



---

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS  
Mát. Luis M. Rivera Gutiérrez

# **CARACTERIZACIÓN DEL ALCOHOL POLIVINÍLICO Y VIOLETA DE GENCIANA COMO MATERIAL FOTOSENSIBLE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS**

PRESENTA:

**KARINA ALEMÁN AYALA**

ASESOR:

**MAURICIO ORTIZ GUTIÉRREZ**

MORELIA, MICHOACÁN, OCTUBRE DEL 2006.

# Tesis

Karina Alemán Ayala

26 de octubre de 2006



# Agradecimientos

Agradezco a mi madre por todo el cariño que me dio desde que estaba en pañales, también le agradezco por respetar mis decisiones , por la confianza que me ha dado y la libertad de elegir.

Agradezco a mis hermanos Claudia Rigoberto y Julio con ellos aprendí el significado de la humildad, la bondad y el respeto.

Gracias Ariel.

Agradezco infinitamente a mi asesor el Dr. Mauricio Ortíz Gutiérrez por su paciencia y por todos el conocimiento que me brindo en el laboratorio de óptica.

Agradezco a todos los que me hicieron feliz!



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	7
1.2. Objetivo general . . . . .	10
1.3. Objetivos Específicos . . . . .	10
1.4. Organización . . . . .	11
<b>2. Interferencia y Difracción</b>	<b>13</b>
2.1. Conceptos básicos de Interferencia . . . . .	13
2.2. Interferencia . . . . .	16
2.2.1. Consideraciones Generales . . . . .	17
2.2.2. Condiciones para la interferencia . . . . .	20
2.3. Interferómetro de división de amplitud . . . . .	21
2.4. Conceptos básicos de difracción . . . . .	25
2.4.1. Difracción de Fraunhofer . . . . .	25
2.4.2. Rejillas de difracción . . . . .	27
2.4.3. Eficiencia de difracción . . . . .	29
<b>3. Materiales fotosensibles</b>	<b>31</b>
3.1. Introducción a los materiales fotosensibles . . . . .	31
3.2. Materiales de registro hográfico . . . . .	33
3.3. Haluros de plata . . . . .	37
3.4. Polímeros . . . . .	38
3.4.1. Polimerización y estructura . . . . .	38
3.4.2. Clasificación de polímeros . . . . .	39
<b>4. Caracterización del material y resultados</b>	<b>43</b>
4.1. Características del PVA y de la VG . . . . .	43
4.2. Preparación de la muestra . . . . .	44

4.3. Espectro de absorbanca de la emulsión PVA y VG . . . . .	45
4.4. Grabado de las rejillas Holográficas . . . . .	45
4.4.1. Resultados experimentales . . . . .	47
<b>5. Conclusiones</b>	<b>53</b>
<b>A. Transformada de Fourier de rendijas</b>	<b>55</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

La necesidad de almacenar información de una manera rápida y eficiente a hecho que la investigación de materiales holográficos sea cada vez mayor. Al mismo tiempo se han desarrollado técnicas holográficas para aumentar la capacidad de almacenamiento en los materiales disponibles

La holografía es una técnica avanzada de fotografía que consiste en grabar imágenes tridimensionales. Para esto se utiliza un láser que graba microscópicamente una película fotosensible; ésta, al recibir la luz desde la perspectiva adecuada, proyecta una imagen en tres dimensiones.

La técnica de fotografía avanzada fue inventada en el año 1947 por el físico húngaro Dennis Gabor, que recibió por esto el Premio Nobel de Física en 1971. La técnica se perfeccionó años más tarde con el desarrollo del láser, pues los hologramas de Gabor eran muy primitivos a causa de las fuentes de luz tan pobres que se utilizaban en sus tiempos.

Originalmente, Gabor sólo quería encontrar una manera para mejorar la resolución y definición de las imágenes del microscopio electrónico. Llamó a este proceso holografía, que proviene del griego "holos", que significa completo, ya que los hologramas mostraban objetos completos y no sólo una perspectiva.

En realidad, los primeros hologramas que verdaderamente representaban un objeto tridimensional bien definido, fueron hechos en 1963 por Emmett Leith y Juris Upatnieks en Estados Unidos y por Yuri Denisyuk en la Unión Soviética.

La holografía a generado campos de investigación entre los que encontramos:

Hologramas por computadoras, hologramas como instrumento de medida, como técnica de almacenamiento de información, hologramas de exhibición y hologramas de seguridad.

**Hologramas por computadoras.** Las franjas de interferencia que se obtienen con cualquier objeto imaginario o real se pueden calcular mediante una computadora. Una vez calculadas estas franjas, se pueden mostrar en una pantalla y luego fotografiar; esta fotografía sería un holograma sintético. Esta técnica tiene la desventaja de que no es fácil representar objetos muy complicados con detalle. En cambio, la ventaja es que se puede representar cualquier objeto imaginario y no se requiere de un laboratorio. Esta técnica se usa mucho para generar frentes de onda de cualquier forma, con alta precisión que es muy útil en interferometría.

**La holografía como instrumento de medida.** La holografía es también un instrumento muy útil, para efectuar medidas sumamente precisas. La utilidad de la holografía proviene del hecho de que mediante ella es posible reconstruir un frente de onda de cualquier forma que se desee, para posteriormente compararlo con otro frente de onda generado en algún momento posterior. De esta manera es posible observar si el frente de onda original es idéntico al que se produjo después, o bien si tuvo algún cambio. Esto permite determinar las deformaciones de cualquier objeto con una gran exactitud, aunque los cambios sean tan pequeños como la longitud de onda de la luz. Esto se emplea para analizar superficies ópticas de espejos, lentes, etc.

**La holografía como técnica de almacenamiento de información.** La holografía también se usa para almacenar información. Esto es particularmente útil, ya que existen materiales holográficos que se pueden grabar y borrar a voluntad de forma muy rápida y sencilla. Con el tiempo, cuando se resuelvan algunos problemas prácticos será sin duda posible substituir las memorias magnéticas o las de estado sólido que se usan ahora en las computadoras por memorias holográficas.

**La holografía de exhibición.** Ésta es la aplicación más frecuente y popular de la holografía. Es muy conocida, por ejemplo, la exhibición que hizo una famosa joyería de la Quinta Avenida de Nueva York, donde por medio de un holograma sobre el vidrio de un escaparate se proyectaba hacia la calle la imagen tridimensional de una mano femenina, mostrando un collar de esmeraldas.

También se utiliza actualmente en tarjetas de crédito, billetes y discos

compactos, además de su uso como símbolo de originalidad y seguridad [13].

Los avances mencionados han sido posible gracias al desarrollo de técnicas holográficas así como el desarrollo de materiales fotosensibles donde se pueden grabar estos hologramas. Existe en la literatura textos que muestran diversas técnicas para grabar hologramas [6]. La investigación en materiales fotosensibles ha tenido avances lo que ha propiciado que se aumente la capacidad de almacenamiento de información. Uno de los avances más recientes es el DVD ó CD en el cual se puede grabar y leer información gracias al material fotosensible con el que se fabrica. Con la combinación del material fotosensible y las técnicas de holografía se espera que en breve salga al mercado un nuevo dispositivo para almacenar información con más capacidad que los actuales conocido como Disco Holográfico.

Existen diferentes materiales fotosensibles tales como: materiales orgánicos, cristales fotorefractivos, fotopolímeros y los de haluros de plata, entre otros. Los cristales fotorefractivos son materiales con los cuales se puede experimentalmente hacer conjugación de fase, amplificación óptica, hologramas dinámicos y procesamiento de información óptica.

Actualmente las películas de haluros de plata más avanzada son la PFG-O3M y la PFG-O3C de alta resolución alcanzando 5,000 líneas/mm fabricadas por la compañía Slavich, en Rusia. Por otro lado la compañía Du Pont tiene una película que consiste de un fotopolímero llamado Omni-Dex el cual no necesita de un revelador químico, con solo exponerlo a la luz solar se fija la imagen y sirve para producir hologramas de reflexión en masa.

En la actualidad se han encontrado nuevos materiales fotosensibles que se usan como memorias holográficas, en los que el principal componente es el Alcohol Polivinílico (PVA) que se utiliza como soporte o matriz mezclada con tintes. En la literatura se pueden encontrar diferentes trabajos en los que se utiliza el PVA. Por ejemplo, Sylviane Lelievre and Jean J. A [8]. Counture grabaron hologramas de fase en PVA dicromatado. Roma Grzymala and Tuula Keinonen [5] también graban hologramas de fase en PVA mezclado con gelatina dicromatada.

Existen otras investigaciones en las que el PVA no se usa como material fotosensible sino como un sensor de humedad relativa con fibra óptica. Su fabricación consiste en recubrir las fibras ópticas de alcohol polivinílico, y cuando hay un cambio en la humedad provoca que cambie el índice de refracción del PVA el cual es detectado cuando un haz viaja por la fibra, esta información es detectada y analizada posteriormente; de esta manera el PVA funciona como sensor de humedad. Las fibras ópticas que se usan en el

sensor de humedad son las mismas que se usan en comunicaciones, por lo que no es necesario la fabricación de nuevos dispositivos haciendo con esto que su precio sea muy bajo [2]. En base a lo anterior, en esta tesis se proponen los objetivos siguientes.

## 1.2. Objetivo general

1. Desarrollar y caracterizar un nuevo material fotosensible de bajo costo.

## 1.3. Objetivos Específicos

1. Comprender la teoría de interferencia y difracción.
2. Introducir conceptos de materiales poliméricos.
3. Desarrollar las habilidades para obtener patrones de interferencia en el laboratorio.
4. Proponer un nuevo material fotosensible.
5. Grabar rejillas holográficas de diferente frecuencia espacial en el material propuesto.
6. Caracterizar las rejillas holográficas obtenidas.

En esta tesis se propone un nuevo material fotosensible basado en la mezcla de alcohol polivinílico (PVA) y un tinte que es conocido como Violeta de Genciana.

El PVA es un polímero sintético obtenido por hidrólisis ácida o básica del acetato de polivinilo. La violeta de Genciana es un tinte que se utiliza como antiséptico. La mezcla de estos dos materiales, forman película delgada sobre la cual se grabaron rejillas de difracción.

Lo novedoso de esta tesis, además de presentar esta mezcla como material fotosensible es que se puede grabar información en tiempo real y que el material no requiere de procesos de revelado y además, se puede grabar información en este material con equipo convencional existente en cualquier laboratorio de óptica. Otra de las ventajas de este material es su bajo costo y que sus componentes se pueden conseguir fácilmente.

La caracterización óptica del material fotosensible que se presenta en esta tesis se lleva a cabo por medio del registro de rejillas de difracción debido a que son los elementos difractivos más fáciles de caracterizar midiendo su eficiencia de difracción. La eficiencia de difracción de un holograma es un parámetro que depende del tipo de modulación (absorción o de fase), así como en la forma de medirla (transmisión o reflexión) además depende de la longitud de onda utilizada.

## 1.4. Organización

Para entender los procesos por los cuales se generan las rejillas de difracción y se graban en el material fotosensible, esta tesis se divide en los siguientes capítulos.

En el capítulo dos se presenta la teoría de interferencia y difracción. En la primera parte se analiza el interferómetro que se utilizó para grabar las rejillas y que pertenece a los interferómetros de división de amplitud. En este interferómetro se genera un patrón de interferencia con un perfil senoidal que se graba en el material fotosensible obteniendo de esta manera una rejilla de difracción. En la parte de Difracción se describe la rejilla y los conceptos básicos de eficiencia de difracción como parámetro de modulación de las rejillas.

En el capítulo tres se dan las características generales de los polímeros que pueden ser usados como materiales fotosensibles y se mencionan los materiales existentes y disponibles comercialmente.

En el capítulo cuatro se dan las características generales de los dos componentes empleados para la creación del material fotosensible y se detalla la técnica empleada para prepararlo, también se describe el arreglo experimental para grabar la rejilla de difracción, y las variaciones de parámetros con las que ésta fue grabada como son concentración, longitud de onda, tiempos de exposición y ángulo de interferencia entre los haces, para obtener la mejor eficiencia de difracción del material. Por último en el capítulo cinco se dan las conclusiones.



# Capítulo 2

## Interferencia y Difracción

En este capítulo se describen los conceptos básicos de interferencia y difracción que serán de utilidad para el entendimiento completo de la tesis.

Una onda es una perturbación autónoma de un medio, que se mueve en el espacio transportando energía e impulso. El medio perturbado puede ser de naturaleza diversa, como el aire, agua, un trozo de metal, incluso el vacío; existen dos tipos de ondas: las longitudinales y transversales, este último tipo de ondas son de interés particular porque los perfiles corresponden a curvas que se pueden sintetizar matemáticamente como suma de funciones armónicas.

