

Caracterización de la gelatina y dicromato de amonio como material fotosensible

Rodolfo Pasaye Pérez¹, Flor Anahí Cerna Aguilar¹, Brenda Daniela Medina Aguilar¹, Grissel Estephany Peláez Martínez¹, Oscar Javier Arellano González¹, Francisco Javier Cira Sánchez¹, Mario Pérez Cortés^{2,*}, Mauricio Ortiz Gutiérrez¹, Jorge Lugo Jiménez³

¹Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

³Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán

Fecha de recepción: 19 de mayo de 2019 — Fecha de aceptación: 16 de agosto de 2020

Resumen

Se presenta la caracterización de un material fotosensible compuesto por gelatina comercial marca Duche mezclada con dicromato de amonio en el que se registra una rejilla holográfica formada. La rejilla es generada por la interferencia de dos haces de luz provenientes de un láser de Argón de 532 nm de longitud de onda. La caracterización se lleva a cabo al medir la eficiencia de difracción de la rejilla con un láser de lectura de He-Ne de 632.8 nm de longitud de onda. Al registrar la rejilla sobre el material se consideran cambios en varios parámetros, tales como la cantidad de concentración entre la gelatina y el dicromato de amonio, el espesor de la celda que contiene la mezcla del material, la intensidad y el ángulo de los haces que interfieren. Se encuentra que en este material se puede grabar información con una eficiencia del 11.7% en el orden +1 de difracción.

Palabras Clave: Gelatina, Dicromato de amonio, material fotosensible, rejillas holográficas

Characterization of gelatin and ammonium dichromate as photosensitive material

Abstract

The characterization of a photosensitive material composed of commercial Duche brand gelatin mixed with ammonium dichromate in which is recorded a holographic grating is presented. The grating is generated by the interference of two light beams from an Argon laser of 532 nm wavelength. The characterization is carried out by measuring the diffraction efficiency of the grating with a He-Ne with 632.8 nm wavelength as reading beam. When the grating is registered on the material, changes in several parameters are considered, such as the amount of concentration between the gelatin and the ammonium dichromate, the thickness of the cell that contains the mixture of the material, the intensity and the angle of the beams that interfere. It is found that in this material information can be recorded with an efficiency of 11.7% in the order +1 of diffraction.

Keywords: Gelatin, ammonium dichromate, photosensitive material, holographic gratings

1. Introducción

Los medios de almacenamiento de información más comunes son bidimensionales ya que la información está guardada en su superficie. La capacidad de almacenamiento en estos dispositivos está limitada al tamaño físi-

co de la superficie del medio, por ejemplo, las fotografías, CD's o DVD's tienen un tamaño físico de superficie pequeño por lo que su capacidad está limitada. Para aumentar la capacidad de almacenamiento se puede recurrir a la holografía que permite el registro de información no sólo en la superficie sino también en el volumen del

*mperez.cortes@correo.uady.mx

material. La holografía permite el registro de información que posee un campo de luz modulado en amplitud y/o fase, es decir, permite el registro de información de un haz de luz con amplitud compleja.

El registro se lleva a cabo por medio del almacenamiento de un patrón de interferencia generado por dos haces de luz monocromática y coherente. Uno de los haces pasa a través (o es reflejado) por un objeto que se desea almacenar llamado haz objeto y otro haz de luz que proviene directamente de la fuente de luz conocido como haz de referencia. Al superponerse ambos haces generan un patrón o distribución de franjas de luz con intensidad máxima y mínima que es conocido como interferograma. Los materiales que han sido expuestos a interferogramas y una vez procesados químicamente (o según sea el tipo de material para llevar a cabo el proceso de revelado) se les conoce como hologramas. Para recuperar la información registrada o almacenada en estos dispositivos se hace incidir sobre éstos un haz de luz idéntico al haz de referencia y al pasar a través del holograma se difracta en direcciones discretas formando en un punto alejado el mismo patrón o información que posee el objeto registrado. Si el objeto que se almacena es una página de datos el holograma constituye una memoria holográfica.

Una de las principales ventajas de una memoria holográfica es que la información almacenada no está localizada espacialmente en un punto concreto del medio sino que todos los puntos del holograma contienen toda la información, por lo que una memoria holográfica es más resistente al rayado u otras agresiones comparado con medios tradicionales; además la velocidad de recuperación de la información es superior en una memoria holográfica, ya que durante la reconstrucción del holograma se pueden leer páginas completas de datos de una sola vez.

Los materiales que se utilizan para el registro de información u hologramas se conocen como materiales fotosensibles. En general, los materiales fotosensibles permiten modificar sus propiedades físicas o químicas cuando sobre ellos incide un haz de luz. Algunas características deseables que deben tener son su alto rango de almacenamiento de datos, alta velocidad de grabado, buena calidad de grabado, tiempo de vida largo etc (Solano, 1993).

