

Rregistro de rejillas holográficas en Norland Optical Adhesive no. 72®

*Mauricio Ortiz Gutiérrez¹, Marco Antonio Salgado Verduzco¹, Juan Carlos Ibarra Torres²,
Mario Pérez Cortés³ y María Milagrosa Pérez Sánchez³*

¹Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH; ²Centro Universitario de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Guadalajara; ³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

Resumen

Se presenta la caracterización del Norland Optical Adhesive No. 72® como material fotosensible en el que se grabaron rejillas holográficas. Este adhesivo se introduce en tres diferentes celdas formadas por dos portaobjetos con una separación de 110, 220 y 330 micras de espesor. La caracterización se realizó midiendo la eficiencia de difracción de rejillas holográficas grabadas en la celda con un láser de argón usando la longitud de onda de 457nm. La máxima eficiencia de difracción obtenida fue del 17.5% del primer orden. También es posible grabar hologramas de Fourier en este material mediante un arreglo experimental sencillo y se muestran los resultados experimentales obtenidos.

Palabras clave: Rejillas holográficas, hologramas de Fourier, material fotosensible.

Abstract

Holographic grating was recorded in the Norland Optical Adhesive No. 72®. We show the characterization of this adhesive a photosensitive material in which we recorded holographic gratings. The adhesive was introduced into three glass cells with a thickness of 110, 220 and 330 microns. The characterization was achieved measuring the diffraction efficiency of the holographic gratings recorded in the material with a light beam from an argon laser with a 457 nm wavelength. The diffraction efficiency we ob-

tained was 17.5% at the first order. Using an adequate experimental setup storage Fourier holograms are also possible. Experimental results are shown.

Keywords: holographic gratings, Fourier holograms, photosensitive materials.

1. Introducción

Hoy en día los hologramas se han convertido en instrumentos de uso común, ya que se encuentran en tarjetas de crédito o en cualquier objeto al que se quiera evitar su falsificación, es por eso que se han convertido en una herramienta poderosa en cuestión de seguridad de documentos y productos.

La palabra "holografía" proviene del griego "holos" que significa completo y "graphos" que significa descripción, por lo que el significado completo de la holografía es una descripción completa de un objeto real. Para hacer un holograma de un objeto se usan técnicas avanzadas de fotografía y para ello se utiliza la luz proveniente de un láser que graba un patrón de interferencia en una película fotosensible que posteriormente es sometida a un proceso de revelado fotográfico. Para reconstruir la imagen registrada en el material fotosensible se hace pasar nuevamente un haz de luz a través de éste y de esta forma se proyecta una imagen tridimensional del objeto registrado.

A diferencia de una fotografía que solo graba la intensidad de la luz que refleja un objeto, para grabar un holograma es necesario grabar un patrón de interferencia que se forma por la superposición de dos haces de luz, uno de ellos, llamado haz de referencia, proviene directamente del láser y el otro haz, llamado haz objeto, se produce por el reflejo de la luz sobre un objeto real al ser iluminado con la luz láser.

Dependiendo de las aplicaciones de los hologramas, es necesario contar con un material fotosensible que registre el patrón de interferencia. Estos pueden ser películas fotosensibles como los haluros de plata, gelatina dicromatada, cristales fotorrefractivos y fotopolímeros [1-5], e independientemente de su aplicación, las características que se deben considerar en un material fotosensible para registro holográfico son: resolución, sensibilidad de energía, su selectividad de amplio espectro (longitud de onda), eficiencia de difracción, fácil manejo, velocidad de revelado y fijado, capacidad de multiplexado, rango de temperatura, distorsión, etc. [6,7].

Los materiales de registro holográfico ampliamente usados son los basados en tecnología de haluros de plata. La principal característica de estos materiales es su capacidad para registrar estructuras extremadamente finas comparadas con las estructuras registradas en películas fotográficas convencionales. La respuesta en frecuencia espacial de las películas holográficas a base de haluros de plata exceden las 2000 líneas/mm, mientras que las películas fotográficas alcanzan 200 líneas/mm. Sin embargo, la alta resolución es siempre acompañada de baja sensibilidad, es decir, las películas holográficas requieren mayor tiempo de exposición a la luz que las películas fotográficas. Así, la densidad de energía ne-

cesaria para exponer materiales de alta resolución es mucho mayor que aquella requerida para materiales de baja resolución.