### 2.1. Conceptos básicos de Interferencia

La función más simple que describe el perfil de una onda estacionaria,  $\Psi(x, t)$ , en el tiempo  $t = 0$  se presenta en la ecuación 2,1

$$\Psi(x, t)_{t=0} = \psi(x) = E \operatorname{sen}(kx), \quad (2.1)$$

donde  $k$  es una constante positiva conocida como el **número de onda**, y su existencia se debe a que el argumento de una función sinusoidal tiene que ser adimensional. El valor máximo de la perturbación,  $E$ , se conoce como **amplitud** de onda.

Con el fin de transformar la onda estacionaria representada por la ecuación 2,1 en una onda progresiva que viaja con una velocidad  $v$  en la dirección positiva de  $x$ , se reemplaza la variable  $x$  por  $(x - vt)$  y la ecuación 2,1 se transforma en

$$\psi(x, t) = E \sin k(x - vt), \quad (2.2)$$

Si se mantiene fija ya sea  $x$  o  $t$ , se obtiene una perturbación sinusoidal de tal forma que la onda es periódica en el espacio o en el tiempo. El período espacial se conoce como longitud de onda y se denota por  $\lambda$ , esto es

$$\Psi(x, t) = \Psi(x \pm \lambda). \quad (2.3)$$

Para que este sea el caso, el número de onda  $k$  debe ser dado por  $k = 2\pi/\lambda$ . La figura 2.1 muestra el perfil de una onda estacionaria en términos de  $\lambda$ .

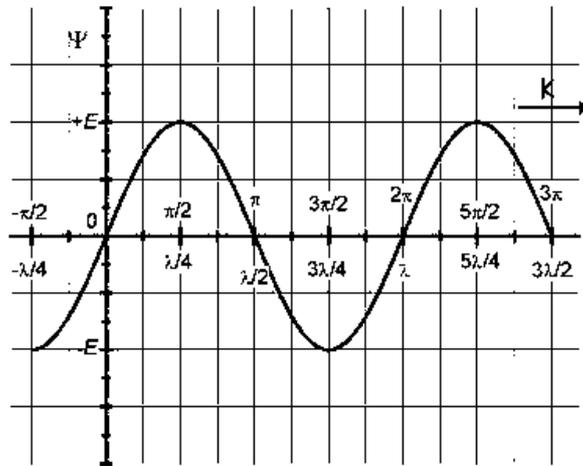


Figura 2.1: Gráfica que muestra el perfil de una onda estacionaria suponiendo  $t = 0$ .

Análogamente, la onda se puede repetir a sí misma después de un **período temporal**,  $\tau$ , que es la cantidad de tiempo que una onda completa tarda en superar a un observador estacionario, por lo tanto, la onda se describe como

$$\Psi(x, t) = \Psi(x, t \pm \tau), \quad (2.4)$$

$$\Psi(x, t) = \Psi(x, t \pm \lambda/v), \quad (2.5)$$

donde se define  $\tau = (\lambda/v)$  y  $\nu$  es llamada frecuencia temporal es decir, es el número de veces que se repite la onda en el tiempo. Entonces  $\nu = 1/\tau$  está dada en unidades de ciclos por segundo o Hertzios. Existen otras dos

cantidades que se usan a menudo en la literatura del movimiento ondulatorio; una es la **frecuencia temporal angular** definida por  $\omega = 2\pi/\tau = 2\pi\nu$  y sus unidades son radianes por segundos, y la segunda es el número de onda o frecuencia espacial definida por  $k = 1/\lambda$ .

Se puede definir a una clase especial de ondas que tienen una sola frecuencia y son llamadas ondas **monocromática** o **monoenergética**. Sin embargo físicamente no existen, pero si existen algunas ondas con una pequeña variación en su frecuencias y son llamadas cuasimonocromáticas [6].

Utilizando lo anterior, la fase de la onda se expresa mediante:

$$\varphi = (kx \pm \omega t) \quad (2.6)$$

Un caso especial se presenta cuando  $t = 0$  y  $x = 0$ , entonces  $\Psi(0, 0) = 0$  y significa que la onda no tiene un valor en este punto y no hay razón para que la magnitud de la onda no pueda tener cualquier valor que se quiera para  $t = 0$ ,  $x = 0$ . Para que esto no sea así se traslada la función sinusoidal, mediante la introducción de una **fase inicial**  $\epsilon$  tal que

$$\Psi(x, t) = E \text{sen}(kx - \omega t + \epsilon) \quad (2.7)$$

La gráfica de la ecuación 2,7 se muestra en la figura 2,2.

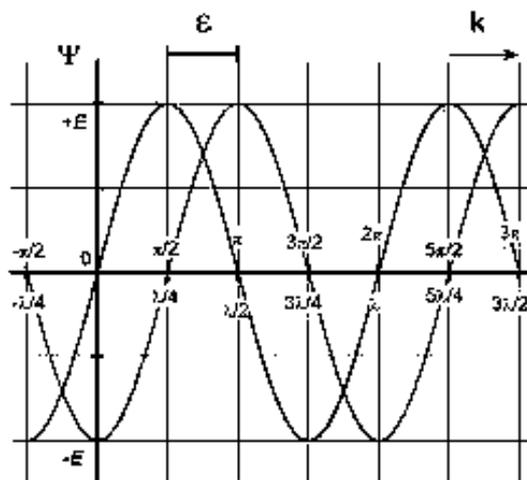


Figura 2.2: Perfil de una onda estacionaria (línea negra) suponiendo  $t=0$  y muestra el perfil de onda con fase inicial (línea roja).

Supóngase que dos ondas  $\Psi_1(x_1, t_1)$  y  $\Psi_2(x_2, t_2)$  se encuentran en una región del espacio. En esta región se creará una nueva onda  $\Psi_3(x_3, t_3)$  que es la suma de las ondas constitutivas, es decir  $\Psi_3(x_3, t_3) = \Psi_1(x_1, t_1) + \Psi_2(x_2, t_2)$ . Esta suma de ondas se le conoce como **Principio de Superposición**. Después que las ondas se separan continúan su viaje sin alterarse y esto es lo que origina diversos fenómenos, como el de interferencia [6] que se presenta en la siguiente sección.

Debido a la naturaleza de la luz que es una onda electromagnética, la luz se compone de dos campos, uno eléctrico representado por  $E(x, t)$  y uno magnético dado por  $B(x, t)$ , por lo que para representar físicamente a un haz de luz se pueden emplear estos campos. Sin embargo, debido a la energía que transporta cada uno de ellos ( $E = cB$ ), es común que solo se emplee el campo eléctrico para representarla, por lo que en la siguiente sección se emplea este campo  $E(x, t)$  en lugar de  $\Psi(x, t)$  [6].

## 2.2. Interferencia

La interferencia es un fenómeno característico de todo movimiento ondulatorio, trátase de ondas en el agua, ondas sonoras u ondas de luz. La interferencia de ondas de luz causa, por ejemplo, los colores que se ven en las burbujas de jabón. La luz blanca está compuesta por ondas de luz de distintas longitudes de onda. Las ondas de luz de cierta longitud de onda (por ejemplo las de color amarillo cuya  $\lambda = 598nm$ ) son reflejadas en la superficie interior de la burbuja e interfieren con las ondas de esa misma longitud reflejadas en la superficie exterior. Esta interferencia ocasiona que la luz pueda desaparecer completamente ó que aparezca dándole una coloración a la burbuja. Ese mismo proceso ocurre con las demás longitudes de onda que componen la luz blanca. Algunas longitudes de onda desaparecerán mientras que otras no por lo que la luz reflejada por la burbuja de jabón aparece coloreada.

En 1801 Thomas Young realizó el primer experimento que demostró la interferencia de la luz. Young utilizó un haz de luz y lo hizo incidir en dos ranuras paralelas angostas. En una pantalla blanca, colocada más allá de las ranuras, se formó un patrón de bandas de luz claras y oscuras alternadas, llamadas franjas de interferencia. Las franjas claras indican interferencia constructiva y las oscuras indican interferencia destructiva que se produce por las dos ondas que atravesaron las ranuras. Cuando las crestas de una onda se superponen con las de una segunda onda el efecto de la superposición es que

la intensidad de la onda aumenta, a esto se le conoce como **interferencia constructiva**, y se dice que las ondas están en fase. Por el contrario cuando la cresta de una onda se superpone con el valle de una segunda onda, la intensidad de la onda disminuye y este fenómeno se le conoce como **interferencia destructiva**, y en este caso se dice que las ondas están desfasadas o fuera de fase.

### 2.2.1. Consideraciones Generales

Cuando dos ondas coinciden en una región del espacio, interfieren dando como resultado características bien definidas que son producto de la combinación de ambas ondas, después de separarse prosiguen sin modificarse la una de la otra transportando cada una su energía y sus características propias como si nunca se hubiesen encontrado.

Imagínese que se tienen dos fuentes puntuales separadas una distancia  $a$  llamadas  $S_1$  y  $S_2$ , que estén emitiendo ondas de la misma longitud de onda  $\lambda$ , es decir, emiten ondas monocromáticas en un mismo medio homogéneo [6]. Sea su separación  $a$  mucho mayor que  $\lambda$ . Además, se coloca un punto de observación  $P$  sobre una pantalla paralela a línea que une a las fuentes lo suficientemente lejos de ellas para que los frentes de ondas sean planos.

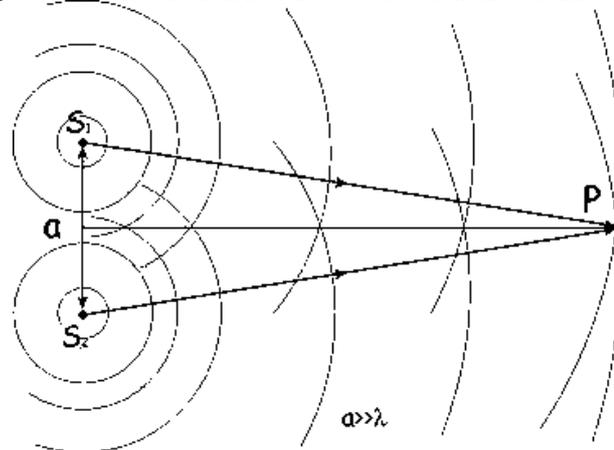


Figura 2.3: Ondas de dos fuentes puntuales superponiéndose espacialmente en el punto  $P$ .

Supóngase también que las ondas que emiten las fuentes son dos ondas linealmente polarizadas cuyas expresiones  $E_1(r, t)$  y  $E_2(r, t)$  están dadas por

$$E_1(r, t) = E_{01} \cos(k_1 r - \omega t + \varepsilon_1), \quad (2.8)$$

y

$$E_2(r, t) = E_{02} \cos(k_2 r - \omega t + \varepsilon_2), \quad (2.9)$$

donde  $k_1$  y  $k_2$  son los vectores de onda,  $r$  es el vector de posición  $(x, y, z)$  y  $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$  son las fases iniciales.

En el punto  $P$  mostrado en la figura 2,3 se presenta la superposición de las ondas  $E_1(r, t)$  y  $E_2(r, t)$  expresada por  $E(r, t) = E_1(r, t) + E_2(r, t)$ . El campo  $E$  varía tan rápido que es imposible observarlo a simple vista, por lo que es conveniente introducir el concepto de irradiancia. La irradiancia esta dada por

$$I = \frac{\epsilon \nu}{2} \langle E^2 \rangle_T. \quad (2.10)$$

Puesto que solamente nos ocuparemos de las irradiancias relativas dentro del mismo medio, se omitiran, al menos por el momento, las constantes y la ecuación anterior se puede expresar como

$$I = \frac{\langle E^2 \rangle_T}{2}, \quad (2.11)$$

donde  $\langle E^2 \rangle_T$  es el promedio temporal de la magnitud del campo eléctrico al cuadrado y además

$$E^2 = E \cdot E, \quad (2.12)$$

donde  $E = E_1 + E_2$ , entonces por consiguiente

$$E^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2), \quad (2.13)$$

y por lo tanto

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2. \quad (2.14)$$

Sustituyendo la ecuación 2,14 en la ecuación 2,11 se obtiene

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}, \quad (2.15)$$

donde

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle_T, \quad (2.16)$$

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle_T \quad (2.17)$$

y

$$I_{12} = 2 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle_T . \quad (2.18)$$

A la ecuación 2,18 se le denomina término de interferencia. Para calcularlo se sustituye las ecuaciones 2,8 y 2,9, de donde se obtiene;

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 r - \omega t + \varepsilon_1) \times \cos(k_2 r - \omega t + \varepsilon_2), \quad (2.19)$$

haciendo las operaciones adecuadas se obtiene una forma equivalente

$$\begin{aligned} E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} [ & \cos(k_1 r + \varepsilon_1) \times \cos \omega t + \text{sen}(k_1 r + \varepsilon_1) \text{sen} \omega t] \\ & \times [\cos(k_2 r - \omega t + \varepsilon_2) \times \cos \omega t + \text{sen}(k_2 r + \varepsilon_2) \text{sen} \omega t], \end{aligned} \quad (2.20)$$

después de hacer los cálculos del promedio temporal de la ecuación (2,18) se obtiene

$$\langle E_1, E_2 \rangle_T = \frac{1}{2} [E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 r + \varepsilon_1 - k_2 r - \varepsilon_2)], \quad (2.21)$$

donde  $\langle \cos^2 \omega t \rangle_T = \frac{1}{2}$ ,  $\langle \text{sen}^2 \omega t \rangle_T = \frac{1}{2}$  y  $\langle \cos \omega t \text{sen} \omega t \rangle_T = 0$ .

