

Principales parámetros de los materiales fotosensibles para utilizarse en holografía

CRISTINA SOLANO

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.

Apartado postal 948, León, Gto., México

Recibido el 5 de octubre de 1993; aceptado el 18 de abril de 1994

RESUMEN. Se analizan las principales propiedades y métodos de caracterización para determinar mejores materiales fotosensibles para holografía.

ABSTRACT. In this paper the main properties and characterization methods needed to analyze a photosensitive material to be used in holography are discussed.

PACS: 42.40.Ht; 42.70.Gi; 42.40.-i

1. INTRODUCCIÓN

La importancia del material fotosensible en holografía la reconoció Gabor en una de sus primeras publicaciones [1], ya que es evidente que la alteración de la información durante el registro del holograma, no es posible recuperarla en procesos posteriores. Debido a esto se han propuesto varios esquemas para presentar las características más importantes de los materiales fotosensibles utilizados en holografía, sin embargo no existe una uniformidad de criterios, lo que dificulta la tarea al analizar los diferentes materiales y para escoger el más conveniente a una determinada aplicación.

El presente trabajo tiene como fin el de realizar una revisión de las principales características de los materiales fotosensibles, para presentar y discutir posteriormente las curvas de caracterización que se han propuesto por otros autores. Entre los principales parámetros que determinan la calidad de la imagen holográfica producida al utilizar un cierto material fotosensible están: sensibilidad, dependencia entre el tiempo de exposición y la eficiencia de la imagen reconstruida, máxima resolución espacial, respuesta espectral, ruido, linealidad de la respuesta de la emulsión, transmitancia intrínseca del material en el holograma revelado, facilidad de revelado, etc.

Los materiales fotosensibles que se encuentran mejor caracterizados son los compuestos de halogenuros de plata, ya que se utilizan en fotografía. Sin embargo como se discutirá a lo largo del presente trabajo, existen grandes diferencias entre los procesos holográficos y fotográficos, lo que modifica los criterios impuestos a los materiales que se utilizan así como la forma de evaluar sus características [2]. Otro factor importante en los materiales de registro es su sensibilidad a las condiciones ambientales de trabajo, por lo que es indispensable especificar los parámetros involucrados en la caracterización de los materiales fotosensibles.

Es necesario tener en cuenta que en este trabajo sólo se especifican las características y requisitos de los materiales fotosensibles en forma general, evitando hablar de algún material en particular.

2. PRINCIPALES PARÁMETROS DE LOS MATERIALES FOTOSENSIBLES

El proceso fotográfico consiste en formar la imagen de un objeto sobre una placa fotográfica, donde la imagen obtenida en este caso representa una distribución de intensidades que refleja el objeto; sin embargo, Gabor [3] en 1948 encontró la forma de registrar la fase de la onda luminosa proveniente del objeto, utilizando el patrón de interferencia, el cual se produce por la superposición de los campos luminosos de una onda proveniente del objeto y una onda empleada como referencia. De esta forma, la fase del objeto se traduce en el espaciamiento de las microfranjas producidas por el patrón de interferencia, conservándose así la fase.

Por otro lado, la imagen del objeto se reconstruye cuando un campo incidente se difracta a través del holograma. Por lo anterior es posible definir que el registro holográfico sobre una película fotosensible forma una rejilla compleja, la cual es capaz de reconstruir una imagen por efecto de difracción [4].

En estos dos procesos el material fotosensible que se utiliza para el registro debe responder a la exposición de la luz con un cambio en sus propiedades físicas y químicas. La amplitud de transmitancia compleja del material puede escribirse en la forma [5]

$$t(x, y) = A \exp(-\alpha d) \exp[-i(2\pi nd/\lambda)], \quad (1)$$

donde α es la constante de absorción del material, d su grosor, n su índice de refracción y λ la longitud de onda utilizada. Los materiales empleados en fotografía responden a la luz con un cambio en su amplitud, sin embargo en holografía es posible utilizar un material que registre su respuesta a la luz predominantemente en forma de cambios de amplitud o de fase. Las características del registro dependen del tipo de material utilizado, por lo que los hologramas resultantes pueden clasificarse como moduladores de amplitud si predominan los cambios en α con la exposición, obteniéndose diferencias de transmitancia en el material de registro, y modulados por la fase si $\alpha =$ constante y los cambios con la exposición más importantes se presentan en n y/o d . A los hologramas con variaciones en la amplitud y en la fase se les denomina hologramas de transmitancia compleja; experimentalmente, en la mayoría de los casos, es difícil eliminar esta dualidad.

Otra distinción básica de los hologramas es la clasificación como hologramas gruesos o de volumen y hologramas delgados. Un holograma se considera delgado cuando la estructura que lleva la información tiene un grosor pequeño del orden de la longitud de onda de la luz empleada en su registro. En este caso las características del holograma resultante dependerán de la posición de la placa fotosensible con respecto al patrón de interferencia, de acuerdo con la Fig. 1. En esta figura en la región de superposición existe un patrón de franjas estacionarias si los dos haces provienen de la misma fuente y la diferencia de caminos ópticos entre ellas no es mayor a la longitud de coherencia de la fuente utilizada. En la Fig. 1a, las franjas de interferencia se registrarán perpendiculares al grueso de la

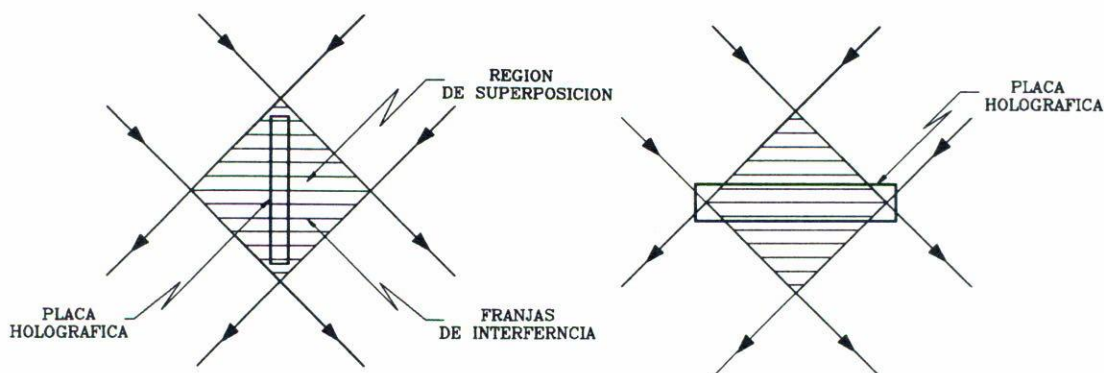


FIGURA 1. Diagrama del dispositivo experimental para registrar a) hologramas de transmisión y b) hologramas de reflexión.

emulsión, por lo que se obtendrá un holograma de transmisión, este tendrá características de holograma de volumen si el material fotosensible es suficientemente grueso. En el caso mostrado en la Fig. 1b, las franjas de interferencia se registrarán paralelas al grueso de la emulsión, holograma de reflexión, y depende también del grosor del material fotosensible el que tenga características de holograma de volumen.

Como se observa de la Fig. 1, la clasificación de estos hologramas depende de la geometría de registro y del grosor físico del material, lo que tiene una influencia directa en la eficiencia de difracción del holograma resultante. Comúnmente, algunos hologramas se consideran delgados aun si tienen un grosor de varias longitudes de onda, ya que no presentan las características de los hologramas de volumen. Cada uno de estos hologramas (de volumen o delgados, de fase o de amplitud) tienen diferentes características en la definición de la imagen, selectividad, eficiencia de difracción, etc. Estas propiedades no se describirán aquí, ya que queda fuera del objetivo del presente trabajo y están reportadas en otras publicaciones [4,6].

A continuación se analizarán los principales factores que definen el comportamiento de un material; éstos se dividirán en tres grupos: los relacionados con las características de los elementos fotosensibles del material de registro (resolución espacial, sensibilidad, etc.), la respuesta de éste a la luz (reproducible, efectos no lineales, ruido, intermodulación, etc.), y las características físicas del material (tamaño, grosor, etc.).

Para evaluar la imagen holográfica es necesario definir ciertos parámetros que puedan dar una idea cualitativa y/o cuantitativa de la calidad de la imagen producida por un holograma. Es posible imaginar un gran número de criterios, como la claridad, contraste, brillantez o cantidad de ruido de la imagen. Sin embargo, aun midiendo estos parámetros debe existir un criterio apropiado para definir la calidad de la imagen y éste está relacionado con la aplicación que se desea dar al holograma, por lo que en este trabajo se discutirán algunos de los criterios conocidos para dar así los elementos de juicio necesarios.

2.1. Eficiencia de difracción (η)

Una de las características de un holograma que se considera como la más importante es

TABLA I. Eficiencias de difracción máximas teóricas de los diferentes tipos de hologramas [6].

Tipo de holograma	Plano de Transmisión		Volumen de Transmisión		Volumen de Reflexión	
	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase
Eficiencia de difracción	6.25%	33.9%	3.7%	100%	7.2%	100%

la brillantez de la imagen o la cantidad de luz difractada en la imagen holográfica, la que se conoce como eficiencia de difracción. Ésta se define como la razón de intensidades entre la intensidad difractada en el primer orden que contribuye a la reconstrucción del frente de onda original y la intensidad de la onda luminosa incidente sobre el holograma. La importancia de producir un holograma con una alta eficiencia de difracción es obvia, ya sea que su aplicación sea para obtener una imagen tridimensional, como aplicación en holografía interferométrica, almacenamiento de datos, etc. El uso eficiente de la luz que lo ilumina nos permite tener sistemas pequeños más económicos y puede ser el factor decisivo para una determinada aplicación. Sin embargo, es necesario tener ciertas precauciones al analizar la eficiencia de difracción de un holograma, tal y como se verá en la Sec. 4. Por lo regular, para obtener una eficiencia de difracción alta se introduce ruido sobre la imagen que puede llegar a ser inaceptable.