Existen fabricantes a nivel mundial de películas holográficas en base a haluros con alta resolución espacial tales como Kodak, Agfa-Gevaert, Ilford Limited y Slavich. Estos fabricantes tienen disponibles películas con sensibilidad en diferentes longitudes de onda, espesores, presentaciones (en película o en placa), etc. [2, 7].

Las películas de gelatina dicromatada son ampliamente usadas para grabar hologramas de volumen de fase con buena eficiencia. La eficiencia de difracción en estos materiales puede alcanzar el 90%.

La gelatina dicromatada no es disponible comercialmente por lo que para registrar hologramas en estos materiales es necesario fabricar las placas fotosensibles usando gelatina comestible mezclada con dicromato, tal como $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$. Los métodos para preparar tales placas y el procedimiento para revelar las placas después de haber sido expuestas a la luz es complejo y debe ser realizado con cuidado. La descripción de estos métodos pueden ser encontrados en [8-10]

Existen cristales que exhiben una combinación de sensibilidad a la luz y efecto electro-óptico. Este efecto combinado es conocido como efecto fotorrefractivo y los materiales que presentan este efecto son conocidos como materiales fotorrefractivos. El mecanismo físico que se lleva a cabo para grabar hologramas en estos materiales es complejo y no es tratado en este trabajo, sin embargo, se puede consultar la referencia [11-12] donde se presenta un análisis detallado de este proceso. El material quizás más común que se emplea como material fotorrefractivo es el cristal de niobato de litio (LiNbO_3), sin embargo, existen otros que también son empleados [11-14].

Muchos cristales fotorrefractivos son muy lentos cuando son comparados con emulsiones fotográficas para exposiciones con láser de onda continua. Su tiempo de respuesta depende de la razón a la cual la energía le es liberada y, por tanto, se pueden grabar hologramas en un tiempo muy corto con un láser pulsado.

Un inconveniente en el uso de los cristales fotorrefractivos como medio de registro holográfico es el hecho que el haz que se usa para la reconstrucción borra total o parcialmente el holograma grabado mientras incide sobre el cristal. Mientras que en algunos casos es posible leer la imagen con una longitud de onda diferente que la usada para grabar el holograma (en la cual el cristal no es sensible) no es posible en general debido a la incapacidad para acceder a los planos de Bragg donde se almacenan las imágenes. Estos cristales aún están siendo analizados por diversos grupos de investigación en todo el mundo y se están aplicando en interferometría, óptica adaptiva, memorias holográficas y procesamiento de señales ópticas.

Los fotopolímeros son polímeros sensibles a la luz que graban cualquier tipo de información ya sean datos y/o imágenes. Son un excelente medio para registro holográfico y tienen dos virtudes principales: 1) los hologramas que se obtienen en estos materiales son

principalmente de fase y, 2) las películas pueden tener un espesor considerable (hasta 8 mm). Los hologramas registrados en estos polímeros tienen una eficiencia excelente.

Estos materiales reaccionan a la luz debido a la concentración de monómeros los cuales cambian la estructura del polímero en función del patrón de luz con el que se irradian, además, tienen excelentes características holográficas, tales como alta modulación del índice de refracción, buena sensibilidad, revelado de imágenes en tiempo real, alta calidad óptica y bajo costo. Su sensibilidad espectral se puede cambiar fácilmente modificando su composición. Por estas razones, importantes compañías como DuPont y Polaroid, así como diversos grupos de investigación en todo el mundo están trabajando para encontrar materiales de registro holográfico en base a fotopolímeros [15-17].

Los polímeros tienen una gran importancia en muchas industrias y se encuentra el uso de éstos en la industria aeroespacial, automotriz, marítima y de construcción [18-19]. Además, debido a su alta sensibilidad a la luz, también se han usado como materiales de registro holográfico. En otros trabajos ya se ha demostrado su uso y su caracterización como material fotosensible para registro holográfico; en particular, el uso de los polímeros de la marca Norland Optical Adhesive® han sido ampliamente analizados [20-21], sin embargo, en estos trabajos se ha utilizado algún tinte para dopar los polímeros y caracterizarlos mediante el uso de luz visible. En estos polímeros se han registrado rejillas holográficas en tiempo real y se han registrado hologramas de Fourier.

