

RENDIMIENTO EN DIFRACCIÓN, RELACIÓN SEÑAL-RUIDO Y CONTRASTE DE HOLOGRAMAS DE OBJETOS DIFUSORES ALMACENADOS EN TIEMPO REAL EN FOTOPOLÍMEROS

DIFFRACTION EFFICIENCY, SIGNAL-TO-NOISE RATIO AND CONTRAST OF DIFFUSE OBJECT HOLOGRAMS IN REALTIME PVA-PHOTOPOLYMERS

C. García¹, I. Pascual¹ y A. Fimia²

1. Laboratorio de Óptica. Departamento Interuniversitario de Óptica. Universidad de Alicante, Apdo. 99. Alicante 03080.

2. Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales. División de Óptica. Universidad Miguel Hernández. Campus de Elche. Edf. La Galia. Avda. del Ferrocarril, s/n, 03202 Elche (Alicante).

E-mail: c.garcia@ua.es

RESUMEN

En este artículo se estudia la influencia de la relación de haces y la intensidad en la calidad óptica de las imágenes de hologramas de transmisión de objetos difusores almacenados en un fotopolímero y reconstruidos en tiempo real. El fotopolímero utilizado en nuestros experimentos está basado en acrilamidas. El sistema fotopolimerizable está formado por acrilamida como monómero, trietanolamina como generador de radicales y eosina amarillenta como sensibilizador, todo ello sobre una película de polivinilalcohol. Se ha utilizado como medida de la calidad óptica el contraste y la señal-ruido, obteniéndose un contraste de 0.98 y una señal-ruido de 0.94 con un rendimiento del 8% para una relación de haces de 20 y una intensidad de 1.2 mW/cm².

Palabras clave: fotopolímeros, hologramas de objetos difusores, relación señal-ruido, contraste.

ABSTRACT

In this article we study the influence of the beam ratio and intensity on the optical quality of the transmission hologram images of diffuse objects stored in a photopolymer and reconstructed in real time. The photopolymer used in our experiment is based on acrylamides. The photopolymerizable system used consisted of acrylamide as monomer, triethanolamine as radical generator and eosin yellowish as sensitizer. All the components were supported in a film of polyvinylalcohol. The signal-to-noise ratio and the contrast were used as a measure of the optical quality. We obtained a signal-to-noise ratio of 0.94 and a contrast of 0.98 with an efficiency of 8% for a beam ratio of 20 and an intensity of 1.2 mW/cm².

Key words: photopolymers, diffuse object holograms, signal-to-noise ratio, contrast.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado muchos tipos de sistemas fotopolimerizables como material de registro holográfico¹⁻⁹. Estos materiales presentan muchas de las características deseables en un material de registro holográfico, tales como: buena sensibilidad energética y espectral, alta resolución, alto rendimiento en difracción, buena señal-ruido, estabilidad temporal y procesado en tiempo real. Todas estas características los hacen útiles en aplicaciones tales como: almacenamiento óptico holográfico, fabricación de elementos ópticos holográficos, interferometría holográfica^{10, 11}...

Un fotopolímero está formado básicamente por uno o varios monómeros, un fotoiniciador y un coiniador, todo ello sobre una película polimérica como matriz. El material usado en nuestras experiencias es un fotopolímero basado en acrilamidas. Jenney³ fue el primero en utilizar un sistema de este tipo como composición líquida, obteniendo una sensibilidad de 0.6 mJ/cm² con un rendimiento en difracción del 20%. Jeudy y Robillard¹² fueron los primeros en utilizar la acrilamida en una película de polivinilalcohol, obteniendo un rendimiento en difracción del 80% con una sensibilidad de 100 mJ/cm². Se han desarrollado otros sistemas basados en acrilamidas^{13, 14}, en los que se ha utilizado trietanolamina como iniciador y azul de metileno como sensibilizador, lográndose a obtener unos rendimientos en difracción del 80% con sensibilidades de 40 mJ/cm².

A pesar de que se han desarrollado muchos sistemas de este tipo, son pocos los estudios que podemos encontrar sobre la medida de la calidad óptica de hologramas de transmisión de objetos difusores y sobre las fuentes de ruido presentes en las imágenes almacenadas holográficamente¹⁵.

