



29
43

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

OBTENCION DE REJILLAS DE DIFRACCION HOLOGRAFICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

LICENCIADO EN FISICA

PRESENTA:

ANTONIO ALFONSO RODRIGUEZ ROSALES

MEXICO, D. F.

1989

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

CONTENIDO

INTRODUCCION GENERAL

CAPITULO I. PRINCIPIOS GENERALES DE LA HOLOGRAFIA

- I. INTRODUCCION
- I.1 GENERALIDADES
- I.2 INTERFERENCIA
- I.3 COHERENCIA
- I.4 DIFRACCION
- I.5 LA REJILLA DE DIFRACCION
- I.6 FILTRAJE ESPACIAL

CAPITULO II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCION DE REJILLAS DE DIFRACCION HOLOGRAFICAS

- II.1 INTRODUCCION
- II.2 ECUACION GENERAL QUE GOBIERNA LA FRECUENCIA ESPACIAL DE LOS PATRONES DE INTERFERENCIA.
- II.3 ECUACION PARAMETRICA DEL ARREGLO OPTICO PROPUESTO
- II.4 COHERENCIA DE LA FUENTE Y ESTABILIDAD MECANICA DE LA MESA ANTIVIBRATORIA
- II.5 FILTRAJE ESPACIAL
- II.6 SELECCION DEL DIAMETRO DEL HAZ COLIMADO
- II.7 COMPONENTES OPTICOS EMPLEADOS
- II.8 ALINEACION DE LOS COMPONENTES OPTICOS
- II.9 SELECCION Y EXPOSICION DE PLACAS HOLOGRAFICAS
- II.10 REVELADO Y BLANQUEADO DE LAS PLACAS HOLOGRAFICAS
- II.11 RECUBRIMIENTO

CAPITULO III. REJILLAS DE DIFRACCION OBTENIDAS Y SUS CARACTERIZACIONES

- III.1 INTRODUCCION

- III.2 FRECUENCIA ESPACIAL
- III.3 ORDEN ESPECTRAL DE LAS REJILLAS DE DIFRACCION
- III.4 DISPERSION ANGULAR
- III.5 DISPERSION LINEAL
- III.6 RESOLUCION Y PODER RESOLUTIVO
- III.7 RANGO ESPECTRAL LIBRE
- III.8 RESPLANDOR (BLAZE)
- III.9 EFICIENCIA
- III.10 ANOMALIAS

CONCLUSIONES:

- TABLA 1 VALORES DE LOS PARAMETROS PARA ARREGLO OPTICO
- TABLA 2 SELECCION DE FILTRO ESPACIAL
- TABLA 3 MATERIAL FOTOSENSIBLE COMERCIAL
- TABLA 4 PROCEDIMIENTO DE REVELADO Y BLANQUEADO DE PLACAS HOLOGRAFICAS
- TABLA 5 CARACTERISTICAS DE LAS REJILLAS DE DIFRACCION HOLOGRAFICAS
- TABLA 6 CUADRO COMPARATIVO DE LAS REJILLAS DE DIFRACCION HOLOGRAFICAS Y LAS CONVENCIONALES (POR RAYADO)

APENDICES:

- APENDICE 1 DESARROLLO DE LA ECUACION PARAMETRICA DEL ARREGLO OPTICO PROPUESTO
- APENDICE 2 INFORMACION SOBRE LOS PROCESOS FOTOGRAFICOS

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION GENERAL

El desarrollo científico siempre ha estado relacionado con la construcción de sistemas de medición más exactos y precisos. En algunos de estos sistemas se requiere analizar espectroscópicamente la radiación electromagnética, utilizando para estos fines un elemento dispersor; uno de estos elementos es la rejilla de difracción.

La obtención de rejillas de difracción por el método convencional consiste en el grabado de surcos sobre una superficie plana. Dicho grabado se lleva a cabo en forma mecánica y es controlado interferométricamente; el proceso produce rejillas de gran calidad pero es lento y costoso.

Otro método para la obtención de rejillas es por medio de procesos holográficos, el cual consiste en el registro de un patrón de interferencia producido por dos haces de luz coherente sobre un medio fotosensible.

Este trabajo propone un método experimental para la obtención de rejillas de difracción por métodos holográficos con resolución de orden bajo, mediano y alto. Asimismo se presenta en un formato que sirva como un manual auxiliar para la obtención de dichas rejillas.

Para lograr el objetivo propuesto, el presente trabajo se divide en varios capítulos, con el siguiente contenido:

Capítulo I. Se discuten los principios de la holografía dando una breve explicación de los fenómenos ópticos involucrados en ella. Es decir: interferencia, coherencia de la fuente luminosa, difracción y filtraje espacial.

Capítulo II. Se propone el arreglo experimental y la ecuación paramétrica que gobierna la obtención de rejillas de difracción. Estas pueden ser de alta, mediana y baja resolución. Asimismo se describe el procedimiento experimental empleado, tanto para el arreglo óptico como para el revelado y blanqueado de las rejillas.

Capítulo III. Se caracterizan las rejillas holográficas obtenidas, tanto cuantitativa como cualitativamente. Estas a su vez son comparadas con las convencionales, de rayado mecánico.

Finalmente el texto se complementa con apéndices, tablas y bibliografías, con el objeto de dar una mayor comprensión a este trabajo de tesis.

CAPITULO I

PRINCIPIOS GENERALES DE LA HOLOGRAFIA

INTRODUCCION:

La holografía fue inventada, antes que el laser, por Dennis Gabor, quien en 1948 obtuvo el primer holograma⁵. Dentro de la aplicación de los láseres, la holografía ha tomado una fuerte importancia por su uso en las distintas áreas de la ciencia, la tecnología y las artes.

La holografía, a pesar de tener un proceso fotográfico, es diferente en su concepto a la fotografía. En fotografía se obtiene de un objeto el registro de los distintos frentes de ondas que de él emanan, tales como la distribución de irradiancias y las frecuencias; mientras que en holografía se puede registrar además la diferencia de fase de las ondas.

Para lograr lo anterior se ilumina la placa fotosensible (haz de referencia), por otro lado se ilumina el objeto (haz objeto), él que a su vez se refleja en la placa y se obtiene con esto los registros de patrones de interferencia. Para reproducir la imagen se ilumina la placa con el haz de referencia, obteniéndose por difracción la imagen del objeto; por este motivo a menudo se refieren a la holografía como la reconstrucción de frente de onda. De ahí que los elementos básicos de la holografía sean:

- . Interferencia (registro de la imagen).
- . Fuente de luz coherente.
- . Difracción (reproducción de la imagen).
- . Filtraje espacial (alta calidad del registro).

I.1 GENERALIDADES:

La radiación electromagnética se describe como una función que depende de las coordenadas espaciales y temporales (x, y, z, t) , de ésta nos interesa la componente del campo eléctrico $\vec{E}(x, y, z, t)$. Este campo eléctrico en lo sucesivo lo denotaremos como campo óptico.

El campo óptico cumple con el importante principio de superposición, que podemos escribir como la suma vectorial de campos eléctricos individuales. Esto es¹²

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (1.1)$$

Esta perturbación óptica obedece la ecuación diferencial parcial de segundo orden¹³.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial z^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

Donde:

μ_0 : permeabilidad magnética del espacio libre.

ϵ_0 : permitividad eléctrica del espacio libre.

\vec{E} : vector de campo eléctrico en la dirección x, y, z .

Que es una ecuación de onda. En otras palabras, el campo óptico puede ser tratado como un modelo de ondas. Esta descripción nos permite entender claramente los principios en que está basada la interferencia de ondas.

Por otro lado, para evitarnos preocupaciones por la naturaleza vectorial de la luz, se toman los casos en los que las ondas de la luz se propagan a lo largo de la misma línea, asociándoles un eje de coordenadas, compartiendo un plano común constante de vibración. Cada una de estas ondas de luz

podrán ser descritas en términos de una componente del campo eléctrico o magnético. Pudiendo ser paralelas o antiparalelas en cualquier instante de tiempo, por lo cual pueden ser tratadas como escalares, facilitando con esto las operaciones algebraicas.

I.2 INTERFERENCIA:

De la ec. (1.1) se puede examinar, en forma analítica, la superposición de los campos ópticos que nos daran como resultado la formación de un patrón de franjas. Del experimento de Thomas Young (1773-1829), Fig. I.1(a), en donde se tienen como fuentes luminosas a S_1 y S_2 , las cuales están descritas por las ecuaciones de onda.

$$E_1(x, y, z, t) = A \cos(\omega t - kz + \phi_1) \quad (1.3)$$

$$E_2(x, y, z, t) = A \cos(\omega t - kz \sin \theta - kz \cos \theta + \phi_2) \quad (1.4)$$

Donde:

A : Amplitud de la onda.

$\omega = 2\pi f$; frecuencia temporal angular (radianes/segundo).

$k = 2\pi/\lambda$; frecuencia espacial angular (radianes/metro).

ϕ_1, ϕ_2 : fase.

Usando el principio de superposición se suman ambas ondas, con lo que se obtiene:

$$E_{\text{TOTAL}}(x, y, z, t) = A \cos(\omega t - kz + \phi_1) + A \cos(\omega t - kz \sin \theta - kz \cos \theta + \phi_2) \quad (1.5)$$

como el detector no registra la variación en el campo eléctrico de las ondas, sino la energía que estas transportan en la unidad de tiempo y área, es necesario definir la irradiación

cia $I(x, y, z)$. Esto es, que se absorba la energía radiante durante un intervalo de tiempo dado y en una cierta área, la cual está definida por⁴:

$$I(x, y, z) = \langle E(x, y, z, t) E^*(x, y, z, t) \rangle \quad (1.6)$$

Donde:

$\langle \rangle$: simboliza el valor promedio en el tiempo.

* : conjugado complejo.

Recordando que el promedio en el tiempo de alguna función $f(t)$, tomada sobre un intervalo τ , es¹³:

$$f(t) = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} f(t') dt' \quad (1.7)$$

De las ecs. (1.6) y (1.7) la irradiancia queda determinada por²⁷:

$$I(x, y, z) = C \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} E^2(x, y, z, t) dt \quad (1.8)$$

Donde:

C : factor de proporcionalidad que relaciona al campo eléctrico ($\text{volts}^2/\text{m}^2$) con la irradiancia (watt/m^2).

De la fig. I.1(a), en donde se observa el plano en $z=0$, la variación de la irradiancia en la dirección x , utilizando las ecs. (1.5) y (1.8) se obtiene:

$$I(x, y) = \frac{4CA^2}{\tau} \cos^2 \frac{1}{2} (kx \sin \theta + \phi_1 - \phi_2) \int_0^{\tau} \cos^2 \frac{1}{2} (2\omega - kx \sin \theta + \phi_1 + \phi_2) dt \quad (1.9)$$

El intervalo de tiempo T se selecciona de tal forma que la

integral evaluada para $r \gg l/w$ es igual a $T/2$ con lo que se obtiene:

$$I(x, y) = 2CA^2 \cos^2 \frac{1}{2} (kx \sin \theta + (\phi_1 - \phi_2)) \quad (1.10)$$

ó

$$I(x, y) = CA^2 [1 + \cos(kx \sin \theta + (\phi_1 - \phi_2))] \quad (1.11)$$

La irradiancia varía cosenoidalmente en la dirección de X ; la gráfica de esta relación se ilustra en la Fig. 1.2, en donde se nota una generación alternativa de franjas, oscuras y brillantes en el patrón de la irradiancia, conocido como patrón de interferencia. Este patrón se ilustra con el experimento de Young Fig. 1.1(b).

Los conceptos de fase relativa y diferencia de trayectoria óptica son importantes para entender la interferencia. Si dos ondas oscilan en un punto particular de la pantalla, como $\cos(\omega t + \phi_1)$ y $\cos(\omega t + \phi_2)$ se dice que las ondas tienen una fase relativa de $[(\omega t + \phi_1) - (\omega t + \phi_2)] = (\phi_1 - \phi_2)$.

Cuando la fase relativa es igual a múltiplos enteros pares de π radianes ($n\pi; n: 0, \pm 2, \pm 4, \dots$) se dice que las ondas están en fase y ocurre interferencia constructiva (franjas brillantes) y cuando es igual a múltiplos enteros de π radianes ($n\pi; n: \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$) se obtienen ondas fuera de fase por 180° y ocurre la interferencia destructiva (franjas oscuras). La diferencia de trayectoria óptica ocasiona cambios en la fase relativa.

I.3 COHERENCIA.