En este trabajo se presenta el adhesivo Norland Optical Adhesive No. 72® como material holográfico de baja resolución en el que se han grabado rejillas de difracción en tiempo real utilizando un láser de argón ($\lambda = 457 \text{ nm}$). Este polímero no requiere de tintes para registrar hologramas. En la siguiente sección se detalla el procedimiento mediante el cual se crearon celdas con el fotopolímero empleado, posteriormente se menciona el proceso mediante el cual se registraron las rejillas holográficas y se presentan los resultados experimentales obtenidos.

2. Material fotosensible

En este trabajo se usó el adhesivo conocido como Norland Optical Adhesive No. 72® (NOA 72®) que está compuesto de monómeros de acrilato con mercapto-éster y gracias a su transparencia en la región visible del espectro electromagnético es usado frecuentemente como adhesivo en la cementación de lentes ópticos. Este material se polimeriza por exposición directa a la radiación ultravioleta entre 315 a 400 nm y luz visible entre 400 y 450 nm. Las longitudes de onda máximas de absorción son 320, 365 y 420 nm [22].

3. Preparación de la muestra y arreglo experimental

El adhesivo NOA 72® se depositó en una celda que se prepara con dos portaobjetos separados por una película plástica y sujetado en los extremos por pinzas. En el borde de la

celda se deposita el NOA 72® y se deja en reposo sobre una superficie en posición vertical y, por acción de la gravedad, el material se va deslizando entre los portaobjetos hasta que la celda se llena por completo. Se utilizaron tres celdas diferentes de 110, 220 y 330 micras de espesor cada una que se obtienen con la utilización de 1, 2, y 3 películas de acetato comercial. El espesor fue medido con un micrómetro digital marca Mitutoyo con una micra de precisión.

Debido a que el adhesivo es líquido (el NOA 72® es un polímero líquido antes del proceso de curado o polimerizado), las celdas con el material fotosensible deben ser manejadas con cuidado y no hacer presión sobre los portaobjetos porque esto podría alterar el espesor de las celdas. Una vez que cada una de las celdas se han llenado se colocan sobre una superficie horizontal (de forma perpendicular a la posición en que se fue depositando) para evitar escurrimientos. Al finalizar el proceso anterior, las celdas fotosensibles están listas para grabar rejillas y/o hologramas en ellas.

Para grabar las rejillas holográficas en cada una de las celdas fotosensibles se empleó un arreglo experimental como el que se muestra esquemáticamente en la figura 1. En este arreglo el haz que proviene de un láser de argón (Ar) se divide en dos haces por medio del divisor de haz (DH) y es dirigido hacia dos espejos (E1 y E2) que reflejan los haces hacia el tercer espejo (E3) e inciden en la celda fotosensible donde se registra el patrón de interferencia. Se puede observar en la figura 1 que la muestra (celda) está en posición horizontal debido a que el material es líquido y de esta manera se evita que este se escurra (o se derrame).

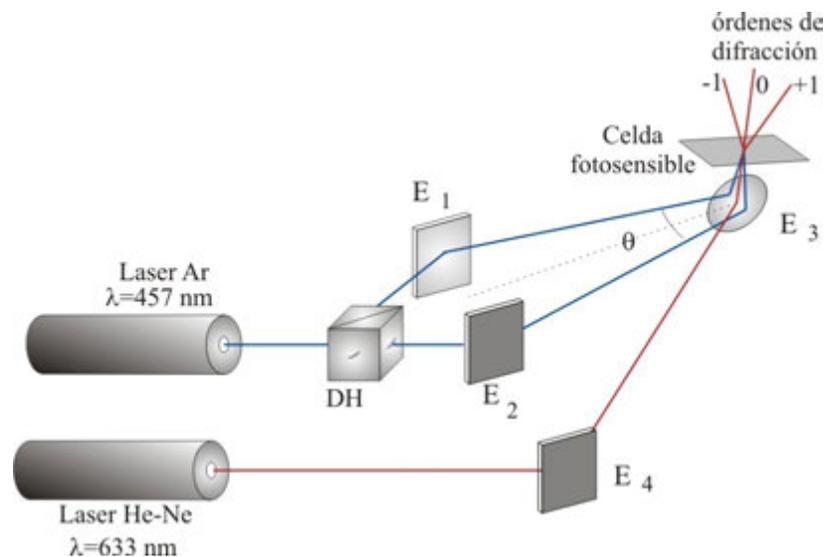


Figura 1. Esquema para grabar rejillas holográficas en el fotopolímero NOA 72.