Estos materiales tienen diversas aplicaciones y las más común o popular es para generar hologramas, sin embargo, se pueden encontrar en guías de onda, elementos difractivos, sensores de luz o de temperatura entre otras. Existen diferentes materiales fotosensibles tales como los fotopolímeros (Calixto, 1987), materiales fotorrefractivos (Frejlich, 2007), haluros de plata (Bjelkhagen, 2013) y gelatinas dicromatadas (Shankoff, 1968) entre otros. En particular, en este trabajo se utiliza la gelatina dopada con dicromato de amonio como

material fotosensible. Otros usos que se le da a la gelatina es como base para películas y placas fotográficas comerciales a base de haluros de plata. Estas películas se componen de una película de poliéster (o placas de vidrio) recubierta con una fina capa de gelatina infundida con haluro de plata y otros productos químicos que otorgan a la película sus propiedades fotosensibles.

La gelatina es el medio o matriz para transportar el haluro de plata durante el almacenamiento, la exposición y el revelado de la película, la gelatina por si sola es inerte, es decir no es fotosensible. Otros materiales que se emplean como agente sensibilizador es el dicromato de amonio o de potasio que cuando se mezcla con la gelatina, ésta se vuelve débilmente sensible a la luz y se conoce como gelatina dicromatada. Cuando un haz de luz incide sobre la gelatina dicromatada provoca el endurecimiento de la gelatina localmente, lo que implica que, cuando la gelatina dicromatada es expuesta a un interferograma, las zonas brillantes del patrón de interferencia endurecen localmente a la gelatina y provoca que el haz de luz se difracte de forma diferente a la gelatina sin endurecer (o sobre la que incide una zona oscura del interferograma).

Para caracterizar un material fotosensible es necesario grabar sobre éste el patrón de interferencia de dos haces de luz, por lo que se necesita grabar una rejilla holográfica y entonces para estudiar la respuesta del material a la exposición de la luz se mide la eficiencia de difracción de las rejillas holográficas grabadas. Cuando se hace incidir un haz de luz en una rejilla holográfica se observan los órdenes difractados en la propagación del haz.

Existen en el mercado emulsiones de gelatina dicromatada como las placas comerciales Slavich PFG-04, Ayalid M. Villamarín (Villegas, 2010) hizo una caracterización de esta placa mediante el registro de rejillas de volumen, transmisión y fase, logrando un eficiencia de hasta un 78 % con valores de exposición de alrededor de 1540 mJ/cm^2 . En otros estudios se agregan más aditivos a la emulsión fotosensible, V. Romero en su trabajo "Gelatina dicromatada modificada para incrementar su resistencia a la humedad" (Romero-Arellano, Solano, y Martínez-Ponce, 2006) elabora este tipo de placas y presenta un análisis de la eficiencia de difracción de rejillas grabadas holográficamente en películas de gelatina dicromatada tradicional y modificada al agregar glicerol que actúa como un agente plastificante, logrando alcanzar valores de eficiencia de difracción más altos que para la gelatina dicromatada tradicional y evitando la necesidad de protegerlo contra la humedad que muy frecuentemente afecta al diseño de los elementos holográficos.

Khazvalieva, et al (Khazvalieva, Ganzherli, Gulyaev, y Maurer, 2019) presenta un método para convertir un holograma de sólo amplitud en uno de amplitud com-

pleja en una emulsión sensibilizada con haluros de plata basada en el efecto fotolítico de la radiación UV de onda corta, usando como base gelatina. Repiten este procedimiento para crear capas de gelatina dicromatada para crear rejillas de difracción de baja frecuencia del orden de 100 – 200 lin/mm. Ganzherli (Ganzherli, Gulyaev, Maurer, y Khazvalieva, 2019) muestra la posibilidad de crear rejillas holográficas de relieve-fase de alta frecuencia espacial (1550 lin/mm) en gelatina dicromatada, con el inconveniente que utilizan radiación UV corta; Azkona J. J, et al (Azkona, Martínez-Calderon, Gómez, Rodríguez, y Olaizola, 2019) utilizan gelatina dicromatada encapsulada entre dos placas de vidrio para crear dispositivos como guías de onda, acopladores o amplificadores, etc usando un láser de femtosegundos. Rastogi V. et al (Rastogi, Agarwal, Kumar, y Shakher, 2019) utilizan una rejilla holográfica grabada en gelatina dicromatada como divisor de haz en un interferómetro de dos haces para medir la variación de la temperatura de la flama de una vela. Otros usos que se les ha dado a rejillas holográficas o elementos difractivos grabados en gelatina dicromata son como componentes para mejorar la eficiencia en concentradores solares (Ferrara, Striano, y Coppola, 2019) y como elementos difractivos para pantallas (Bang, Jang, y Lee, 2019). Aunque se han encontrado diversas aplicaciones para elementos difractivos grabados en gelatina dicromatada no se ha presentado una caracterización de este material fotosensible.

La caracterización óptica del material fotosensible que se presenta en este trabajo se lleva a cabo por medio del registro de rejillas holográficas debido a que son los elementos difractivos fáciles de caracterizar midiendo su eficiencia de difracción cuando se cambian algunos parámetros físicos tales como la cantidad de concentraciones entre los materiales, espesor de la muestra fabricada, entre otros. El material es accesible, económico y relativamente fácil de elaborar.