La luz puede ser coherente, incoherente o parcialmente co-

herente. La habilidad para medir la coherencia está ligada a la relación que existe entre la coherencia y la interferencia. Los instrumentos ópticos que se usan con mayor frecuencia en la medición de la coherencia son los interferómetros, los cuales pueden ser por división de amplitud (interferómetro de Michelson, coherencia temporal, Fig. I.3); o por división de frente de onda, empleando para ello el experimento de Young (coherencia espacial, Fig. I.1(a)). Consideraremos la medida de la coherencia desde el punto de vista del experimento de Young.

En la discusión de este experimento se iluminan dos pequeños orificios (pin-hole), utilizando como fuente un haz de luz laser (He-Ne); éstos a su vez sirven como dos fuentes puntuales, que en lo sucesivo así llamaremos. En una pantalla, colocada a cierta distancia de las dos fuentes puntuales Fig. I.1(a), se observa un patrón de interferencia Fig. I.1(b). La coherencia se puede medir en función de la visibilidad o contraste de las franjas, la cual está definida como sigue :

$$V = \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}} \quad (1.12)$$

Donde:

$$I_{\text{máx.}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}$$

$$I_{\text{mín.}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}$$

Nótese que la visibilidad de las franjas debe tomar un valor entre 0 y 1, dado que la irradiancia es siempre una cantidad no negativa.

La visibilidad de las franjas puede ser tomada como una medida directa del grado de coherencia que exhibe la luz de las dos fuentes puntuales. Para que V iguale la coherencia de la luz en estos dos puntos, se requiere que iguales cantidades de luz partan de las dos fuentes puntuales. (Al bloquear una de

las fuentes puntuales el patrón de las franjas desaparece y $V=0$, sin embargo la coherencia de la luz en las dos fuentes puntuales ciertamente no ha cambiado). Específicamente, sean I_1 e I_2 las irradiancias que inciden sobre la pantalla de cada una de las fuentes puntuales, en forma separada. Si $I_1=I_2$, la visibilidad de las franjas V es igual a la coherencia de la luz de ambas fuentes puntuales. (si $I_1 \neq I_2$, entonces la coherencia es igual a la visibilidad de las franjas V multiplicada por el factor $(I_1+I_2)/2\sqrt{I_1I_2}$).

Para la etapa del desarrollo experimental se toma el caso para $I_1=I_2$; de ahí que la visibilidad de las dos fuentes puntuales es la unidad, es decir, la luz exhibe completa coherencia. Este procedimiento se emplea en el Capítulo II, Sección II.4.

I.4 DIFRACCION.

La difracción, al igual que la interferencia, es un fenómeno que se explica en función de la teoría ondulatoria de la luz; éste se manifiesta al hacer incidir un haz de luz sobre un objeto, en el borde del mismo ocurre una desviación de su trayectoria rectilínea con lo cual se alteran las leyes de la óptica geométrica. Los diversos segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfirieron para producir franjas brillantes, alternadas con oscuras; lo cual es conocido como patrón de difracción Fig. I.4, hecho que no se puede explicar en términos de la óptica geométrica, fundamentada en las leyes de la reflexión y refracción³.

Este fenómeno se explica en términos de la teoría ondulatoria de Christian Huygens y del principio de interferencia. De acuerdo al principio de Huygens, "Cada punto en un frente de onda primario sirve como fuente de onditas esféricas secunda-

rias tales que el frente de onda primario, un momento más tarde es la envolvente de estas onditas. Además las onditas avanzan con una rapidez y frecuencia igual a la de la onda primaria en cada punto del espacio".¹³

Los fenómenos de difracción se clasifican en:

- . Difracción de Fresnel (campo cercano).
- . Difracción de Fraunhofer (campo lejano).

Para los propósitos de difracción por medio de rejillas se utiliza la difracción de Fraunhofer, ya que, generalmente éstas se usan con la fuente luminosa y la pantalla en que se observan las franjas de difracción colocada al infinito (cumpliendo con esto la condición de campo lejano).

Partiendo de estas condiciones, se considera la difracción para una ranura Fig. 1.5, en donde el campo total en P, debido a esta ranura está dado por¹²:

$$E_p = \frac{E_0 P}{R} \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right) \sin(\cot - KR) \quad (1.13)$$

Donde:

$$\beta = \left(\frac{k \ell}{2} \right) \sin \theta$$

$\frac{E_0 \ell}{R}$: Amplitud de onda.

ℓ : longitud de la ranura.

R : distancia al punto.

Para obtener la irradiancia se utiliza la ec. (1.8) con lo que se obtiene:

$$I(\theta) = I(0) \text{sac}^2 \beta \quad (1.14)$$

Donde:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{E_1 \ell}{R} \right)^2$$

$$\text{sinc } \beta = \left(\frac{\text{sen } \beta}{\beta} \right)$$

Cuando $\ell \gg \lambda$ y $\beta = \left(\frac{k b}{2} \right) \text{sen } \theta$, $I(\theta)$ decrece rápidamente, a medida que θ se aparta de cero.

La distribución de irradiancia para una sola ranura tiene la forma de una función $\text{sinc}^2 \beta$, la cual se ilustra en la Fig. I.6.

Para el caso de ranuras múltiples Fig. I.7, en el que ondas planas inciden en forma normal, el campo al punto P está dado por ¹²:

$$E_p = b E_1 \text{sinc } \beta \left(\frac{\text{sen } N \alpha}{\alpha} \right) \text{sen} [\omega t - kR + (N-1)\alpha] \quad (1.15)$$

Donde:

$$\beta = \frac{k b}{2} \text{sen } \theta$$

$$\alpha = \frac{k a}{2} \text{sen } \theta$$

b : anchura de las aberturas.

a : separación entre aberturas.

De ahí que la distribución de la irradiancia de campo lejano para N ranuras es (Fig. I.8):

$$I(\theta) = I_0 \text{sinc}^2 \beta \left(\frac{\text{sen } N \alpha}{\text{sen } \alpha} \right) \quad (1.16)$$

Donde:

I_0 : densidad de flujo en la dirección de $\theta = 0$, emitido por cualquiera de las ranuras.

θ : ángulo subtendido por el eje z .

R : distancia del origen al punto de observación.

De esta ecuación se observa que existen máximos de interferencia cuando $\alpha = M\pi$ ($M=0,1,2,\dots$) y mínimos cuando $\alpha = \pm \frac{\pi}{N}, \pm \frac{2\pi}{N}, \dots, \pm \frac{(N-1)\pi}{N}, \pm \frac{N\pi}{N}$.

Además como:

$$\alpha = \left(\frac{Kd}{2}\right) \sin \theta \quad \text{y} \quad K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Esto da como resultado:

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (1.17)$$

A esta relación se le conoce como ecuación de la rejilla.

1.5 LA REJILLA DE DIFRACCION

Partiendo de los conceptos y relaciones obtenidos, se define a una rejilla de difracción como un conjunto repetitivo de elementos difractores en forma periódica, que consisten en aberturas u obstáculos, todos ellos paralelos y de la misma anchura, los cuales tienen el efecto de producir alteraciones periódicas en la fase, amplitud, o en ambas, de las ondas de luz incidentes en ellas.

Cuando se ilumina la rejilla con luz blanca se forma un conjunto de imágenes, una al lado de la otra, esto es: la luz se dispersa formando un "espectro continuo", y dicha rejilla forma un cierto número de espectros a cada lado de la normal.

Partiendo del conocimiento de que un frente de onda puede ser reflejado o transmitido, se tiene que existen rejillas de difracción con estas dos características y son las siguientes:

- Rejillas de transmisión. En estas rejillas lo que se tiene son variaciones en el espesor óptico de las

mismas. La Fig. 1.9(a) ilustra una rejilla con el rayado convencional, teniendo en este caso de "transmisión de fase" y de "transmisión de amplitud".

Rejillas de Reflexión. Cuando el frente de onda no atraviesa la rejilla, sino que es reflejada, como se observa en la Fig. 1.9(b), se tiene una rejilla de reflexión de fase.

La condición para que un orden de difracción exista es que la contribución de cada surco o franja, estén en fase o un poco fuera de fase, por un número entero de 2π radianes; esto mediante la diferencia de trayectoria óptica de luz incidente a luz difractada, a través de los surcos sucesivos de la rejilla, será igual al número total de longitudes de ondas.

Se considera el caso más general de incidencia oblicua donde la ecuación de la rejilla, tanto de transmisión como de reflexión está dada por:

$$a (\sin \alpha \pm \sin \beta) = m \lambda \quad (1.18)$$

Donde:

α : ángulo de incidencia respecto a la normal de la red.

β : ángulo de difracción.

a : espacio entre franjas o surcos.

m : es un número entero y se le conoce como número de orden.

λ : longitud de onda.

Las características de las rejillas de difracción dependen de:

- . Longitud de onda. λ (Å o μm)
- . Espacio entre surcos. a (mm)

Angulo de incidencia y de difracción (α y β)

Como caso particular se tiene que si se observa perpendicularmente, a través de una rejilla de transmisión a una fuente lineal paralela a los surcos, se tiene que $\alpha=0$, por lo que se obtiene:

$$m\lambda = a \sin \beta \quad (1.19)$$

Nótese que la ecuación 1.17 es similar a la 1.19, en donde $\theta = \beta$

1.6 FILTRAJE ESPACIAL.

Para obtener un buen registro holográfico de los patrones de interferencia de los haces de luz coherente, es necesario eliminar al máximo el ruido, debido a la interacción con los diversos dispositivos ópticos, ya que en este tipo de aplicación la forma de los surcos obtenidos del patrón de interferencia se puede perder o deformar si el plano de iluminación no es uniforme.

El perfil de intensidad ideal se aproxima a una forma Gaussiana Fig. 1.10(a), el cual está asociado a la ecuación siguiente²³:

$$I(r) = I_0 \cdot \bar{e}^{-2\left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (1.20)$$

Donde:

$$I_0 = 2P_t / \pi a^2$$

a : radio del haz en $I_0 \cdot \bar{e}^{-2}$

P_t : potencia total del laser.

r : radio de la distancia dentro del espectro de potencia óptica.

Esto no sucede en la práctica, ya que presenta una serie de fluctuaciones en la intensidad I . Dichas fluctuaciones son ocasionadas por efectos de interferencia de la luz dispersada debido a partículas en el aire, en los lentes y espejos, también por defectos en las lentes, etc.: usualmente varía en forma rápida y aleatoria sobre distancias más pequeñas que la de a , obteniéndose un perfil con ruido, Fig. I.10(b). Enfocando un haz de luz laser sobre el plano focal de una lente positiva (objetivo de microscopio) se forma el espectro de potencia óptica de la distribución de la luz - Fig. I.10(c); en esta figura se aprecia una zona de ruido, la cual se bloquea con la utilización de una fuente puntual, con esto se obtiene un filtro espacial. La fracción de potencia que pasa a través de una fuente puntual de radio r se obtiene de la relación²³:

$$\frac{P(r)}{P_t} = 1 - e^{-2\left(\frac{r}{a}\right)^2} \quad (1.21)$$

Donde:

$P(r)/P_t$: fracción de potencia.

r : radio de la fuente puntual (Pin-hole).

a : radio del haz del laser.

Esto queda representado en la gráfica de la Fig. I.10(d).

Para seleccionar una fuente puntual adecuada, en función del objetivo, se obtiene la relación siguiente:

$$D = \frac{\lambda F}{a} \quad (1.22)$$

Donde:

D : diámetro de la fuente puntual (Pin-hole).

F : longitud focal del objetivo.

a : radio del haz.

λ : longitud de onda del laser.

De la Fig. I.10(d) se selecciona el diámetro óptimo de la fuente puntual, el cual es de πa , para que pase el 99.3% de

la potencia total. De ahí que las ecs. (1.21) y (1.22) combinadas entre sí dan la relación de fracción de potencia total pasando a través de la fuente puntual, esto es²³:

$$\frac{P(D)}{P_t} = 1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\pi a D}{\lambda F} \right)^2} \quad (1.23)$$

La mínima frecuencia bloqueada está dada por:

$$K = \frac{D}{2F\lambda} \text{ líneas/mm} \quad (1.24)$$

Estas ecuaciones se usan en el Capítulo II, Sección 2.