El láser que se emplea para registrar la rejilla es un láser de argón multilíneas en el que se seleccionó la longitud de onda $\lambda=457$ nm correspondiendo al color azul, el láser en esta longitud de onda emite el haz con una potencia de 400 mW. Las rejillas se grabaron dejando la celda fotosensible expuesta al patrón de interferencia durante 45 minutos cuando los haces que interfieren forman un ángulo $\theta = 4$ grados entre sí, con lo que se obtiene una rejilla con frecuencia de 153 líneas/mm.

Para caracterizar el material fotosensible se midió la eficiencia de difracción de la rejilla; para ello se hace incidir sobre la celda un haz de luz proveniente de un láser de He-Ne con una longitud de onda de $\lambda = 633$ nm (ver figura 1) mientras la rejilla se va grabando. Cuando el haz pasa a través de la rejilla se difracta o desvía en direcciones discretas conocidas como órdenes de difracción. La posición o dirección de estos órdenes de difracción se calcula siguiendo la Ley de Bragg [8]. La eficiencia de difracción, considerando pérdidas por reflexión, se calcula usando la ecuación (1).

$$\eta(\%) = \frac{100 \cdot I_1}{I_i - I_r} \quad (1)$$

donde I_1 es la intensidad del orden +1 de difracción, I_i e I_r son las intensidades de la luz incidente y reflejada en la celda que contiene el NOA 72®. Las intensidades de los haces se mi-

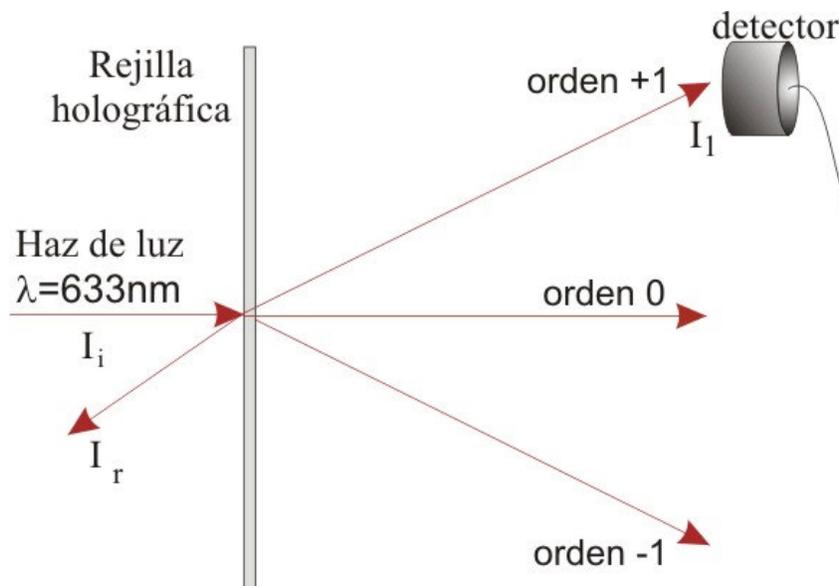


Figura 2. Esquema para medir de la eficiencia de difracción de una rejilla holográfica. El detector se coloca de tal forma que incida sobre él el haz difractado de orden +1. En la figura el haz reflejado I_r no cumple la ley de reflexión debido a que solo es ilustrativo.

dieron con un radiómetro de la marca Newport modelo 2930C. En la figura 2 se muestra el esquema para medir la eficiencia de difracción.

4. Resultados

En la figura 3a se muestra una imagen de la rejilla que se graba en la celda fotosensible amplificada 60 veces con un objetivo de microscopio 60x proyectada sobre una pantalla y el patrón de difracción que produce al incidir sobre ella un haz de láser ($\lambda=633\text{ nm}$) se muestra en la figura 3b.