Entre las diferentes fuentes de ruido que degradan la calidad de las imágenes almacenadas holográficamente están el ruido de intermodulación de gran importancia en hologramas de objetos difusores, en los que aparece el efecto de interferencia entre la luz proveniente de los diferentes puntos objeto, dando lugar a redes de baja frecuencia que se almacenan junto con el diagrama interferencial deseado, ruido de moteado debido a la coherencia de la luz utilizada tanto en el registro como en la reconstrucción del holograma, ruido de difusión y las redes de ruido debido a la estructura granular del medio y el ruido debido a las no linealidades en la respuesta del material frente a la exposición incidente. Todas estas fuentes de ruido cuyo origen se encuentra en la coherencia de la luz en el registro y reconstrucción del holograma, así como en el material de registro utilizado para almacenar el holograma se traducen en una degradación de la imagen holográfica lo que produce una disminución tanto de la relación señal-ruido como del contraste.

En este artículo se estudian la influencia de la intensidad y la relación de haces en el contraste y la señal-ruido de hologramas de objetos difusores almacenados en un fotopolímero y reconstruidos en tiempo real.

2. EL FOTOPOLÍMERO Y SU OPTIMIZACIÓN

Como se ha señalado antes el fotopolímero usado en nuestras experiencias es un fotopolímero basado en acrilamidas, está formado por eosina amarillenta como sensibilizador, trietanolamina como generador de radicales, acrilamida como monómero y polivinilalcohol como plastificante. La disolución resultante es depositada en una placa de vidrio de 20x40 cm². La placa se mantiene durante un periodo de secado de 24 h. en la oscuridad y en condiciones normales de laboratorio (T ≈ 21-23° C, RH ≈ 40-60%), una vez seca se corta en placas de 6.5 x 6.5 cm².

Para determinar la composición óptima del material se ha partido de un material optimizado con anterioridad¹⁴, y que se diferencia únicamente en el sensibilizador utilizado. Para optimizar el material se ha variado la concentración del sensibilizador y se ha medido la evolución temporal del rendimiento en difracción para distintas intensidades totales incidentes, manteniendo constan-

te el resto de las concentraciones. Obteniéndose los mejores resultados para una concentración de eosina amarillenta de 1.9×10^{-5} M, con un rendimiento en difracción del 80% y una sensibilidad de 100 mJ/cm². En la tabla I se presenta la composición del fotopolímero utilizado.

El espesor de las placas es un factor determinante en la forma de las curvas de rendimiento y en los valores que este alcanza, por lo que es necesario controlarlo para asegurar la fiabilidad de los resultados. A pesar de utilizar un depositador automático, que nos asegura una mayor homogeneidad se ha medido la transmitancia de cada una de las placas. Por la ecuación de Lambert Beer podemos estimar el valor del espesor a través del valor de la transmitancia, los mejores resultados de rendimiento en difracción y sensibilidad se han obtenido para un espesor de 70 ± 5 μ m lo que equivale a una transmitancia de 20 ± 2 %.

TABLA I
Composición del fotopolímero utilizado, todas las concentraciones están referidas a la disolución final

Composición del fotopolímero

Acrilamida (AA)	4.4×10^{-1} M
Triatenolamina (TEA)	2.0×10^{-1} M
Eosina Amarillenta	1.9×10^{-5} M
PVA	10%

3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y FUNCIONES DE DEFINICIÓN DE LA CALIDAD ÓPTICA DE LA IMAGEN

El esquema del dispositivo experimental se muestra en la figura 1. Tanto el registro como la reconstrucción del holograma se realizan con un láser de Argón de 5 W de potencia emitiendo a 514 nm.

El objeto usado es un test target delante del cual se ha colocado un difusor. Únicamente se ha almacenado la zona correspondiente a 1.6 líneas/mm. Para reconstruir la imagen holográfica se utiliza un obturador electrónico que corta el haz objeto, de manera que sólo el haz de referencia ilumina la placa. El obturador electrónico tiene una frecuencia de 100 mHz. La imagen virtual situada en el plano del objeto es focalizada por la lente L_2 y capturada por una cámara CCD, que trabaja con la misma frecuencia que el obturador.

A partir del esquema del dispositivo experimental (figura 1) se observa que los diafragmas D_1 y D_2 tienen un papel importante en el dispositivo. D_1 limita el tamaño del haz de referencia y D_2 la luz que llega a la CCD. Para determinar cuáles son los tamaños óptimos de estos diafragmas, primero se calibró D_2 y con D_2 fijo se determinó el tamaño óptimo de D_1 .