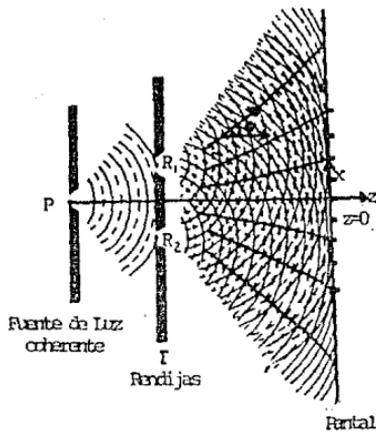


Figura I.1(a) Experimento de Young, en donde la fuente (P) ilumina dos rendijas (R₁ y R₂) las cuales sirven como dos fuentes puntuales. Ref. 13, Pág. 300

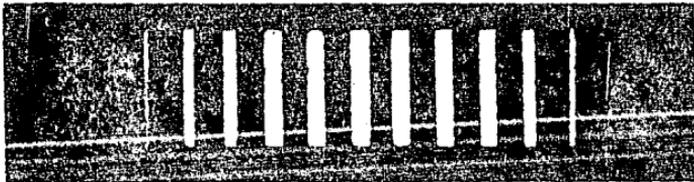


Fig. I.1 (b) Patrón de interferencia que se obtiene al utilizar el arreglo de la Fig. I.1(a). Las zonas claras denotan la interferencia constructiva. Ref. 13, Pág. 300

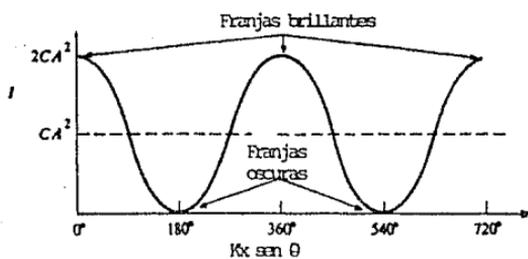


Fig. 1.2 Gráfica cosenoidal de la ecuación 1.10 basada en el experimento de Young. Ref. 27, Pág. 26

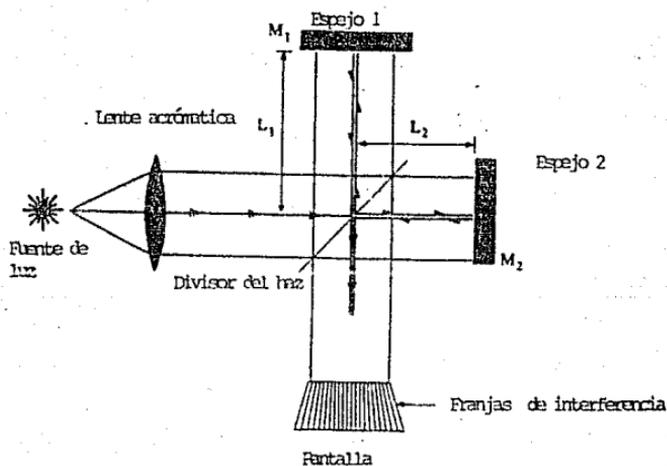
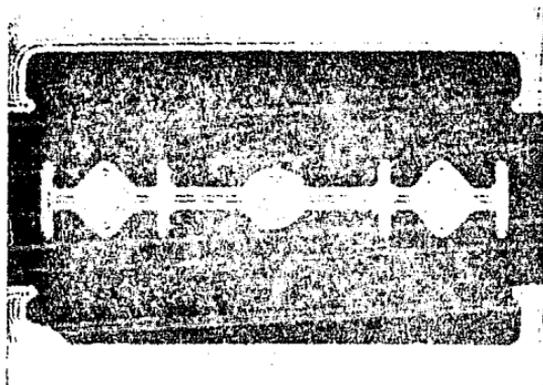
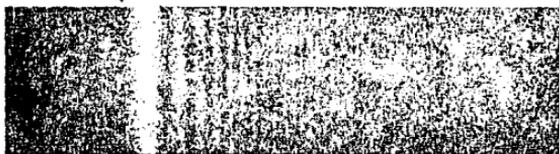


Fig. 1.3 Interferómetro de Michelson. El haz se divide en dos partes, la diferencia de trayectoria $\Delta L = 2(L_1 - L_2)$ ocasiona que al recombinarse, se obtenga en la pantalla un patrón de interferencia. Ref. 27, Pág. 37



Sombra de una hoja de afeitar



Sombra de un borde rectilíneo

Fig. I.4 Patrones de difracción de diferentes objetos iluminados con una fuente de luz coherente (Laser He-Ne). Este fenómeno se observó en el laboratorio. Ref. 31, Pag. 226

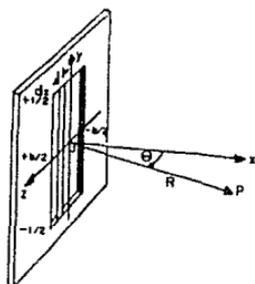


Fig. I.5 Difracción de Fraunhofer, geometría para una ranura. Ref. 12, Pág. 164

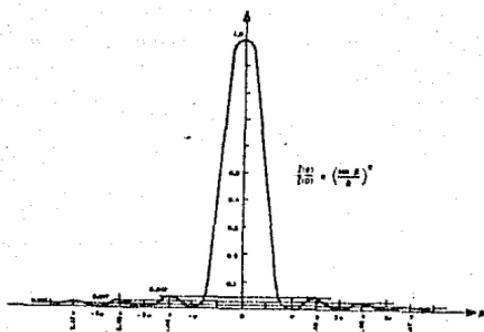


Figura I.6 Distribución de irradiancia para una ranura.
Ref. 12, Pág. 165

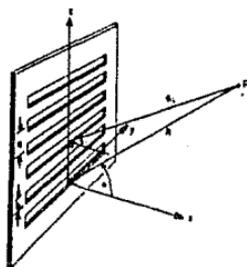


Fig. 1.7 Difracción de Fraunhofer, geometría de ranuras múltiples. Ref. 12, Pág. 170

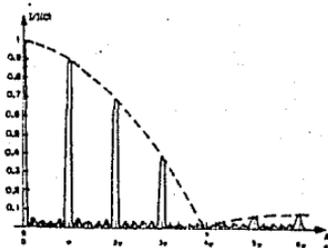


Fig. 1.8 Distribución de la irradiancia para ranuras múltiples (En este caso 5 ranuras separadas por una distancia igual a 4 veces el ancho individual de la ranura) Ref. 12, Pág. 172

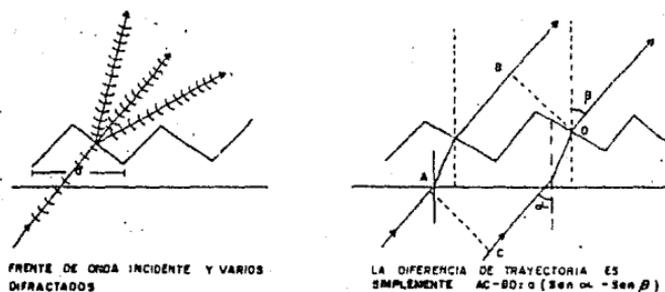


Fig. I.9(a) Rejillas de Transmisión Ref. 6, Pag. 48

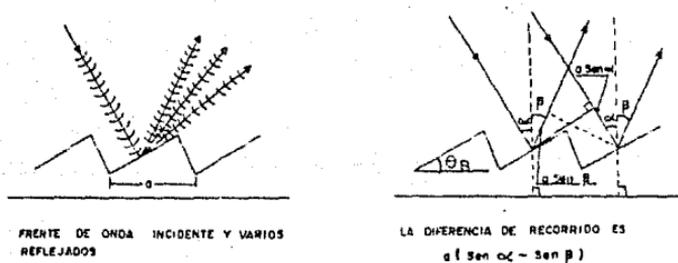


Fig. I.9(b) Rejillas de Reflexión. Ref. 6, Pag. 49

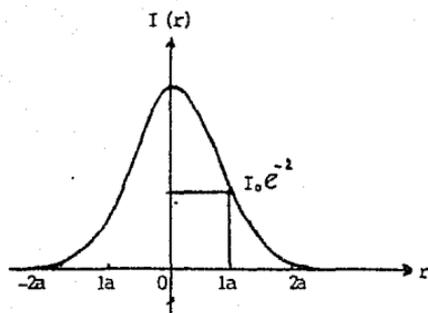


Fig. I.10(a) Perfil de intensidad ideal con una distribución de forma Gaussiana. Ref. 23, Pág. 114

Fig. I.10(b) Perfil normal, en donde se observan fluctuaciones en la intensidad, ocasionadas por la interferencia de la luz con las partículas en el aire y las componentes ópticas. Ref. 23, Pág. 114

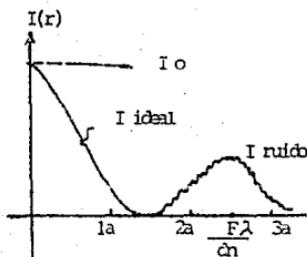
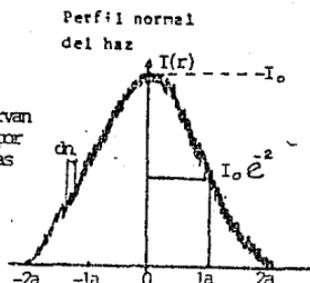
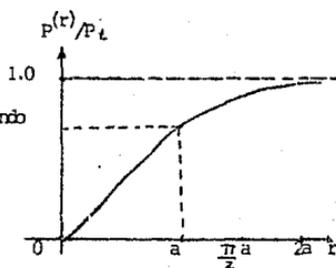


Fig. I.10(c) Enfocando el haz sobre una lente positiva, esto da lugar a la formación de un espectro de potencia óptica de luz.

Fig. I.10(d) Separación del ruido, bloqueando éste con la utilización de un pin-hole de radio r . Ref. 23, Pág. 115



CAPITULO II

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCION
DE REJILLAS DE DIFRACCION HOLOGRAFICAS

II.1 INTRODUCCION.

La posibilidad de obtener rejillas de difracción por métodos holográficos fue mencionada por el físico soviético Yu N. Denisyuk¹⁷. Hoy en día estas ya son obtenibles* y, dado que las mismas presentan una serie de ventajas respecto de las convencionales, en este capítulo se propone un procedimiento experimental que permite obtener rejillas de reflexión y transmisión de diferente frecuencia espacial y perfil senoidal. El método propuesto utiliza un laser de He-Ne de 35mW como fuente de luz coherente, un arreglo produce un patrón de interferencia sobre placas espectrográficas del tipo 10E75 de Agfa Gevaert.

El arreglo óptico y método experimental permite obtener rejillas de difracción holográficas de baja, mediana y alta frecuencia espacial de los patrones de interferencia.

II.2 ECUACION GENERAL QUE GOBIERNA LA FRECUENCIA ESPACIAL DE
LOS PATRONES DE INTERFERENCIA.

En la sección 1.2 se describe un patrón de interferencia senoidal, el cual se forma cuando dos ondas planas coherentes interfieren entre sí, ec. (1.11).

Partiendo de esto se toman dos haces de ondas luminosas - cuyos frentes de onda son planos y estos se hacen converger sobre una placa fotosensible con un determinado ángulo Fig.

II.1 Los puntos A y B corresponden a las posiciones de dos

* 9,10,15,17,21,34

franjas adyacentes, el camino recorrido entre los haces 1 y 2 está dado por:⁶

$$\Delta_1 + \Delta_2 = \lambda \quad (2.1)$$

Donde Δ_1 y Δ_2 están dados como:

$$\Delta_1 = a \sin \alpha \quad \text{y} \quad \Delta_2 = a \sin \beta$$

Por lo que:

$$a(\sin \alpha \pm \sin \beta) = \lambda \quad (2.2)$$

la cual corresponde a la ec. (1.18).

Aquí se propone un arreglo óptico en el que para $m=1$ y $\alpha = \beta = \theta$ (condiciones de Littrow), por lo que la ec. (2.2) puede escribirse como:

$$2a \sin \theta = \lambda \quad (2.3)$$

La distancia entre franjas del patrón de interferencia está dada por:

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2.4)$$

La frecuencia espacial (# líneas/mm) está dada por:

$$N = a^{-1} \quad (2.5)$$

Las ecuaciones anteriores caracterizan a las rejillas de difracción.

II.3 ECUACION PARAMETRICA DEL ARREGLO OPTICO PROFUESTO.

De la consideración dada en la sección II.2, para obtener la ec. (2.4) se hizo el arreglo óptico, el cual se ilustra en la Fig. II.2, éste tiene la forma de un triángulo. Los espejos y la placa fotosensible están colocados en los vértices

de un triángulo de base $2X_m$ y altura Y_m

La fuente luminosa proveniente de un laser de He-Ne incide en un divisor de haz, con una potencia al 50% para cada uno, estos pasan por los espejos y filtros espaciales para ser colimados (ondas planas). Una vez colimado inciden sobre la placa holográfica colocada en el ápice del triángulo, formando un ángulo θ respecto a la normal de ésta.