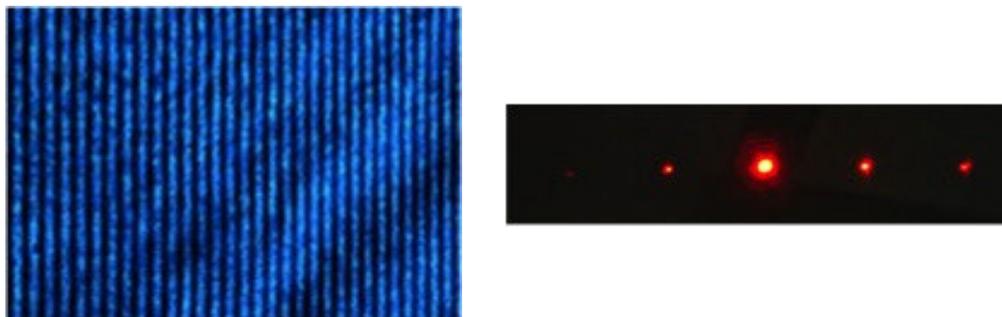


Figura 3. Fotografías (a) del patrón de interferencia usado para grabar las rejillas y (b) del patrón de difracción producido por la rejilla grabada en NOA 72.

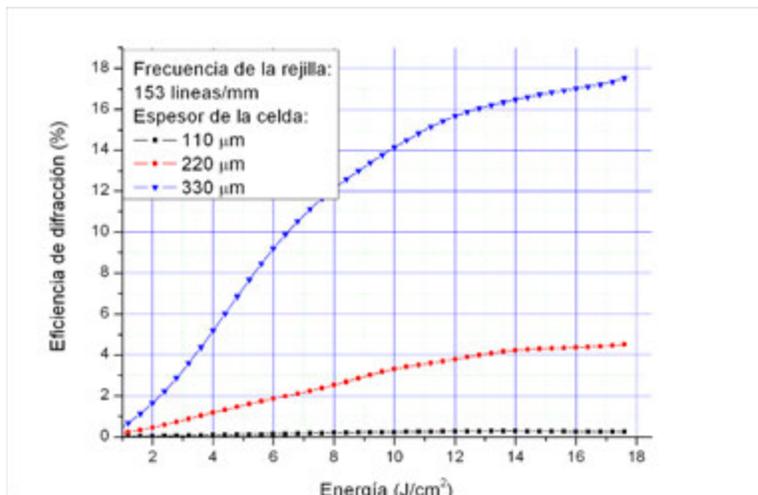
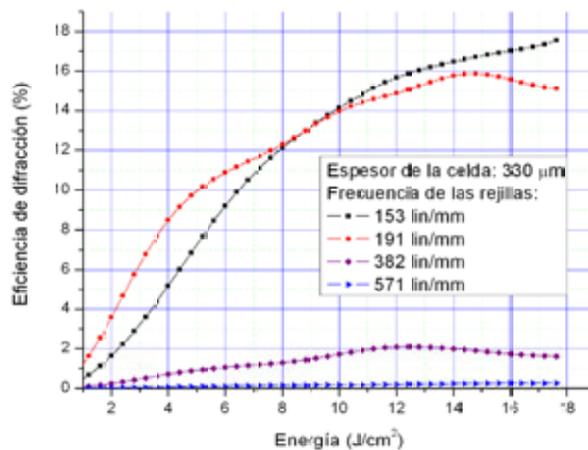


Figura 4. Comportamiento de la eficiencia de difracción de las rejillas holográficas grabadas en las celdas con distintos espesores. La eficiencia fue medida en el orden +1 de difracción.

En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos para la eficiencia de difracción de la rejilla grabada en NOA 72® con los tres distintos espesores de las celdas usadas en este trabajo.

Como puede observarse en la figura 4, se obtienen diferentes eficiencias de difracción para los diferentes espesores de la celda fotosensible, la muestra que tiene mayor eficiencia fue fabricada con el espesor de 330 micras y alcanzó su máxima eficiencia de difracción de 17.5%. Para la celda de 220 micras se alcanzó una eficiencia de 4.63% y la celda de 110 micras alcanzó la máxima eficiencia de 0.29%.