2. Interferencia de dos haces

La rejilla holográfica es creada mediante la superposición de dos haces de luz provenientes de un láser de Argón (Ar) como se muestra en la figura 1, donde un haz de luz es dividido en amplitud por un divisor de haz formando dos haces que son reflejados por dos espejos hacia un punto fijo P donde interfieren formando un patrón de interferencia o interferograma; este patrón tiene la forma de una rejilla, es decir, está compuesto por franjas claras y oscuras alternadas de igual espesor. La separación a entre los espejos, la longitud de onda λ del haz de luz y la distancia s que existe entre el centro de la línea que une los espejos hacia el punto donde se superponen los haces determinan la frecuencia de la rejilla según la ec. (1)

$$f = \frac{1}{p} = \frac{a}{\lambda s} \quad (1)$$

donde p es el periodo espacial de la rejilla.

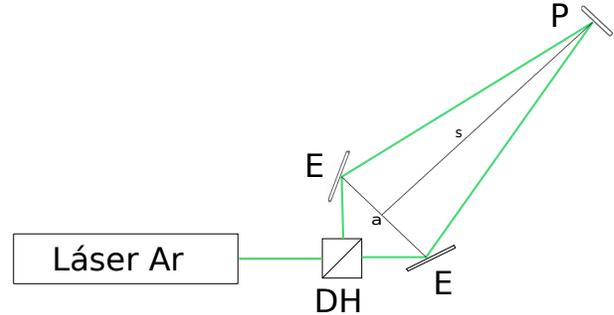


Figura 1: Esquema de la superposición de dos haces. Un haz de luz es dividido por un divisor de haz (DH) y cada haz es dirigido hacia los espejos (E). Los espejos desvían los haces hacia un punto (P) donde interfieren y forman la rejilla. La distancia (a) entre los espejos y la distancia (s) determinan la frecuencia de la rejilla que se genera.

Como es mencionado anteriormente, el patrón de interferencia consiste en una serie de franjas claras y oscuras alternadas; cuando este patrón se registra sobre un material fotosensible, después del proceso de revelado correspondiente, se le conoce como rejilla holográfica. La eficiencia de difracción $\eta(\%)$ (ED) es un parámetro que sirve para determinar la calidad de una rejilla. Cuando se hace incidir un haz de luz en una rejilla se observan los órdenes difractados en la propagación, en general, si la rejilla difracta en varios órdenes, la ED total será la suma de las intensidades de los órdenes difractados multiplicados por 100 entre la intensidad del haz incidente. Se dice que la ED de orden 1 es la razón de la irradiancia de la luz difractada del orden +1 entre la irradiancia incidente, multiplicado por 100, como lo indica la siguiente ecuación:

$$\eta(\%) = \frac{I_t}{I_0} 100 \quad (2)$$

donde I_t es la irradiancia del orden de difracción +1 y el término I_0 representa la irradiancia del haz incidente sobre la muestra.

Para caracterizar un material fotosensible se registra una rejilla holográfica en éste y se mide, en tiempo real, el cambio de la ED, esto es porque el material fotosensible cambia gradualmente sus propiedades al incidir un haz de luz. Por tal motivo, se emplea el arreglo experimental mostrado esquemáticamente en la figura 2 donde se muestra un segundo haz que incide en la muestra y al difractarse se mide la intensidad del orden +1 de difracción. El segundo haz de luz debe tener una longitud de onda y una intensidad que no altere el proceso de grabado de la rejilla holográfica.

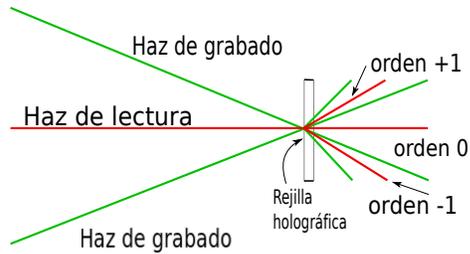


Figura 2: Esquema que representa los órdenes de difracción de una rejilla holográfica cuando se ilumina con un haz de luz. Se muestran los órdenes 0, +1, -1, de difracción. Para medir la ED se coloca un detector en el orden +1 de difracción no mostrado en la figura.

En la figura 2 se muestran dos haces de luz de color verde que se superponen sobre el material fotosensible y producen una rejilla holográfica que difracta estos haces en tiempo real; también se muestra un haz de color rojo que incide sobre la rejilla y se difracta, en la figura sólo se muestran los órdenes 0, +1 y -1. Para medir la ED se obstruyen todos los haces difractados y se deja pasar únicamente el orden +1 del haz de lectura que incide en un detector (no mostrado en la figura) que mide la intensidad de este haz.