Para obtener diferente frecuencia espacial N , en el arreglo óptico se varían X_m y Y_m , tomando en cuenta la longitud de onda λ de la fuente para la N deseada.

Bajo estas condiciones se obtiene la ecuación paramétrica del arreglo óptico (Apéndice 1), la cual está dada por :

$$Y_m = Y_m(N) = X_m \left[\frac{4}{(N\lambda)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

De esta ecuación debe cumplirse la condición para $N \leq 2/\lambda$. Para la longitud de onda del laser de He-Ne ($\lambda = 6328 \times 10^{-7}$ mm) el arreglo proporciona patrones de interferencia con $N \leq 3160$ líneas por mm. Utilizando la ec. (2.6) para diferentes valores teóricos de N y X_m se construye la Tabla 1.

II.4 COHERENCIA DE LA FUENTE Y ESTABILIDAD MECANICA DE LA MESA ANTIVIBRATORIA.

Como se discute en la Sección I.3, la coherencia de la fuente luminosa se determina midiendo la visibilidad o contraste con la ayuda de la ec. (1.12). Para este fin se utilizó el experimento de Young Fig. I.1(a), la medición se logra al bloquear cada una de las fuentes puntuales, obteniéndose que $I_1 = I_2$, lo cual cumple con la condición de coherencia

puesto que $V=1$

Asimismo la estabilidad de la mesa se determina en forma cualitativa utilizando el interferómetro de Michelson Fig. I.3; el criterio empleado fué el de observar el comportamiento del patrón de interferencia al provocar perturbaciones mecánicas (vibraciones en el piso y sonidos). Como la mesa tiene un sistema de amortiguamiento neumático, no se observaron variaciones en el patrón de interferencia. Sin embargo se encontró que hay que tener cuidado con los sonidos (en el umbral de una charla), ya que se observaron alteraciones en el patrón de interferencia (en especial para frecuencias mayores a 700 líneas/mm).

II.5 FILTRAJE ESPACIAL.

De la discusión dada en la Sec. I.5 para determinar el filtraje espacial se toma en cuenta que se utiliza un laser de He-Ne, cuya longitud de onda λ es de 6328×10^{-7} mm con un diámetro del haz de 2mm.; con estos datos y la ec. (1.22) se elaboraron los datos dados en la Tabla 2. De esta tabla se seleccionan los objetivos de 10X y fuentes puntuales (Pin-hole) de 15 μ m de diámetro, esto estuvo restringido a la disponibilidad de los mismos en el laboratorio.

La fracción de potencia total, pasando a través de la fuente puntual está dada por la ec. (1.23). En nuestro caso esto es igual al 99.8%.

II.6 SELECCION DEL DIAMETRO DEL HAZ COLIMADO.

Para seleccionar el diámetro del haz colimado, se utiliza la teoría de la difracción para la abertura circular de la fuente puntual. A la salida de ésta se aprecia un patrón de

difracción consistente de un disco luminoso circundado por anillos Fig. II.3. A este tipo de discos o anillos se les conoce como de Airy, ya que fue Sir George Biddell Airy (1801-1892) quien dedujo por vez primera la ecuación que gobierna el patrón de irradiancia debido a una abertura circular Fig. II.4. El radio dibujado desde el centro al primer disco está dado por ¹³:

$$q = 1.22 \frac{R\lambda}{2a} \quad (2.7)$$

Donde:

R: distancia de la pantalla.

a: radio de la abertura circular.

λ : longitud de onda del laser.

Para una lente que colima el haz proveniente de la fuente puntual, la distancia focal $f \approx R$ y $D = 2a$, por lo que:

$$q \approx 1.22 \frac{f\lambda}{D} \quad (2.8)$$

En el caso de la fuente puntual seleccionada $D = 15 \mu\text{m}$, al colocar la lente de longitud focal $f = 800 \text{ mm}$ se obtiene que:

$q \approx 4 \text{ cm}$ de radio.

Con lo que se tiene un haz colimado de $\sim 8 \text{ cm}$ de diámetro, éste tiene las dimensiones deseadas para la obtención de rejillas de difracción de $2 \times 3 \text{ cm}$.

II.7 ACCESORIOS Y COMPONENTES OPTICOS UTILIZADOS.

El montaje de los accesorios y componentes ópticos Fig. II.2, se hace sobre una mesa antivibratoria, la cual cuenta con un sistema de amortiguamiento neumático. El arreglo forma un triángulo, en la parte superior de la base formada por

los espejos ubicados en los vértices se coloca el laser, el obturador y el divisor de haz; en los lados adyacentes a la base se colocan los filtros espaciales y las lentes colimadoras. Para el arreglo propuesto se utiliza el siguiente material:

- . Mesa antivibratoria (Newport Research Corporation, NRC, Modelo RS-58-12)
- . Láser de He-ne de 35mW (Spectra-Physics).
- . Radiometro Universal, con obturador electrónico (NRC, Modelo 880).
- . Divisor de haz variable (NRC, Modelo 50600).
- . Filtro espacial (Objetivo de microscopio 10X y fuente puntual (Pin-hole) de 15 μ m de diámetro).
- . Espejos aluminizados.
- . Lentes con un mínimo de aberraciones.
- . Banco óptico.
- . Soportes ópticos.

II.8 ALINEACION DEL SISTEMA OPTICO.

La Tabla 1 permite seleccionar la frecuencia espacial N a partir de X_m y Y_m . A continuación se listan los pasos que se siguen en la alineación del arreglo óptico propuesto.

- Paso 1: Se alinea el haz del laser siguiendo el recorrido que pasa únicamente por el divisor de haz y los espejos, hasta llegar al soporte de la placa holográfica (en este lugar se coloca una pantalla). Con el divisor de haz variable y con el auxilio del medidor de potencia se ajusta hasta obtener el 50% de la potencia total para cada haz. Teniendo extremo cuidado

en que las longitudes de camino recorrido - sean idénticas para cada haz, así como el de mantener una altura constante en todo el camino.

Paso 2: Se coloca en uno de los lados, a una cierta distancia del espejo, la montura del filtro espacial, colocando únicamente el objetivo de microscopio, el cual, en este caso, es de 10X. Se alinea el haz expandido de tal forma que éste quede centrado con la pantalla. En el otro extremo se procede de idéntica manera.

En esta etapa se encontró que existe una pérdida de potencia de, aproximadamente, el 13% para cada haz.

Paso 3: A continuación se monta la fuente puntual de $15\mu\text{m}$ y se coloca una tarjeta blanca frente a ésta (aproximadamente a 10cm.), seguidamente se ajusta con movimiento en X, Y que correspondan al plano normal del haz incidente, hasta que se obtenga una pequeña mancha luminosa. En seguida se ajusta en la dirección Z. Auxiliándose con el medidor de potencia se efectúan los ajustes finos, hasta que se obtiene la máxima intensidad y se observa el patrón de discos de Airy, Fig. II.3. En el otro lado se sigue el mismo procedimiento.

Paso 4: Se colocan las lentes, libres de aberraciones, en la distancia focal de las mismas; las que se utilizaron son de $f=800\text{mm}$, y un diámetro de 10cm. Para una alineación rápida se colo-

ca un espejo aluminizado en la parte superior de la lente, para hacer autocolimación.

Se alinean ambos haces, hasta lograr que coincidan en la región de interferencia, efectuando los ajustes finos necesarios con el divisor de haz, hasta obtener el 50% del total de la energía para cada uno.

II.9 SELECCION, CORTE Y EXPOSICION DE LAS PLACAS HOLOGRAFICAS.

Debido a que los registros holográficos incluyen frecuencias espaciales mucho mayores que las de una fotografía normal, las emulsiones holográficas de haluros de plata generalmente contienen un grano muy fino de estos, al punto de ser casi transparentes; este tipo de placas a la vez son de una sensibilidad muy baja. En la referencia bibliográfica 4 se encuentra un capítulo sobre "Materiales de Registro Holográfico", en el cual los autores describen el método de formación de hologramas, exposición, resolución de registro, ruido y características de exposición, así como los diversos materiales fotosensibles más usuales en holografía.

Una placa holográfica tiene la característica de tener asociada la transmitancia (T) de luz con la exposición de ésta¹¹ (E), lo cual quiere decir que existe una curva de comportamiento T-E. Fig. II.5

En ésta se observa que para exposiciones de baja irradiancia (lado izquierdo de la curva), el material fotográfico, una vez revelado, transmite casi toda la luz incidente, mientras que para exposiciones de alta irradiancia (lado derecho de la curva) la transmitancia de la luz es cercana a cero; esto significa que no permite el paso de la luz a través de la

película.

Para obtener una óptima exposición se trabaja en la región de la curva de exposición contra transmitancia, en la cual se tiene una relación de tipo lineal, ésta está dada por²⁷:

$$\xi(x,y) = t I(x,y) \quad (2.9)$$

Donde:

$\xi(x,y)$: distribución de exposición (J/cm^2).

$I(x,y)$: distribución de irradiancia expuesta ($watt/cm^2$).

t : duración de la exposición en segundos.

Para garantizar el registro lineal de las franjas de interferencia, el tiempo de exposición t se escoge de tal forma que la exposición ξ , dada por la ec. (2.8) esté cercana al centro de la porción lineal de la curva.

En la Tabla 3 se da una relación de las distintas placas holográficas que comercialmente están disponibles. Se seleccionó la 10E75 de Agfa-Gevaert³⁰ por disponer de ésta en el laboratorio, así como por sus características, las que son:

- . Sensibilidad a la longitud de onda del laser He-Ne (6238 \AA).
- . La energía de exposición requerida es de 20 erg/cm^2 .
- . Resolución de aproximadamente 2500 líneas/mm .

Dado que las placas holográficas 10E75 vienen en presentación de placas de dimensiones $10 \times 12 \text{ cm}$ se hacen cortes¹⁶, dependiendo de las dimensiones de las rejillas de difracción - que se desee obtener. En nuestro caso son de $2 \times 3 \text{ cm}$. El proceso de corte utilizado Fig. II.6, nos permitió obtener, en serie, 16 placas. Para almacenarlas se utiliza el recipiente de plástico opaco, negro, en el que vienen guardadas las películas de 35 mm .

Una vez teniendo todos los parámetros y materiales listos, se monta en el soporte, la placa holográfica. En seguida se expone ésta. Los tiempos de exposición se controlan con el obturador electrónico de que dispone el Radiómetro Universal²³. En una libreta se lleva el control de las rejillas, así como de los eventos que se observan.

II.10 REVELADO Y BLANQUEADO DE LAS PLACAS HOLOGRAFICAS.

El revelado es un proceso químico que tiene como finalidad el obtener una imagen permanente de la distribución de irradiancia del objeto.

En la sección anterior se mencionó que el material fotosensible se compone de haluros de plata; estos están dispersados en un coloide (usualmente gelatina). En las emulsiones se utiliza cloruro de plata, bromuro, yoduro o sus combinaciones; según el tipo de resolución que se desea obtener (caso de los fabricantes). En el Apéndice 2 se dan los procesos químicos por medio de los cuales se obtiene la imagen de un objeto en forma permanente.

Los químicos empleados en el proceso de revelado y fijado son los siguientes **:

- . Revelador D-19 y HC-110 de Kodak.
- . Fijador Rápido de Kodak.
- . Enjuague final Photo-Flo de Kodak.

La preparación de los mismos se lleva a cabo en base a las instrucciones del fabricante, utilizando agua destilada en cada una de las etapas. En la Tabla 4 se dan los pasos seguidos en el procedimiento de revelado y fijado. Sin embargo es conveniente señalar que durante las diversas etapas se deben extremar los cuidados en cuanto al agua empleada, ya que ésta

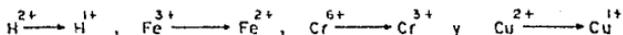
** 4,5,33

debe estar libre de suciedad, la temperatura siempre debe mantenerse a 21°C de preferencia. En los enjuagues se debe evitar el chorro de agua directo y, por supuesto, no tocar por ningún motivo la superficie de la película.

En un principio se observó que los patrones de interferencia obtenidos presentaban una serie de anillos (fenómeno conocido como los anillos de Newton), o franjas, dando como resultado una baja calidad en las rejillas obtenidas. El problema se solucionó adhiriendo la placa holográfica sobre un sustrato de vidrio, utilizando como agente adherente el agua, ya que el índice de refracción del agua y el vidrio son casi iguales.