Figura 5. Comportamiento de la eficiencia de difracción de las rejillas holográficas grabadas en la celda de 330 micras de espesor. El ángulo de interferencia de los haces que forman la rejilla fue modificado para obtener rejillas de diferente frecuencia. La eficiencia fue medida en el orden +1 de difracción.



Usando la celda fotosensible con espesor de 330 micras, que fue la que mejor eficiencia alcanzó con el ángulo de 4 grados, se grabaron rejillas con frecuencia de 153, 178, 358 y 535 líneas/mm generadas cuando los haces que interfieren (ver figura 2) forman ángulos de 4, 5, 10 y 15 grados, respectivamente. En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos.

La máxima eficiencia de difracción fue para la rejilla con frecuencia de 153 líneas/mm siendo su valor de 17.5% como se mencionó anteriormente. Para la frecuencia de 191 líneas/mm la eficiencia obtenida fue de 16% y para las frecuencias 382 y 571 líneas/mm las eficiencias fueron 2% y 0.27%, respectivamente.

Usando la celda fotosensible de 330 micras de espesor y formando un ángulo de 4 grados entre los haces, se grabaron hologramas de Fourier [8, 20] de diversas figuras. Los hologramas de Fourier se obtienen grabando la interferencia del haz de referencia con la transformada de Fourier de un objeto. Una de las principales características de este tipo de

hologramas es que el área necesaria para grabarlo es pequeña comparada con otros tipos de hologramas.

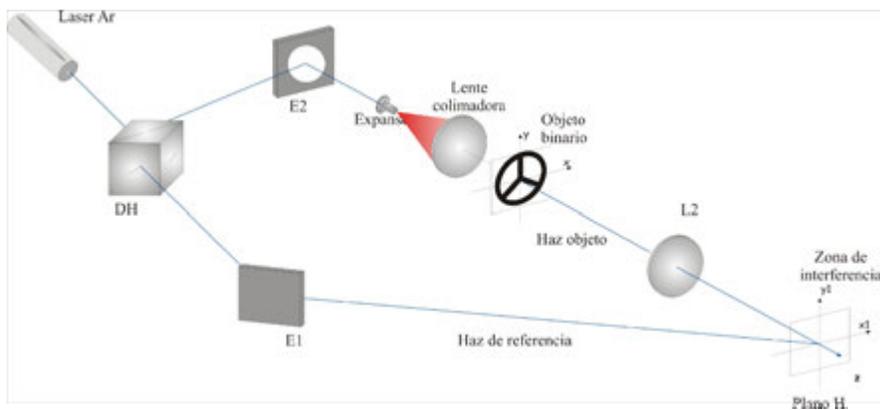


Figura 6. Esquema para grabar hologramas de Fourier en un material fotosensible colocado en el plano H.

En la figura 6 se muestra el esquema para grabar hologramas de Fourier; en esta figura se muestra un haz de luz proveniente de un láser el cual es separado por un divisor de haz (DH). El haz que pasa directamente, llamado haz de referencia, se dirige hacia el espejo E1 y es reflejado hacia el material fotosensible (plano H); el segundo haz que es desviado es filtrado y colimado ilumina al objeto binario ubicado en el plano xy ; la lente convergente L2 ob-

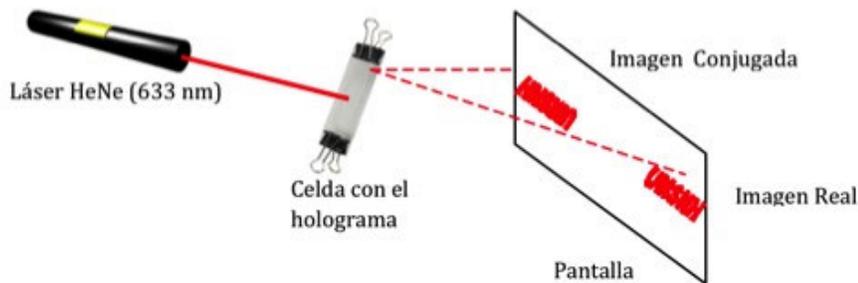


Figura 7. Esquema que muestra la reconstrucción de las imágenes almacenadas en un material fotosensible. En la figura se muestran dos imágenes, una real y otra conjugada del objeto registrado. Estas imágenes son proyectadas sobre una pantalla blanca y alejada de la celda.

tiene la transformada de Fourier del haz proveniente del objeto y lo dirige hacia el material fotosensible donde interfiere con el haz de referencia en el plano H (zona de interferencia).