Por lo tanto el término de interferencia queda

$$I_{12} = E_{01} \cdot E_{02} \cos \delta, \quad (2.22)$$

donde  $\delta = (k_1 \cdot r - k_2 \cdot r + \varepsilon_1 - \varepsilon_2)$  es la diferencia de fase entre las ondas  $E_1(r, t)$  y  $E_2(r, t)$ .

Esta última ecuación puede ser escrita de una forma mas sencilla dándose cuenta de que

$$I_1 = \langle E_1^2 \rangle_T = \frac{E_{01}^2}{2} \quad (2.23)$$

y

$$I_2 = \langle E_2^2 \rangle_T = \frac{E_{02}^2}{2}, \quad (2.24)$$

por lo que el término de interferencia queda de la siguiente manera

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (2.25)$$

Haciendo la sustitución de las ecuaciones 2,23, 2,24 y 2,25, en la ecuación 2,15 se obtiene

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta. \quad (2.26)$$

En varios puntos del espacio, la irradiancia final puede ser mayor, menor o igual a  $I_1 + I_2$ , y depende del valor de  $I_2$  y este depende de  $\delta$ . Un máximo de irradiancia se obtiene cuando  $\cos\delta = 1$  de modo que

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}, \quad (2.27)$$

y esto sucede cuando  $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$ . En este caso se dice que ocurre **interferencia constructiva total**, es decir el desfase entre las dos ondas es un múltiplo entero de  $2\pi$  y las perturbaciones están en fase. Cuando  $0 < \cos\delta < 1$  las ondas están fuera de fase y  $I_1 + I_2 < I < I_{max}$  el resultado se denomina *interferencia constructiva*.

Si  $\delta = \pi/2$ ,  $\cos\delta = 0$  y se dice que las ondas están desfasadas  $90^\circ$  y en este caso  $I = I_1 + I_2$ .

Ahora, en el caso en que  $0 > \cos\delta > -1$  se tienen las condiciones de *interferencia destructiva*, es decir  $I_1 + I_2 > I > I_{min}$ . La irradiancia mínima es producida cuando las ondas están desfasadas esto es cuando  $\delta = 180^\circ$ , en este caso  $\cos\delta = -1$  por lo que se obtiene

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}. \quad (2.28)$$

Es decir, para valores de  $\delta = \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots$  se produce la llamada **interferencia destructiva total**.

El caso más importante es cuando las amplitudes de ambas ondas que alcanzan el punto  $P$  de la figura 2,3 son iguales es decir  $E_{01} = E_{02}$ , y por lo tanto  $I_1 = I_2 = I_0$ . la ecuación 2.25 queda de la siguiente forma:

$$I = 2I_0(1 + \cos\delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (2.29)$$

de lo que se deduce que  $I_{min} = 0$  é  $I_{max} = 4I_0$ .

### 2.2.2. Condiciones para la interferencia

Las ondas que producen interferencia tienen que ser coherentes, es decir la luz debe tener la misma frecuencia y fase [6]. Esto se consigue de manera

mucho más sencilla utilizando un láser. Por otro lado la luz tiene que ser linealmente polarizada. Además la luz tiene que ser de un mismo color, esto se consigue colocando un filtro de color, o usando un laser.

Todo esto se resume en las Leyes de Fresnel Arago que son las siguientes:

1. Los haces deben estar linealmente polarizados.
2. Los haces deben ser coherentes es decir, la fase debe ser constante.
3. Los haces deben ser monocromáticos.

Existe una variedad de sistemas ópticos en los cuales se puede realizar la interferencia, y se dividen en dos grandes grupos que son: *división del frente de onda y división de amplitud*. En el primer caso, se usa un frente de onda primario para obtener frentes de ondas secundarios o fuentes virtuales ejemplos de este es el experimento de Young; en el segundo caso, la amplitud de la onda se divide y genera dos ondas que viajan por diferentes caminos y se reencuentran para darse así la interferencia, un ejemplo de este tipo de interferómetro es el de Michelson [6]. Dentro de este tipo de interferómetros, se encuentra el arreglo interferométrico que se usó en esta tesis, y que se detalla a continuación.

## 2.3. Interferómetro de división de amplitud

Este sistema produce franjas brillantes y oscuras alternadas llamadas franjas de interferencia. Considérese una onda plana monocromática hipotética que ilumina un espejo semiplatado conocido como divisor de haz (DH). Este divisor de haz genera dos ondas que viajan por caminos separados. Una de ellas se dirige hacia el espejo  $S_1$  y el otro hacia el espejo  $S_2$  que reflejan los haces sobre una pantalla situada a una distancia  $S$  de los espejos medida desde el centro de la línea que une a los dos espejos, tal como se muestra en la figura 2.4.

La distancia entre cada uno de los espejos  $S_1$  y  $S_2$  ( ver la figura 2.4) a la pantalla es mayor comparada con la distancia de separación  $a$  entre los espejos. Como puede observarse de la figura 2.4, los haces que se superponen en el centro de la pantalla (el punto O de la figura) recorren caminos iguales, por lo que en este punto llegan en fase y generan un máximo de intensidad. Para cualquier otro punto  $P$  arbitrario sobre la pantalla, los haces recorren

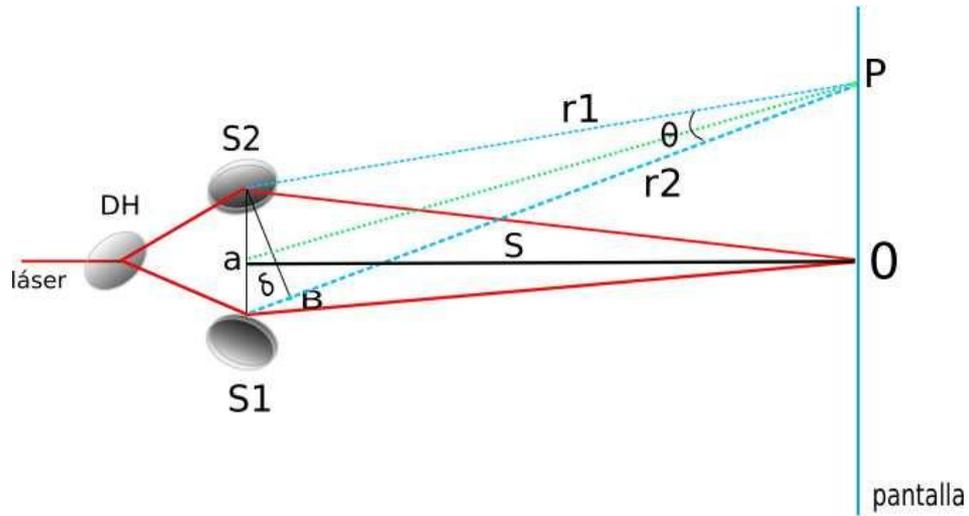


Figura 2.4: Geometría para calcular la diferencia de camino óptico

caminos distintos, es decir, existe una diferencia de camino óptico ( $\delta$ ) entre ambos. El camino óptico se define como la distancia que recorre un haz de luz al viajar de un punto  $A$  a un punto  $B$  en el menor tiempo, multiplicado por el índice de refracción  $n$  del medio en el que viaja. En este caso, el haz de luz viaja en el aire, por lo que se considera  $n = 1$ .

La diferencia de camino óptico entre los rayos a lo largo de  $\overline{S_1P}$  y  $\overline{S_2P}$  puede calcularse, con buena aproximación mediante la figura 2.4.

La diferencia de camino óptico ( $\delta$ ) se obtiene de la proyección de  $\overline{S_2P}$  sobre  $\overline{S_1P}$ . Esta proyección es la diferencia de camino óptico que está dada por:

$$(\overline{S_1B}) = (\overline{S_1P}) - (\overline{S_2P}), \quad (2.30)$$

o

$$(\overline{S_P}) = r_1 - r_2. \quad (2.31)$$

Continuando con esta aproximación  $(r_1 - r_2) = a \sin \theta$  y por lo tanto

$$r_1 - r_2 \approx a \theta, \quad (2.32)$$

puesto que  $\theta \approx \sin \theta$ . Obsérvese que

$$\theta \approx \frac{y}{s}, \quad (2.33)$$

por lo tanto

$$r_1 - r_2 = \frac{a}{s}y. \quad (2.34)$$

De acuerdo con la sección 2,2 la interferencia constructiva ocurrirá cuando

$$r_1 - r_2 = m\lambda. \quad (2.35)$$

Entonces, de las últimas dos relaciones obtenidas

$$y_m \approx \frac{s}{a}m\lambda. \quad (2.36)$$

Esto proporciona la posición de la  $m$ -ésima franja brillante en la pantalla si consideramos el máximo en 0 como la franja cero, la posición angular de la franja se obtiene sustituyendo la última expresión en la ecuación 2,33; así

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{a}. \quad (2.37)$$

Esta relación puede obtenerse directamente inspeccionando la figura 2,4. Para el máximo de interferencia de orden  $m$ -ésimo,  $m$  longitudes de onda enteras deberían caber dentro de la distancia  $r_1 - r_2$ . Por consiguiente, del triángulo  $S_1S_2B$  de la figura 2,4

$$a \operatorname{sen} \theta_m = m\lambda. \quad (2.38)$$

Las ecuaciones 2,34 y 2,35 son la diferencia de camino óptico entre los haces, por lo que la diferencia de fase entre las ondas está dada por

$$\delta = k\delta, \quad (2.39)$$

donde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  y entonces

$$\delta = k(r_1 - r_2), \quad (2.40)$$

además, si  $r_1 - r_2 \approx \frac{ya}{s}$  lo que se observa en la pantalla es la irradiancia dada por

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{ya\pi}{s\lambda}. \quad (2.41)$$



Figura 2.5: Fotografía ampliada de un patrón de interferencia producido por la superposición de ondas amplificado

Esta ecuación representa un patrón de interferencia como el de la figura 2,5.

El espacio entre las franjas en la pantalla puede obtenerse fácilmente de la ecuación 2,36 la diferencia en las posiciones de los máximos consecutivos es:

$$y_{m+1} - y_m \approx \frac{s}{a}(m+1)\lambda - \frac{s}{a}m\lambda \quad (2.42)$$

o

$$\Delta y \approx \frac{s}{a}\lambda \quad (2.43)$$

El periodo de la ecuación la de irradiancia 2,40 se define como

$$P = \frac{a}{s\lambda}, \quad (2.44)$$

por lo tanto la ecuación 2,40 queda de la siguiente forma

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{y\pi}{P}, \quad (2.45)$$

Cuando el patrón de interferencia de la figura 2,5 se graba en un material fotosensible obtenemos una rejilla holográfica que al ser iluminada con un laser en forma perpendicular se producirá lo que se conoce como difracción; esto se detalla en las siguientes secciones.

## 2.4. Conceptos básicos de difracción

Un cuerpo opaco colocado a medio camino entre una pantalla y una fuente puntual proyecta una sombra compuesta de regiones claras y oscuras muy diferentes de las que podrían esperarse de los principios de la óptica geométrica [6]. En el siglo *XVII* Francesco Grimaldi publicó el primer estudio detallado sobre esta **desviación de la luz de su propagación rectilínea**, a la que denominó *difracción*. *El efecto es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurren donde quiera que una parte de un frente de onda ya sea sonido, onda material o luz, esté ostruida de alguna manera.* Si al encontrar un obstáculo transparente u opaco se altera la amplitud o la fase de una región del frente de onda, esto producirá difracción. Los varios segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interferirán, produciendo aquella distribución de densidad de energía particular denominada figura de difracción. No hay distinción física significativa entre *interferencia* y *difracción*. Sin embargo, se ha vuelto algo común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se analiza la superposición de solamente unas pocas ondas y de difracción cuando se trata de un gran número de ondas.

