir de este punto el secado se hizo con aire caliente. Cuando se aumentó el tiempo del primer baño de agua a 3 baños de 5 minutos, asegurándose de que toda la TMG se hubiera ido, el resultado final mejoró considerablemente, reduciendo las manchas en un 80%.

Se intentó recubrir los hologramas con una capa de óxido de silicio que no contuviera agua o alcohol para evitar la humedad, aun así la imagen del holograma se borró. Ésto habla de cuan hidrofóbicos son los dicromatos. Algunos hologramas que no

fueron sellados se ven más azules de lo que eran en un principio pues han sido afectados por la humedad y por cambios de temperatura del ambiente. Sellarlos resulta pues indispensable.

Luego de obtener resultados satisfactorios, es decir hologramas de reflexión con un alto índice de difracción, y poco ruido, se repitió el experimento utilizando el cristal de violeta en la misma concentración molar que el azul de metileno. Los resultados no fueron los esperados. No solamente no se observó ningún holograma, si no que no había ningún rastro de una respuesta de la película a la luz láser roja en los 633 nm ni a la luz láser naranja en los 612 nm como lo son diminutos surcos en la película que semejan una huella digital. Existiendo tantas variables como la concentración de colorante, el pH, el tiempo de exposición y la temperatura de revelado fue necesario hacer distintas pruebas.

Al triplicar la cantidad de cristal de violeta en la película se hizo evidente, finalmente, la existencia de un holograma de transmisión. Dicha evidencia, en forma de ligeros destellos multicolores, es resultado de una interferencia entre la luz reflejada por los brillantes de un arete (objeto holografiado) y la luz de referencia.

Esta película aún tiene el inconveniente de que el colorante se precipita y parece no estar completamente disuelto, pues aparecen diminutos granos color violeta, incluso después de una hora de agitación. Aumentar el pH de la emulsión pareciera el camino a seguir; sin embargo, demasiados radicales libres pueden dañar irreversiblemente la gelatina por un efecto de hidrólisis.

Todos estos hologramas fueron hechos con una configuración vertical, mostrada en la Figura 3.10. En ella se aprecia la vista lateral de una configuración para hologramas de reflexión simple. En vez de la caja de arena, se utiliza una placa de vidrio como soporte para la película; el vidrio está apoyado sobre una base de concreto unida firmemente al suelo. El objeto descansa sobre la película y está cubierto por una cúpula reflejante que lo ilumina por todos sus lados. Esta configuración permite exposiciones de hasta 3 minutos, ya que, al estar en contacto el objeto y la película, cualquier vibración que afecte al primero afecta al segundo; además, la base de concreto casi no transmite vibraciones. Para esta configuración no se midió el tiempo de relajación, puesto que el espacio y la disposición de los objetos no lo permitían; sin embargo, dio como resultado los hologramas con mayor eficiencia, volumen y profundidad.

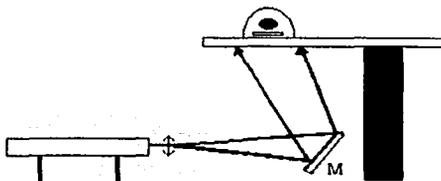


Figura 3.10 Configuración vertical

Estos hologramas de reflexión tipo Denisjuk, con modulación de fase y alta eficiencia de difracción, mostrados en las Figuras 3.10-3.15, pueden ser vistos con luz blanca y muestran un gran detalle, profundidad de campo y volumen.



Figura 3.11 Arete 1.



Figura 3.12 Arete 2.

Las Figuras 3.11 y 3.12 son dos fotografías desde distinto ángulo del mismo dicromato. El objeto holografiado es un arete con brillantes y perla. En la primera fotografía, *arete 1*, se observa el lado frontal del arete en un tono verdoso, mientras que en la fotografía *arete 2* se observa el mismo objeto con un tono más azulado. Con un poco de paciencia es posible ver el alfiler del arete que se encuentra en la parte posterior de éste. Visto con una luz intensa como los rayos del sol, se observan colores brillantes que van desde el amarillo intenso hasta el violeta. Al mirar el holograma desde distintos ángulos se observan las propiedades refractivas de los brillantes del arete.



Figura 3.13 Sartén 1.



Figura 3.14 Sartén 2.