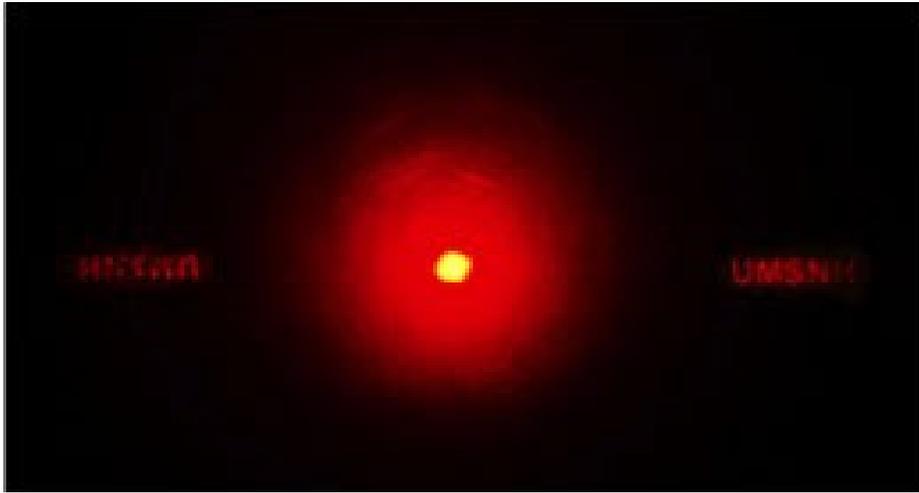


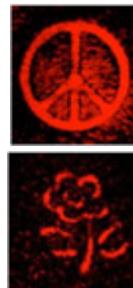
Figura 8. Fotografía de las imágenes real y conjugada del holograma reconstruido. Es importante notar que la imagen derecha corresponde a la imagen real, mientras que la imagen de la izquierda es la imagen conjugada. El punto central es el orden cero de difracción.

Una vez que el holograma ha sido registrado en el material fotosensible, se ilumina con un láser He-Ne con una longitud de onda de $\lambda=633$ nm para recuperar la imagen almacenada (20). En la figura 7 se presenta un esquema que muestra la reconstrucción de las imágenes registradas.

En la figura 8 se muestra una fotografía de las imágenes que se obtienen en la reconstrucción de un holograma de Fourier de un objeto binario con las siglas de la Universidad Michoacana (UMSNH).

Los objetos empleados para grabar los hologramas se generan en computadora y se despliegan en un monitor. Con una cámara réflex y usando película Kodalith se toma la fotografía de la imagen y se revela usando el revelador D-11 recomendado por Kodak para este tipo de películas. Una vez que la película ha sido revelada adecuadamente, los negativos son usados como objetos en el arreglo mostrado en la figura 6 y son mostrados en la columna izquierda de la tabla 1. Después de grabar los hologramas de Fourier en la celda fotosensible, siguiendo las especificaciones arriba mencionadas, se reconstruye el holograma haciendo incidir sobre el holograma un haz proveniente del láser de He-Ne con $\lambda = 633$ nm. Éste genera las imágenes real y conjugada del holograma.

TABLA 1 Imágenes reconstruidas de los hologramas grabados en el NOA 72.	
Objeto binario	Imagen real



En la tabla 1 se muestran las fotografías de las imágenes reales que se obtienen al reconstruir los hologramas y también se muestran los objetos que se emplearon para registrar los hologramas. En este caso no fue posible medir la eficiencia de difracción de los hologramas grabados debido a que el tamaño de la imagen ($2 \times 2 \text{ cm}^2$) es mayor al tamaño del detector que se dispone en el laboratorio.