Antes de pasar a los resultados obtenidos, es necesario definir una serie de parámetros que se van a utilizar para evaluar tanto el tamaño óptimo de los diafragmas como para evaluar la calidad ópticas de las imágenes almacenadas holográficamente. Estos parámetros son el contraste (ec. 1), la relación señal-ruido (ec. 2) y el rendimiento en difracción (ec. 5), definidos como:

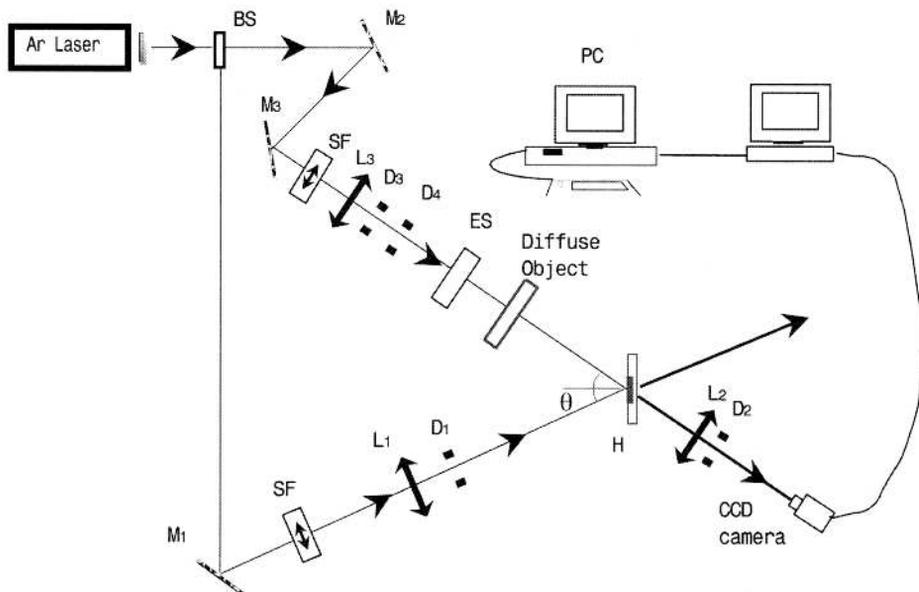


FIGURA 1: Esquema del dispositivo experimental: BS: Separador de haces, M: Espejos, SF: Filtro espacial, L: Lentes, D: Diafragma, ES: Obturador Electrónico, H: Placa holográfica.

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100\% \quad (1)$$

$$SNR = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (2)$$

Donde $I_{m\acute{a}x}$ (ec. 3) e $I_{m\acute{i}n}$ (ec. 4) vienen dadas por:

$$I_{max} = I_1 \quad \text{con} \quad I_1 = \sum_{j=1}^{128} \left\{ \sum_{p=1}^5 \sum_{i=N_{2,p}}^{N_{2,p+1}} I_{ij} \right\} \quad (3)$$

$$I_{min} = \bar{I}_2 \quad \text{con} \quad I_2 = \sum_{j=1}^{128} \left\{ \sum_{p=0}^5 \sum_{i=N_{2,p+1}}^{N_{2,p+2}} I_{ij} \right\} \quad (4)$$

de manera que: $\sum_{p=0}^5 (N_{2,p+1} + N_{2,p+2}) = 128$

donde I_{ij} es la intensidad del píxel i - j ésimo y N_i señalan el principio y fin de cada una de las franjas (figura 2):

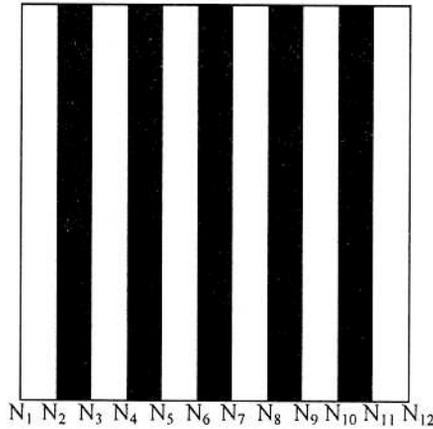


FIGURA 2: Objeto.

Dado que tanto el contraste como la señal-ruido de la imagen del objeto depende tanto de la intensidad total incidente como de la relación de haces se han normalizado todas las medidas de contraste y señal-ruido con respecto al contraste y señal-ruido de la imagen del objeto.