En la práctica nunca se podrán obtener rejillas con una eficiencia del 100 %, experimentalmente, se observa que la energía incidente y la energía emergente al atravesar la rejilla no son las mismas; esto es debido a que parte de esta energía se pierde debido a efectos de difusión, reflexión y/o absorción del medio o material holográfico. Así que la ED será menor al 100 %.

Dependiendo del tipo de procesamiento del material fotosensible empleado para registrar el patrón de interferencia, se pueden generar tres tipos de hologramas; si se produce una variación o modulación del índice de refracción o del espesor de la emulsión se dice que los hologramas registrados son de fase. Si por el contrario la variación o modulación es en el coeficiente de absorción, se dice que los hologramas son de amplitud. Si ocurre que hay modulación del índice de refracción y del coeficiente de absorción, se dice que los hologramas grabados son mixtos.

Otra clasificación de los hologramas se hace por medio de la comparación del espesor del material fotosensible y el periodo entre las franjas de la rejilla de difracción, en este caso se pueden distinguir hologramas delgados y gruesos. Un holograma es delgado si el espesor del material fotosensible t es comparable con el periodo Λ de la rejilla holográfica registrada ($\Lambda \approx t$). Un holograma es de volumen si su espesor es mucho mayor que el periodo de la rejilla ($t \gg \Lambda$). Los hologramas de volumen constituyen sistemas de superficies tridimensionales que se corresponden con las variaciones periódicas de la absorción o índice de refracción.

Dependiendo de la geometría de registro empleada,

los hologramas pueden ser de reflexión, si los haces objeto y referencia inciden en caras opuestas del material holográfico y de transmisión si los haces objeto y referencia inciden en la misma cara del material fotosensible. Por lo anteriormente expuesto, el tipo de rejilla holográfica que se registra en este trabajo es de fase por modulación del índice de refracción, es delgado y es de transmisión.

3. Gelatina y dicromato de amonio

Para la realización de este trabajo se utilizó la gelatina dicromatada como material para grabar rejillas holográficas y a continuación se dan algunas definiciones y propiedades de los materiales que la componen. La gelatina dicromatada consiste en una mezcla de dicromato de amonio, gelatina y agua destilada. Este material se endurece bajo la exposición a la luz y es considerado como un buen material holográfico porque muestra buena modulación del índice de refracción, buena capacidad de resolución y baja absorción para luz visible cerca del infrarrojo. Este material es sensible a la radiación Ultra Violeta ($\lambda < 400$ nm), azul-verde ($400 \text{ nm} < \lambda < 550$ nm) y puede prepararse con relativa facilidad en los laboratorios.

3.1. Gelatina

La gelatina es ampliamente utilizada en la industria alimentaria, farmacéutica e industria de la fotografía debido a sus propiedades exhibidas algunas de las cuales son su reversibilidad del estado de gel al estado sólido, su capacidad de actuar como un coloide protector entre otros. Las gelatinas son comercializadas de acuerdo a su graduación en categorías de Bloom o fuerza de gelificación que es una medida estándar de la fuerza aplicada para provocar una deformación a una concentración y temperatura estandarizada en un gel (fuerza requerida para deprimir un cilindro de 12.7 mm de diámetro en la superficie de un gel de gelatina elaborado enfriando una solución de 6.67 % a 10°C durante 17 horas). Es posible producir cualquier grado de dureza necesario en el gel con cualquier tipo de Bloom cambiándose su concentración. Generalmente, el bloom oscila entre 50 y 325 (Merck, 2020). Existen dos tipos de gelatina, las del tipo A que son producidas mediante procesos ácidos del colágeno y presentan un punto isoelectrico de pH 9.0; y las gelatinas del tipo B que son obtenidas por procesamiento alcalino y su punto isoelectrico se encuentra al rededor de pH 4.8.

3.2. Dicromato de Amonio

Los dicromatos usados por excelencia han sido sales de amonio ($(NH_4)_2Cr_2O_7$), potasio ($K_2Cr_2O_7$) y sodio

($Na_2Cr_2O_7$). El dicromato de amonio es preparado a partir de sulfato de amonio y dicromato de sodio. Su presentación es en forma cristalina de color naranja-rojizo brillante, es flamable e inodoro. Su sistema cristalino es monoclinico. Se emplea comúnmente en pirotécnica y en fotografía, sin embargo, también se encuentra su uso en la industria textil; es tóxico y en contacto con la piel se produce sensibilización y puede provocar alergias. Al igual que los cromatos, los dicromatos son cancerígenos.

4. Metodología

En este trabajo se usa la mezcla de gelatina y dicromato de amonio. La reacción química que permite el registro de la rejilla holográfica se debe a las cadenas polipeptídicas de la gelatina que pueden experimentar reacciones de entrecruzamiento, responsables de la insolubilización de la gelatina y su endurecimiento permanente, esta propiedad se logra mediante la adición de un sensibilizador como las sales de ácido crómico y la posterior exposición a luz actínica. El efecto básico de la luz sobre la gelatina dicromatada es aumentar su punto de fusión, bajo la acción de la luz tiene lugar la formación de un derivado crómico que insolubiliza localmente la gelatina. De forma general este proceso tiene lugar por polimerización de las moléculas del coloide mediante acoplamiento de iones de cromo con grupos polares del coloide. Se necesita una fuente de iluminación que provoque la polimerización de la gelatina sensibilizada con dicromato de amonio. Esta polimerización se lleva a cabo por reacciones entre el cromo y el agua que contiene la gelatina, quedando deshidratada, provocando un endurecimiento y la elevación del punto de fusión al tiempo que disminuye de solubilidad en agua (Chang y Leonard, 1979).