Las fotografías presentadas en las Figuras 3.13 y 3.14 son de dos ángulos distintos del mismo holograma. El objeto es un sartén metalizado de juguete. Se puede apreciar en la Figura 3.13 que la sombra de la tapa del sartén se encuentra en la parte superior, mientras que la sombra en la Figura 3.14 es de la pared del sartén, y se encuentra en la parte inferior.

Al observar el holograma desde distintos ángulos, no solo vemos los lados del objeto, también observamos cómo llegaba la luz láser desde dichos ángulos.



Figura 3.15 Tornillos 1.



Figura 3.16 Tornillos 2

Las Figuras 3.15 y 3.16 muestran a dos tornillos y una tuerca. El tornillo acostado se puede observar en posiciones distintas con respecto a la tuerca según el ángulo con que se mire el holograma.

3.2 Conclusiones

Respecto a la elaboración de hologramas en general, se puede concluir que bajo las condiciones de aislamiento adecuadas es posible elaborar hologramas de reflexión y transmisión con alta eficiencia de difracción, utilizando el material básico de un laboratorio de óptica. Aunque no indispensable, es recomendable la utilización de un filtro espacial.⁵⁴

La película *Red Star Ultra* tiene una respuesta muy lenta y grabar hologramas de reflexión en ella no resulta satisfactorio. Se sugiere la búsqueda de otra película con textura más fina y mayor sensibilidad.

El revelador *pyrochrome* da buenos resultados, sin embargo, su uso continuo puede ser nocivo para la salud ya que el *pyrogalol* es cancerígeno y venenoso.

El Dispositivo 1. es adecuado para elaborar película delgada ya que con él es posible modular el grosor de la película, ya sea al controlar tanto la velocidad de extracción como la temperatura de la solución.

La elaboración de película holográfica con el proceso de *dip coating* resulta en una película de alta uniformidad y mínimo espesor ($18 \pm 3 \mu\text{m}$), condiciones indispensables para grabar hologramas. El proceso de *dip coating* es mucho más eficiente que el de *vail coating*, propuesto por Jeff Blyth.

Las películas dicromatadas hechas con azul de metileno y la receta de Blyth reproducen imágenes holográficas con luz blanca de alta eficiencia de difracción, volumen y profundidad.

Los grabados en estas películas dicromatadas son hologramas de reflexión, del tipo Denisyuk, de volumen y con modulación de fase.

Los colorantes corren la longitud de onda a la que la película es sensible.

El cambio del pH en las emulsiones dicromatadas determina la eficiencia de absorción de los colorantes, de manera que para un colorante específico, un aumento en el pH puede hacer que la emulsión absorba a longitudes mayores.

⁵⁴ Las imperfecciones en y entre los componentes ópticos —lentes, prismas, divisores de haz, espejos, etc.— utilizados en las configuraciones, así como las partículas suspendidas en el aire, pueden provocar una degradación en el frente de onda del laser. Para asegurarse de que los frentes de onda varíen lo menos posible se utiliza un filtro espacial. Este filtro, en su forma más sencilla, está compuesto por una lente positiva (en general un objetivo de microscopio) y un agujero de alfiler (pin hole) colocado en el foco de la lente. Este arreglo permite que toda la luz colimada sea enfocada precisamente en el agujero, y que la luz originada en puntos de contaminación como podría ser una ralladura en un espejo o polvo en el aire sea enfocada antes o después del agujero y como consecuencia no pase a través de él. De esta manera la energía es filtrada fuera del sistema por el orificio.

El azul de metileno, en películas de pH igual a 9.2, tiene un máximo de absorción en los 665 nm. Mientras que el cristal de violeta lo tiene en los 600 nm. Ambos tienen la misma absorción en los 633 nm.

El cristal de violeta es un colorante viable para la producción de hologramas. Su respuesta a longitudes de onda en la región del rojo, el naranja y el amarillo abre la posibilidad de utilizar distintos láseres.