Y el rendimiento en difracción calculado a partir de la imagen capturada por la cámara CCD:

$$DE = \frac{I_d}{I_r} \times 100 \quad (5)$$

con:

$$I_d = \sum_{i=1}^{128} \sum_{j=1}^{128} I_{ij} \quad \text{e} \quad I_r = KI_o = K \sum_{i=1}^{128} \sum_{j=1}^{128} I_{oij} \quad (6)$$

donde I_d es la intensidad difractada capturada en la CCD, I_o la intensidad del haz objeto, I_r la intensidad del haz de referencia y K la relación de haces.

Para calibrar D_2 capturamos únicamente la imagen del objeto iluminando éste con una intensidad $I_{obj} = 1.60 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$ y variando el diámetro de D_2 en un rango desde $2.00 \pm 0.05 \text{ mm}$ hasta $12.00 \pm 0.05 \text{ mm}$. A partir del cálculo del contraste se ha determinado cuál es el diámetro óptimo.

En la figura 3 se muestra la variación del contraste frente al tamaño del diámetro, observándose que los valores máximos del contraste se obtienen para $\phi_2 = 3.00 \pm 0.05 \text{ mm}$ y $\phi_2 = 4.00 \pm 0.05 \text{ mm}$, elegimos el diámetro de $4.00 \pm 0.05 \text{ mm}$ porque nos limita menos la cantidad de luz que llega a la cámara CCD.

Una vez calibrado D_2 , para calibrar D_1 se utilizó el mismo dispositivo descrito en la figura 1, trabajando con una intensidad de $1.20 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$, una relación de haces de 5 y variando únicamente el diámetro del haz de referencia. A continuación se presentan los resultados obtenidos. En la figura 4 se muestra la variación del contraste frente a la exposición.

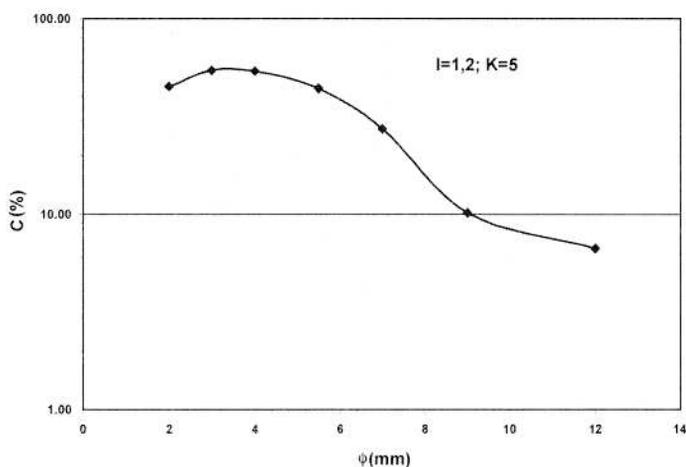


FIGURA 3: Contraste frente al diámetro de D_2 para $I_{obj} = 1.60 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$ y $K = 5$.

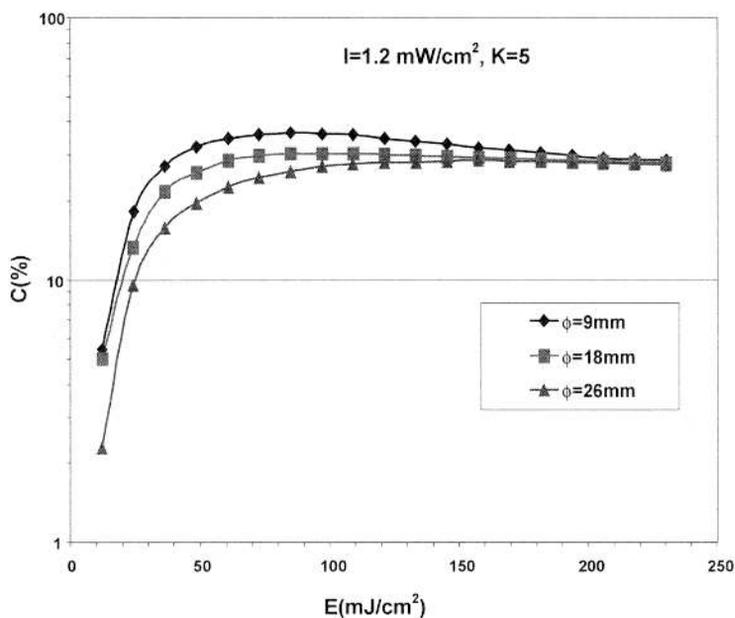


FIGURA 4: Contraste frente a la exposición para distintos valores del diámetro de D_1 , con $I = 1.20 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$ y $K = 5$.