Las rejillas holográficas obtenidas hasta esta etapa presentan una baja eficiencia de difracción, razón por la que se emplea la técnica del blanqueado,^{***} ésta consiste en convertir la plata en una sal de plata transparente; los baños de blanqueo normalmente contienen uno de los siguientes agentes oxidantes: cloruro mercúrico $HgCl_2$, cloruro férrico $FeCl_3$, ferricianuro de potasio $K_3Fe(CN)_6$, dicromato de amonio $(NH_4)_2Cr_2O_7$ y bromuro cúprico. $CuBr_2$

La oxidación de la plata $Ag \rightarrow Ag^+$ es acompañada por una reacción química en la que un ión metálico de valencia múltiple - es reducido de uno de alta valencia a uno de baja valencia.



La sal de plata resultante es usualmente un haluro de plata.

Para los propósitos de este trabajo se usa como agente oxidante el ferricianuro de potasio, en una solución al 5%. Se debe tener cuidado con el manejo de este tipo de compuestos, dada su toxicidad. En la Tabla 4 se dan los pasos seguidos en el blanqueado.

*** 4,19,33

Con esta técnica se encontró que la eficiencia de la difracción se incrementaba hasta en un 70%; los hologramas obtenidos con este procedimiento se les conoce como de fase.

Las rejillas de difracción obtenidas con esta técnica son conocidas como rejillas de transmisión.

II.11 RECUBRIMIENTO.

Para la obtención de rejillas de reflexión se procedió a la aluminización de las rejillas de transmisión obtenidas. El tipo de aluminio empleado fue el standard y la aluminización se llevó a cabo en una cámara de vacío.

Las rejillas que se obtuvieron con este proceso, en forma similar que las de transmisión, presentan una calidad bastante buena; éstas tienen una reflectancia de aproximadamente el 90% de la luz incidente, a una longitud $\lambda = 6328 \times 10^7 \text{ nm}$

Existe la posibilidad de utilizar otros tipos de recubrimientos* que confieren a las rejillas características especiales - Fig. II.7, tales como:

- MgF Para trabajar en la región de 120 a 200 nm.
- LiF Para trabajar en la región de 100 a 120 nm.
- Ag₂Si Para trabajar en la región del infrarrojo.
- SiO Para trabajar en regiones superiores a los 300 nm.

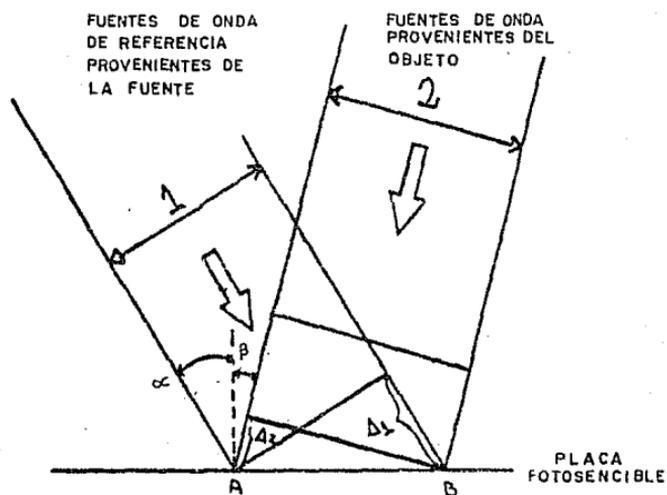


Figura II.1 Formación de una red de difracción holográfica

Ref. 6, Pág. 99

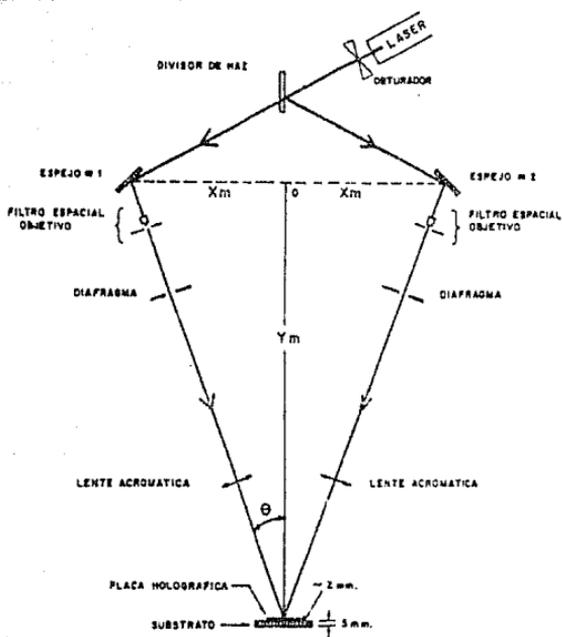


Fig. II.2 ARREGLO OPTICO PARA REJILLAS DE DIFRACCION HOLOGRAFICAS



Fig. II.3 Anillos de Airy, patrones de difracción que se observan a la salida del Pin-hole, en la etapa del filtro especial.

Ref. 13 , Pág. 376

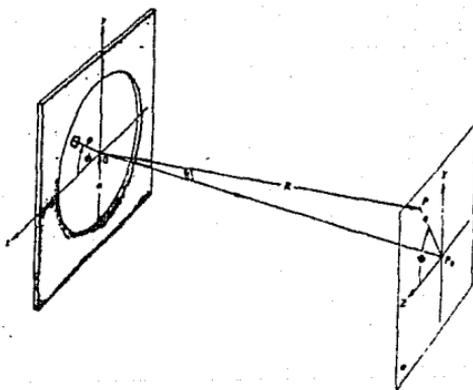


Fig. II.4 Geometría utilizada en la difracción de Fraunhofer para una abertura circular. Ref. 13 , Pág. 372

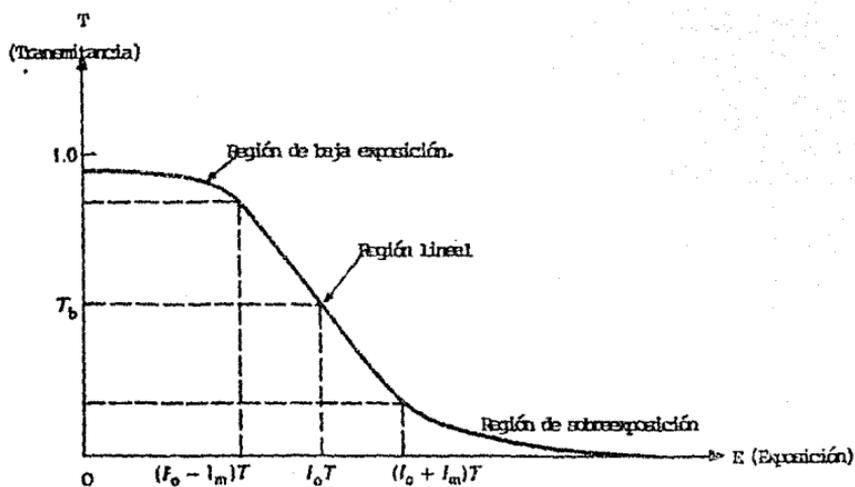


Fig. 11.5 Gráfica típica de transmitancia contra exposición (T-E) para una emulsión fotográfica. Ref. 27, Pág. 169

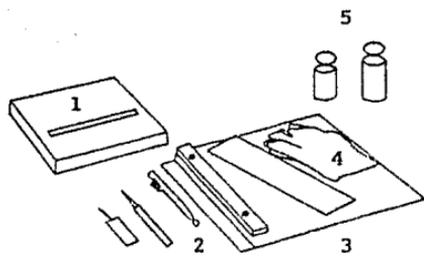


Fig. II.6 Material que se utiliza en el corte de las placas holográficas.

1. Placas holográficas
2. Rayadores de vidrio.
3. Guía para el rayado.
4. guantes de algodón.
5. Recipientes para el almacenaje de las placas cortadas.

Fig.II.6 (b) Dispositivo empleado en la guía del corte.

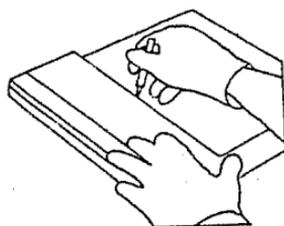
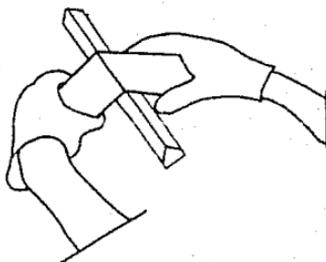


Fig. II.6(c) Rayado de la placa

Fig. II.6 (d) Fractura del corte de la placa. (En este caso se utilizó una llave Allen).



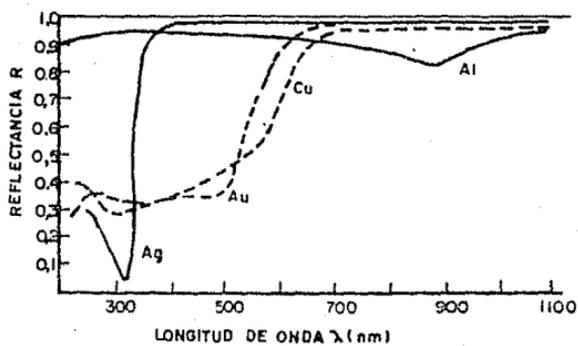


FIG.II.7 REFLECTANCIA TIPICA DE DISTINTOS METALES

Ref. 13. Pag. 88.

CAPITULO III

REJILLAS DE DIFRACCION OBTENIDAS Y SUS CARACTERIZACIONES

III.1 INTRODUCCION.

Variando los parametros de la ec. (2.5) se obtienen valores teóricos de las rejillas de difracción de baja, mediana y alta frecuencia espacial. La última etapa de este trabajo consiste en obtener experimentalmente las rejillas, al variar las dimensiones del arreglo óptico según los valores teóricos anteriores.

A continuación se caracteriza y prueba la calidad de las rejillas obtenidas, comparándolas a la vez con las convencionales. Para esto se utiliza una rejilla de difracción comercial, con frecuencia espacial de 472 líneas/mm. Parte de las caracterizaciones son de tipo cualitativo. Para ello se seleccionan los parámetros más importantes, tomados del catálogo de las rejillas comerciales.^{6,24}

En la Tabla 5 se listan 6 de las mejores rejillas obtenidas, con sus características básicas; finalmente se resume en la Tabla 6 un cuadro comparativo entre las rejillas de difracción holográficas y las convencionales (planas para ambos casos).

III.2 FRECUENCIA ESPACIAL.

La frecuencia espacial se determinó por observación directa al microscopio y por medición del ángulo de difracción de un haz que incide sobre la rejilla en forma normal a ésta Fig. II.2.

Para la primera se utilizó un microscopio marca Versamet, Modelo 2 Unión con capacidad de amplificar hasta mil aumentos. El mismo tiene una retícula de medición dada en micras (μm); en este tipo de microscopio sólo se pueden tomar lecturas de rejillas cuya frecuencia espacial es menor de 500 líneas/mm. La Fig. III.1(a) corresponde a la fotografía tomadas a una rejilla con frecuencia espacial de 195.3 líneas/mm (experimental).

En el método empleado para medir la dispersión del haz de laser se emplea el arreglo que se muestra en la Fig. III.2, este arreglo permite medir el ángulo de difracción para los distintos órdenes espectrales. Partiendo de la ecuación general de la rejilla ec. (.1.18) y tomando el ángulo de incidencia normal a la placa $\alpha=0$ se obtiene la ecuación siguiente:

$$a \operatorname{sen} \beta = m\lambda \quad (3.1)$$

La frecuencia espacial está dada como $N=d^{-1}$, despejando a de la ecuación anterior nos queda como:

$$N = \frac{\operatorname{sen} \beta}{m\lambda} \quad (3.2)$$

Aplicando la ec. (3.2) para los distintos ángulos β y órdenes m , se obtienen diferentes valores de la frecuencia espacial para cada una de las rejillas, Tabla 5. En esta Tabla se listan seis de las mejores rejillas obtenidas con sus valores - teóricos y experimentales, así como los valores del arreglo óptico.

III.3 ORDEN ESPECTRAL DE LA REJILLA DE DIFRACCION.

La interferencia constructiva de la luz proveniente de los diversos surcos de la rejilla únicamente requiere que cada rayo esté retardado en fase por un múltiplo entero de la longitud de onda; esto sucede cuando el primer retraso es en una

longitud de onda (λ), con esto se obtiene el primer orden espectral ($m \neq 1$), si el retraso es en dos longitudes de onda (2λ) se trata del segundo orden espectral ($m \neq 2$) y así en forma sucesiva. En el orden espectral $m=0$, la rejilla no difractada se comporta como un espejo.

El primer orden espectral aparece a cada lado del orden espectral cero y es seguido de intervalos alternados de oscuridad por los espectros de mayor orden, donde para el primer orden corresponde una longitud de onda λ , para el segundo orden $\lambda/2$ y así sucesivamente.