En la Tabla I se muestran las eficiencias teóricas máximas de difracción que se pueden obtener de los diferentes tipos de hologramas [7]. De esta Tabla se puede observar claramente que las mayores eficiencias de difracción se obtienen con los hologramas de fase, que pueden formarse directamente en varios tipos de materiales holográficos. Para estos resultados, se consideró que el material holográfico realiza un registro lineal, por lo que existe una limitación en el intervalo de exposiciones que se pueden utilizar (Sec. 4).

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS FOTOSENSIBLES DEL MATERIAL DE REGISTRO

La mayoría de los materiales fotosensibles tienen un medio de soporte que contiene los elementos fotosensibles. Este material de soporte puede contener partículas suspendidas que dispersan la luz y que alteran la calidad final del holograma registrado. La penetración de la luz en este medio se encuentra en función de la longitud de onda, el grosor, etc., por lo que es muy importante que al describir un material fotosensible se especifiquen las características de este medio de soporte.

Debido a la gran cantidad de materiales fotosensibles que se pueden utilizar en holografía, como lo son los materiales de halogenuros de plata, gelatina dicromatada, cristales fotorrefractivos, fotorresinas, termoplásticos, fotopolímeros, fotocromicos, etc., cada uno de ellos tendrá un diferente mecanismo de absorción de la luz. Por esta razón, en el presente trabajo se analizarán las características que debe tener un material fotosensible para que pueda ser utilizado en holografía y poder comparar éstas para tener los elementos de juicio necesarios para decidir qué material se aplica mejor a un proceso particular. Entre las principales características de los elementos fotosensibles están los siguientes.

3.1. Sensibilidad espectral

Se conoce como sensibilidad espectral al intervalo de longitudes de onda que un material fotosensible es capaz de absorber. Para que este material se pueda utilizar en holografía es necesario que el material holográfico sea sensible a la longitud de onda del láser utilizado. Entre los láseres que se utilizan comúnmente en holografía están los de Ar (argón), He-Cd (helio-cadmio), He-Ne (helio-neón), CO₂ (dióxido de carbono) y los láseres de diodo. Los dos primeros emiten en la parte azul-verde del espectro visible y el láser de He-Ne y los de diodo en la parte roja del mismo. La utilización de los láseres que emiten en el infrarrojo se ve limitada por la escasez de materiales que sean sensibles a esta parte del espectro, aun cuando existen varios trabajos en este campo [8].

3.2. Velocidad del material fotosensible

Este parámetro se refiere a la cantidad de energía luminosa necesaria para provocar un cambio fotoquímico en el material en un determinado tiempo.

La reducción de la energía luminosa óptima para una material es importante dado que los tiempos de exposición se reducen y minimizan los requisitos de estabilidad mecánica del arreglo experimental. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que los materiales fotosensibles de alta resolución son antagónicos con los materiales de alta fotosensibilidad y también es necesario encontrar el mejor compromiso entre ellas. Existen muchos criterios para medir la velocidad de una película fotográfica, el más común es el que mide el recíproco de la mínima energía necesaria para obtener una densidad óptica que se puede registrar, pero la desventaja de este criterio es que no se puede aplicar a todos los materiales fotosensibles.

En general, considerando la ecuación $E = It$, E = energía de exposición, I = intensidad del haz y t = tiempo de exposición, se puede decir que un material fotosensible se considera más rápido que otro, sí, para una condición de iluminación (misma intensidad), se requiere menos energía de exposición (menor tiempo de exposición) para producir un holograma con la misma eficiencia de difracción. La sensibilidad está directamente relacionada con el mecanismo de absorción de cada material.

3.3. Resolución

Una de las características importantes de los material de registro es la resolución. Se conoce como resolución (ν) a la capacidad de registrar el mínimo detalle de la información proveniente del objeto, y se expresa normalmente en ciclos o líneas por milímetro.

La importancia de este parámetro reside en que si se registra un holograma a baja frecuencia se tendrá una pérdida en el detalle de las imágenes [5]. Los requisitos de resolución teóricos para los diferentes hologramas (independientes del tipo de material) son [4,6]:

Para hologramas de transmisión $0 < \nu < 4000$ ciclos/mm

y

para hologramas de reflexión $4500 < \nu < 6000$ ciclos/mm.

En el caso de hologramas de transmisión, estos valores se deben a que la frecuencia portadora sobre la cual se codifica la información está dada por la ecuación de la rejilla [4]

$\nu = (\text{sen } \theta_0 - \text{sen } \theta_r)/\lambda$, donde λ es la longitud de onda de la luz en el aire empleada en el registro, θ_0 y θ_r son los ángulos del campo objeto y el de referencia medidos sobre el plano normal al material de registro. Estos ángulos varían entre 0 y 90 grados, para hologramas de transmisión y $\theta > 90$ grados para los hologramas de reflexión.

En hologramas por reflexión, las franjas de interferencia están separadas por la cantidad $\lambda/(2n)$, donde λ es la longitud de la luz utilizada para el registro y n el índice de refracción del material.

De estos requisitos se puede observar que la resolución es uno de los factores determinantes en la elección del material fotosensible. Como dato comparativo podemos mencionar que para utilizar un material fotosensible en fotografía una resolución de $\nu = 200$ ciclos/mm se considera alta.

Entre los parámetros utilizados en la medida de la resolución está la modulación o visibilidad (V) de la señal definida por

$$V = \frac{2\sqrt{R}}{2 + R}, \quad (2)$$

donde R es la razón entre los haces dados por $R = I_0/I_r$, I_r e I_0 son las intensidades de los haces de referencia y el objeto, respectivamente. De estas ecuaciones se puede observar que la visibilidad será máxima cuando $R = 1$, sin embargo, como se verá en las siguientes secciones, para reducir los términos de intermodulación y los no lineales es necesario cambiar el valor de R de uno a cinco, aproximadamente. Para estos valores la disminución en η (eficiencia de difracción) es menor que el recíproco de R [9].

El criterio fotográfico utilizado para medir el poder de resolución de una emulsión es utilizando la tarjeta de prueba de la USAF de tres barras, como la mostrada en la Fig. 2. La resolución aumenta incrementando el contraste entre los elementos adyacentes de la figura, el contraste de las líneas de la tarjeta debe especificarse para que la resolución que se determinó tenga significado. Al analizar la imagen resultante se estudia el conjunto de barras más pequeño que se puede discernir, y es el que define la resolución o poder de resolución para esa exposición y revelado.

El criterio anterior se puede aplicar a la holografía, indicando el ángulo entre los haces objeto y de referencia con el que se registró el holograma, dado que este ángulo cambia el valor de la resolución indicado en la tarjeta de prueba.

3.3.1. Modulación en el umbral

Intuitivamente se puede esperar que el material fotosensible sea incapaz de resolver detalles más finos que el tamaño de los elementos fotosensibles que forman la imagen, pero la resolución está sujeta a mecanismos más complejos y puede reducirse por factores como granularidad o tamaño del elemento sensible, definición, contraste de la imagen y claridad de la emulsión. Por esta razón, de este el punto de vista fotográfico se introdujo el concepto de modulación en el umbral [10] (TM, *threshold modulation*) para describir la señal de modulación mínima necesaria a una cierta frecuencia espacial para crear una señal sinusoidal detectable sobre la película. El concepto TM considera a la resolución en el sentido de reconocimiento de la detección dependiendo del contraste y las frecuencias.

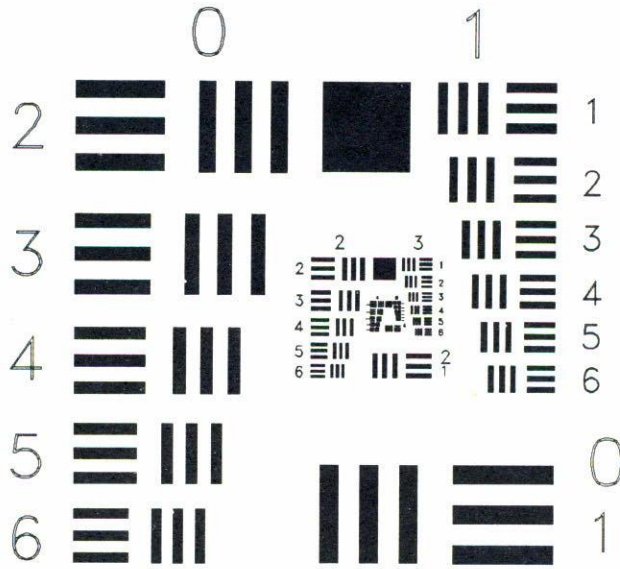


FIGURA 2. Tarjeta de prueba USAF para analizar la resolución de un material fotosensible [20].

Cuando el contraste de la imagen decrece, también decrece la habilidad para detectar su presencia debido a la existencia de la estructura granular del medio de registro. El valor mínimo del contraste dependerá del tipo de material fotosensible. Este concepto se utiliza en el análisis de fotografías aéreas y en procesamiento digital de imágenes.

3.3.2. MTF del material fotosensible

Un concepto más común en óptica es el de la MTF (*modulation transfer function*) que caracteriza el cambio en la cantidad de la modulación que se experimenta por una modulación unitaria sinusoidal de cualquier frecuencia espacial expuesta sobre una película dada. Esto sirve para caracterizar la respuesta relativa del material a las diferentes frecuencias espaciales.

La MTF es de gran interés en el análisis de las características de los materiales fotosensibles, debido a que tiene una influencia al cuadrado con la eficiencia de difracción [12].