A partir de la gráfica se observa que no hay mucha diferencia entre los contrastes máximos alcanzados para los distintos diámetros aunque el valor máximo se obtiene para $\phi_1 = 9.00 \pm 0.05 \text{ mm}$. Se observa que el contraste es lineal con el diámetro, por lo que se concluye que el diámetro del haz de referencia no influye en la calidad de la imagen, para el valor de D_2 utilizado en este trabajo. Elegimos como diámetro $\phi_1 = 9.00 \pm 0.05 \text{ mm}$ porque nos permite grabar cuatro hologramas en una misma placa.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se ha señalado antes, se ha estudiado la influencia de la intensidad y de la relación de haces en la señal-ruido y el contraste de las imágenes almacenadas holográficamente y capturadas por la cámara CCD. La influencia de la intensidad se ha estudiado porque el material utilizado responde a variaciones de ésta y la relación de haces porque es el parámetro que más se relaciona con la calidad de imagen en holografía.

Para ello se ha representado la relación señal-ruido y el contraste frente al tiempo para distintas intensidades totales incidente y distintas relaciones de haces.

4.1. Influencia de la intensidad en la calidad óptica de la imagen holográfica

Para analizar la influencia de la intensidad en la calidad de la imagen holográfica representamos la relación señal-ruido frente al tiempo para distintas intensidades totales incidentes, $I = [0.60 \pm 0.01, 1.20 \pm 0.01, 2.40 \pm 0.01, 4.80 \pm 0.01]$ mW/cm², siendo la relación de haces empleada constante e igual a 5. Se ha elegido esta relación de haces porque es la más empleada en la bibliografía.

A la vista de la figura 5.a se observa que el sistema depende de la intensidad de trabajo, por otra parte la velocidad de polimerización también es función de la intensidad por lo que las distintas fuentes de ruido se van a almacenar en distinto momento y con distinto rendimiento.

Se observa que para intensidades bajas ($I = 0.60 \pm 0.01$ mW/cm² e $I = 1.20 \pm 0.01$ mW/cm²) la señal-ruido alcanza su valor máximo y luego se estabiliza, al aumentar la intensidad ésta alcanza su valor máximo y a partir de ciertos valores de tiempo decrece, es decir, el ruido tarda más tiempo en almacenarse, esto es por la relación de haces existentes entre las distintas ondas que componen dicho ruido y la intensidad total, ya que si dicha intensidad afecta a la señal del objeto, con el mismo motivo afectará al ruido, ya que éste se está almacenando como redes de distinta frecuencia a la del propio objeto. También se observa que al aumentar la intensidad, aumenta el máximo de señal-ruido y la pendiente del tramo inicial es mayor, es decir aumenta la velocidad de polimerización y el holograma se forma más rápidamente.

Análogamente representamos el contraste frente al tiempo para distintas intensidades totales incidentes, $I = [0.60 \pm 0.01, 1.20 \pm 0.01, 2.40 \pm 0.01, 4.80 \pm 0.01]$ mW/cm² y $K = 5$. En la figura 5.b podemos ver como el contraste sigue la misma tendencia que la señal-ruido. Al aumentar la intensidad aumenta el máximo de contraste y este se alcanza más rápidamente. Si comparamos las ecuaciones 1 y 2 se observa que existe una relación entre la señal-ruido y el contraste que es prácticamente lineal en el rango de contrastes y señal-ruido en el que nos movemos.

En la figura 5.c se representa el contraste frente al rendimiento (ecuación 5), para todas las intensidades totales incidentes la forma de las curvas es la misma, el contraste aumenta hasta un máximo y luego decrece. Al aumentar la intensidad los rendimientos que se alcanzan son mayores. Para $I = 0.60 \pm 0.01$ mW/cm² los rendimientos que se alcanzan son muy bajos, para esta intensidad el material prácticamente no responde, en este caso no hay grandes diferencias entre los valores de I_{\max} e I_{\min} , por lo que podemos decir que únicamente se está almacenando el ruido de la cámara CCD.