El material fotosensible que se utilizó en este trabajo consiste en la mezcla de gelatina de la marca Duche con Bloom 270 con dicromato de amonio, disueltos en agua destilada. Se prepararon 4 concentraciones diferentes que tienen el 95 % de agua destilada y se cambió la cantidad en peso de gelatina y dicromato de amonio tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Porcentajes del peso de los ingredientes.

Concentración	Gelatina	Dicromato
C1	4.5 %	0.5 %
C2	4 %	1 %
C3	3.5 %	1.5 %
C4	3 %	2 %

La cantidad en miligramos de cada material se determinó por medio de una balanza de precisión, posteriormente en un vaso de precipitados se colocó agua destilada junto con la gelatina (la cantidad depende de la concentración con la que se esté trabajando) y se dejó reposar para su hidratación durante 10 minutos; una vez

cumplido este lapso de tiempo la solución se colocó en la estufa con agitador magnético donde se calienta (procurando que la temperatura permanezca menor a $60^{\circ}C$) y se mantuvo en constante agitación hasta que los granos de gretina se disolvieron; transcurridos 10 minutos se agregó el dicromato de amonio y se continuó agitando por 45 minutos más. Transcurridos los 45 minutos se procedió a depositar la solución en las celdas previamente preparadas. En la figura 3 se muestra una fotografía de los materiales durante el proceso de preparación.

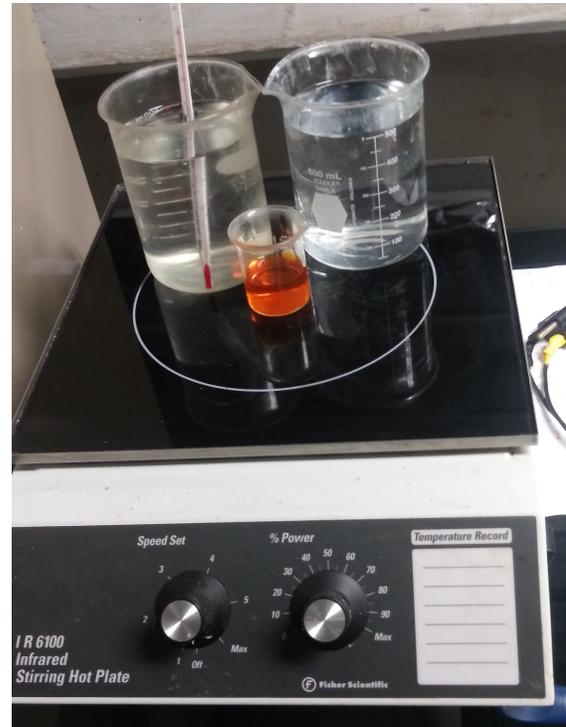


Figura 3: Mezcla de elementos para la fabricación del material fotosensible. Se disuelve la gelatina en agua destilada y posteriormente se le agrega dicromato de amonio. Este proceso se lleva a cabo en una parrilla con agitador magnético.

Una vez que la mezcla de gelatina y dicromato de potasio ha concluido y después que el tiempo de reposo ha terminado, se deposita esta mezcla en una celda fabricada por dos placas de vidrio separadas por películas plásticas en sus extremos. Se prepararon 4 celdas con espesores distintos cada una, es decir, se prepararon celdas con espesor de 10, 100, 200 y $300 \mu m$. Para introducir la mezcla de la gelatina y dicromato de amonio en las celdas, esta se deposita en el borde de la celda colocada verticalmente para que por efectos de gravedad, la mezcla se introduzca en el espacio entre las placas de vidrio. Cuando el material llena la celda, ésta se coloca en forma horizontal y se deja reposar durante 2 horas para que se solidificara. En la figura 4 se muestra una fotografía cuando la celda está preparada para registrar en ella el patrón de interferencia.



Figura 4: Celda fotosensible preparada para grabar una rejilla holográfica en ella.

4.1. Arreglo Experimental

Para caracterizar el material fotosensible en función de la eficiencia de difracción de la rejilla holográfica registrada en la celda fotosensible se utilizó el arreglo experimental que se muestra en la figura 5. Como puede observarse en la figura 5 se coloca un tercer espejo a 45° en la zona próxima a la superposición de los haces para permitir que la celda fotosensible sea colocada en forma horizontal y así evitar escurrimientos o fracturas de la gelatina dicromatada.