### 2.4.1. Difracción de Fraunhofer

La teoría escalar de la difracción permite tratar el comportamiento de la propagación de la luz de una forma simplificada, ya que no tiene en cuenta el carácter vectorial de las ondas electromagnéticas. Esta simplificación da resultados precisos si se cumplen dos condiciones básicas: a) la abertura de difracción u obstáculo debe ser grande comparada con la longitud de onda y b) la distancia de observación del campo difractado debe ser suficientemente grande en comparación con las dimensiones de la abertura. En estas condiciones la polarización del campo electromagnético no varía, lo que permite prescindir del formalismo vectorial. Para los propósitos de esta tesis basta con describir el desarrollo de esta teoría de difracción que a continuación se detalla.

Con la teoría de difracción se puede predecir el comportamiento de los frentes de onda al iluminar un obstáculo y propagarse libremente. Para ello, se debe considerar la formulación matemática de una onda esférica que satisface las ecuaciones de onda y de Helmholtz y analizar su comportamiento al propagarse; dicho comportamiento se puede analizar usando el teorema

de Green. Rayleigh y Sommerfeld analizaron el comportamiento de un haz de luz sobre una superficie cerrada con volumen  $V$  originado en una fuente puntual dentro de este volumen; Fresnel y Kirchoff continuaron este análisis suponiendo que el frente de onda esférico incide sobre una pantalla opaca sobre la cual existe una pequeña apertura. Como puede observarse, este análisis involucra frentes de onda esféricos, y fue Fraunhofer quien al proponer que si este frente de onda se propaga una distancia muy grande comparada con el tamaño de la apertura, la ecuación que describe el comportamiento del haz se podía expresar por medio de:

$$U(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int_{\Sigma} U(x_0, y_0, 0) \exp\left(\frac{ik}{2z}(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\right) dx_0 dy_0. \quad (2.46)$$

Los límites de integración se extienden al campo de la apertura  $\Sigma$ . Estos límites se pueden extender al infinito considerando que el campo eléctrico fuera de la apertura es cero. Otra interpretación se puede obtener si se desarrollan los binomios de la integral de difracción (ecuación 2.45) obteniendo:

$$U(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right) \int_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0) e^{-2\pi i\left(\frac{x}{\lambda z}x_0 + \frac{y}{\lambda z}y_0\right)}. \quad (2.47)$$

Así la difracción de Fraunhofer se puede obtener a partir de la Transformada de Fourier [7] escalada, y excepto por unos factores de fase constante, entonces:

$$U(x, y, z) = TF[U(x_0, y_0)]. \quad (2.48)$$

La función  $U(x_0, y_0)$  se conoce como función de transmitancia y es la función matemática que describe la geometría del obstáculo.

La ecuación 2,48 es de suma importancia porque simplifica el análisis matemático de la difracción e indica que para conocer el patrón de difracción de cualquier obstáculo iluminado con un frente de onda plano solo es necesario obtener la transformada de Fourier de su función de transmitancia.

En el apéndice A se muestran algunos ejemplos útiles de las transformadas de Fourier de rejillas. En la siguiente sección se definen las rejillas de difracción.

### 2.4.2. Rejillas de difracción

En el capítulo anterior se mencionó que el patrón de interferencia de un interferómetro de división de amplitud también se puede interpretar como una rejilla de difracción. Es decir, si se toma la fotografía de este patrón, se encontrarán zonas claras y oscuras alternadas de forma parecida a las rejillas. En esta tesis se usó una rejilla holográfica producida por la interferencia de dos haces de luz. El arreglo usado se muestra en la figura 2,6 que consta de un haz de luz que incide en un divisor de haz después del cual, los haces que emergen son reflejados por espejos e inciden en una placa holográfica donde forman el patrón de interferencia.

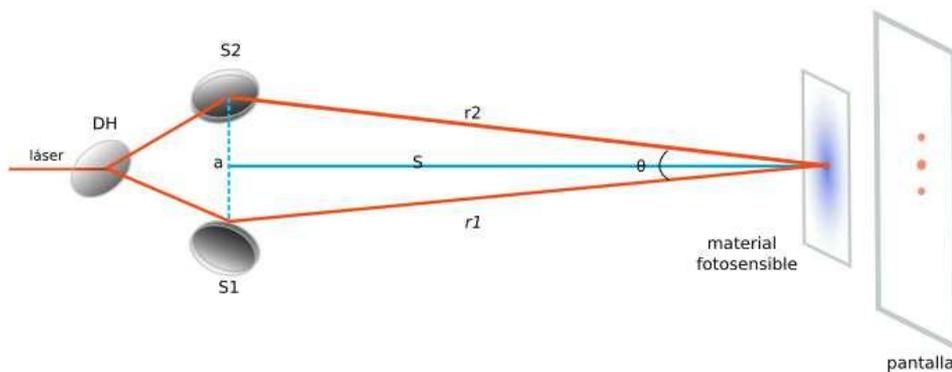


Figura 2.6: Muestra el arreglo interferométrico para el grabado de una rejilla de difracción

Existen dos tipos de rejillas de difracción: de transmisión y de reflexión. Una rejilla de transmisión es cuando el haz de luz incide y atraviesa la película holográfica, y la rejilla de reflexión es cuando la rejilla refleja el haz que incide sobre ella. En ambos casos, el haz transmitido ó reflejado se difracta. Esto es, se desvía en direcciones específicas de acuerdo al periodo espacial de la rejilla y a la longitud de onda de la luz empleada.

La utilidad de la rejilla depende del hecho que existe un único conjunto de ángulos discretos a lo largo de los cuales la luz difractada está en fase, de tal manera que se combina constructivamente.

Las rejillas se rigen por una ecuación y para obtenerla considérese el esquema de la figura 2,7

En este esquema un haz de luz incide en una rejilla de difracción de reflexión, el haz difractado tiene una diferencia de camino óptico  $\Lambda$  respecto

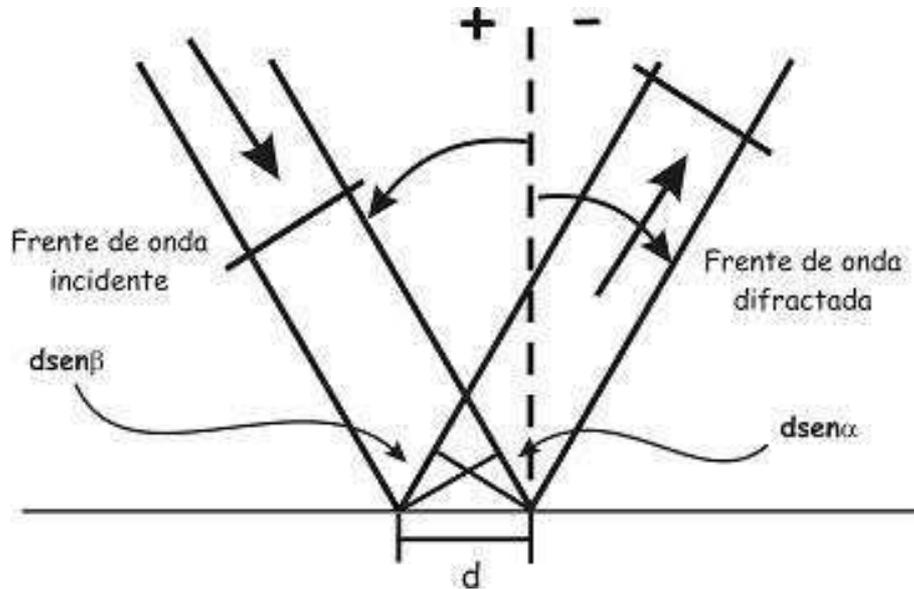


Figura 2.7: Geometría de difracción para un frente de ondas planas.

del incidente por una cantidad que fácilmente se puede medir, y está dada por

$$\Lambda = d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta). \quad (2.49)$$

Por definición las rejillas desvían la luz a ángulos discretos en donde los haces están en fase, entonces,

$$\Lambda = m\lambda, \quad (2.50)$$

donde  $m$  es un número entero y  $\lambda$  la longitud de onda por lo que

$$m\lambda = d(\text{sen}\alpha + \text{sen}\beta). \quad (2.51)$$

Por lo tanto, la ecuación de la rejilla de difracción también puede expresarse mediante

$$\frac{m\lambda}{d} = \text{sen}\alpha + \text{sen}\beta, \quad (2.52)$$

donde  $\frac{1}{d}$  se le conoce como frecuencia de la rejilla o densidad de líneas o más comúnmente llamado *líneas por milímetros* (1/mm). Si  $\alpha = \beta$  entonces

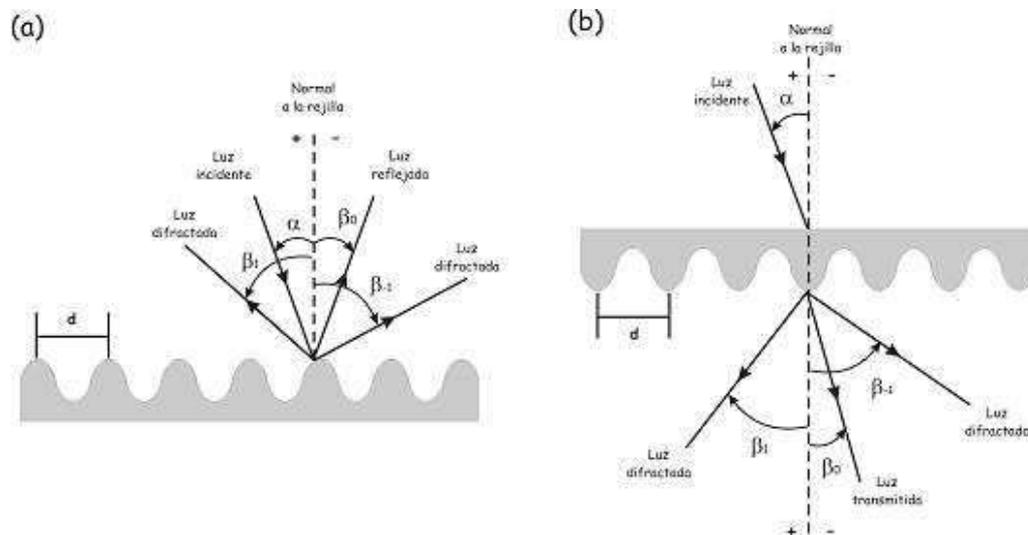


Figura 2.8: Esquema de la difracción de una rejilla. (a) de reflexión, y (b) de transmisión. Obsérvese las direcciones discretas de la luz difractada.

$$\frac{m\lambda}{d} = 2\text{sen}\alpha, \quad (2.53)$$

coincidiendo con la ley de Bragg.

Existe un parámetro para determinar si las rejillas de difracción son de buena calidad o no, este parámetro es conocido como eficiencia de difracción, y en la siguiente sección se define.

### 2.4.3. Eficiencia de difracción

La eficiencia de difracción  $\eta$  es uno de los parámetros mas importantes que se deben medir para caracterizar elementos de difracción, como rejillas y hologramas. Matemáticamente esta expresada como:

$$\eta = \frac{I_1}{I_i}, \quad (2.54)$$

donde  $I_1$  es la intensidad del primer orden difractado por el elemento e  $I_i$  es la intensidad del haz incidente en el elemento holográfico. Convencionalmente la eficiencia de difracción se expresa como  $\eta$  o en porcentaje  $\eta(\%)$ , es decir se multiplica por 100.

$$\eta(\%) = \frac{I_1}{I_i} \times 100. \quad (2.55)$$

Es necesario tener ciertas precauciones al analizar la eficiencia de difracción del holograma, ya que puede presentar ruido que afectaría el valor de la eficiencia medida. El ruido de la imagen holográfica puede deberse a los siguiente factores: granularidad del material, dispersión de la luz incidente al material debido al soporte o a la emulsión que contiene el material fotosensible [11]. Cuando incide un haz de luz sobre una rejilla difractada el haz producirá puntos luminosos ubicados en posiciones simétricas tal como se muestra en la figura 2,9. Estos puntos son simétricos respecto al orden cero ubicado en la misma posición que el haz incidente. Por comodidad se nombra al orden de la izquierda como orden  $-1$  y al de la derecha como orden  $+1$  de tal forma que al medir cualquiera de los dos órdenes se define la eficiencia de difracción como la razón de la intensidad difractada  $I_1$  entre la intensidad de la onda luminosa incidente sobre el elemento difractado  $I_i$ .