Uno de los aspectos que se observan en una rejilla de difracción convencional para múltiples órdenes, es que estos se lleguen a traslapar entre sí. esto se debe a que al incidir luz de diversas longitudes de onda sobre la rejilla éstas producen máximos de difracción a diferentes ángulos β excepto para $m=0$. Para saber hasta que punto estas líneas están claramente delimitadas se introduce el concepto de RESOLUCION, Sección III.6.

En el caso especial de nuestras rejillas de difracción holográfica con perfil senoidal se tienen órdenes $m=0$ y $m \neq 1$, sin embargo, se obtuvieron unas pocas rejillas de $N \approx 200$ líneas/mm, en donde se aprecian más órdenes, esto probablemente se debió a deformaciones en el perfil de los surcos.

III.4 DISPERSION ANGULAR.

La dispersión angular (D) es la separación angular $d\beta$ obtenida para dos diferentes longitudes de onda de luz difractada, las cuales están dadas por $d\lambda$. De la ecuación general de la rejilla ec.(1.18) se diferencia respecto a β , esto es:¹⁵

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \left(a(\sin \alpha \pm \sin \theta) \right) = m\lambda \quad (3.3)$$

Considerando el ángulo de incidencia como constante o normal a la red, se tiene que la dispersión angular D ec. (3.3) queda:

$$D = \frac{\partial \beta}{\partial \lambda} = \frac{m}{a \cos \beta} = \frac{1}{\lambda} = \frac{(\sin \alpha + \sin \beta)}{\cos \beta} \quad (3.4)$$

De la ec. (3.4) y de las medidas realizadas en el laboratorio, se encontró que para una longitud de onda dada la dispersión depende únicamente de los ángulos de incidencia y difracción.

III.5 DISPERSION LINEAL.

La dispersión lineal D_L de un sistema óptico con una rejilla es el recíproco del producto de la dispersión angular por la longitud focal del lente (f) del sistema óptico, está dada por ^{6,15} :

$$D_L = \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} \left(\frac{1}{f} \right) = \frac{a \cos \beta}{mf} \quad (3.5)$$

Considerando que el plano focal del instrumento es perpendicular al haz difractado. Puede darse la situación de que el plano focal no es normal al rayo difractado sino que tiene una cierta inclinación, por lo que la dispersión lineal queda como:

$$D_L = \frac{1}{fF} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} \quad (3.6)$$

Donde:

$F = 1/\cos \epsilon$:plano focal del instrumento.

Un ejemplo de dispersión para todas las longitudes de onda que produce la rejilla a un ángulo fijo, tal es el caso de un espectrográfo, donde el espectro se registra en una placa fotosensible, o un fotodetector.²⁵

En los monocromadores, en los cuales la luz penetra al instrumento a través de una rendija fija y una sección del espectro es seleccionada para permitirle pasar a través de una segunda rendija.²⁶ En ambos ejemplos el espectro es rastreado al rotar la rejilla, así que los ángulos α y β de la ecuación general de la rejilla varía con la longitud de onda. En tales instrumentos a menudo se necesita conocer la rotación de la rejilla para la longitud de onda deseada. Para hacerlo se expresa a cen términos de β y la desviación angular (esto es, la constante $\alpha = \beta + \delta$).

En un caso Littrow, la dispersión queda como:

$$D_L = \frac{\lambda}{\text{tg } \beta} \left(\frac{1}{f} \right) \quad (3.7)$$

En este caso el ángulo para el que se debe rotar la rejilla y obtener un cambio dado en la longitud de onda es tan sólo la mitad del ángulo opuesto a la misma longitud del espectro en un espectrógrafo. Este resultado no es sorprendente ya que se está familiarizado con el hecho de que si se rota un espejo por un ángulo θ el reflejo rotará 2θ . Sin embargo es necesario tener mucho cuidado con el espectrógrafo ya que es importante distinguir entre la rotación de la rejilla y la dispersión del espectro.

III.6 RESOLUCION Y PODER RESOLUTIVO.

Los términos resolución y poder resolutivo se utilizan para describir la capacidad de separar líneas espectrales, las cuales se encuentran cercanas entre sí. La resolución de un instrumento se relaciona con la capacidad de poder detectar el menor cambio de longitud de onda. Mientras que el poder resolutivo de una rejilla es la razón entre el menor cambio

de longitud de onda, que la rejilla puede resolver y la longitud de onda a la cual está operando.^{6,15,24}

El poder resolutivo es una propiedad de la rejilla, mientras que la resolución es una función, tanto de la rejilla como del instrumento en el cual es colocada, y puede ser limitada por otros factores, tales como la resolución de la placa fotosensible y el tamaño de entrada/salida de la rejilla.

El poder resolutivo se define como:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3.8)$$

Donde:

λ : longitud de onda promedio de dos líneas espectrales que además se pueden distinguir como diferentes.

$\Delta\lambda$: mínima diferencia resoluble de longitudes de onda.

El poder separador de una rejilla de difracción, normalmente, se determina por el criterio de Rayleigh, el cual dice lo siguiente: "Para que los máximos principales estén en el límite de ser separados, deben tener, de acuerdo con este criterio, una separación angular ($d\beta$) tal que el máximo de una línea espectral (λ_1) coincida con el primer mínimo de la segunda línea espectral (λ_2)", la ec. (3.8) puede ser escrita en su límite teórico como:

$$R = Nm \quad (3.9)$$

Donde:

N : número total de franjas (surcos) de la rejilla.

De la ecuación general de la rejilla para m , se tiene que:

$$R = \frac{W}{\lambda} (\sin\alpha + \sin\beta) \quad (3.10)$$

Donde:

W = Na (ancho de la rejilla).

En esta ecuación se observa que al máximo valor de R sucede cuando $\sin \alpha + \sin \beta = 2$, esto es $\alpha = \beta = \pi/2$, quedando como sigue:

$$R = \frac{2W}{\lambda} \quad (3.11)$$

En esta ecuación se nota que la resolución espectral está determinada por el ancho efectivo de la rejilla y la longitud de onda.

III.7 RANGO ESPECTRAL LIBRE.

Una diferencia de la rejilla, comparada con un prisma, es que genera más de un orden difractado y, por lo tanto, más de un espectro; ya que si sobre una rejilla se hacen incidir un amplio intervalo de longitudes de onda, el espectro se trasladará y podrá llegar a ser confuso para mayores órdenes m .

En el caso de la configuración Littrow, diversas longitudes de onda se superponen, éstas son todas las longitudes para las cuales $m\lambda = \text{cte}$.

La relación $\sin \alpha + \sin \beta = mN\lambda$ se puede escribir como:^{6,5}

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{mN}{\sin \alpha + \sin \beta} \quad (3.12)$$

Donde:

σ : número de onda.

La radiación superpuesta en el ángulo β tiene un número de ondas en una progresión aritmética $\sigma_1, 2\sigma_2, 3\sigma_3, \dots$

Si se desea evitar el traslape de los espectros es necesario que la radiación incidente se componga de vibraciones de números de onda contenidas en el intervalo máximo $\Delta\sigma$. Por lo que el intervalo de una longitud de onda para dos órdenes

espectrales adyacentes que no se traslapen se le conoce como rango espectral libre, esto significa que dos líneas de longitud de onda λ y $\lambda + \Delta\lambda$ en orden sucesivo m y $m+1$, coinciden con la media del intervalo de la longitud de onda $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ en la que el m -ésimo orden la longitud de onda λ_2 coincide con el $(m+1)$ -ésimo orden de la longitud de onda λ_1 .

Lo anterior lo podemos escribir como:

$$d(\sin\alpha \pm \sin\beta) = m\lambda \quad (3.13)$$

$$d(\sin\alpha \pm \sin\beta) = m(\lambda + \Delta\lambda) \quad (3.14)$$

Igualando ambas ecuaciones se tiene que $\Delta\lambda = \lambda/m$ y se define a $F_\lambda = \Delta\lambda$ como el rango espectral libre, usando la ec. (3.12) se tiene que:

$$F_\sigma = F_\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (3.15)$$

III.8 RESPLANDOR (BLAZE).

Para darle un mejor uso a las rejillas se debe concentrar la energía espectral en cualquiera de los órdenes (excepto en el orden 0). Por mucho tiempo se ha sabido que la distribución de la energía en los distintos órdenes depende de la forma de los surcos. En el caso de las rejillas convencionales el elemento reflectante (surco) tiene un cierto ángulo de inclinación respecto a la superficie de la rejilla. A este ángulo θ_B se le conoce como de resplandor, también es el ángulo de incidencia en el cual se tiene que trabajar para obtener el efecto de resplandor, el cual depende de la longitud de onda.

La relación entre θ_B, λ Fig. 1.9 se obtiene al aplicar la ecuación de la rejilla para la configuración de Littrow, esto es $\alpha = \beta = \theta_B$ obteniéndose la relación siguiente:

$$2d \sin\theta_B = m\lambda \quad (3.16)$$

Donde:

λ_0 : longitud de onda de resplandor.

Por convención general, cuando se habla del resplandor de la rejilla en λ_0 , esto implica que la rejilla resplandece en el primer orden para esta longitud de onda y para la configuración Littrow.

En el caso de las rejillas holográficas la eficiencia teórica siempre será de aproximadamente 1/3 de la que corresponde a la rejilla de resplandor, esto es una desventaja para las rejillas holográficas, comparadas con las de resplandor en el UV.

III.9 EFICIENCIA.

La eficiencia está dada como razón de la longitud de onda λ en el orden m de interés y la energía reflejada por un espejo bajo las mismas condiciones de trabajo.

La variación de la eficiencia con la longitud de onda es una de las características más importantes de una rejilla de difracción.

La máxima eficiencia de la rejilla sucede cuando el ángulo del surco es tal que el ángulo de reflexión para el ángulo de incidencia (α) es igual al de difracción (β), esto es, el ángulo del surco $\alpha = \beta$ = ángulo de resplandor, el pico de la máxima eficiencia se forma si ^{6,15}:

$$\begin{aligned} &= 2 \operatorname{Sen} \alpha \\ \lambda_0 &= 2 \operatorname{Sen} \beta & (3.17) \\ &= 2 \operatorname{Sen} \theta_0 \end{aligned}$$

En estas ecuaciones se aprecia que el comportamiento de la red difractada está en función de la longitud de onda λ_0 , del

ángulo α , de la geometría del surco y el orden espectral que en este caso es $m=1$

En la determinación de la eficiencia para las rejillas holográficas, esto se hizo en la condición de Littrow. El procedimiento consistió en medir la energía difractada por la rejilla a una longitud de onda $\lambda=6328 \times 10^{-7}$ mm, entre la energía reflejada por un espejo (mismo aluminizado), en idénticas condiciones. Posteriormente se repite el procedimiento con una convencional (características similares). Se encontró que la eficiencia de una rejilla holográfica es por lo menos del 65-70% de la convencional.

III.10 ANOMALIAS.

En las rejillas de difracción convencionales se llega a observar en el espectro obtenido una serie de líneas falsas, así como "fantasmas" conocidos como anomalías de Wood, lo cual se debe fundamentalmente a las variaciones de periodicidad en los surcos ^{6,10,15}.

Las anomalías de Wood se manifiestan sobre la región espectral en la que existe una cierta cantidad de energía difractada en forma de líneas agudas, que aumentan o disminuyen en intensidad con respecto a otras longitudes de onda difractadas, estas anomalías son sumamente sensibles al estado de polarización del haz incidente.

En el proceso comparativo entre la rejilla de difracción convencional y las holográficas que se obtuvieron. En estas últimas prácticamente no se aprecian "fantasmas", asimismo se aprecia que la luz del espectro es menos difusa, lo que es una ventaja importante, que en las rejillas de difracción holográficas.