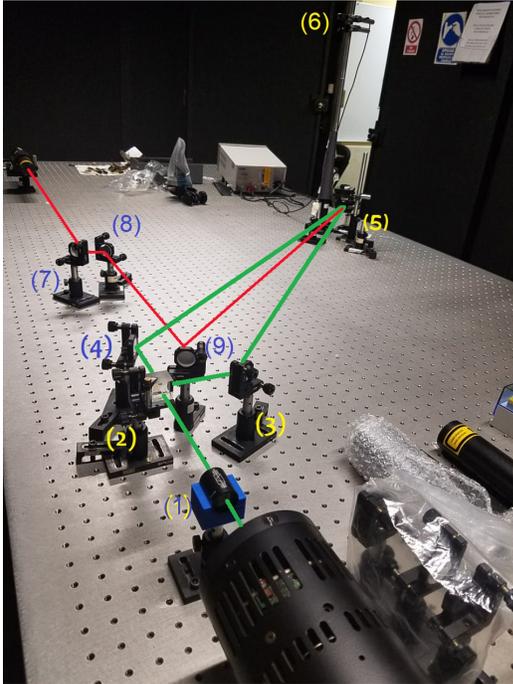


Figura 5: Arreglo experimental usado para grabar una rejilla de difracción y medir su eficiencia. El haz de luz que sale del láser de Ar (parte inferior de la fotografía) pasa a través de un polarizador (1) y es dividido por un divisor de haz (2) que envía dos haces de luz hacia los espejos (3) y (4). Ambos haces inciden en el espejo (5) a 45° y los haces alcanzan el detector (6). Para medir la ED se usa un láser de He-Ne cuyo haz de luz es desviado por los espejos (7), (8) y (9) para que incida sobre la rejilla que se forma en la celda fotosensible.

Para el registro de la rejilla holográfica se utilizó un haz de luz proveniente de un láser de Argón de intensidad variable con una longitud de onda $\lambda = 532$ nm

correspondiente al color verde y para medir la eficiencia de difracción se utilizó un láser de He-Ne con una potencia de 2 mW y una longitud de onda $\lambda = 632.8$ nm. El detector que se utilizó es de la marca Thorlabs, y para la captura de los valores de intensidad se utilizó el software propio del detector.

5. Resultados

La caracterización de la gelatina dicromatada se realizó al modificar los parámetros de la muestra y del arreglo experimental. Primero se prepararon las cuatro concentraciones de gelatina y dicromato de amonio (ver tabla 1) y cada concentración se depositó en una celda de $20 \mu\text{m}$ de grosor, y sobre cada una se registró una rejilla holográfica; la potencia del laser de Ar fue fijada a 20 mW y el arreglo experimental fue de tal modo que el patrón de interferencia formaba una rejilla de 120 lin/mm, se midió la eficiencia de difracción en tiempo real en cada caso y se seleccionó la celda con la concentración que mostró la mejor eficiencia. Posteriormente, usando esa concentración se depositó en las celdas de $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ y $300 \mu\text{m}$. Sobre cada una de ellas se grabó una rejilla holográfica y se seleccionó el espesor que presentó una mayor eficiencia. El siguiente parámetro que se cambió fue la intensidad del láser; para ello se usaron las potencias de 20 mW, 40 mW, 60 mW y 80 mW, por último se cambió la frecuencia de la rejilla holográfica.

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos de la eficiencia de difracción (mostrada en porcentaje) en cada una de las celdas fotosensibles que se fabricaron. El espesor de las celdas en este caso fue de $20 \mu\text{m}$ y se usaron todas las concentraciones mostradas en la tabla 1.

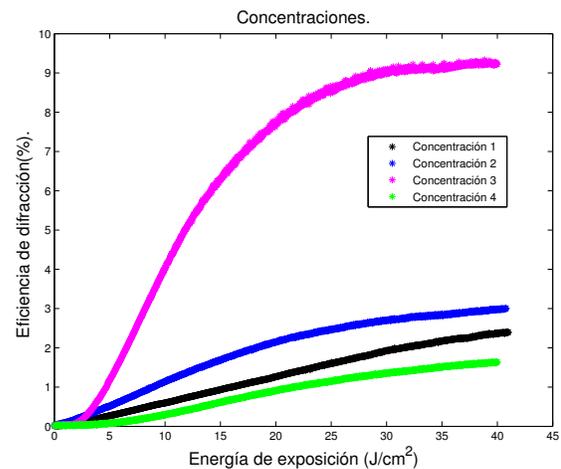


Figura 6: Comportamiento de la eficiencia de difracción.

Como puede observarse de la figura 6 la concentración 3 subió a una eficiencia cerca del 9.3% con una

potencia de 40 mW/cm^2 , mientras que para la misma potencia las concentraciones 1, 2 y 4 muestran una eficiencia de difracción menor al 3%, por lo que en los experimentos siguientes sólo se hicieron para la concentración 3 que exhibió la mayor eficiencia de difracción.