Para materiales compuestos por halogenuros de plata se han aplicado tres métodos para medir las MTF de una emulsión, el principio de las tres métodos se muestra en la Fig. 3 [12] y se describen a continuación:

a) El microdensitómetro. Este instrumento utiliza una rendija como la abertura de barrido, (Fig. 3a). En el caso de emulsiones para registro holográfico este dispositivo no tiene la suficiente resolución para realizar una medida confiable [12].

b) El método de difracción. En este método se deriva la MTF de una serie de mediciones de la eficiencia de difracción (η) de hologramas con diferente frecuencia espacial, donde se normalizan estos resultados para frecuencias espaciales bajas (Fig. 3b). Este método no es preciso ya que implica que no existen otros parámetros que puedan variar la eficiencia de difracción de los hologramas, o que la influencia de éstos se puede mantener cons-

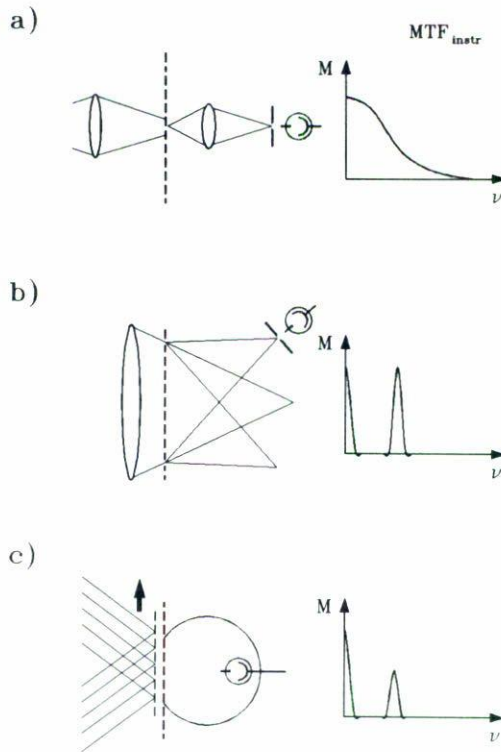


FIGURA 3. Métodos para medir las MTF de un material fotosensible [12]: a) microdensitómetro, b) método de difracción y c) microdensitómetro de rejillas múltiples sinusoidales.

tante [13, 14]. La ventaja de este método sobre el anterior es que realiza las mediciones sobre un área mayor, promediando las variaciones de granularidad. Su desventaja es que al realizar las mediciones en un plano alejado del holograma no permite que se tomen en cuenta las variaciones introducidas por la superficie del holograma que actúan como una rejilla de fase. Este método es útil para hologramas de amplitud.

c) El microdensitómetro de rejillas múltiples sinusoidales. Este instrumento elimina los efectos de fase, desventaja del método anterior, ya que realiza las mediciones en el plano del material en lugar del de la transformada, (Fig. 3c). La muestra que ha registrado un patrón de interferencia se irradia por una distribución de intensidad proveniente de la interferencia de la misma frecuencia espacial y orientación que la registrada [15]. Toda la luz que transmite la muestra se colecta por una esfera integradora como se muestra en la Fig. 3c. Cuando se cambia la fase de uno de los campos que interfieren, el patrón de interferencia se mueve a lo largo de la muestra y el flujo de luz detectado en la esfera integradora varía periódicamente.

Los dos últimos métodos se pueden aplicar sólo a hologramas de transmisión registrados en cualquier tipo de materiales, ya que el método es independiente de la forma como el material registró la información (como variaciones de amplitud o de fase). Para la

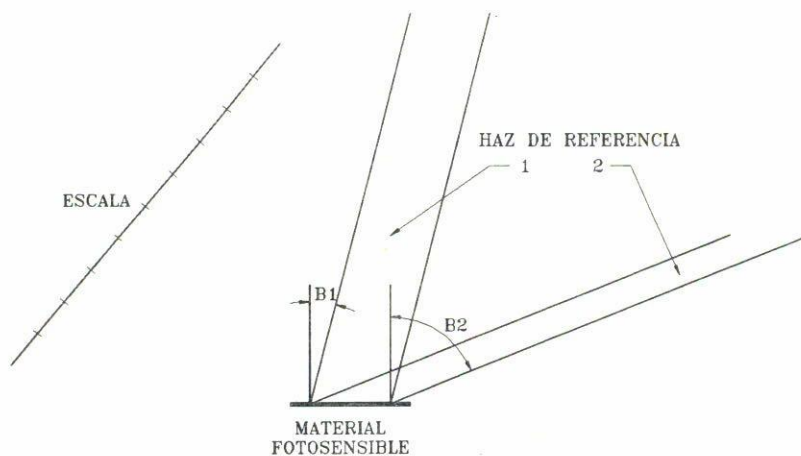


FIGURA 4. Diagrama del registro del holograma para observar su respuesta a las diferentes frecuencias espectrales [17].

evaluación de hologramas de reflexión es necesario modificar los arreglos experimentales que se muestran en la Fig. 3.

El efecto de la MTF del material en holografía se puede visualizar fácilmente con el modelo de la máscara ficticia descrito por Van Ligten [16], donde la máscara localizada en el haz objeto substituye el efecto de la MTF finita del material de registro.

Existe un método sencillo para evaluar cualitativamente la MTF de un material, éste da una idea rápida del intervalo de magnitud de este parámetro y permite estudiar también la influencia del medio ambiente y/o de los procesos de revelado necesarios para obtener el holograma. Este método comprende el registro del holograma de un objeto sencillo en el arreglo experimental mostrado en la Fig. 4, utilizando como objeto una escala graduada [17]. Debido a las dimensiones finitas del material, la luz reflejada por una cierta área del objeto forma un intervalo angular con el haz de referencia, por lo que cada elemento de área del objeto corresponde a un intervalo de frecuencias espaciales. Al reconstruir el holograma aquellas partes del objeto que corresponden a los ángulos menores, bajas frecuencias espaciales se observan claramente y va disminuyendo la claridad de las imágenes al incrementar la frecuencia hasta que se pierde la visibilidad en esa parte del objeto. Para incrementar las frecuencias espaciales que se registrarán se utiliza un segundo haz de referencia con un ángulo mayor con respecto a la normal del plano del holograma (B_2) y de esta forma se puede analizar la respuesta del material hasta una frecuencia de 3000 líneas/mm. El problema de este método es que debido a la geometría del registro puede haber cambios en el espaciamiento de las franjas registradas, tal y como se verá en la Sec. 5.1.

4. RESPUESTA DEL MATERIAL FOTOSENSIBLE A LA LUZ

La reconstrucción precisa del frente de onda del objeto por un holograma requiere que la amplitud de la onda reconstruida sea linealmente proporcional a las variaciones de la

exposición alrededor de un valor medio. En realidad, la respuesta del material no es ideal, lo que produce diferentes defectos en la imagen y que se puede definir, en general, como fuentes de ruido; entre éstas se encuentra el registro no lineal, la granularidad, el moteado, reciprocidad, etc.

4.1. Efectos no lineales

Este efecto considera las variaciones en la respuesta del material fotosensible. Al registrar un frente de onda bajo ciertas condiciones experimentales la amplitud de esta onda será registrada exactamente proporcional a la onda que incide sobre él. Esta situación es normal con hologramas de fase debido a su alinealidad intrínseca. Para analizar este problema de forma simplificada se puede considerar el caso de un holograma delgado de fase. En este caso si el corrimiento de fase producido en el medio de registro es estrictamente proporcional a la irradiancia en el patrón de interferencia, la amplitud de transmitancia compleja en cualquier punto en un holograma de fase se puede escribir como

$$t(x, y) = \exp(-i\phi) = 1 - i\phi - \frac{1}{2}\phi^2 + \frac{1}{6}\phi^3 + \dots \quad (3)$$

Si la modulación de fase se incrementa para aumentar la eficiencia de difracción los efectos de los términos de orden alto en la ecuación anterior no pueden despreciarse. El efecto de la no-linealidad en el registro es la aparición de términos espurios adicionales, como puede ser un halo alrededor del rayo directamente transmitido con el doble de ancho que este mismo rayo, y da lugar a imágenes primarias de órdenes altos, imágenes falsas y la creación de un halo ruidoso alrededor de la imagen real [18,19]. Para minimizar estos efectos se ha sugerido reducir la modulación en el patrón de interferencia al registrarse en el material fotosensible. Esto trae como consecuencia una pérdida de la brillantez de la imagen resultante hasta de una cuarta parte de la eficiencia máxima teórica que se puede obtener, de acuerdo con lo expuesto en la Tabla I.

Debido a lo discutido anteriormente, que es posible generalizar para cualquier tipo de hologramas, se podría suponer que el efecto de las no-linealidades de la respuesta de la emulsión es el factor más importante en el registro de hologramas; sin embargo, es necesario subrayar que este es posible minimizarse utilizando el intervalo de valores de la energía de exposición donde la respuesta es aproximadamente lineal (Sec. 6).

4.2. Ruido

En holografía se conoce como ruido a la luz que no forma una imagen y que se difracta en la misma dirección que la imagen reconstruida. Las principales fuentes de ruido en holografía son [4]:

1. Dispersión aleatoria de los haces de referencia y del objeto durante la exposición, debidas a la granularidad del material de registro.
2. Dispersión aleatoria del haz de reconstrucción debido a la granularidad del material ya revelado.
3. Respuesta no-lineal del material de registro.