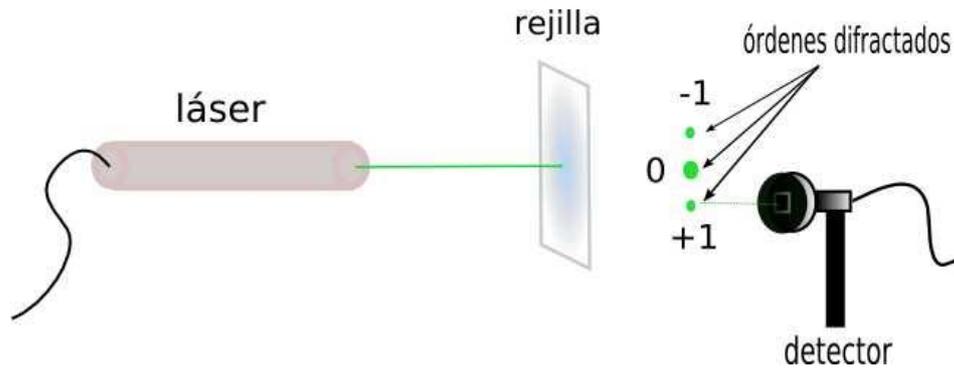


Figura 2.9: Muestra el arreglo para leer una rejilla de difracción

# Capítulo 3

## Materiales fotosensibles

### 3.1. Introducción a los materiales fotosensibles

La demanda de materiales fotosensibles con características especiales cada día es mayor, por lo que es importante conocer las cualidades que los hacen especiales y únicos. Conocer las características ópticas de los materiales fotosensibles permiten darles una adecuada aplicación como elementos holográficos. Estas características son: su resolución, su sensibilidad energética, la capacidad de almacenamiento, grabado en tiempo real, capacidad de multiplexado y su eficiencia de difracción entre otros [3] .

A continuación se presentan materiales holográficos fotosensibles que se han caracterizado grabando en ellos rejillas de difracción.

Existen materiales fotosensibles fabricados con materiales orgánicos [4], cristales fotorrefractivos, fotopolímeros [9] y los de haluros de plata [10], entre otros. Actualmente las películas de haluros de plata más avanzadas son la PFG-O3M y la PFG-O3C de alta resolución alcanzando  $5,000\text{lin/mm}$  fabricadas por la compañía Slavich, en Rusia [14]. En la tabla 3,1 se muestran algunos materiales de la compañía Slavich.

Las películas de Slavich después de ser grabadas deben ser sometidas a un proceso de revelado, similar al proceso que se necesita para las películas fotográficas convencionales.

**TABLA 3.1 Productos de la compañía Slavich.**

MATERIAL	ESPELOR DE LA EMULSIÓN ( $\mu\text{m}$ )	SENSITIVIDAD ESPECTRAL (nm)	SENSIBILIDAD ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )				PODER SE RESOLUCIÓN (l/mn)
			488	514	633	647	
			488	514	633	647	
<b>MONOCROMÁTICO</b>							
PFG-01	10-12	633-647	-	-	0,1	0,1	3000
PFG-03M	7	633-647	-	-	3	3	10000
PFG-04(DCG)	10-12	488-514	200	400	-	-	-
VRP(AH)	-	488-532	0,1	0,1	-	-	3000
VRP-M(NoAH)	7	488-532	0,1	0,1	-	-	3000
<b>COLOR</b>							
PFG-03C	7	480-647	1,5	1,2	1,0	1,0	10000

[h]

Por otro lado la compañía Du Pont tiene una película novedosa, que consiste de un fotopolímero llamado Omni-Dex o HRT que no necesita de un

**TABLA 3.2 Productos HRT [30] de origen Alemán.**

MATERIAL	ESPELOR DE LA EMULSIÓN ( $\mu\text{m}$ )	SENSITIVIDAD ESPECTRAL (nm)	SENSIBILIDAD ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )				PODER SE RESOLUCIÓN (l/mn)
			488	514	633	647	
			488	514	633	647	
<b>MONOCROMÁTICO</b>							
BB-700 <sup>+</sup>	7	660-710	-	-	-	-	-
BB-640	7	580-650	-	0,3	-	-	5000
BB-520	7	488-540	-	0,2	-	-	5000
BB-450	7	410-470	0,2	0,2	-	-	5000
<b>COLOR</b>							
BB-PAN	7	450/540/650	1,0	1,0	1,0	-	6000

En la siguiente sección se hace una clasificación de los materiales disponibles en los que se graban hologramas.

## 3.2. Materiales de registro holográfico

En la literatura existe una inmensa variedad de materiales para registro holográfico y que están disponibles comercialmente. De una forma genérica se hace la clasificación de los materiales, dentro de cuatro categorías que dependen de los mecanismos de registro holográfico y la naturaleza de los mismos.

Cada una de las clasificaciones se nombran como sistemas, siendo los siguientes:

1. Sistema fotopolimerizables.
2. Sistema fotoenlazable.
3. Sistema de polímeros dopados.
4. Otros Sistema.

La clasificación de estos sistemas se muestra a continuación y en cada uno de ellos los materiales con los que están fabricados.

Un sistema fotopolimerizable generalmente depende de una mezcla adecuada de monómeros, de un fotoiniciador y un fotosensibilizador. El fotoiniciador genera radicales libres en excitación e inicia la polimerización. El fotosensibilizador ayuda a extender el rango espectral de absorción del medio y sensibiliza la reacción en presencia de un electrón donado. En la Tabla 3,3 se muestra algunas características sobresalientes de estos materiales holográficos, que son películas en líquido o en seco.

**Sistema Fotopolimerizable** se clasifican en

- Composiciones en líquidos
- Películas en seco
  - Systeme de Acrilato
  - Metil metacrilato
  - sistemas de multicomponentes
  - Sistemas de poliéster

### **Sistema Fotoenlazable**

Los sistemas fotoenlazables constituyen otra clase de materiales de registro, con iones metálicos fotosensibilizador. Este fotosensibilizador sufre una reacción fotoquímica e induce enlazamiento dentro del medio de registro, el cual es el responsable de los cambios en la modulación del índice de refracción y en la formación del holograma. La mayoría de estos materiales son utilizados en seco. La Tabla 3,4 muestra también las características importantes de algunos materiales holográficos de este sistema, se clasifican de la siguiente forma:

- Gelatina Dicromatada
- Polímeros Dopados con ion metálico
- Poli (vinil carbozole)
- poli (metil metacrilato)

### **Sistemas de Polímeros Dopados**

Los sistemas de polímeros dopados, se refieren a polímeros a los que se añade un tinte. Un ejemplo de estos materiales es alcohol polivinílico (PVA) mezclado con tintes, los cuales tienen las siguientes características: alta sensibilidad, buena respuesta en frecuencia espacial, eficiencias de difracción razonable y alta razón señal a ruido. Lo que permite obtener la posibilidad de hacer películas de registro reutilizables. Dentro de la tabla 3,5 se muestran las diferentes propiedades de diferentes materiales holográficos de los sistemas de polímeros dopados. Este sistema se clasifica en:

- Polímeros dopados con tintes
- Polimeros dopados con fotocronicos
- Fotopolimeros de cadena lateral
- Polimeros dopados con bacteriorodopsina

### **Otros Sistemas**

Se encuentran materiales tales como el Sol-Gel, en donde se pueden grabar rejillas de transmisión permanentes. También se reportan emulsiones que graban puntos espectrales candescentes, radiación IR (infrarroja).

<b>TABLA 3.3 Algunas características sobresalientes de diferentes materiales holografías de sistemas fotopolimerizables, de películas en líquido y seco.</b>							
<b>MATERIAL</b>	<b>TIPO DE MODULACIÓN</b>	<b>METODO DE PREPARACIÓN</b>	<b>ESPESOR (<math>\mu</math>)</b>	<b><math>\lambda</math> nm</b>	<b>J/cm<sup>2</sup></b>	<b>l/mm</b>	<b><math>\eta\%</math></b>
<b>Composición de líquidos fotopolimerizables</b>							
<b>Bario y acrilato de plomo</b>	Superficie e índice de refracción	Líquido entre dos placas de vidrio	10-20	694	0,3	3000	45
<b>Acrilatos multifuncionales</b>	índice de refracción	Líquido entre dos placas de vidrio	55	450-550	0,1-0,2	-	80
<b>Metacrilato</b>	índice de refracción	Líquido entre dos placas de vidrio	120	457	0,5	-	14
<b>Película en seco fotopolimerizable</b>							
<b>Fotopolímero de DuPont's</b>	índice de refracción	Cubierto en sustrato de vidrio	1,25-200	350-550	0,1-0,4	3000	88-90
<b>Ommidex HRF De DuPont's</b>	índice de refracción	Cubierto en sustrato de plástico	6-78	450-650	0,01-0,1	6000	99
<b>DMP - 128</b>	Sólido	Cubierta en plástico flexible	1-30	422-647	0,005-0,3	5000	80-95
<b>Metil metacrilato</b>	índice de refracción	Muestra de PMMA	2000	325	50-150	5000	70
<b>Acrilamida</b>	índice de refracción	Cubierta en vidrio	100	633	0,1	3000	80

**TABLA 3.4 Características importantes de materiales holográficos de sistemas fotoenlazables.**

MATERIA	TIPO DE MODULACIÓN	TIPO DE PREPARACIÓN	ESPESOR $\mu$	$\lambda$ nm	J/cm <sup>2</sup>	l/mn	$\eta\%$
DCPVA	Indice de refracción	Cubierto en vidrio	30-60	488	0,5	3000	68
DCPAA	Indice de refracción	Cubierto en vidrio	40-60	488	4	3000	28
DCPAA-DMF	Indice de refracción	Cubierto en vidrio	40-60	488	0,2	3000	70
FePVA	Indice de refracción	Cubierto en vidrio	60	488	17	3000	80
PVCz	Indice de refracción	Cubierto en spinner	1,4-1,7	488	0,05-0,5	>3500	96

**TABLA 3.5 Propiedades de diferentes materiales holográficos de sistemas de polimeros dopados.**

MATERIAL	TIPO DE MODULACIÓN	ESPESO $\mu$	$\lambda$ nm	J/cm <sup>2</sup>	l/mm	$\eta\%$
MO/PVA	Rejilla de polarización	-	488	0,6	-	76
Tinte Azo PVA	Rejilla de polarización	15-30	488	-	500-4000	77
Acidified MR/PVA	Rejilla de polarización	30	488	-	500-4000	78
Tinte Azo PMMA	Rejilla de polarización	10	488	-	-	80
Espiropirano/PVCz	-	10	350	300	-	81
Azo-cadena lateral	Rejilla de polarización	0,5	514	-	1000	84
Bacterioropsina	-	200-500	350-620	-	>5000	86

El significado de las siglas de los materiales holográficos referente a las tablas 3,4 y 3,5. se presentan a continuación

**MMA** Metacrilato de metilo, **PMMA** Metacrilato de polimetilo, **AA** Acrilamide, **AIBN** Azobisisobutironitrilo, **TEA** Trietanolamina, **PVA** Alcohol polivinílico, **DCPVA** Alcohol polivinílico con Dicromato, **DCPAA** Poli acrílico ácido con dicromato, **DCPAA-DMF** Poli acrílico ácido dicromato formamida dimetilo, **FePVA** Alcohol polivinílico con cloruro ferrico, **PVCz** Polivinil carbazole, (DCCTA) Acetato de celulosa dicromatada, **MO** Naranja de metilo y **MR** Rojo metilo.

### 3.3. Haluros de plata

Los haluros de plata son cristales sensibles a la luz empleados en las emulsiones fotográficas que se vuelven negros cuando se exponen a la luz.

Regularmente, los materiales holográficos convencionales están formados por una emulsión donde se encuentran inmersos bromuros de plata, que son altamente fotosensibles. La emulsión de estos materiales está sobre un sustrato que normalmente es un acetato de poliéster o vidrio [11].

Los materiales holográficos, se encuentran comercialmente en una diversidad de formas con características de sensibilidad espectral y resolución; así como sustratos que pueden ser de vidrio, plásticos, poliéster, entre otros. Además poseen una alta fotosensibilidad en el rango visible, razón que les da el carácter de ser los materiales holográficos más populares (ver tabla 3,6).

<i><b>TABLA 3.6 Características de los materiales holográficos de Haluros de plata.</b></i>		
<b>PRODUCTO</b>	<b>RESOLUCIÓN (l/mm)</b>	<b>ESPESOR DE LA PELÍCULA (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>Kodak 649-F</b>	2000	17 / 6
<b>Placa 120 y Película SO-173</b>	2000	6
<b>Placa 125 y Película SO-424</b>	1250	7 / 3
<b>Placa 131 y Película SO-253</b>	1250	9
<b>Película 2415</b>	320	7,5
<b>AGFA</b>		
<b>8E56HD-AHI</b>	2500	7
<b>8E75HD-AHI</b>	2500	7
<b>10E56-NAH</b>	1500	7
<b>10E75-NAH</b>	1500	7

El material fotosensible que se usa en holografía, contienen cristales muy pequeños que se encuentran entre 0,08 y 0,03 micras. El tamaño de estos cristales es directamente proporcional a la sensibilidad del material, ya que la probabilidad de absorber un cierto número de fotones es proporcional al área proyectada de un cristal. El tamaño de los cristales de plata en el revelado, generalmente depende de la sensibilidad y de la resolución de la

imagen. Si los cristales son muy pequeños se tendrá una mayor resolución e inversamente si el tamaño de los cristales aumenta tendremos una resolución menor.