En la figura 7 se muestran las eficiencias de difracción obtenidas de los diferentes espesores ($20 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ y $300 \mu\text{m}$). Se encontró que el espesor en cuál se tiene la mayor eficiencia fue el correspondiente a $200 \mu\text{m}$.

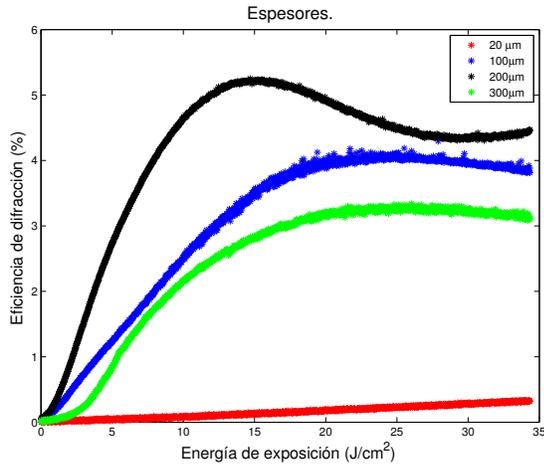


Figura 7: Gráfica obtenida al variar los espesores. En el eje horizontal se tiene la energía, y en el eje vertical se tiene la eficiencia de difracción.

Posteriormente se repitió el procedimiento para la concentración 3, con un espesor de $200 \mu\text{m}$, y se cambió la potencia del láser a 20 mW , 40 mW , 60 mW y 80 mW . En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos.

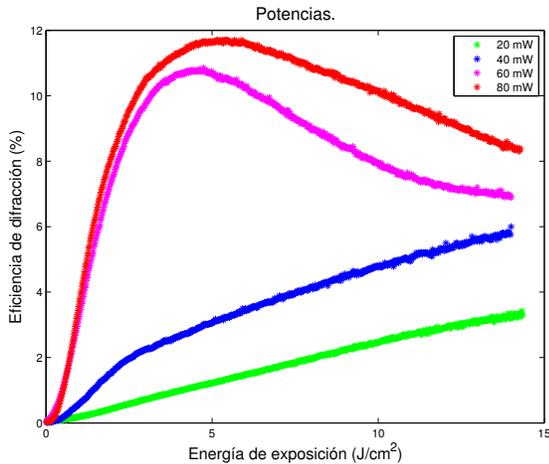


Figura 8: Gráfica obtenida al variar la potencia. En el eje horizontal se tiene la energía, y en el eje vertical se tiene la eficiencia de difracción.

Se observó que las curvas correspondientes a las potencias de 60 mW y 80 mW alcanzan valores similares mostrando un comportamiento similar, sin embargo, pa-

ra las potencias de 20 mW y 40 mW la ED alcanzó un máximo aproximado de 2% y 6% respectivamente. Con base a los resultados mostrados, se optó por considerar la potencia de 80 mW como la mejor (ya que a esa potencia se llegó a la máxima ED). Posteriormente se hizo variar el ángulo de interferencia entre los haces de 1.9° , 3.8° y 5.7° (que corresponde a los ángulos θ , 2θ y 3θ respectivamente). Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9 y se encontró que el ángulo en el cuál se tiene la mayor eficiencia fue el de 1.9° .

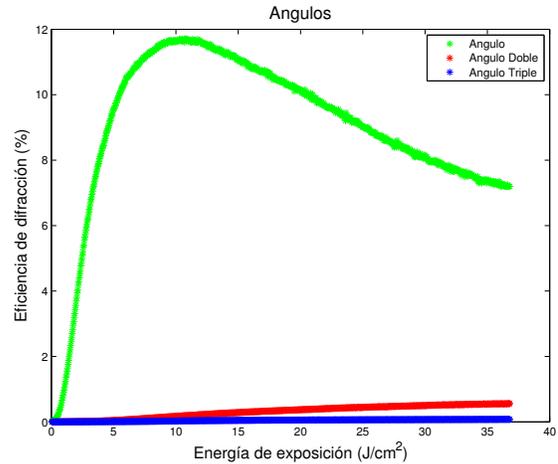


Figura 9: Gráfica obtenida variando ángulo de incidencia (respecto de la normal) entre los dos haces que forman la rejilla. En el eje horizontal se tiene la energía, y en el eje vertical se tiene la eficiencia de difracción.

La concentración 3 de la figura 6 muestra una mayor eficiencia de difracción probablemente por la velocidad de polimerización que es afectada por el volumen del material. El haz incidente, en forma de patrón de interferencia, forma zonas brillante y oscuras. El proceso de radiación en el material polimeriza más fuerte en la dirección de mayor proceso energético, esto es en la zona brillante de la interferencia donde se concentra la radiación. La polimerización también depende de la absorción del material que afectará a cada electrón que forma un enlace en el polímero, que posteriormente realizará la catalización que endurece los enlaces de cada molécula presente en el polímero, y este proceso se expande en todas direcciones por un proceso de reacción en cadena. La velocidad de polimerización será mucho más rápido en donde le haz incide directamente y más lenta hacia los costados.