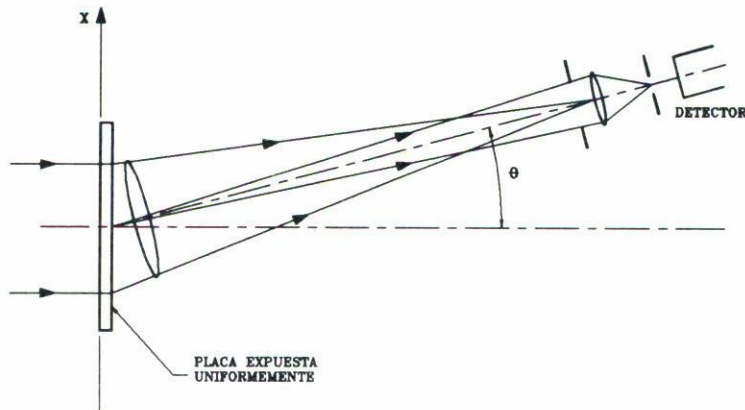


FIGURA 5. Arreglo experimental utilizado para medir el espectro de ruido de los materiales fotosensibles [8].

4. Defectos en la superficie del material de registro.

Las primeras dos fuentes dependen del soporte que sostiene a los elementos fotosensibles. En el caso de películas fotográficas en los que el soporte es gelatina tratada especialmente, es posible controlar la dispersión de este material si se revela en forma adecuada. Sin embargo, éste es un problema común en los procesos de blanqueado de los hologramas para obtener hologramas de fase. En otros materiales como la gelatina dicromatada que se fabrica en el laboratorio, la calidad de ésta no se puede controlar fácilmente y el ruido provocado por el soporte es tan importante que en la mayoría de los casos es necesario sacrificar eficiencia de difracción para obtener un holograma aceptable. Por esta razón son especialmente atractivos los materiales que no necesitan de un proceso de revelado húmedo, ya que se minimizan las deformaciones en la superficie del material. Estas fuentes de ruido son importantes también en el caso de registro múltiple de hologramas y para la formación de hologramas con luz incoherente [4].

Como se describió en la sección anterior probablemente la fuente más importante de ruido es la no-linealidad en el registro del material fotosensible. La cuarta causa se deriva de la preparación del material de registro o proceso del material después de la exposición que altera la superficie del material.

Para estudiar los efectos de ruido en un material determinado se mide la transmitancia fuera del eje de las placas expuestas uniformemente (Fig. 5) [5]. El ruido que aparece en la imagen reconstruida es de dos tipos. El primero es causado por la distribución de intensidades de las falsas imágenes o imágenes fantasmas debidas a las no-linealidades en el medio de registro, lo cual se denomina ruido por intermodulación. Éste impone generalmente el límite superior al intervalo dinámico útil del holograma determinando la eficiencia de difracción máxima que puede obtenerse sin producir una degradación de la imagen inducida por la no-linealidad. El ruido del medio de registro que existe en la forma de variaciones al azar de la amplitud en la transmitancia de la fase del holograma se manifiesta como la luz de fondo dispersada y determina el límite inferior del intervalo dinámico útil del registro holográfico evitando la detección de imágenes débiles.

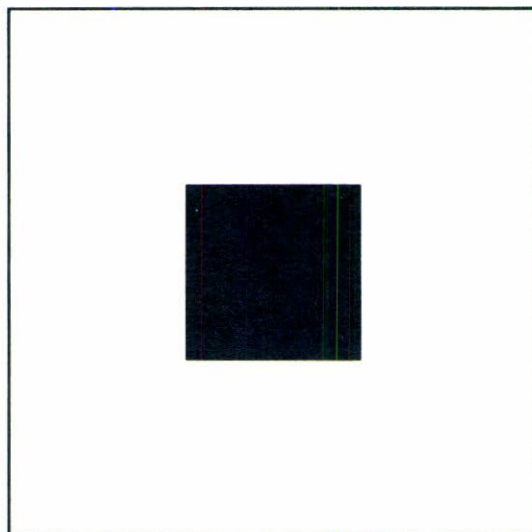


FIGURA 6. Objeto utilizado para medir la razón señal a ruido (RSR) producida en el material fotosensible [20].

4.2.1. Razón señal a ruido (RSR)

La razón señal a ruido (RSR) se define como la razón entre el promedio espacial de la intensidad de la luz que forma la imagen y el promedio de intensidad del ruido [20]. Al calcular la RSR en la imagen reconstruida por un holograma, es necesario tomar en cuenta el hecho de que las amplitudes de la señal y el ruido se suman, ya que las dos están codificadas en la misma onda portadora [21]. No existe un estándar para la medición de la RSR, ya que ésta depende del método de medición o del arreglo utilizado, teniendo que especificar las condiciones bajo las que se midieron. Una técnica sencilla es la de construir un holograma de una fuente puntual y medir la razón entre la imagen puntual y el ruido en el entorno de éste. La RSR se grafica contra el ángulo entre el haz del objeto y el de referencia o contra la frecuencia espacial. Para la RSR de un objeto difuso se considera la imagen reconstruida de un objeto que consiste en un cuadro brillante en un fondo negro (Fig. 6). Usando como objeto un vidrio esmerilado y la RSR se define como la razón promedio de intensidades en el anillo cuadrado dividido entre el promedio de intensidad de la luz dispersada en el centro. Debe especificarse la distancia del objeto al plano holográfico, ya que esto afecta a la medición.

Con iluminación coherente la RSR está dada por [21]

$$\frac{I_i}{I_n} = \frac{I_i}{I_n \sqrt{(2 + 2I_i/I_n)}}, \quad (4)$$

donde I_i e I_n son las intensidades de la señal y el ruido, respectivamente. Aun con un fondo con poca dispersión existen fluctuaciones relativamente grandes en la intensidad en la imagen de las áreas brillantes.

La RSR es muy importante cuando se requiere un buen contraste en la imagen, como en el caso de interferometría holográfica de una superficie en vibración, ya que en este caso el número de franjas discernible está directamente relacionado con la precisión que se obtiene al determinar las amplitudes de vibración [22].

4.3. Moteado

Si al reconstruir el holograma se utiliza un haz proveniente de un láser, la imagen producida se degrada por la apariencia granular debido a la coherencia de la luz. Esta apariencia granular se conoce como moteado (*speckle*). Este moteado es dependiente de las características del haz luminoso y de la cantidad de luz que refleja el objeto y no del material de registro, por lo que siempre que se utilice un haz láser estará presente [5,20].

4.4. Efectos del grosor del holograma

Si suponemos que un objeto a registrarse en un holograma consiste de dos fuentes puntuales con frecuencias espaciales S_1 y S_2 , se originarán dos conjuntos de franjas al interferir con el haz de referencia, pero debido a los términos de intermodulación se registrarán también en el grosor de la emulsión varios conjuntos de franjas de diferentes frecuencias que tendrán la forma general $pS_1 + qS_2$, donde p , q son enteros positivos [23]. El ruido generado por este conjunto de franjas sería muy grande si no fuera por la selectividad angular de los hologramas de volumen, lo que hace que no se satisfaga la condición de Bragg para estas frecuencias de intermodulación [24]. Esto último se ha comprobado con análisis sencillos [25] y realizando estudios rigurosos [26] utilizando la teoría de onda acoplada [27].

4.5. Reciprocidad

La ley de reciprocidad para la emulsión fotográfica nos indica que la exposición (E) necesaria para registrar el holograma es función del producto de la intensidad del haz luminoso (I) multiplicado por el tiempo de exposición (t), o sea

$$E = I \times t, \quad (5)$$

y que es independiente de la magnitud de I o t . Pero debido al mecanismo y cinética de la formación de la imagen latente, la ley de reciprocidad no es cierta para exposiciones de alta irradiancia (corta duración) y para exposiciones de baja irradiancia (larga duración). En general, cada emulsión tiene una combinación óptima de $I \times t$ para producir una densidad dada con todas las otras combinaciones produciendo menor densidad. Se ha reportado que en el caso de las emulsiones fotográficas esta condición no es tan problemática actualmente, dado que la reciprocidad se mantiene para un gran número de combinaciones de $I \times t$ [28]. Sin embargo, en un estudio reciente realizado con películas de halogenuros de plata [28] se observó una variación de la densidad óptica del holograma hasta de un 50% cuando se varía el tiempo de exposición de 0.225 s a 8 s, manteniendo constante el valor del producto $I \times t$. Además se demostró que este efecto se incrementa con los reveladores rápidos.

Esta violación de la ley de reciprocidad es muy importante cuando se registran hologramas con un láser pulsado y se manifiesta también de otra forma: la densidad de la imagen producida por una exposición total E_t puede ser menor si E_t se recibe como una serie de exposiciones estroboscópicas en lugar de una exposición continua, como en el caso de registro de hologramas múltiples. Este efecto de intermitencia depende de la frecuencia y ocurre a altas y bajas irradiancias como consecuencia directa del mecanismo y cinética del registro de la imagen.

La falta de reciprocidad de un material fotosensible no depende del arreglo experimental (independiente del tipo de holograma) y es un factor muy importante para la obtención de hologramas de alta calidad.

5. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL

En esta sección se discutirán los factores que dependen de los cambios físicos del material de registro y que alteran por consecuencia la calidad de la imagen producida.

5.1. Variaciones en el grosor de la emulsión

La presencia de este factor se manifiesta principalmente en los materiales que necesitan de un proceso de revelado para obtener el holograma definitivo. Este problema se acentúa cuando el revelado se realiza con líquidos, ya que varía el grado de humedad dentro de la emulsión alterando el grosor de ésta. En el caso de películas fotográficas, los productos químicos de los procesos de revelado y blanqueado producen subproductos que pueden endurecer la gelatina en la vecindad de los granos de plata revelados o disueltos, respectivamente. Estos subproductos varían el grado de solubilidad de la gelatina y depende de la naturaleza del producto químico en el revelado o blanqueado. La gelatina endurecida pierde su capacidad de absorber agua, dando como resultado la generación de esfuerzos internos. Estos esfuerzos se intensifican durante el secado, porque se secan más rápido que las partes no endurecidas. El resultado de estos esfuerzos se manifiesta como una variación en la superficie de la película y como variaciones internas del índice de refracción.