5. Conclusiones

Se presenta la caracterización del adhesivo Norland Optical Adhesive No. 72® como material fotosensible. Sobre este material se grabaron rejillas holográficas con 153, 178, 358 y 535 líneas/mm con una longitud de onda de $\lambda = 457 \text{ nm}$ proveniente de un láser de argón. Estas rejillas fueron grabadas en celdas de 110, 220 y 330 micras de espesor. La rejilla con 153 líneas/mm registró la máxima eficiencia de difracción con un valor de 17.5% usando la celda de 330 micras. Además, en este material es posible grabar hologramas de Fourier de objetos binarios.

Agradecimientos:

En memoria de nuestro amigo Daniel Ruiz Velázquez. Agradecemos a los Dres. Edgar Alvarado Méndez y Mónica Trejo Durán por sus valiosos comentarios y por las facilidades del equipo usado en este trabajo. Agradecemos también a la CIC, UMSNH por el financiamiento de este trabajo.

Referencias

- [1] A. L. Mikaelian and V. A. Barachevsky. 1991. Photopolymer device physics, chemistry and applications II. Proc. SPIE 1559: 256-260.
- [2] M. Smith. 1997. Holographic recording materials. Springer Verlag. Berlin.
- [3] J. J. Robillard. 1989. In recording materials and processes & holographic recording materials. MRCE monograph series, 1:72-101.
- [4] Pochi Yeh. 1993. Introduction to photorefractive nonlinear optics. John Wiley & Sons, Inc.
- [5] R. J. Collier, C. B. Burckhardt and L. H. Lin. 1971. Optical holography. Academic Press, Inc. LTD.
- [6] Elena Fernández, Celia García, et al. 2006. Optimization of a thick polyvinil alcohol-acrylamide photopolymer for data storage using a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing. Applied Optics, 45, 29:7661-7666.
- [7] H. I. Bjelkhagen. 1993. Silver halide recording materials. Springer Verlag. USA.
- [8] Howard M. Smith. 1975. Principles of holography; second edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [9] P. Hariharan. 1984. Optical holography: Principles, techniques and applications. Cambridge University Press. Cambridge UK.
- [10] G. Saxby. 1988. Practical holography. Prentice Hall Englewood Cliffs, USA.
- [11] P. Gunter and J. P. Huignard editors. 1988. Photorefractive materials and their applications I. Springer Verlag. Berlin.
- [12] P. Gunter and J. P. Huignard editors. 1988. Photorefractive materials and their applications II. Springer Verlag, Berlin.
- [13] Joseph W. Goodman. 1996. Introduction to Fourier optics. Mc Graw Hill. USA.
- [14] J. J. Amodei. 1971. Electron diffusion effects Turing holograma recording in crystals. Appl. Phys. Lett. 18:22-24.
- [15] Raymond K. Kostuk. 1999. Dynamic hologram recording characteristics in DuPont photopolymers. Applied optics. 38, 8:1357-1363.
- [16] William J. Gambogi Jr., William A. Gerstadt; Steven R. Mackara; Andrew M. Weber. 1991. Holographic transmission elements using improved photopolymer Films. Proc. SPIE 1555: 1-5.
- [17] William J. Gambogi Jr. William K. Smothers; Kirk W. Steijn; Silvia H. Stevenson; Andrew M. Weber. 1995. Color holography using DuPont holographic recording Films. Proc. SPIE 2405: 1-5

- [18] B. Taljsten. 2005. The importance of bonding-an historic overview and future possibilities. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures. 1-10.
- [19] Mays G. C. And Hutchinson A. R. 1992. Adhesives in Civil Engineering. Cambridge University Press. UK.
- [20] J.C. Ibarra, L. Aparicio-Ixta, M. Ortiz-Gutiérrez and C.R. Michel 2011. Norland Optical Adhesive 65® as Holographic Material. P. 23-44. En Holograms - Recording Materials and Applications, Izabela Naydenova (Ed.) InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/holograms-recording-materials-and-applications/norland-optical-adhesive-65-as-holographic-material>.
- [21] Aparicio Ixta L. 2007. Caracterización del Norland Optical Adhesive No. 65 y violeta de genciana como material fotosensible. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Univ. Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán, México. 102pp.
- [22] <http://www.norlandprod.com/adhesives/NOA%2072.html>