La descripción del proceso anterior forma surcos en la estructura del polímero con diferentes condiciones en los índices de refracción: $n_a < n_b$ ó $n_a > n_b$ ó $n_a = n_b$, figura 10. Existe la posibilidad que en el proceso de generación del holograma, en donde están las concentraciones menores a $200 \mu\text{m}$ no se desarrolle una diferencia significativa para los índices de refracción, es decir aquí los índices de refracción serán aproximadamente iguales

$n_a \approx n_b$, y debido a esto existe una baja eficiencia de difracción.

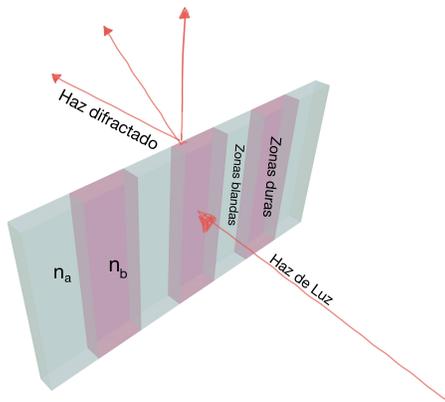


Figura 10: Esquema de los surcos formados en la formación de la rejilla.

6. Conclusiones

Se presentó la caracterización de un material fotosensible compuesto por gelatina comestible tipo A marca DUCHE mezclada con dicromato de amonio sobre el que se registró una rejilla holográfica de volumen, de transmisión y de fase por modulación del índice de refracción. La mayor eficiencia de difracción obtenida es de 11.7 % que corresponde a la mezcla que está formada por 3.5 % de gelatina, 1.5 % de dicromato de amonio y 95 % de agua destilada, este material se colocó dentro de una celda fotosensible compuesta por dos portaobjetos separados por una película plástica de 200 μm . La rejilla holográfica de 120 lin/mm formada por la interferencia de dos haces de luz de una láser de Ar con una longitud de onda $\lambda = 532 \text{ nm}$, 80 mW/cm^2 de potencia. La respuesta del material para grabar información es muy lenta, sin embargo se puede grabar texto e imagen, utilizando técnicas de grabado de hologramas de Fourier. La eficiencia para la recuperación de datos es baja, ya que existen pérdidas por efecto de pupila y esto provoca pérdidas en el objeto.

Referencias

- Azkona, J. J., Martínez-Calderon, M., Gómez, M., Rodríguez, A., y Olaizola, S. M. (2019). Talbot effect in embedded gratings inscribed with femtosecond laser in transparent media. En *The european conference on lasers and electro-optics* (p. cm_p.20).
- Bang, K., Jang, C., y Lee, B. (2019). Curved holographic optical elements and applications for curved see-through displays. *Journal of Information Display*, 20(1), 9–23.
- Bjelhagen, H. I. (2013). *Silver-halide recording materials: For holography and their processing* (Vol. 66). Springer.
- Calixto, S. (1987). Dry polymer for holographic recording. *Applied optics*, 26(18), 3904–3910.
- Chang, B. J., y Leonard, C. D. (1979). Dichromated gelatin for the fabrication of holographic optical elements. *Applied optics*, 18(14), 2407–2417.
- Ferrara, M. A., Striano, V., y Coppola, G. (2019). Volume holographic optical elements as solar concentrators: An overview. *Applied Sciences*, 9(1), 193.
- Frejlich, J. (2007). *Photorefractive materials: fundamental concepts, holographic recording and materials characterization*. John Wiley & Sons.
- Ganzherli, N., Gulyaev, S., Maurer, I., y Khazvalieva, D. (2019). High-frequency relief-phase holographic gratings on dichromated gelatin processed by short-wave uv radiation. *Technical Physics Letters*, 45(6), 613–615.
- Khazvalieva, D., Ganzherli, N., Gulyaev, S., y Maurer, I. (2019). High-frequency relief holographic gratings created by exposing dichromated gelatin to short-wave uv radiation. En *Journal of physics: Conference series* (Vol. 1236, p. 012020).
- Merck. (2020). <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?interface=all&term=gelatin&n=0&mode=match+partialmax&focus=documents&lang=es&ion=mx>.
- Rastogi, V., Agarwal, S., Kumar, V., y Shakher, C. (2019). Holographic optical element based digital holographic interferometer for the study of macro flames, micro flames and their temperature instability. *Optics and Lasers in Engineering*, 122, 29–36.
- Romero-Arellano, V., Solano, C., y Martínez-Ponce, G. (2006). Gelatina dicromatada modificada para incrementar su resistencia a la humedad. *Revista mexicana de física*, 52(2), 99–103.
- Shankoff, T. (1968). Phase holograms in dichromated gelatin. *Applied Optics*, 7(10), 2101–2105.

- Solano, C. (1993). Principales parámetros de los materiales fotosensibles para utilizarse en holografía. *Revista Mexicana de Física*, 40(5), 686-712.
- Villegas, A. M. V. (2010). *Elementos holograficos en gelatinas dicromatadas* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Zaragoza.