Para evitar este problema en el caso de hologramas de transmisión, es práctica común que al registrar el holograma el ángulo del haz de referencia y el del objeto sean iguales para que las franjas de interferencia resultantes estén perpendiculares al grosor del material (Figs. 7a y b). De esta forma, si la emulsión en el holograma resultante tiene un grosor diferente, las franjas se mantendrán perpendiculares a éste y el holograma se reconstruirá a la misma longitud de onda (Fig. 7c).

Como esto no es posible en el caso de hologramas de reflexión, (Figs. 7d, e), los efectos del cambio de dimensiones de la emulsión se acentúan, ya que las franjas de interferencia están casi paralelas a la superficie de la emulsión, variando su espaciado cuando el holograma está revelado, (Fig. 7f). Cuando el holograma se ilumina con luz blanca se reconstruye una imagen a la longitud de onda λ' la que está dada por la relación [20]

$$\lambda' = \frac{\Lambda'}{\Lambda} \lambda, \quad (6)$$

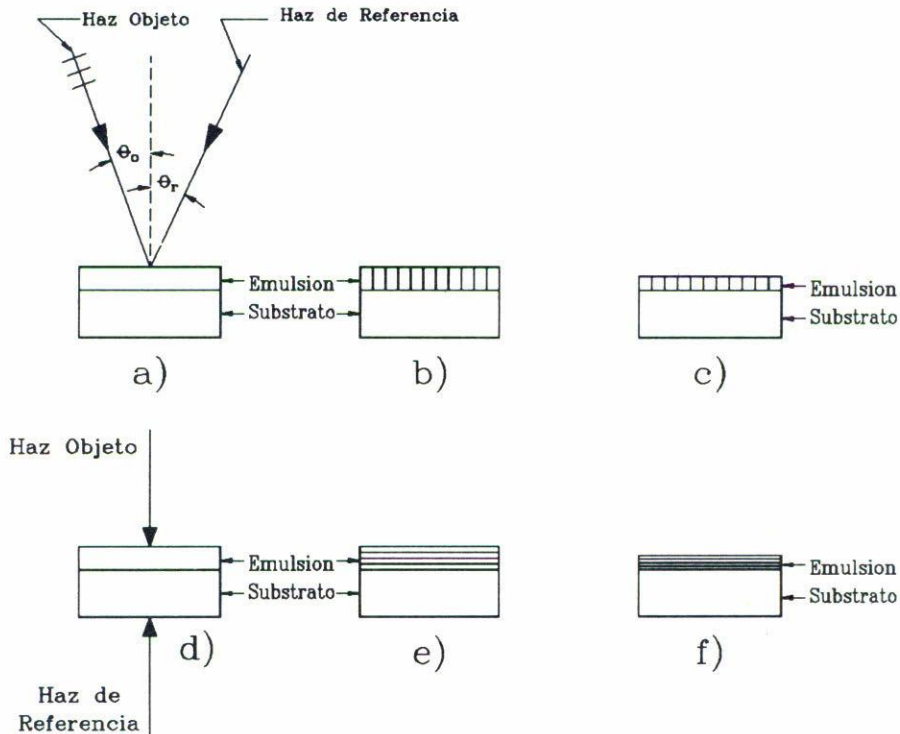


FIGURA 7. Efecto de las variaciones del grosor de la emulsión. Holograma de transmisión: a) registro, b) franjas de interferencia resultantes después del registro, c) franjas de interferencia resultantes después del revelado. Holograma de reflexión: d) registro, e) franjas de interferencia resultantes después del registro, f) franjas de interferencia resultantes después del revelado.

donde λ es la longitud de onda usada durante el registro del holograma y Λ, Λ' es el espaciado de las franjas de interferencia del patrón de interferencia y las del holograma ya revelado, respectivamente. Como ejemplo podemos mencionar que para un holograma registrado con un láser de He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$) se reconstruye a una longitud de onda de $\lambda' = 530 \text{ nm}$, dando una imagen en el verde.

5.2. Persistencia del holograma

Un holograma necesita ser persistente sobre el período de tiempo necesario para realizar la reconstrucción. Los realizados sobre superficies líquidas tienen en general poca persistencia para ser útiles en holografía. La emulsión fotográfica forma un registro permanente que no puede borrarse y reutilizarse. Otros tienen grados intermedios de permanencia que se borran por relajamiento térmico por exposición con el rayo de reconstrucción. El que los hologramas se borran gradualmente constituyen un efecto indeseable, sin embargo es conveniente poder borrar a voluntad. Obviamente una aplicación determina la importancia en la persistencia del material de registro, pero debe estudiarse el compromiso para no sacrificar sensibilidad, eficiencia y resolución [29].

5.3. Formación de halos

Al incidir la luz que va formar el holograma en la emulsión una parte de ella se refleja en la interfase entre la emulsión y el vidrio y en la interfase vidrio-aire. Esto produce halos en las imágenes producidas por el holograma. En el caso de hologramas de transmisión es posible minimizar este problema utilizando los siguientes métodos. Colocando una película antihalo en la parte posterior del soporte, que se elimina durante el revelado. Otro método consiste en colocar capas antihalo entre la emulsión y el soporte y emplear colorantes que se blanquean o eliminan durante el proceso. Sin embargo, el empleo de colorantes es muy delicado, ya que en algunos casos el material de soporte puede colorearse contribuyendo permanentemente en la calidad de la imagen procesada [30]. Es posible utilizar también un líquido con el mismo índice de refracción para aclopar un prisma que desvíe la luz transmitida. Existe una variedad de líquidos que se pueden utilizar, entre ellos está el polivinilalcohol disuelto en agua combinándolo con colorantes orgánicos.

En el caso de hologramas de reflexión es más difícil eliminar los halos, ya que los haces de referencia y el proveniente del objeto inciden por lados opuestos de la emulsión; sin embargo, si el efecto es muy importante es posible minimizarlo introduciendo el material en un recipiente con un líquido con el mismo índice de refracción.

5.4. Requisitos en el tamaño y características de las placas fotosensibles a utilizar

La manera de escoger el tamaño del material depende del propósito. Cuando se requiere registrar un holograma que al reconstruirse muestre tres dimensiones, o sea, con propósitos de exhibición, se apreciará realmente la profundidad si el holograma tiene dimensiones del orden de 24×30 cm y el objeto unos 20 o 25 cm de ancho. En este caso es necesario un material con alta resolución y obtener la más alta eficiencia de difracción y la menor dispersión que asegura las imágenes más brillantes. Es importante notar que al incrementar el tamaño del material se incrementa la resolución de la imagen, pero esto trae como consecuencia el incremento en los requisitos de estabilidad mecánica, de coherencia espacial y temporal del láser utilizado.

Al utilizar el material para holografía interferométrica o para la fabricación de elementos holográficos, se imponen varios requisitos al material fotosensible. Como ya se mencionó anteriormente, es necesario utilizar un material con buena RSR y buena resolución pero en ninguno de estos casos es necesario que el material sea muy grande.

Para mediciones de rutina en pruebas holográficas no destructivas lo único necesario es determinar la estructura básica del interferograma en una sola dirección de observación, lo que no impone requisitos en la razón señal a ruido. Además el holograma no necesita ser más grande que el ojo o una cámara de televisión que registre el holograma. En estos casos es más práctico utilizar un material holográfico que se puede introducir en la cámara fotográfica, lo que disminuye considerablemente los costos.

Es importante notar que el tamaño de la placa holográfica no depende de ninguna manera del tamaño del objeto del cual se tomará el holograma, sino de las aplicaciones que se le den a la imagen.

6. CURVAS DE CARACTERIZACIÓN PARA LAS PELÍCULAS FOTOGRÁFICAS

La discusión de los parámetros principales en las emulsiones fotográficas son importantes para conocer la interrelación entre la densidad óptica, la modulación en el índice de refracción, las variaciones en la superficie del material procesado en función de la energía, la longitud de onda, el tiempo de exposición, la variación de velocidad de la emulsión con respecto a la intensidad absoluta de radiación incidente, el gradiente máximo de exposición, revelado, etc. A continuación se analizarán las diferentes curvas de caracterización.

6.1. La Curva H-D

En el año de 1890 F. Hurter y V.C. Driffield demostraron que la cantidad de plata presente por unidad de área en una película que ha sido revelada o densidad óptica (D) es igual al logaritmo base diez de la exposición E , es decir,

$$D = \log_{10} E. \quad (7)$$

Desde entonces mucho se ha estudiado respecto a la naturaleza de la imagen latente, el revelado y las condiciones que gobiernan la velocidad y el gradiente de densidad para las emulsiones fotográficas [31,32].

La Fig. 8 muestra la relación entre la densidad óptica y el logaritmo de la exposición que recibe el nombre de curva H-D. En esta curva se pueden observar cuatro regiones:

- a) La región de niebla (R_1).
- b) La región lineal (R_2).
- c) La región de umbral o saturación (R_3).
- d) La región de solarización (R_4).