4.2. Influencia de la relación de haces en la calidad óptica de la imagen holográfica

En una segunda experiencia se ha estudiado la influencia de la relación de haces en la calidad de la imagen holográfica. Para ello se ha variado la relación de haces, $K = [3, 5, 10, 20]$, para una intensidad constante, $I = 1.20 \pm 0.01$ mW/cm².

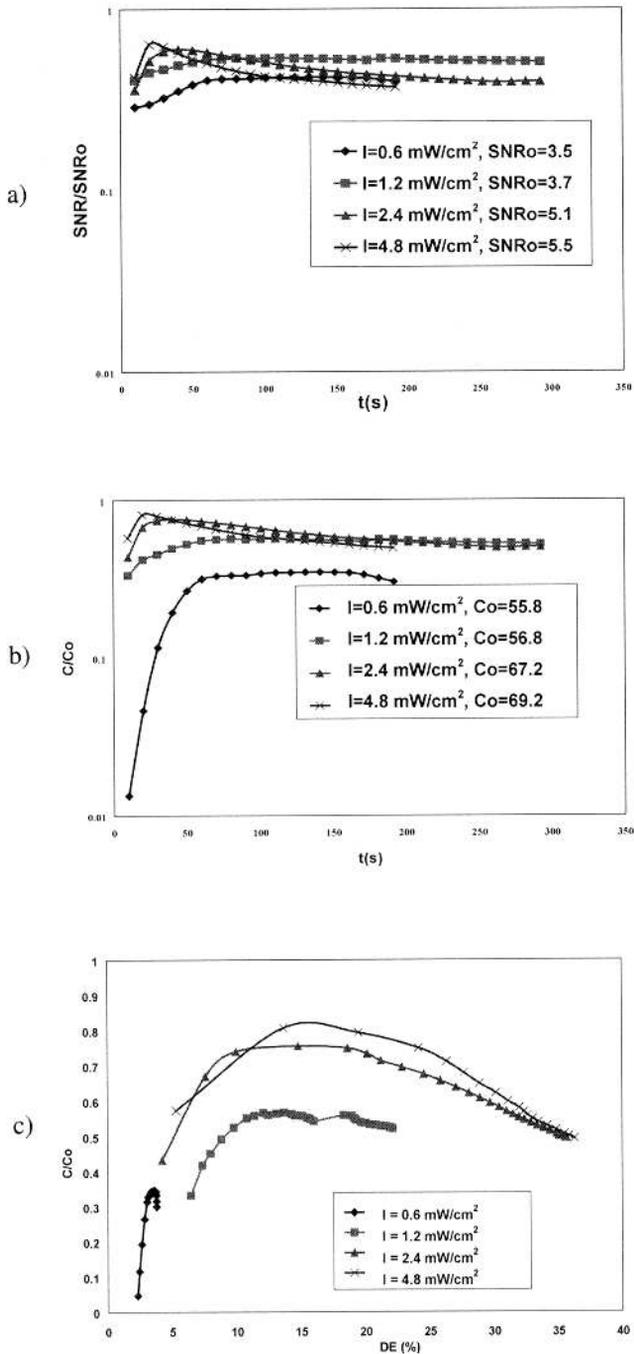


FIGURA 5: a) Relación señal-ruido normalizada frente al tiempo para $K = 5$ e $I = [0.60 \pm 0.01, 1.20 \pm 0.01, 2.40 \pm 0.01, 4.80 \pm 0.01]$ mW/cm². b) Contraste normalizado frente al tiempo para $K = 5$ e $I = [0.60 \pm 0.01, 1.20 \pm 0.01, 2.40 \pm 0.01, 4.80 \pm 0.01]$ mW/cm². c) Contraste normalizado frente al rendimiento para $K = 5$ e $I = [0.60 \pm 0.01, 1.20 \pm 0.01, 2.40 \pm 0.01, 4.80 \pm 0.01]$ mW/cm².