La sensibilidad de la película o índice de exposición, esta relacionada con la exposición necesaria para obtener una densidad específica. Sin embargo, el índice de exposición depende de otros factores, como son: el tiempo de revelado, temperatura de los líquidos, tipo de revelado etc.

## 3.4. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

### 3.4.1. Polimerización y estructura

La reacción por la cual se sintetiza un polímero a partir de sus monómeros se denomina polimerización. Según el mecanismo por el cual se produce la reacción de polimerización para dar lugar al polímero, ésta se clasifica como polimerización por pasos o como polimerización en cadena. En cualquier caso, el tamaño de la cadena dependerá del tiempo de reacción, se formarán  $n$  cadenas, obtenidas en la síntesis artificial de polímeros, de distinto tamaño entre sí y, por tanto, de distinto peso molecular.

Por otra parte, los polímeros pueden ser lineales, formados por una única cadena de monómeros, o bien ésta cadena puede presentar ramificaciones de mayor o menor tamaño. También se pueden formar entrecruzamientos provocados por el enlace entre átomos de distintas cadenas.

La naturaleza química de los monómeros, su peso molecular y otras propiedades físicas, así como la estructura que presentan determinan diferentes características para cada polímero. Por ejemplo, si un polímero presenta un grado de entrecruzamiento, el material será mucho más difícil de fundir que si no presentara ninguno.

Los enlaces de carbono en los polímeros no son equivalentes entre sí, por eso dependiendo del orden estereoquímico de los enlaces, un polímero puede ser: atáctico (sin orden), isotáctico (mismo orden), o sindiotáctico (orden alternante) a esta conformación se le llama tacticidad. Las propiedades de un polímero pueden ser modificadas severamente según su estereoquímica.

En el caso de que el polímero provenga de un único tipo de monómero se denomina homopolímero y si proviene de varios monómeros se llama copolímero o heteropolímero. Por ejemplo, el poliestireno es un homopolímero pues proviene de un único tipo de monómero, el estireno, mientras que si se parte de estireno y acrilonitrilo se puede obtener un copolímero de estos dos monómeros.

En los heteropolímeros los monómeros pueden distribuirse de diferentes maneras, particularmente para polímeros naturales, los monómeros pueden repetirse de forma aleatoria, informativa (como en los polipéptidos de las proteínas o los ácidos nucleicos) o periódica, como en el peptidoglucano.

Copolímero se le llama convencionalmente a un polímero sintético, los monómeros que conforman su cadena, son 2 o más, estos se ubican en la cadena principal alternándose según el diseño en: copolímero alternante, Copolímero en bloque Copolímero aleatorio, Copolímero de injerto. Para lograr este diseño, la reacción de polimerización y los catalizadores deben ser los adecuados.

Finalmente, los extremos de los polímeros pueden ser distintos que el resto de la cadena polimérica, sin embargo es mucho más importante el resto de la cadena que estos extremos debido a que la cadena es de una gran extensión comparada con los extremos.

### 3.4.2. Clasificación de polímeros

**Los polímeros se clasifican en las siguientes categorías**

**Según su origen**

- Polímeros naturales. Existen en la naturaleza muchos polímeros y las biomoléculas que forman los seres vivos son macromoléculas de polímeros. Por ejemplo, las proteínas, la celulosa, el hule o caucho natural, la quitina, lignina, etc.
- Polímeros semisintéticos. Se obtienen por transformación de polímeros naturales. Por ejemplo, la nitrocelulosa, el caucho vulcanizado, etc.
- Polímeros sintéticos. Muchos polímeros se obtienen industrialmente a partir de los monómeros. Por ejemplo, el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno, etc.

**Según su mecanismo de polimerización**

En 1929 Carothers propuso una distinción de los polímeros según su mecanismo de reacción:

- Polímeros de condensación. La reacción de polimerización implica a cada paso la formación de una molécula de bajo peso molecular, por ejemplo agua.
- Polímeros de adición. La polimerización no implica liberación de ningún compuesto de bajo peso molecular.

Unos años más tarde, Flory refinó la clasificación, dando más énfasis a la cinética de reacción que al hecho de liberar o no moléculas pequeñas:

- Polímeros formados por etapas. La cadena de polímero va creciendo gradualmente mientras haya monómeros disponibles, añadiendo un monómero cada vez. Esta categoría incluye todos los polímeros de condensación de Carothers y además algunos otros que no liberan moléculas pequeñas pero sí se forman gradualmente, como por ejemplo los poliuretanos.
- Polímeros formados por reacción en cadena. Cada cadena individual de polímero se forma a gran velocidad y luego queda inactiva, a pesar de estar rodeada de monómero.

### **Según sus aplicaciones**

Atendiendo a sus propiedades y usos finales, los polímeros pueden clasificarse en:

- Elastómeros. Son materiales con muy bajo módulo de elasticidad y alta extensibilidad; es decir, se deforman mucho al someterlos a un esfuerzo pero recuperan su forma inicial al eliminar el esfuerzo. En cada ciclo de extensión y contracción los elastómeros absorben energía, una propiedad denominada resiliencia.
- Plásticos. Son aquellos polímeros que, ante un esfuerzo suficientemente intenso, se deforman irreversiblemente, no pudiendo volver a su forma original. Hay que resaltar que el término plástico se aplica a veces incorrectamente para referirse a la totalidad de los polímeros.
- Fibras. Presentan alto módulo de elasticidad y baja extensibilidad, lo que permite confeccionar tejidos cuyas dimensiones permanecen estables.

- Recubrimientos. Son sustancias, normalmente líquidas, que se adhieren a la superficie de otros materiales para otorgarles alguna propiedad, por ejemplo resistencia a la abrasión.
- Adhesivos. Son sustancias que combinan una alta adhesión y una alta cohesión, lo que les permite unir dos o más cuerpos por contacto superficial.

#### **Propiedades ópticas de los polímeros**

- Fotoconductividad
- Electrochromismo
- Fotoluminiscencia (fluorescencia y fosforescencia)
- Electroluminiscencia
- Efecto fotoeléctrico
- Efectos ópticos no lineales
- Efectos electro ópticos
- Fotorrefractividad

#### **Propiedades eléctricas**

En general los polímeros tienen propiedades aislantes, para evitar cargas estáticas en aplicaciones que lo requieran, se ha utilizado el uso de antiestáticos que permite en la superficie del polímero una conducción parcial de cargas eléctricas. Los polímeros conductores han sido recientemente desarrollados y sus aplicaciones apenas están siendo estudiadas.



## Capítulo 4

# Caracterización del material y resultados

El material que resulta de mezclar PVA y VG es un nuevo material fotosensible en el que se grabaron rejillas holográficas y con esto se abre una nueva línea de investigación en materiales fotosensibles. Para caracterizar este material se mide la eficiencia de difracción de las rejillas holográficas grabadas. Esta eficiencia está en función de la concentración de las componentes del material, la longitud de onda, el ángulo de interferencia y el tiempo de exposición. Estas características ayudan a conocer la capacidad de registro del material.

### 4.1. Características del PVA y de la VG

Para obtener *alcohol polivinílico* se usa la hidrólisis del polímero acetato de polivinilo es un polímero sintético, obtenido de la polimerización del acetato vinílico, descubierto por el químico Fritz Klatte en 1912.

El alcohol polivinílico también es conocido como Alcohol de polivinilo; PVA; Polyvinyl; homopolímero del ethanol. El PVA tiene excelentes propiedades adhesivas. Es también resistente a grasa y a solventes. Se presenta comercialmente en forma de emulsión, como adhesivo para materiales porosos, en especial la madera. A una de sus variedades se le conoce como resistol blanco. También se puede utilizar para proteger el queso de los hongos y la humedad.

La Violeta de Genciana (Cloruro de metilrosanilina) es un colorante de

anilina que se utiliza para teñir núcleos celulares. También tiene propiedades bactericidas y bacteriostáticas y actividad fungicida. Comúnmente se llama merthiolate.

En la siguiente sección se describe el proceso para mezclar el PVA y la VG y formar el material fotosensible.

## 4.2. Preparación de la muestra

Se mezcla alcohol polivinílico y violeta de Genciana en un recipiente de vidrio. A esta mezcla se le da un agitado de 30 minutos aproximadamente en el agitador magnético; con esto se elimina totalmente los grumos que pudiera tener, quedando una mezcla homogénea color violeta. En la tabla 4,1 se muestran las diferentes concentraciones que se prepararon, manteniendo constante la cantidad de violeta de genciana y variando la cantidad de alcohol polivinílico.

CONCENTRACION	PVA	VG
1	5gr	0.0032gr
2	10gr	0.0031gr
3	15gr	0.0032gr
4	20gr	0.0032r
5	25gr	0.0032gr
6	30gr	0.0032gr

Previamente se prepararon los porta objetos los cuales sirvieron como sustratos para depositar la mezcla de PVA y VG. Estos porta objetos fueron sometidas a un trabajo de limpieza para dejarlas libres de impurezas. Este proceso se realizó de la siguiente manera:

1. Se lavan los porta objetos en una lavadora de ultrasonido durante 30 minutos.
2. Se enjuagan con agua destilada durante 10 minutos.
3. Se someten a un baño con alcohol isopropilico.
4. Se secan a presión con aire por 3 minutos.

### 4.3. ESPECTRO DE ABSORBANCIA DE LA EMULSIÓN PVA Y VG 45

Después del proceso de lavado y con la mezcla ya lista se depositaron 5 gotas del material sobre las placas de vidrio, el cual se extendió sobre el sustrato usando la técnica de la gravedad, que consiste en dejar el porta objeto sobre una superficie plana y horizontal. Posteriormente se deja secar por un tiempo de 12 hrs y se cubren para evitar que las muestras tuvieran polvo, obteniendo así una emulsión con un espesor aproximadamente de  $10\mu m$ . Al finalizar este proceso las placas están listas para grabar rejillas holográficas.

## 4.3. Espectro de absorbanca de la emulsión PVA y VG

Una vez obtenidas las emulsiones fotosensibles con diferentes concentraciones, se procede a obtener las curvas de absorbanca para saber cual longitud de onda es la adecuada para grabar las rejillas holográficas, esto se hace con un espectrofotometro Perkin Elmer  $\lambda 35$ . En la figura 4,1 se muestran los espectros obtenidos.

De la figura 4,1 se encuentra que hay un maximo de absorbanca de  $600nm$  por lo que se emplean dos longitudes de onda con las que se graban las rejillas ( $\lambda = 598$  y  $\lambda = 612$ ).

## 4.4. Grabado de las rejillas Holográficas

Para grabar las rejillas holográficas se usó el arreglo mencionado en la sección 2,3 y mostrado en la figura 4,3. El haz incide en un espejo semiplatado, de esta manera se divide en dos rayos los cuales son reflejados por dos espejos y son superpuestos sobre el material con un ángulo  $\theta$  donde se produce interferencia entre ellos.

En la figura 4,3 se puede ver la fotografía del arreglo en el laboratorio para grabar las rejillas holográficas. En este arreglo se usaron varias longitudes de onda uno de ellos fue uno de marca COHERENT de  $\lambda = 633nm$  con una potencia de  $10mW$  de salida cuyo haz de luz es de color rojo. Otros láser que se emplearon fueron uno de la marca COHERENT, cuya  $\lambda = 598nm$  y con potencia de  $5mW$  correspondiente al color amarillo y también se empleó un láser con  $\lambda = 612nm$  de  $10mW$  correspondiente al color naranja.

Para observar si realmente ocurría la interferencia entre los haces incidentes, se utilizó un microscopio cuya función es amplificar la imagen del patrón

!