La región de niebla (R_1), se origina en el punto conocido como pie de la curva H-D. En esta región se encuentra el valor D_f , conocido como nivel de niebla de la película. Para exposiciones menores a la densidad D_f , la intensidad de la imagen es muy pequeña para que se pueda detectar visiblemente. Al incrementar la exposición se obtiene un incremento de la densidad aproximadamente lineal con respecto a la exposición hasta alcanzar un punto donde ya no se cumple la condición de linealidad; a esta región se le conoce como región lineal (R_2). Esta es la región más útil para propósitos fotográficos, ya que ahí se establece una relación de proporcionalidad directa entre la densidad óptica D y el logaritmo base diez de la exposición E . Esto implica que esta región se puede utilizar para caracterizar películas fotográficas, con base en la pendiente característica para la emulsión determinada. De acuerdo con la figura, la pendiente de la curva de la región recta, definida como γ , está dada por

$$\gamma = \frac{\Delta D}{\Delta \log_{10} E_r}. \quad (8)$$

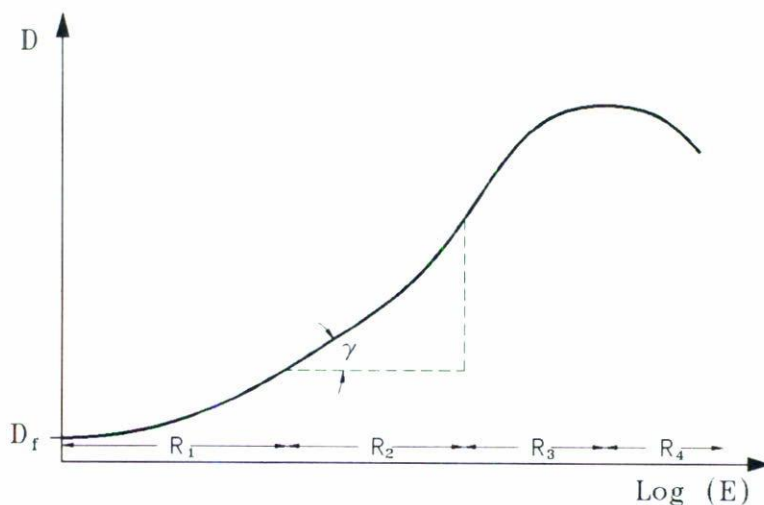


FIGURA 8. Gráfica de la densidad óptica (D) vs. $\log E$, curva H-D [19].

En fotografía, la gama dependerá de la emulsión y el tipo de revelado de ésta. Este intervalo da una diferencia en la densidad detectable llamado “rango dinámico de la exposición”, que varía dependiendo del proceso de revelado de la película y de la distribución del tamaño del grano. Para gamas altas por lo tanto se tendrá alto contraste (rango dinámico de exposición pequeño) y bajas gamas implican bajo contraste en las imágenes (rango dinámico en la exposición grande).

La región R_3 de umbral o de saturación muestra cómo la densidad óptica va decreciendo poco a poco hasta un cierto valor conocido como punto de umbral. Este punto está relacionado con la máxima exposición permitida por una película fotográfica.

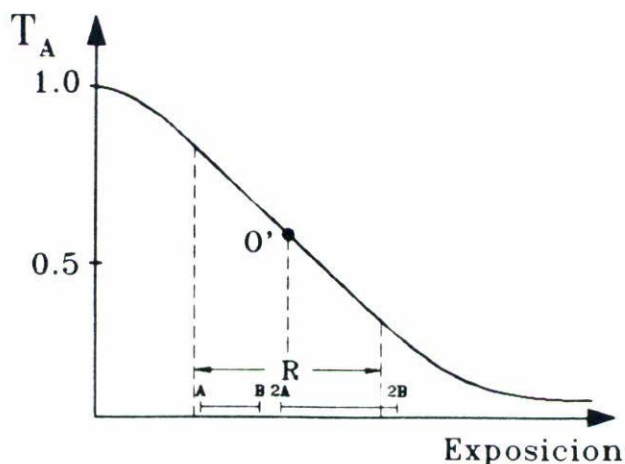
La región de solarización (R_4), solo aparece en cierta clase de materiales [20]. Esta zona muestra el efecto en el cual decrece la densidad óptica cuando se tienen ciertos grados de sobreexposición.

6.2. La curva T_A vs. E

En los inicios de la holografía se sugirió la curva T_A vs. E para caracterizar la transferencia microscópica por las emulsiones fotográficas [33]. Esto se debió a que la holografía es un procedimiento de grabación de imágenes en dos pasos, en donde se utiliza una intensidad incidente durante la exposición del material a la acción de la luz y una intensidad transmitida después de que la película fotográfica se ha revelado y reconstruido el frente de onda; resulta apropiado analizar la respuesta del material en términos de la amplitud de la transmitancia T_A y de la energía de la exposición. De acuerdo con la Ec. (5) se obtiene que la relación entre la amplitud de transmitancia y la energía de exposición en función de la gama de una película es

$$T_A = C^{\mp\gamma/2} E^{\mp\gamma/2}, \tag{9}$$

donde C es una constante de integración que depende de las condiciones iniciales. De

FIGURA 9. Gráfica de T_A vs. E [19].

acuerdo con esta ecuación se observa que se obtendrá una relación lineal entre la amplitud de la transmitancia T_A y la energía de la exposición solamente si γ es igual a ± 2 , condición que se cumple si la película es de alto contraste.

De esta ecuación se observa que puede ser más útil el representar estos resultados en la gráfica que muestre la amplitud de la transmitancia del material en el que se grabó el holograma en función de la energía de exposición (T_A vs. E , Fig. 9). En esta figura, se puede observar que existe una zona lineal con una pendiente β que se puede escribir como

$$\frac{dT_A}{dE} = -\beta. \quad (10)$$

Experimentalmente se ha encontrado que esta relación lineal entre T_A y E se obtiene cuando la intensidad del haz de referencia es mayor que la del objeto, o sea que es necesario que la intensidad resultante sobre todo el holograma tenga pequeñas fluctuaciones en torno a un cierto valor promedio relacionado con el punto de operación lineal O' [33]. Es importante hacer notar que el punto de operación lineal O' de la curva T_A - E no corresponde con la porción lineal de la curva H-D, sino que está en el pie de esta como se muestra en la Fig. 10, además de que sus pendientes correspondientes no son iguales. Este hecho enfatiza aún más la diferencia entre los procesos holográfico y fotográfico.

Para películas fotográficas la gama de la película se mide usando una fuente de iluminación conocida e imprimiendo por contacto una transmitancia conocida en la película. Después del proceso de revelado las densidades resultantes en la emulsión se miden con un microdensitómetro y se hace la gráfica. Este tipo de curvas han sido útiles en fotografía, sin embargo no son de gran ayuda cuando se desean aplicar al proceso holográfico, ya que existe un gran número de parámetros por definir.

La desventaja de este tipo de gráficas es que la forma de la curva depende directamente de la velocidad de la emulsión, lo que representa un inconveniente al querer comparar dos curvas de diferentes emulsiones o al cambiar los procesos de revelado. Además se tiene el inconveniente siguiente: Supongamos que se expone un patrón de interferencias cuyo rango de intensidades varíe entre A y B , Fig. 9, si se dobla el rango de intensidades, el

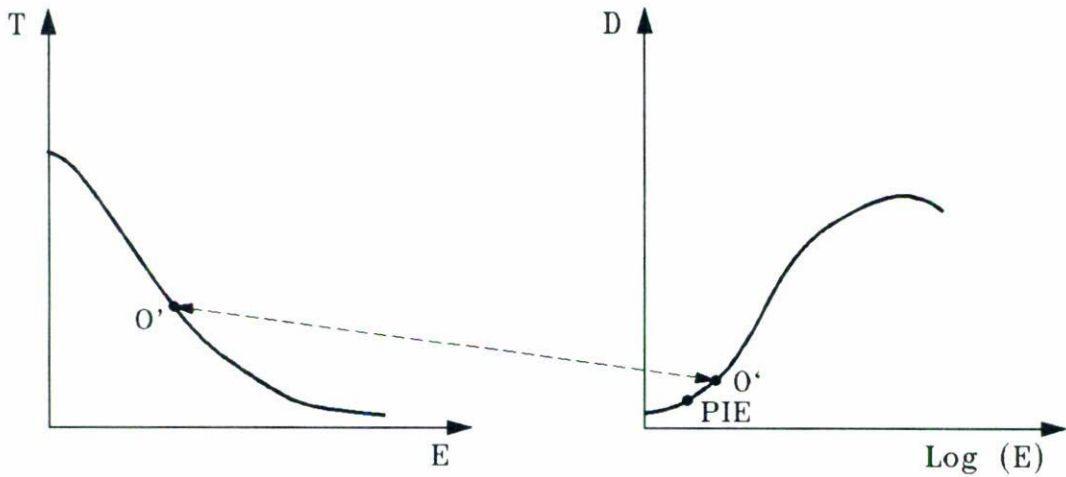


FIGURA 10. Comparación entre la curva T_A-E y la curva H-D [19].

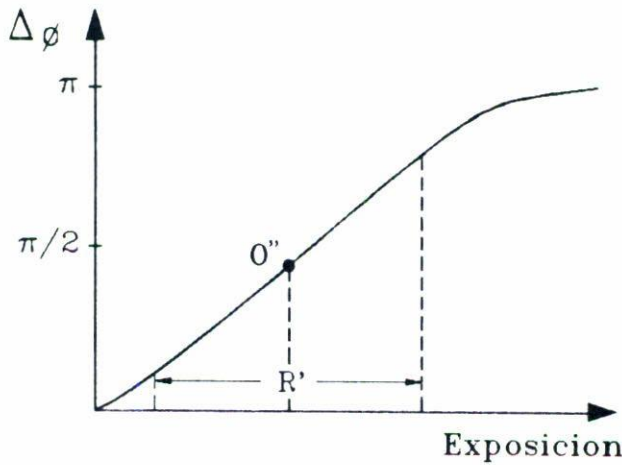


FIGURA 11. Gráfica $\Delta\phi$ vs. E [19].

rango de exposiciones se doblará también como se muestra en esta figura por la línea $2A-2B$. Como la cantidad de luz difractada depende de la variación de la transmitancia, esto significa que las mejores exposiciones serán las representadas en la parte baja de la curva donde los gradientes de exposición son grandes. Estos inconvenientes se eliminan cuando se gráfica la transmitancia contra el logaritmo de la exposición, como se verá más adelante.