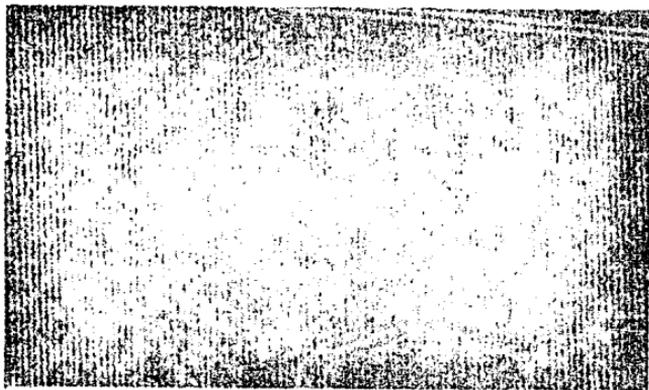


Fig. III.1(a)

- 201.2 líneas/mm (teórica); 195.3 líneas/mm obtenidas por medición directa en el microscopio.
- Distancia entre surcos $5\mu\text{m}$
- Ocular 10X; objetivo 20X



Fig. III. (b)

- 743.1 líneas/mm (teórica); 722.3 líneas/mm obtenidas con la medición del ángulo de difracción de la rejilla.
- Distancia entre surcos $1.4\mu\text{m}$
- Ocular 10X; objetivo 100X

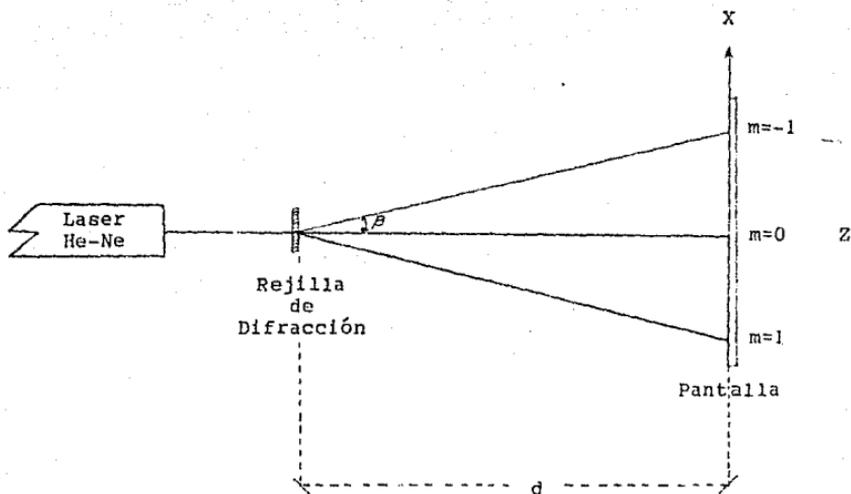


Fig. III.2 Arreglo experimental para determinar el ángulo de difracción para el orden $m \pm 1$ de las rejillas de difracción holográficas obtenidas.

CONCLUSIONES

Este trabajo de tesis tuvo dos objetivos:

- a) Obtención de rejillas de difracción holográficas.
- b) Que el mismo sirva como un manual de procedimiento.

Las rejillas de difracción holográficas obtenidas presentan una serie de ventajas y desventajas sobre las convencionales. De las primeras se tiene que:

- El arreglo es sencillo y versátil y permite obtener rejillas en serie.
- Como resultado de la variación de los parámetros x_m y y_m se obtuvieron rejillas de baja, mediana y alta frecuencia espacial.
- Este tipo de rejillas son mucho más económicas que las convencionales.
- Con el procedimiento de blanqueado se obtuvo un incremento en la eficiencia de difracción de hasta un 70%.
- Dependiendo del tipo de recubrimiento de la rejilla, se selecciona el intervalo espectral en el que se deseé trabajar.

Las desventajas que presentan son las siguientes:

- Este tipo de arreglo dificulta obtener rejillas de baja frecuencia espacial (< 150 líneas/mm).
- Menor eficiencia que las convencionales.
- Las dimensiones de la rejilla están limitadas por las aberraciones que introduzca el sistema óptico que las produce.

Lo anterior nos demuestra que existe un amplio terreno para mejorar la calidad de las rejillas, así como también para diversificar el tipo de éstas, para lo cual se propone se trabaje en los siguientes puntos:

- . Con el arreglo óptico intentar rejillas mejor caracterizadas para $N > 2000$ líneas/mm. (Con el material fotosensible adecuado).
- . Rejillas con resplandor (Blaze).
- . Mejorar la eficiencia con métodos de blanqueado y con diferentes recubrimientos.
- . Trabajar en la obtención de rejillas con el método de gelatina dicromada.
- . Obtención de rejillas cóncavas.
- . Diseñar un sistema automático para la fabricación en serie.

Es conveniente mencionar que las rejillas de difracción holográficas se obtuvieron en el Laboratorio de Optica Aplicada del Departamento de Diseño del Centro de Instrumentos de la U.N.A.M.

TABLA 1

VALORES DE LOS PARAMETROS PARA ARREGLO OPTICO

PARA $\lambda_m = 125 \text{ mm}$ $\lambda = 6328 \times 10^{-7} \text{ mm}$

$N(1/\text{mm})$	$a (\mu\text{m})$	$\lambda_m (\text{mm})$	θ°
100	10.0	3948.7	1.81
200	5.0	1971.3	3.62
250	4.0	1575.3	4.53
300	3.3	1310.9	5.44
400	2.5	979.7	7.27

PARA $\lambda_m = 250 \text{ mm}$ $\lambda = 6328 \times 10^{-7} \text{ mm}$

500	2.0	1560.3	9.10
550	1.8	1414.6	10.02
600	1.6	1292.9	10.94
650	1.5	1189.6	11.86
700	1.4	1100.7	12.79

PARA $\lambda_m = 480 \text{ mm}$ $\lambda = 6328 \times 10^{-7} \text{ mm}$

750	1.3	1964.9	13.72
800	1.2	1834.5	14.66
900	1.1	1615.8	16.54
1000	1.00	1439.1	18.44
1075	0.93	1327.0	19.88
1800	0.55	692.7	34.71
1875	0.53	651.3	36.38

TABLA 2

SELECCION DE FILTRO ESPACIAL

Objetivo de Microscopio	Longitud focal (mm)	Distancia de trabajo (mm)	Diámetro mínimo de entrada	Diámetro del filtro calculado en (μ m)	Diámetro del filtro disponible en nuestro caso (μ m)
5X	25.5	15.2	7	16.1	25
10X	14.8	6.8	8	9.3	15
20X	8.3	1.9	7	5.2	10
40X	4.3	0.45	6	2.7	5
60X	2.9	0.38	5	1.8	-

TABLA 3

MATERIAL FOTOSENSIBLE COMERCIAL

KODAK PRODUCT	EXPOSURE TO ACHIEVE D = 1.0 (ergs/cm ²)								RESOLVING POWER @ TOC		GRANULARITY @ D = 1.0		CONTRAST γ	EMULSION THICKNESS μm	STANDARD BASE	DEVELOPMENT
	HeCd 3250	HeCd 4416	Ar 4880	Ar 5145	Nd:YAG 5320	HeNe 6328	Kr 6471	RUBY 6943	1000:1	1.6:1	48μm	6μm				
Spectroscopic Type 649-F Plate/Film	--	500	600	600	1000	600	800	5000+	2000+	--	<5	<10	5/4	17/6	0.040 Unb or Bkd/A5B	6-8' D-19
Holographic Plate, Type 120 (-02 or -01)/Film, SO-173	--	500	--	--	--	400	400	400	2000+	--	<5	<10	5/4	6	0.040 Unb or Bkd/E4B	6-8' D-19
Special Plate, Type 125 (-02 or -01) /Film, SO-424	20	60	50	50	100	--	--	--	1250	630	<5	13	4	7/3	0.040 Unb or Bkd/A5CB	6-8' D-19
High Speed Holographic Plate, Type 131 (-02 or -01)/Film SO-253	--	20-35	40-65	25-35	20-30	5-8	3.5-6	1000+	1250	800	<5	14	7	9	0.040 Unb or Bkd/E4B	6-8' D-19
Technical Pan Film, 2415	--	0.4	0.8	0.8	0.7	0.4	0.3	--	320	125	0	--	1-3	7.5	E4AH	6-8' HC-110(D) 4' D-19
AGFA-GEVAERT																
8E56HD-AHI Plate/Film	--	350	600	350	300	--	--	--	2500+	--	--	--	4	7	0.060 Bkd/E7B	6-8' D-19
8E75HD-NAH Plate/Film	--	400	--	--	450	150	150	100	2500+	--	--	--	3	7	0.060 Unb/E7C	6-8' D-19
10E56-NAH Plate/Film	--	60	30	20	20	--	--	--	1500+	--	--	--	7	7	0.060 Unb/E7B	6-8' D-19
10E75-NAH Plate/Film	--	60	--	120	60	20	20	20	1500+	--	--	--	4	7	0.060 Unb/E7C	6-8' D-19

TABLA 4
PROCEDIMIENTO DE REVELADO Y BLANQUEADO DE PLACAS HOLOGRAFICAS

PASOS	PROCEDIMIENTO	MATERIAL EMPLEADO	TIEMPO	TEMPERATURA	SUGERENCIAS / PRECAUCIONES
1	REVELADO	HC-110 D-19	6.7 MIN.	210 C	AGITAR SUAVEMENTE 20 SEG. POR 10 SEG. DE RE- POSO
2	ENJUAGAR BAÑO DE STOP	AGUA CORRIENTE BAÑO DE STOP	20 SEG.	210 C	AGITAR VIGOROSAMENTE
3	FIJACION	KODAK RAPID FIXER	5 MIN.	210 C	SIMILAR QUE EN EL PASO 1
4	ENJUAGAR	AGUA CORRIENTE	1 MIN.	210 C	SIMILAR QUE EN EL PASO 2
5	REMOVER EL FIJADOR	KODAK HYPO CLEARING AGENT	1.5 MIN.	210 C	AGITAR SUAVEMENTE
6	ENJUAGAR	AGUA CORRIENTE	5 MIN.	210 C	AGUA RENOVANDOSE SIN PERMITIR QUE EL CHORRO LE PEGUE DIRECTO A LA PLACA
7	REMOVER EL HYPO CLEARING AGENT	ALCOHOL METILICO	5 MIN.	AMBIENTAL	PRECAUCION SEGUIR LAS RECOMENDACIONES DEL FA- BRICANTE
8	ENJUAGAR	AGUA CORRIENTE	1 MIN.	210 C	SIMILAR QUE EL PASO 6
9	BLANQUEADO	FERRICIANURO DE POTASIO AL 5%	3 MIN.	300 C	SE SUMERGEN LAS PLACAS Y SE AGITA SUAVEMENTE, MANTENIENDO LA TEMPERATURA CONSTANTE.
10	ENJUAGAR	AGUA CORRIENTE FOTO-FLO	4 MIN. 2 MIN.	210 C	SIMILAR QUE EL PASO 6, AGITAR SUAVEMENTE
11	DESIGNATAION	ALCOHOL ETILICO ALCOHOL ISOPROPILICO	1.5 MIN. 1.5 MIN.	210 C	AGITAR LAS PLACAS EN CADA CASO. PROCURANDO MAN- TENER LA TEMPERATURA CONSTANTE
12	SECADO	MEDIO AMBIENTE LIBRE DE POLVO	HASTA ESTAR COM- PLETAMENTE SECO	210 C	PROCURAR QUE LA PLACA ESTE VERTICAL

TABLA 5

CARACTERÍSTICAS DE LAS REJILLAS DE DIFRACCIÓN HOLOGRÁFICAS

REJILLAS DE DIFRACCIÓN#	Y _m (mm) ±5	X _m (mm) ±5	ÁNGULO DE INCIDENCIA	ÁNGULO DE DIFRACCIÓN (TEÓRICA)	N 1/mm	N 1/mm EXPERIMENTAL
1	1960	125	(3.6) ^o	(7.0) ^o	202.2	195.3
2	1950	155	(4.5) ^o	(8.9) ^o	250.4	244.5
3	1010	155	(8.7) ^o	(17.2) ^o	479.4	467.3
4	1980	480	(13.6) ^o	(27.2) ^o	743.1	722.3
5	1320	480	(19.9) ^o	(41.8) ^o	1075.7	1053.3
6	650	480	(36.4) ^o	75 ^o	1875.5	1526

TABLA 6

CUADRO COMPARATIVO DE LAS REJILLAS DE DIFRACCION
HOLOGRAFICAS Y LAS CONVENCIONALES (POR RAYADO)

<u>Propiedades Físicas:</u>	<u>Rejillas Planas Convencionales:</u>	<u>Rejillas Planas Holográficas:</u>
1. Número de líneas por mm (N).	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibles de 20 a 4000 líneas /mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibles de 200 a 2000 líneas/mm (con un laser de He-Ne y con placas fotosensibles 10E75 de Agfa-Gevaert) Sin embargo se puede obtener una frecuencia espacial mayor utilizando un laser de Argón (4800Å) y como material fotosensible gelatinas dicromadas.
2. Tamaño de la rejilla.	<ul style="list-style-type: none"> • Existen rejillas de difracción de $1m \times 1m$ • La resolución mínima deseada puede ser un factor al decidir el tamaño. • El tamaño generalmente determina el costo de las mismas. • Para el usuario que está en la posición de seleccionar el número de líneas por mm. le puede resultar ventajosa una rejilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Las rejillas holográficas pueden estar disponibles en tamaños comparables a las convencionales. • El tamaño de la rejilla está limitado por las aberraciones que introduzca el sistema óptico que las produce. • Para el usuario que está en la posición de seleccionar el número de líneas por mm. le

Propiedades Físicas:

Rejillas Planas Convencionales:

lla menor con una densidad de rayado mayor.