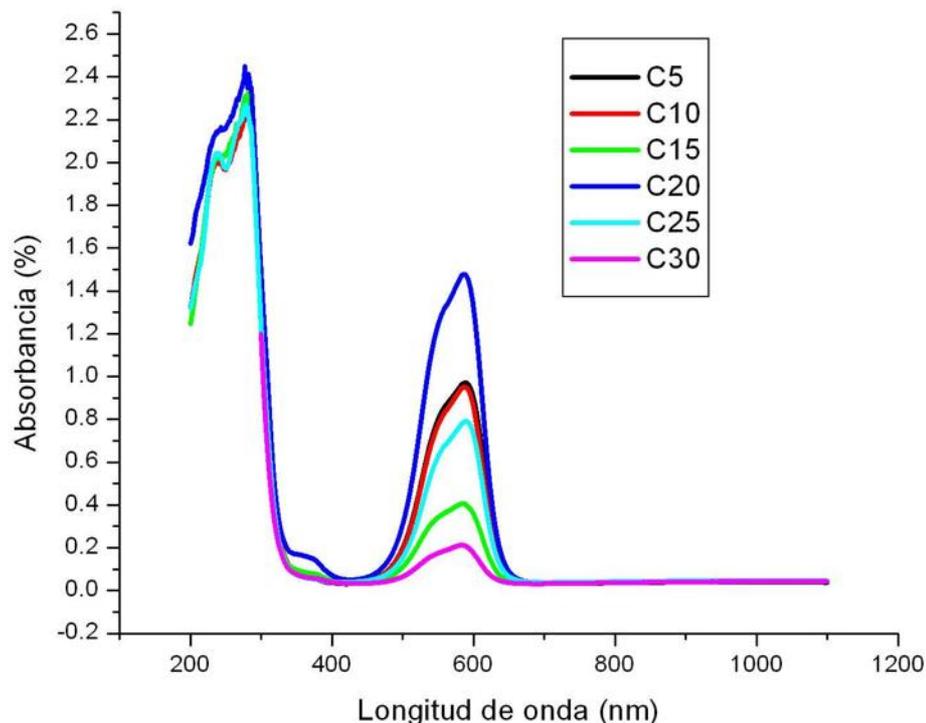


Figura 4.1: Absorbancia

de interferencia y poder observar las franjas. En la figura 2,4 se muestra la fotografía de este patrón amplificado y proyectado sobre una pantalla.

Se nota la presencia de la rejilla debido a que cuando ésta ya está grabada en el material, aparecen dos puntos brillantes que corresponden a los órdenes difractados 1 y  $-1$ . Para corroborar este resultado, se obstruye uno de los haces que interfieren en el material dejando pasar solo uno de ellos a través de la rejilla recién formada, cuando esto sucede aparecen los órdenes 1, 0 y  $-1$  de difracción producida por la rejilla.

Se puede alternar la obstrucción del haz y se seguirán observando 3 puntos brillantes sobre la pantalla, correspondiendo a los órdenes de difracción ya mencionados, cambiando únicamente su ubicación debido a la inclinación del

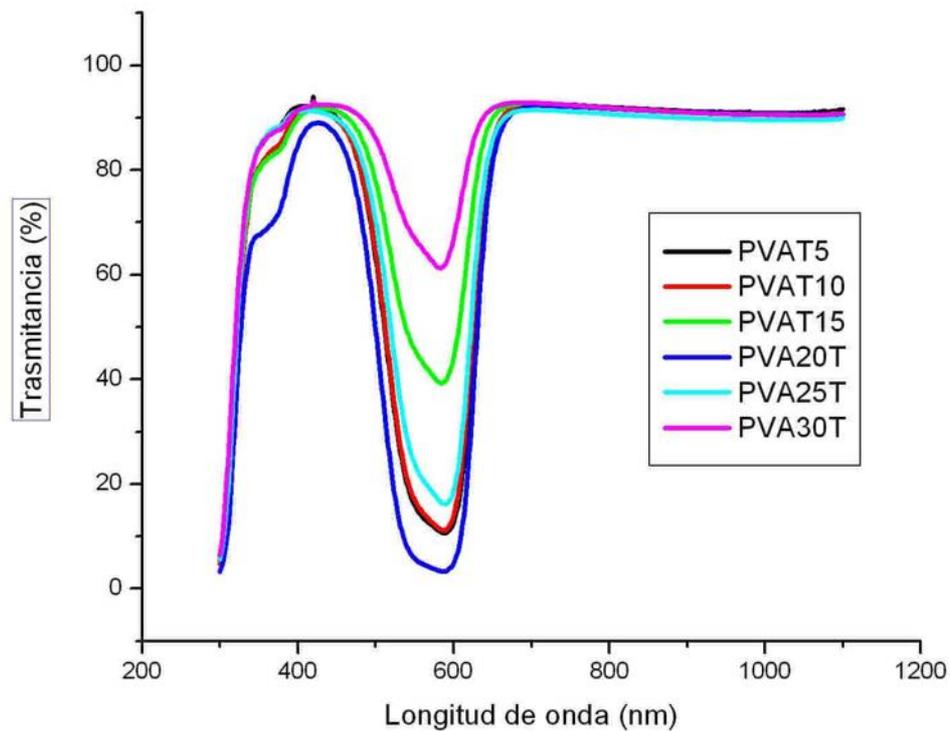


Figura 4.2: Trasmittancia

haz incidente. Estos ordenes de difracción se pueden observar en la figura 4,8.

Una de las características más notables del material fabricado es que no necesita ser sometido a proceso de revelado. Las rejillas que se graban en este material permanecen en él e inmediatamente se puede medir su eficiencia de difracción.

#### 4.4.1. Resultados experimentales

Se grabaron 9 rejillas de difracción una por cada concentración, con algunos parámetros iguales de registro; tales como: el ángulo de interferencia entre los haces  $5^\circ$  y razón entre los haces 1 : 1. Se varió el tiempo de expo-



Figura 4.3: Fotografía del arreglo para grabar rejillas holográficas en el laboratorio de óptica

sición, de: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60min. En la figura 4,4 y se muestran los resultados experimentales de la eficiencia de difracción de la energía de exposición para la concentración 1. En base a la grafica de la figura 4,4 se observa que se obtiene una mayor eficiencia cuando se expone durante 30min, por lo que todas las rejillas fueron grabadas con este tiempo.

Posteriormente se graban las rejillas variando la longitud de onda (usando diferentes lasers) en las diferentes concentraciones.

Se usaron las longitudes de  $\lambda = 598nm$  correspondiente al color amarillo y  $\lambda = 612nm$  correspondiente al color naranja, esto porque con la longitud de onda de  $\lambda = 633nm$  no se grabo ninguna rejilla ya que el material no es sensible a esta longitud de onda. En las figuras 4,5 y 4,6 se muestran los resultados.

Se observa de la figura 4,6 que la emulsión es más sensible en  $\lambda 612nm$  y que la mayor eficiencia es para la concentración 1 por que su  $\eta(\%)$  alcanza

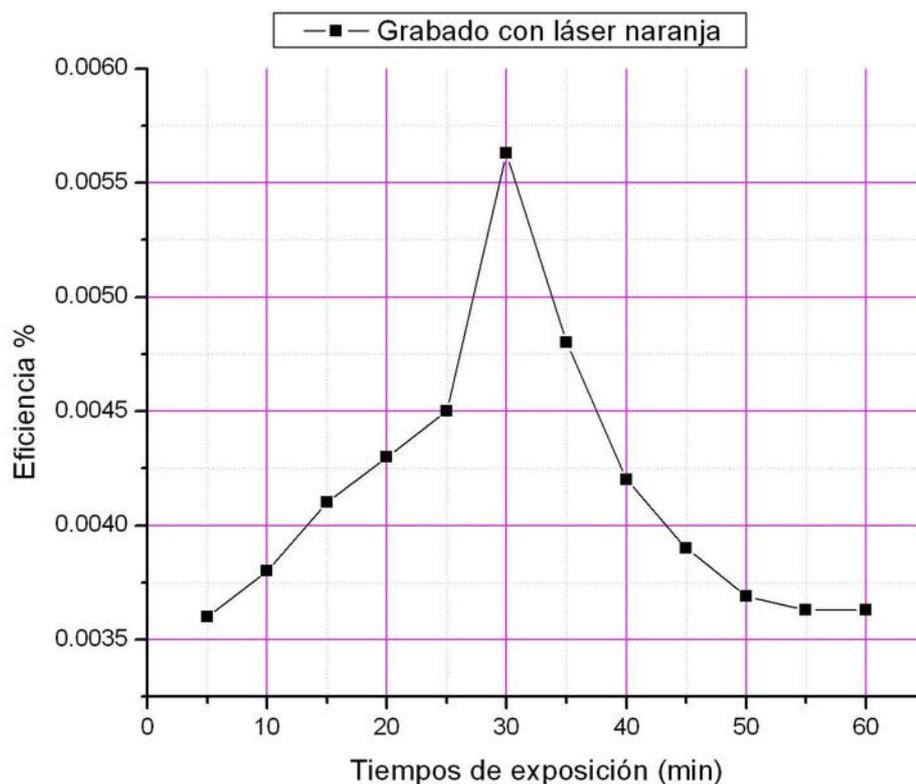


Figura 4.4: Grafica de eficiencia de difracción vs tiempos de exposición para la concentración 1

el valor más grande que es de 0,00563

El último paso consiste en grabar nuevamente rejillas de difracción, en la concentración 1 con la longitud de onda  $\lambda = 612nm$  y  $30min$  de tiempo de exposición pero variando el ángulo  $\theta$  entre los haces, cada  $5^\circ$  hasta  $20^\circ$  en la figura 4,7 se muestran los resultados. Se observa que la eficiencia más alta es para el ángulo de  $20^\circ$  con un valor de 0,006.

De acuerdo con la ley de Bragg:

$$2nd\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \lambda \quad (4.1)$$

donde  $d$  es el periodo de las rejillas,  $n$  es el índice de refracción,  $\theta$  el

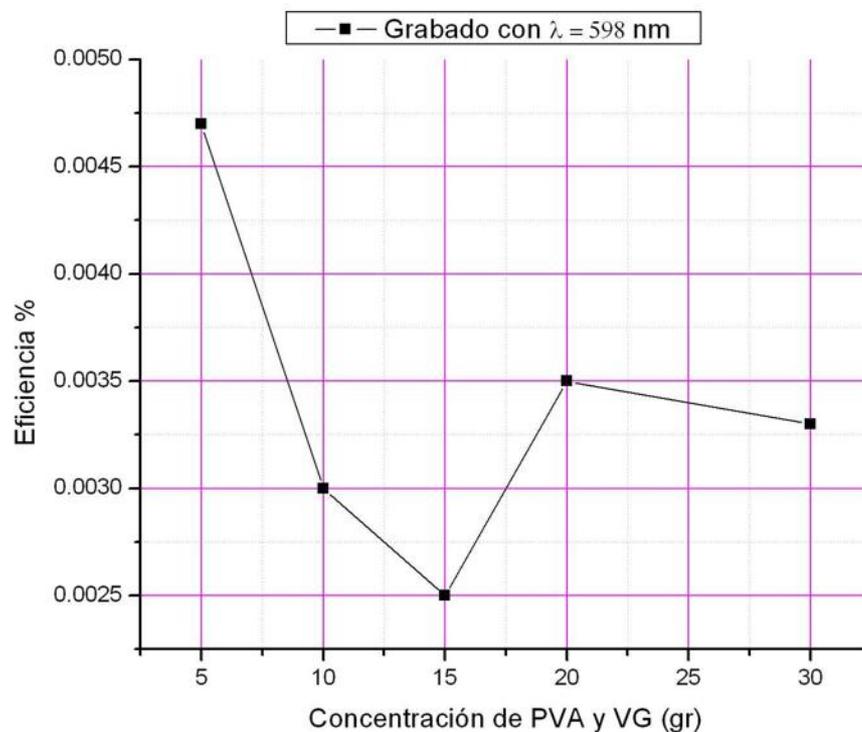


Figura 4.5: Grafica de la eficiencia de difracción obtenida para toda las concentraciones usando una  $\lambda = 598nm$

ángulo de interferencia entre los haces y  $\lambda$  la longitud de onda del laser, Los valores que se obtienen del periodo son:  $7018,34nm$ ,  $3511,18nm$ ,  $2344,87nm$  y  $1762,67nm$  con ángulos de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $20^\circ$  respectivamente.

La figura 4,8, corresponde a una fotografía de la difracción debida a la rejilla, realizada con el material propuesto, y donde se nota claramente los tres órdenes de difracción. En el centro es el orden cero y en ambos lados tenemos los órdenes  $+1$  y  $-1$ .