6.3. La curva $\Delta\phi-E$

De acuerdo con lo expuesto en la Ec. (1) y debido a que la transmitancia es una cantidad compleja, se ha sugerido para caracterizar los materiales de fase el utilizar las curvas $\Delta\phi-E$, (Fig. 11).

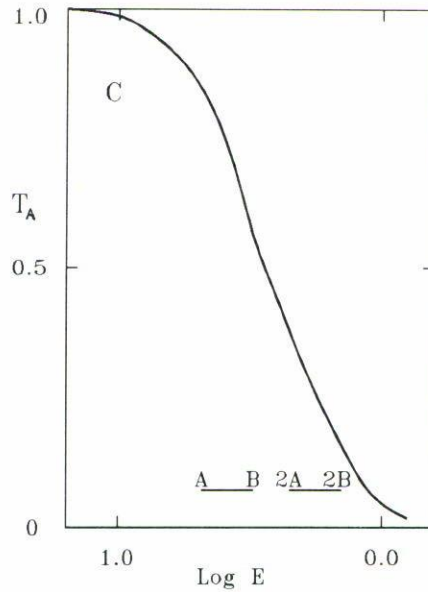


FIGURA 12. Gráfica T_A vs. $\log E$ [29].

En un estudio teórico, se demostró [34] que utilizando la curva característica del material ($\Delta\phi-E$) es posible calcular la eficiencia de difracción (η) en el caso de hologramas de volumen de fase utilizando la teoría de la onda acoplada [26].

6.4. La curva T_A - $\log E$

La curva T_A-E no tiene una representación directa del problema. Se demostró [9-35] que la curva T_A vs. $\log E$ es más apropiada con respecto a la eficiencia de difracción y evita los inconvenientes mostrados en la Sec. 6.2.

En el caso de la intensidad doble que se discutió en la Sec. 6.2, donde se elimina la ambigüedad, dado por la representación de la variación de logaritmo de la exposición para A y B , siendo estos independientes del nivel promedio. Consecuentemente podemos esperar que la radiancia del holograma se correlaciona con la pendiente de la curva. Estas curvas comúnmente tienen una región extendida que se puede aproximar a una línea recta [9] (Fig. 12). En este caso en la gráfica T_A vs. $\log E$, se puede observar que emulsiones de diferente sensibilidad o diferentes reveladores pueden compararse fácilmente en el mismo diagrama, la amplitud de la señal no cambia en proporción a la exposición media, en lugar de eso la modulación o $\Delta \log E$ puede moverse a lo largo de la abscisa, $\log E$, para explorar la eficiencia de difracción como una función de la exposición media.

En el caso de material fotosensible compuesto por halogenuros de plata se encuentra que la eficiencia de difracción es aproximadamente igual a $\alpha(E)$. Diferenciando T_A con

respecto a $\log E$ [23] se tiene:

$$\alpha(E) = \left(\frac{dT_a}{d \log E} \right)_E = \frac{1}{2} \log_{10} T_A(E) \gamma(E). \quad (11)$$

La segunda parte de la Ec. (11) indica que el flujo difractado es proporcional al cuadrado del gradiente local $\gamma(E)$ de la curva $D-\log E$ en cualquier punto atenuado por la transmitancia media del holograma. La dependencia de estas variables que se mueven en direcciones opuestas al incrementar la exposición deja claro una vez más que la eficiencia de difracción máxima se obtendrá en el pie de la curva convencional $D-\log E$. Esta γ máxima se encuentra en la porción de la línea recta de la curva; $D-\log E$ es de menos interés que un cambio abrupto en el pie y que la niebla (densidad base), que debe ser lo más baja posible para permitir el registro de intensidades muy débiles.

Sin embargo, aun cuando las curvas T_A-E y $\Delta\phi-E$ y $T_A-\log(E)$ son más útiles para los procesos holográficos tienen el inconveniente que no permiten dar una información explícita y rápida de la eficiencia de difracción que se puede obtener. Aunque existen métodos indirectos para obtener la eficiencia de difracción (η) en el caso de materiales compuestos por halogenuros de plata, de acuerdo con la Ec. (11) [29,36]. En realidad estas representaciones no nos indica si el material tiene una resolución suficiente para registrar el holograma. Además, este tipo de curvas sólo es estrictamente válido para hologramas de transmisión. Por esta razón es necesario buscar otro tipo de caracterización.

6.5. Caracterización propuesta por Lin

Esta representación [37] de las características de exposición de los materiales fotosensibles está basada en la consideración de que un material ideal permite la reconstrucción de un frente de onda linealmente proporcional al frente de la onda objeto. Basado en este concepto de reconstrucción lineal, un material puede caracterizarse por las propiedades de los hologramas registrados cuando se tiene la interferencia de dos ondas planas. En este caso la eficiencia de difracción del holograma se puede representar por la ecuación

$$\sqrt{\eta} = SE_0V, \quad (12)$$

donde S es una constante que se conoce como sensibilidad holográfica, es una característica del material e idealmente debe ser independiente de la exposición promedio E_0 , la visibilidad de las franjas V , y de la frecuencia espacial de la señal en toda el área del holograma.

Para un material ideal las curvas $\sqrt{\eta}$ vs. E_0 con V como parámetro y las curvas $\sqrt{\eta}$ vs. V con E_0 como parámetro, son familias de líneas rectas, (Fig. 13).

Como η , E_0 y V son cantidades físicas que se pueden medir fácilmente, es posible obtener curvas similares para cualquier material real. Sin embargo, en los materiales reales estas curvas serán rectas en un intervalo limitado de valores de η , E_0 y V , dependiendo de la respuesta de cada material. En estos intervalos el material puede ser considerado lineal. Además de esta eficiencia de difracción máxima, o la exposición necesaria para obtener una eficiencia de difracción dada, estas curvas también hacen posible la determinación

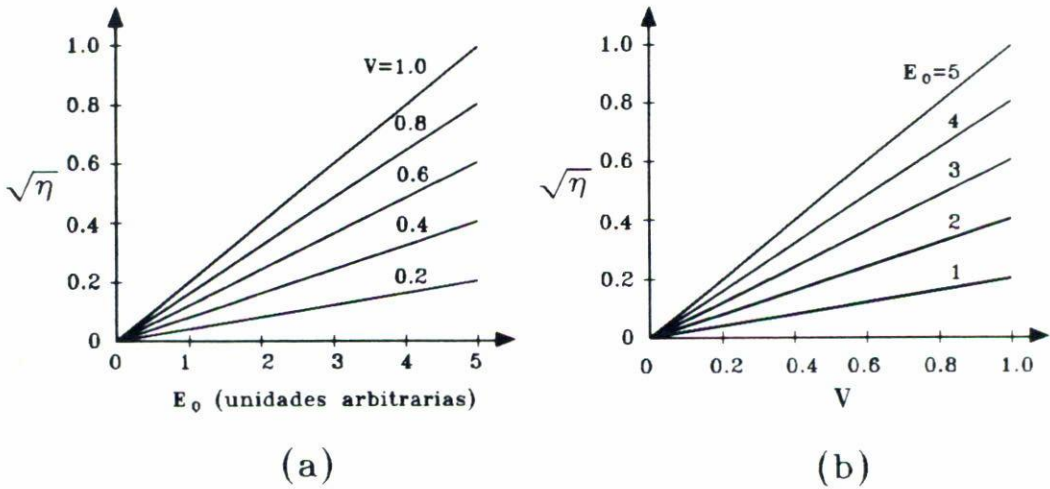


FIGURA 13. Curvas características sugeridas por Lin, $\sqrt{\eta}$ vs. E con V como parámetro y $\sqrt{\eta}$ vs. V con E como parámetro [37].

del intervalo de la visibilidad de las franjas o la razón entre los haces R para los cuales es posible realizar un registro holográfico lineal (indicado por la porción recta de la curva η vs. V , E cte.) y el valor de la exposición que representa el mejor compromiso entre la linealidad y la eficiencia.

En este caso es necesario señalar que si el propósito de graficar las características de exposición es guiar en la formación de un holograma con un ángulo determinado entre los haces, los hologramas de ondas planas deben de formarse con ese mismo ángulo. Por esta razón para caracterizar efectivamente al material es necesario analizar su respuesta para varias frecuencias espaciales, lo que hace de la caracterización un proceso laborioso. Sin embargo, este método tiene la ventaja de que se cumple para cualquier material y tipo de holograma, lo que permite una comparación directa entre varios materiales y con respecto a uno ideal.

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo es un resumen de las principales características que deben cumplir los materiales fotosensibles para utilizarse en holografía y de los modelos más importantes propuestos en la literatura para mostrar las relaciones entre la transmitancia y la eficiencia de difracción de los hologramas con respecto a la energía requerida para su registro. De acuerdo con lo expuesto en la Sec. 6, se puede decir que el único método de caracterización que se puede aplicar a todos los materiales fotosensibles es el propuesto por Lin, ya que tiene la ventaja adicional de que estas gráficas se pueden obtener independientemente del tipo de material utilizado para hacer un holograma. La principal desventaja es que al caracterizar el material se tiene un proceso laborioso y es necesario obtener las curvas para las frecuencias espaciales que se deseen utilizar.