El cambio en el nivel de absorción y longitud de onda en las películas emulsionadas con tianina es bajo—no logra superar el 0.1 de absorción óptica—sin embargo el factor de cambio de casi 5 es comparable con el factor de cambio del cristal de violeta de 5.1 en los 600 nm, no así con el del azul de metileno de 14.58 en los 665 nm (longitud de máxima absorción), lo que hace suponer la posibilidad de obtener una respuesta holográfica utilizando este colorante si se logra incrementar el nivel de absorción como se hizo con el cristal de violeta. Por otro lado un corrimiento en la longitud de onda de absorción máxima parece no ser necesario, ya que la tianina absorbe desde el ultravioleta hasta los 615 nm.

Un camino a seguir en la investigación de estas películas dicromatadas sería la búsqueda de la concentración y pH ideal para el cristal de violeta y la tianina evitando su precipitación; los cuales prometen una alta absorción en el amarillo y naranja. Una combinación de dichos colorantes puede también resultar interesante.

La elaboración de películas dicromatadas es un camino viable en la producción de hologramas de alta eficiencia de difracción, ya que ofrece la posibilidad de cambiar la sensibilidad de la película a distintas longitudes de onda mediante la utilización de colorantes. Entendiendo el proceso fotosensible de estas emulsiones, y los procesos de grabado y de reconstrucción de los patrones de interferencia, resulta factible producir hologramas con películas hechas a base de otros compuestos con propiedades semejantes a las de la gelatina, como lo son las sustancias sol-gel.

Referencias

- Blyth J., "Methylene blue sensitized dichromated gelatin Holograms: a new electrón donor for their improved photosensitivite", *Applied Optics*, Vol. 30, No. 13, 1991
- Chang B.J., "Dichromated gelatin holograms and their applications", *Optical Engineering*, Vol 19 No. 5, 1980.
- Clerc J.R., *Fotografía, Teoría y Práctica*, Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 1975
- Collier R. J., Burckhardt C. B. y Lin L.H., *Optical Holography*, Academic Press, New York, 1971.
- Cruz Vázquez D. Efecto de la orientación de DR1 en la fotoconductividad de películas mesoestructuradas de SiO₂, Tesis para obtener el título de Físico, Facultad de Ciencias, UNAM 2002.
- Fontcuberta Joan, *Fotografía: Conceptos y Procedimientos, una propuesta metodológica*, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1990.
- Gessner G. *Hawley Diccionario de Química y de Productos Químicos*, Ediciones Omega S.A., 1975.
- Hariharan P., "Holographic recording materials: recent developments", *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 5, oct. 1980.
- Hecht E., *Optics*, Addison-Wesley, 1987.
- International Centre for Diffraction, Powder Diffraction File, Organic, Vol. PDIS-22oRB, Compiled by the JCPDS, USA, 1980, 2000.
- Kasper J.E. y Feller S. A., *The complete book of holograms*, Wiley Science Editions, 1987
- Kubota T., "Hologram formation with red light in methylene blue sensitized dichromated gelatin", *Applied Optics*, Vol. 15, No. 2, 1976.
- Langford, Michael J., *Tratado de Fotografía*, Ediciones Omega, S.A., España 1972.
- Leith, E. N., *The Legacy of Dennis Gabor*, *Optical Engineering*, Vol. 19, No. 5, oct 1980
- Maldonado J.L. Garcia-Macedo J., "Los polímeros fotorrefractivos, física y aplicaciones fotónicas de estos nuevos materiales", *Revista Mexicana de Física*, 47, 6, dic. 2001, pp.582-601.
- Michel Frizot (Ed.), *A new history of photography*, Könemann, 1998.
- Olsen Kjell E., *Holographic multi-stereogram constructed from computer images : Applied 3-D printer*, Tesis en óptica y física de láseres, Departamento de Física de la Universidad de Bergen, Noruega, mayo 1996.
- Palomino-Merino, M.R. *Propiedades ópticas de películas compuestas por TiO₂:Co²⁺, TiO₂:Er³⁺ y TiO₂:Eo³⁺ crecidas mediante Sol-Gel*, Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias, UAM, octubre 2001.
- Soroko L.M., *Holography and Coherent Optics*, Plenum Press, New York, 1980.
- Stroke, George W., *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, New York, 1969.
- Towler J., *El Rayo Solar, Tratado Teórico y Práctico de Fotografía*, NY, D. Appleton y Cía, 1890.
- Tung H. Jeong & C. Harry Knowles, *Holography using a Helium-Neon Laser*, *Metrologic Instruments, Inc., T.A.* (1991).