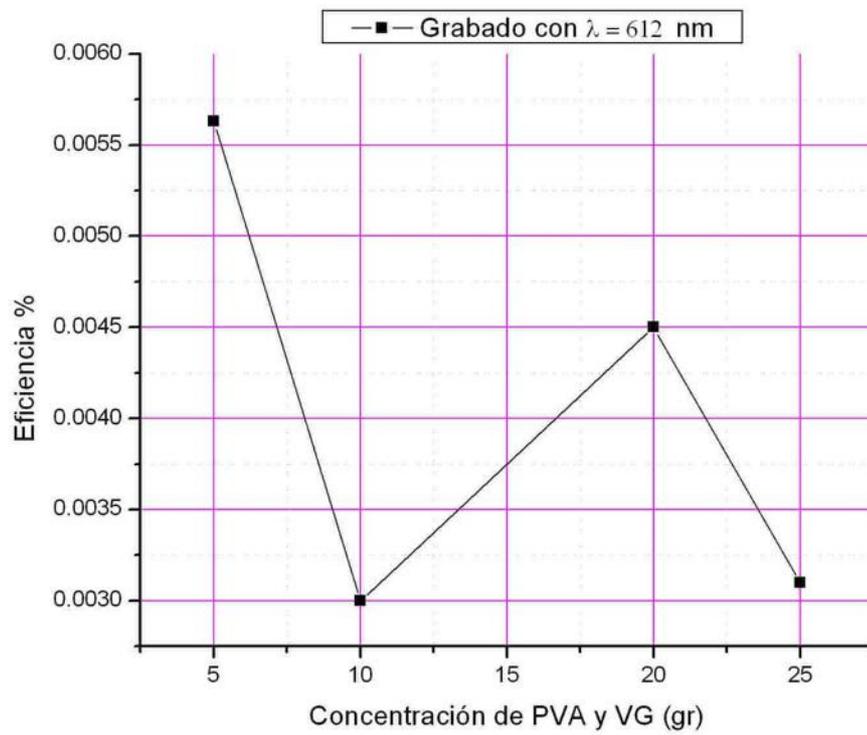


Figura 4.6: Grafica de la eficiencia de difracción obtenida para toda las concentraciones usando una  $\lambda = 612nm$

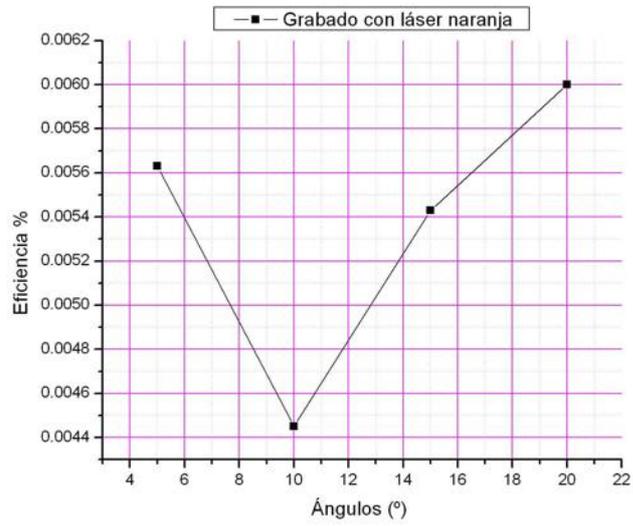


Figura 4.7: Eficiencia de difracción vs ángulos de interferencia.



Figura 4.8: Patrón de difracción de una rejilla holográfica grabada en la emulsión de PVA y VG.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Se ha encontrado un nuevo material fotosensible, el cual es una solución compuesta de alcohol polivinílico (PVA) y del tinte violeta de genciana (VG), que mezclados se obtiene el nuevo material holográfico. Estos materiales se emplean habitualmente como resistol y como antiséptico respectivamente.

El material fotosensible obtenido resulta barato comparado con los disponibles comercialmente. Mientras las películas holográficas a base de haluros de plata fabricados por la compañía Slavich tienen un costo elevado, el material que se usó en esta tesis es de apenas 500 pesos.

En este material se grabaron rejillas de difracción de safe u hologramas, midiendo la eficiencia de difracción como una característica importante, cuyo valor indica la calidad de ellas.

No existen trabajos que hacen referencia al uso de este polímero donde almacenan información, por lo que hace que este trabajo sea más importante. Cuando este polímero se mezcla con violeta de cristal, juntos forman un material fotosensible en la región del visible comprendida entre los 500 y 650nm, con un máximo de absorbancia en la longitud de onda  $\lambda = 600nm$ .

Se prepararon diferentes concentraciones de PVC y VG donde se grabaron rejillas holográficas. No fue posible que en todas las concentraciones se registrara la rejilla debido a que la sensibilidad del material no es igual para todas las longitudes de onda. Además, experimentalmente se pudo notar que la temperatura del laboratorio es un factor importante para la sensibilidad del material; por lo que en el futuro se puede analizar este caso.

La mejor concentración es la 1 con 5gr de PVA y 0,0032gr de VG. La eficiencia de difracción de la rejilla grabada en con esta concentración es de  $\eta = 0,006\%$  y tiene una frecuencia espacial de la rejilla con un ángulo de  $20^\circ$

es de 588 líneas/mm, el tiempo aproximado de grabado es de 30 minutos.

Con este trabajo se abren nuevas posibilidades de investigación en materiales fotosensibles, por lo que en trabajos futuros se continuará con la caracterización de este material y mezclando con otros componentes que permitan aumentar su sensibilidad.

# Apéndice A

## Transformada de Fourier de rendijas

Como se mencionó en el capítulo 2, la difracción se puede analizar con la teoría de Fraunhofer y con las transformadas de Fourier. En esta tesis se grabó una rejilla holográfica que cuando se ilumina con un haz de luz, éste se difracta produciendo puntos brillantes sobre una pantalla. Para comprender la formación de estos puntos brillantes, se presenta a continuación ejemplos de difracción de rendijas que se pueden relacionar con la rejilla de difracción.

**Sean dos rendijas muy angostas (ancho despreciable)** separadas una distancia  $A$ .

la ecuación de transmitancia para este caso es:

$$t(x) = \delta\left(x + \frac{A}{2}\right) + \delta\left(x - \frac{A}{2}\right) \quad (\text{A.1})$$

Aplicando la aproximación de Fraunhofer para esta transmitancia obtenemos:

$$F\{t(x)\} = \exp(-i\pi Au) + \exp(i\pi Au), \quad (\text{A.2})$$

$$= 2\cos\pi Au = 2\cos\pi A \frac{x}{\lambda f}, \quad (\text{A.3})$$

donde  $u = \frac{x}{\lambda f}$ .

**Difracción de 2 rendijas de ancho apreciable** como puede observarse este patrón es similar al patrón de interferencia que se grabó en el PVA y VG.

La ecuación de transmitancia para este caso esta dado por:

$$t(x) = \text{rect}(x) * [\delta(x + \frac{A}{2}) + \delta(x - \frac{A}{2})] \implies, \quad (\text{A.4})$$

$$F\{t(x)\} = F\{\text{rect}(x)\}F[\delta(x + \frac{A}{2}) + \delta(x - \frac{A}{2})], \quad (\text{A.5})$$

donde  $\text{rect}(x) = 1$  si  $|x| \leq \frac{a}{2}$  y 0 en otro caso.

calculando las transformadas por separado se obtiene:

$$F\{\text{rect}(x)\} = a \frac{\sin(\pi ua)}{\pi au} = \text{sinc}(au), \quad (\text{A.6})$$

$$F\{t(x)\} = 2\text{sinc}(\pi u)\cos(\pi Au), \quad (\text{A.7})$$

donde  $a$  es el ancho de la rejilla.

### De un tren infinito

La ecuación de transmitancia para este caso es:

$$t(x) = \cos(\pi Ax) \implies, \quad (\text{A.8})$$

$$F\{\cos\pi Ax\} = \delta(u + \frac{A}{2}) + \delta(u - \frac{A}{2}), \quad (\text{A.9})$$

este caso es ideal no existe algo infinito, lo real es que este tren tenga un limite, es decir que esté encerrada por una función rectángulo[6]  $\delta_B(x)$  eso implicaría que la función de transmitancia sea:

$$t(x) = 2\cos(\pi Ax)\delta_B(x) \implies, \quad (\text{A.10})$$

$$F\{t(x)\} = [\delta(u + \frac{A}{2}) + \delta(u - \frac{A}{2})] * B\text{sinc}(Bu), \quad (\text{A.11})$$

### Para un arreglo periodico de rendijas muy angostas

La función de transmitancia para este caso es:

$$t(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - na) \implies, \quad (\text{A.12})$$

$$F\{t(x)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(2\pi n a u), \quad (\text{A.13})$$

con la ayuda de algunos calculos se obtiene  $F\{t(x)\} = a^{-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u - \frac{n}{a})$  el patrón de difracción que se observa para este caso es una serie de puntos brillantes.

**Rejila real** Este es el caso importante porque la rejilla que se graba en el material fotosensible esta encerrada en un area real. Además la difracción que se observa son dos puntos brillantes conocidos como ordenes de difracción simetricos respecto del orden cero que es el central.

la ecuación de trasmitancia de este caso esta dada por:

$$t(x) = [rec(x/a) * \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - na)]rect(\frac{x}{A}), \quad (A.14)$$

donde  $rec(x/a)$  representa el ancho de cada franja,  $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - na)$  posición de cada franja y  $rect(\frac{x}{A})$  representa el tamaño de la rejilla.

$$F\{t(x)\} = [F\{rect(x/a)\}F\{\sum \delta(x - na)\}] * F\{ret(x/A)\}, \quad (A.15)$$

$$= [asinc(ua) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(u - n/a)] * sinc(uA) \quad (A.16)$$

este patrón de difracción se muestra en la figura 2,5.



# Índice de figuras

2.1. Gráfica que muestra el perfil de una onda estacionaria suponiendo $t = 0$ . . . . .	14
2.2. Perfil de una onda estacionaria (línea negra) suponiendo $t = 0$ y muestra el perfil de onda con fase inicial (línea roja). . . . .	15
2.3. Ondas de dos fuentes puntuales superponiéndose espacialmente en el punto $P$ . . . . .	17
2.4. Geometría para calcular la diferencia de camino óptico . . . . .	22
2.5. Fotografía ampliada de un patrón de interferencia producido por la superposición de ondas ampliada . . . . .	24
2.6. Muestra el arreglo interferométrico para el grabado de una rejilla de difracción . . . . .	27
2.7. Geometría de difracción para un frente de ondas planas. . . . .	28
2.8. Esquema de la difracción de una rejilla. (a) de reflexión, y (b) de transmisión. Obsérvese las direcciones discretas de la luz difractada. . . . .	29
2.9. Muestra el arreglo para leer una rejilla de difracción . . . . .	30
4.1. Absorbancia . . . . .	46
4.2. Transmitancia . . . . .	47
4.3. Fotografía del arreglo para grabar rejillas holográficas en el laboratorio de óptica . . . . .	48
4.4. Gráfica de eficiencia de difracción vs tiempos de exposición para la concentración 1 . . . . .	49
4.5. Gráfica de la eficiencia de difracción obtenida para todas las concentraciones usando una $\lambda = 598nm$ . . . . .	50
4.6. Gráfica de la eficiencia de difracción obtenida para todas las concentraciones usando una $\lambda = 612nm$ . . . . .	51
4.7. Eficiencia de difracción vs ángulos de interferencia. . . . .	52

- 4.8. Patrón de difracción de una rejilla holográfica grabada en la emulsión de PVA y VG. . . . . 52

# Bibliografía

- [1] T. J. Trout A. M. Weber, W. K. Smother and D. J. Mickish. Hologram recording in du pnt's new photopolymer materials. *SPIE*, 1990.
- [2] Fátima Pérez Ainhoa Gastón and Joaquín Sevilla. Optical fiber relative-humidity sensor with polyvinyl alcohol film. *Optical Society of America*, 2004.
- [3] J.Ñ. Cederquist and J. R. Fienup. Analytic design of holographic optical elements. *Optical Society of America*, 1987.
- [4] G. A. Delzenne. *In Recording materials and processes and Holographic recording materials*. MRCE Monograph Series, 1989.
- [5] Roma Grzymala and Tuula Keinonen. Self-enhancement of holographic gratings in dichromated gelatin and polyvinyl alcohol films. *Optical Society of America*, 1998.
- [6] Eugene Hecht. *Óptica*. Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [7] Hwei. Hsu. *Transformadas de Fourier*. Addison Wesley Iberoamericana, 2000.
- [8] Sylviane Lelievre Lelievre and Jean J. A. Dichromated polyvinyl alcohol films used as a novel polarization real time holographic recording material. *Optical Society of America*, 1998.
- [9] L. Mikaelian and V. A. Barachevsky. Analytic optimization for holographic optical element. *Proc. SPIE 1559*, 1989.
- [10] C. B. Burckhardt R. J. Collier and L. H. Lin. Optical holography. *Academic Press, Inc. LTD*, 1971.

- [11] Juan Carlos Ibarra Torres. *Caracterización de Materiales Holográficos*. PhD thesis, Universidad de Guadalajara, 1998.
- [12] T. John Trout. Holographic materials. *SPIE*, 1995.
- [13] Jimmy Donal Wales y otros. (<http://www.wikipedia.org>).
- [14] Jimmy Donal Wales y otros. (<http://www.slavich.ru/english/holo/holo.html>).