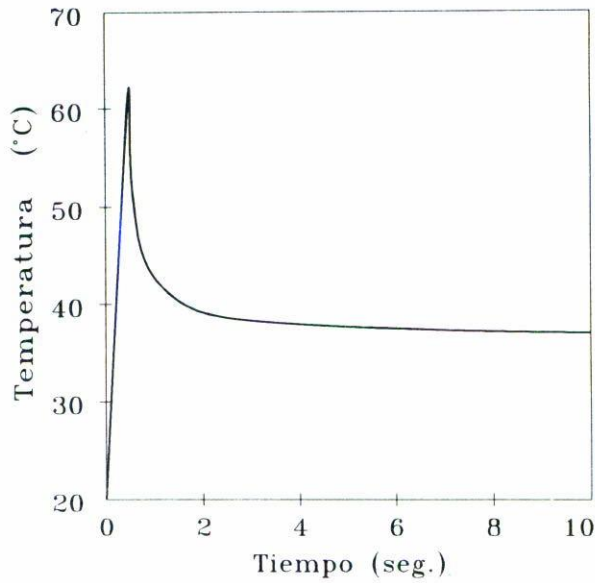


FIGURA 14. Temperatura del material termoplástico en función del tiempo después de iniciar un revelado de 130 mseg [38].

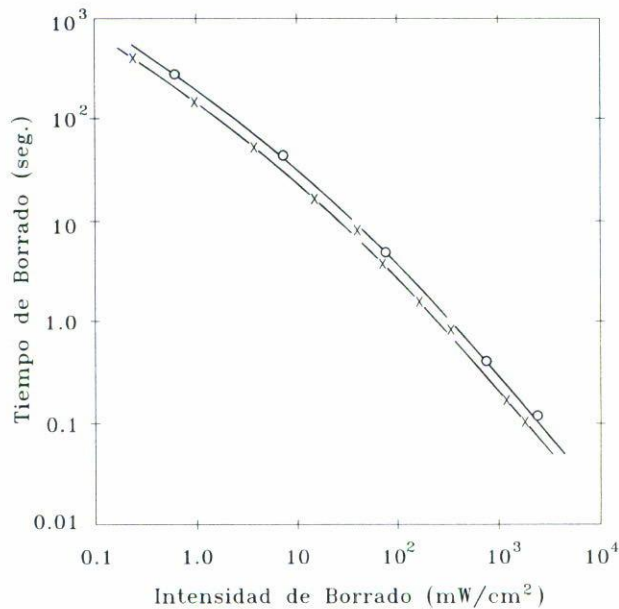


FIGURA 15. Tiempo de borrado necesario para obtener la mitad de la densidad óptica inicial en función de la intensidad del haz luminoso para tres obleas de material fotocromico compuestas de $\text{CaF}_2:\text{Ce}$, Na de diferentes grosores $\circ = 0.86$ mm y $\times = 0.53$ mm [29].

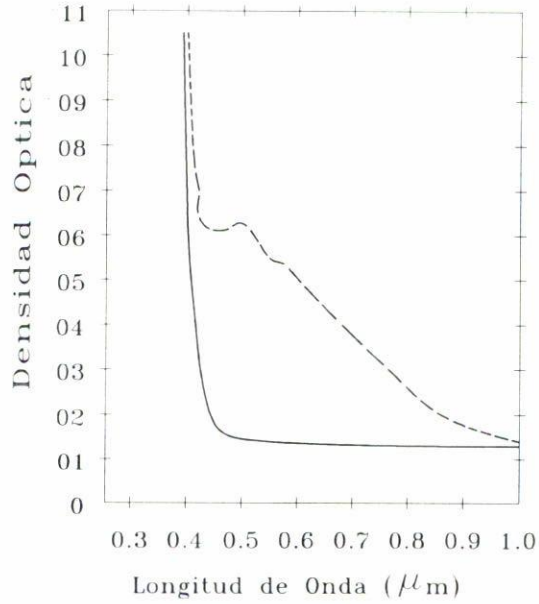


FIGURA 16. Espectro de absorción del material fotocromico compuesto por $\text{SrTiO}_3:\text{Ni},\text{Mo},\text{Al}$, con un grosor de 0.18 mm. — representa al material sin iluminar; - - representa al material después de iluminarlo con luz violeta o ultravioleta [29].

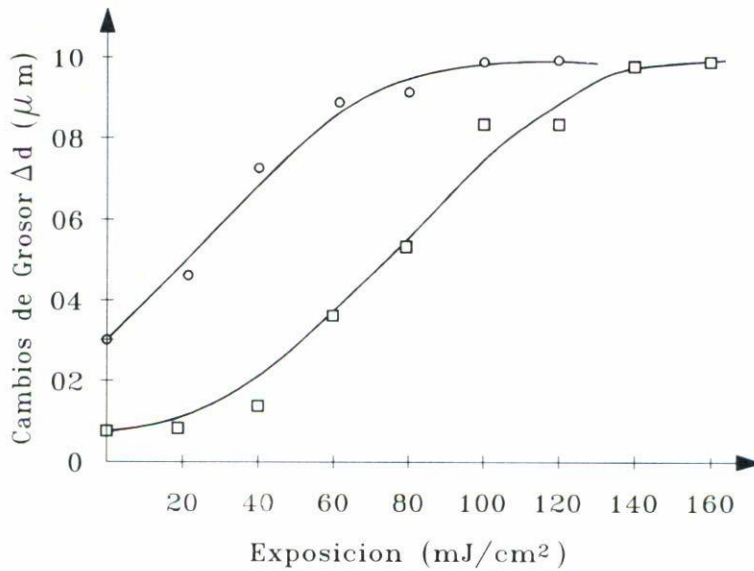


FIGURA 17. Cambios de grosor Δd en función de la energía de exposición para dos tipos de fotoresinas, ○: AZ-303 y □: AZ-1350 [29].

Es necesario tomar en cuenta que estas curvas no son las únicas necesarias para caracterizar un material determinado, ya que es indispensable reportar características como variaciones en la temperatura del revelado (Fig. 14), persistencia del holograma revelado (Fig. 15), variaciones del espectro de absorción (Fig. 16), variaciones en el grosor del material (Fig. 17), dimensiones máximas del material, costo, etc. Todo esto para que el futuro interesado en un material dado conozca todos los datos necesarios para poder determinar si es factible su utilización.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la gran ayuda de mi compañero R. Mendoza en la elaboración de las figuras.

REFERENCIAS

1. D. Gabor, *Proc. Roy. Soc.* **A197** (1949) 454.
2. M. De Belder, *Photogr. Sci. Eng.* **13** (1969) 351.
3. D. Gabor, *Nature* **161** (1948) 777.
4. R. Collier, C. Burckhardt and L. Lin, *Optical Holography*, Academic Press (1972) p. 270.
5. P. Hariharan, *Optical Holography*, Cambridge Monographs, Cambridge, (1984) p. 63.
6. J. Urbach and R. Meier, *Appl. Opt.* **8** (1969) 2269.
7. H.M. Smith, *Principles of Holography*, 2d. ed., John Wiley and Sons (1975) p. 455.
8. S. Calixto, *MRCE Monograph Series and Materials Processes* **1** (1990) 117.
9. F.G. Kaspar and R.L. Lamberts, *J. Opt. Soc. Am.* **58** (1968) 970.
10. R.C. González and P. Wintz, *Digital Image Processing*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company (1987) p.28.
11. K. Biedermann, *Optik* **28** (1968) 160.
12. K. Biedermann, in *Holographic Recording Materials, Topics in Applied Physics*, Vol. 20, Smith H.M. (Ed.), Springer-Verlag, p. 35.
13. S. Johanson and V. Biedermann, *Opt. Eng.* **13** (1974) 553.
14. A. Van der Lugt and R.H. Mitchel, *J. Opt. Soc. Am.* **57** (1967) 372.
15. J.Ch. Vienót, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **72** (1958) 661.
16. R.F. Van Ligten, *J. Opt. Soc. Am.* **56** (1966) 1019.
17. H. Nassentein, H. Dedden, H.J. Metz, H.E. Rieck and D. Schultze, *Photogr. Sc. Eng.* **13** (1969) 194.
18. O. Bryngdahl and A. Lohmann, *J. Opt. Soc. Am.* **58** (1968) 1325.
19. F. García-Barbosa, "Estudio de las no linealidades de las películas fotográficas en holografía", Tesis de licenciatura, Departamento de Física, Universidad de Guadalajara (1988).
20. H.J. Caufield (Ed.), *Handbook of Optical Holography*, Academic Press, (1979) p. 284.
21. J.W. Goodman, *J. Opt. Soc. Am.*, **57** (1967) 493.
22. Yu. I. Ostrovsky, *Interferometry by Holography* **20** Springer Verlag, p. 64.
23. L. Solymar and D.J. Cooke, *Volume Holography and Volume Gratings*, Academic Press (1982) p. 86.
24. Upatnieks and Leonard 2979, *App. Opt.* **8** (1969) 85.
25. Guther and Kush, *Optik* **22** (1974) 119.
26. P. Hariharan, *Opt. Act.* **26** (1979) 2111.
27. H. Kogelnik, *Bell System Tech. J.* **48** (1969) 2909.
28. P. Binfield, R. Galloway and J. Watson, *App. Opt.* **32** (1993) 4337.
29. H.M. Smith, *Holographic Recording Materials*, Springer-Verlag, (1977) Caps. 3-8.

30. Jun Ding Pei and Bo Zheng, *J. Opt. Soc. Am.*, **6** (1989) 1228.
31. M.J. Langford, *Basic Photography*, Focal Press, London, (1977) p. 234.
32. N.J. Phillips, *SPIE* **532** (1985) 29.
33. A. Kosma, *J. Opt. Soc. Am.* **56** (1966) 426.
34. P. Markovski, T. Todorov and N. Koleva, *Opt. Quan. Elec.* **16** (1984) 19.
35. J. Upatnieks and C. Leonard, *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1970) 297.
36. K. Biedermann, *App. Opt.*, **10** (1972) 1584.
37. L.H. Lin, *J. Opt. Soc. Am.*, **61** (1972) 203.
38. W.S. Colburn and E.N. Tomkins, *App. Opt.* **13** (1974) 2934.