Rejillas Planas Holográficas:

puede resultar ventajosa una rejilla menor con una densidad de rayado mayor.

3. Intervalo espectral.

Disponible desde el ultravioleta, hasta el infrarrojo.

Disponible principalmente para cercano al ultravioleta, hasta el cercano al infrarrojo.

4. Intervalo espectral libre.

Depende del número de líneas por milímetro. En este tipo de rejillas se pueden obtener órdenes espectrales claramente separados.

En longitudes de onda más cortas las rejillas holográficas pueden ofrecer ventajas para varias aplicaciones.

Igual que las rejillas convencionales.

El intervalo espectral puede ser determinado por el arreglo óptico que se utiliza para su obtención.

5. Eficiencia.

Las convencionales son más eficientes que las holográficas.

Depende del área de la rejilla el ángulo del surco y la longitud de onda.

La eficiencia máxima depende de la razón de la longitud de onda λ en el orden m de interés y la energía reflejada

La eficiencia máxima depende de la razón de la longitud de onda λ en el orden m de interés y la energía reflejada por un espejo bajo las mismas condiciones de trabajo.

En la mayoría de los casos se puede obtener una alta eficiencia, aunque ésta es

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Propiedades Físicas:

Rejillas Planas Convencionales:

Rejillas Planas Holográficas:

6. Resolución.
- Depende del orden espectral y del ancho del surco.
 - Depende de la longitud de onda y del intervalo espectral en que se trabaje.
 - Entre más fino es el espaciado, mayor es la resolución.
7. Fantasmas y luz difusa.
- En algunas rejillas se llegan a apreciar anomalías de Wood (fantasmas), así como difusión de la luz.
8. Recubrimiento.
- Los recubrimientos a base de Al, Au, Pt, MgF_2 , LiF y SiO_2 se utilizan para la selección de ciertos intervalos espectrales basados en la característica de reflectancia
- Fig. II.7. Asimismo estos
- generalmente más baja que las convencionales.
- Depende del ancho del surco, del intervalo espectral y la longitud de onda en que se trabaje.
- Entre más fino es el espaciado, mayor es la resolución.
- En este tipo de rejillas los fantasmas son muy difíciles de apreciar, por otra parte la luz difusa es mucho menor que en las convencionales.
- Similar que las convencionales.

Propiedades Físicas:

Rejillas Planas Convencionales:

Rejillas Planas Holográficas:

9. Cuidados.

recubrimientos sirven como protección del medio ambiente.

Una rejilla es más vulnerable que la superficie de un espejo sin cubierta; por consiguiente nunca se debe tocar. Siempre deben ser evitados: huellas digitales, humo o limpieza.

La limpieza, de llegarse a efectuar, se hace generalmente con agentes químicos que remueven partículas de polvo o grasa (según las recomendaciones del fabricante). Posteriormente pueden ser recubiertas con un material de características iguales; sin embargo este procedimiento de limpieza puede ocasionar que la rejilla pierda algunas propiedades.

10. Precio.

Los factores principales que afectan el precio son el ta-

Igual que las rejillas convencionales.

Se debe tener extremo cuidado a las variaciones extremas de temperatura y humedad ya que éstas pueden ocasionar deformaciones en los surcos.

Teniendo en el laboratorio de óptica, los elementos necesarios,

Propiedades Físicas:

Rejillas Planas Convencionales:

maño y densidad de los
surcos.

Rejillas Planas Holográficas:

el costo de las rejillas holográ-
fica llega a ser incluso menor al 10%
del costo de una convencional con
características similares.

APENDICE 1

DESARROLLO DE LA ECUACION PARAMETRICA DEL ARREGLO OPTICO PROPUESTO

De la ecuación propuesta para el arreglo de la Fig. II.2 $2a \text{Sen} \theta = m\lambda$ y de la relación trigonométrica que rige en dicho arreglo para el ángulo θ , $\text{tg} \theta = \frac{X_m}{Y_m}$ se tiene que:

$$2a \text{sen} \theta = m\lambda \quad \Rightarrow \quad \text{sen} \theta = m\lambda / 2a \quad (1)$$

$$\text{Ahora como } \text{tg} \theta = \frac{\text{Sen} \theta}{\text{Cos} \theta} = \frac{X_m}{Y_m} \quad (2)$$

De ahí que igualando las ecuaciones (1) y (2)

$\text{tg} \theta = \frac{m\lambda}{2a} = \frac{X_m}{Y_m}$; así como utilizando la identidad trigonométrica $\text{Sen}^2 \theta + \text{Cos}^2 \theta = 1 \Rightarrow \text{Cos} \theta = (1 - \text{Sen}^2 \theta)^{1/2}$

$\frac{m\lambda}{2a} = \frac{X_m}{Y_m (1 - (\frac{m\lambda}{2a})^2)^{1/2}}$; despejando Y_m y efectuando las operaciones algebraicas necesarias, se tiene que:

$$Y_m = X_m \left[\frac{4a^2}{m^2 \lambda^2} - 1 \right]^{1/2} \quad ; \text{ tomando } m=1 \text{ y } a=N^{-1}$$

$$Y_m = X_m \left[\frac{4}{(N \lambda)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad ; \text{ con la condición de que } N \leq 2/\lambda$$

Para el caso particular que aquí se utiliza $\lambda = 6328 \times 10^{-7}$ mm, se tiene que $N \leq 3160$ líneas/mm.

APENDICE 2

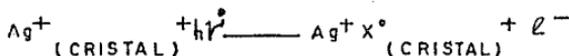
INFORMACION SOBRE LOS PROCESOS FOTOGRAFICOS

Los procesos fotográficos básicos se resumen como:

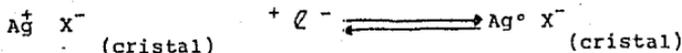
- . Un medio fotosensible (emulsión).
- . Exposición a radiación para producir una imagen invisible (latente).
- . Revelado para proporcionar una imagen visible (reproducción).
- . Fijado para proporcionar una imagen permanente.

Los haluros de plata son cristales con una estructura cúbica en los que cada ión de plata Ag^+ está rodeado por seis iones halúricos cercanos X^- y viceversa.

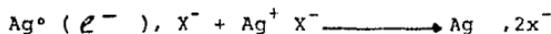
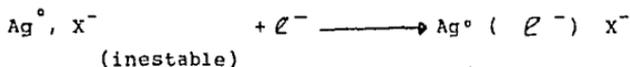
Formación de imagen latente . El cristal haluro de plata es un fotoconductor del tipo n con una banda de valencia de electrones localizados, y con una banda de conducción en la cual los electrones inyectados son libres de emigrar por todo el cristal, hasta ser agrupados por un enrejado. Cuando un fotón de suficiente energía es absorbido por un cristal, un electrón es promovido a la banda de conducción dejando atrás un hoyo positivo, representado por un átomo de halógeno libre.



El electrón libre emigra hasta ser atrapado por un defecto del enrejado, éste puede ser un átomo de plata Ag° . Este electrón atrapado se reduce a un ión de plata Ag° de la vecindad para producir un átomo de plata.



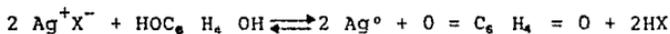
El átomo es inestable, sin embargo tiene un promedio de vida estimado en aproximadamente un segundo; si durante esta vida es atrapado por otro electrón, se agregan dos átomos, lográndose así la estabilidad.



Estos átomos estables no constituyen una imagen latente, esto es, no proporcionan un cristal revelable, ya que se requiere al menos de cuatro átomos para proporcionar un cristal revelable. Los dos átomos agregados, permaneciendo estables, pueden atrapar electrones migratorios adicionales para producir una imagen latente. Esto es:



Revelado. Los haluros de plata pueden ser químicamente reducidos a plata metálica por un número de agentes reductores. La reacción total para esta reducción se da como:



El revelador más común es la hidroquinina, el producto de la reducción es plata metálica y la forma oxidada del revelador es en este caso quinina y ácido halúrico.

Fijado. Los cristales de haluro de plata no expuestos después del revelado son aun fotosensibles y, a menos que sean removidos, limita la vida promedio de la emulsión revelada. Los haluros de plata son insolubles en agua y son solubiliza-

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Bader, T.R., App. Opt. 14, 2818 (1975).
- 2.- Bargallo, M., "Tratado de Química Inorgánica" (Porrúa México, 1972).
- 3.- Born, M. y Wolf, E., "Principles of Optics" (Pergamon, New York, 1964).
- 4.- Caulfield, H.J., "Handbook of Optical Holography" (Academic Press, New York, 1979).
- 5.- Collier, R.J., Burckhard, C. y Lin, L.H., "Optical Holography" (Academic Press, New York, 1971).
- 6.- Cruz, E. "Aplicaciones y Estudio General de las Rejillas de Difracción", (Tesis de Licenciatura, UNAM, 1979).
- 7.- Chang, B.J., Opt. Commun. 17, 270 (1976).
- 8.- Dravins, D., App. Opt. 17, 404 (1978).
- 9.- Firth, K., GEC Journal of Research, 3, 1 (1985).
- 10.- Gime, G.W., Beaumont, J.H., y West, J.B., App. Opt. 14, 2317 (1975).
- 11.- Goodman, J.W., "Introduction to Fourier Optics", (McGraw-Hill, New York, 1968).
- 12.- Hecht, E., "Teoría y Problemas de Optica", (McGraw-Hill, New York, 1976).
- 13.- Hecht, E. y Zajac, A. "Optica", (Fondo Educativo Interamericano, U.S.A., 1977).
- 14.- Jenkins, F.A. y White, H.E., "Fundamentals of Optics", (McGraw-Hill, New York, 1976).
- 15.- Jobin-Yvon S.A. "Handbook of Diffraction Gratings, Ruled and Holographic", (Laboratory Jobin-Yvon, S.A., New York).

- 16.- Kodak-Eastman Company, "Plates and Films for Scientific Photography", (Kodak, Cat. 1459742, E.E.U.U.).
- 17.- Labeyrie, A. y flamand, J., Opt. Commun. 1, 5 (1969).
- 18.- Loewen, E.G., Mavienre, M. y Maystre, App. Opt. 16, 2711 (1977).
- 19.- McMahon, D.H., y Franklin, A.R., App. Opt. 8, 1927, (1969).
- 20.- McPhedran, R.C., Wilson, I.J. y Waterworth, M. D., Opt. Commun, 7, 331 (1973).
- 21.- Mollenauer, L.F. y Tomlinson, W.J., App. Opt. 16, 555 (1977).
- 22.- Morau, J.M. y Kaminon, I.P., App. Opt., 12, 1964, (1973).
- 23.- Newport Corporation, "Catalog 1983-1984", (Newport - Corporation, U.S.A., 1985).
- 24.- Oriol Corporation, "Light Sources, Monochromators, Detection Systems,, Vol. II, (Oriol Corporation, U.S.A., 1985).
- 25.- Ortega, M.R., Tesis Doctoral, (Facultad de Ciencias, UNAM, 1986).
- 26.- Ortega, M.R., Instrumentación y Desarrollo, 2,36, (1987).
- 27.- O'Shea, D.C., "Introduction to Lasers and Their Applications" (Addison-Wesley, E.E.U.U., 1976).
- 28.- Ostovsky Yu I., "Holography and Its Applications", (Mir, Moscow, 1977).
- 29.- Rodríguez, R.A., y Ortega, M.R., Instrumentación y Desarrollo, 2, 26 (1988).
- 30.- Roger, A., Opt. Commun, 32, 11, (1980).
- 31.- Sears, F.W., "Optica", (Aguilar, España, 1974).
- 32.- Som, S.C., App. Opt., 13, 1767 (1974).
- 33.- Stewart, J.E. y Gallaway, S., App. Opt., 1, 421, (1962).

- 34.- Takeshi, Namien, Tatsuo, Harada y Kamenasuke Yasura
Optica Acta, 26, 1021, (1979).
- 35.- Untersehe, F., "Holography handbook", (Rossbook,
Berkeley, Ca., 1982).
- 36.- Wilson, F.J. y Botten, L.C., App. Opt., 16, 2086,
(1977).