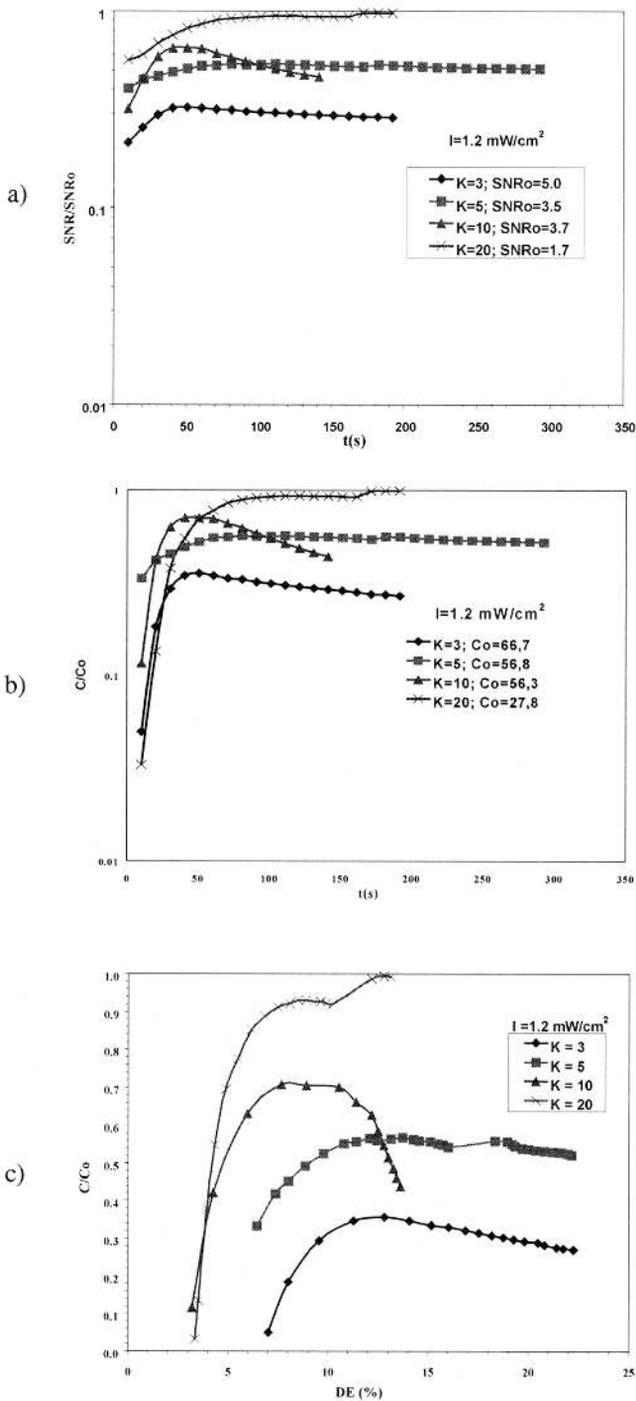


FIGURA 6: a) Relación señal-ruido normalizada frente al tiempo para $I = 1.20 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$ y $K = [3, 5, 10, 20]$. b) Contraste normalizado frente al tiempo para $I = 1.20 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$ y $K = [3, 5, 10, 20]$. c) Contraste normalizado frente al rendimiento para $I = 1.20 \pm 0.01 \text{ mW/cm}^2$ y $K = [3, 5, 10, 20]$.

En las figuras 6.a y 6.b se representan la variación de la señal-ruido y el contraste normalizados frente al tiempo. Se observa que al aumentar la relación de haces los máximos de señal-ruido y contraste alcanzados aumentan, obteniéndose los mejores resultados para $K = 20$ con una señal-ruido de 0.94 y un contraste de 0.98, prácticamente estamos obteniendo una imagen holográfica idéntica a la imagen capturada del objeto.

En la figura 6.c se representa el contraste normalizado frente al rendimiento (ecuación 5) para las distintas relaciones de haces. Se observa que al disminuir la relación de haces los rendimientos que se alcanzan son mayores pero los contrastes son más bajos.

A partir de la gráfica se concluye que para esta intensidad el contraste más alto se obtiene para $K = 20$ con un máximo de 0.98 y un rendimiento del 8%.

5. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos indican que la relación señal-ruido y el contraste dependen tanto de la intensidad total incidente como de la relación de haces, aumentando al aumentar estos, los mejores resultados de señal-ruido y contraste, tanto al variar la intensidad como la relación de haces, se han dado para $K = 20$ e $I = 1.20 \pm 0.01$ mW/cm², obteniéndose una señal-ruido de 0.94 con rendimientos del 8% y un contraste de 0.98.

Otra cuestión a tener en cuenta es la respuesta del material, es necesario una intensidad mínima para que el material responda y el holograma se grave correctamente, en nuestro caso para $I = 0.60 \pm 0.01$ mW/cm² prácticamente sólo se grababa el ruido de la CCD, las imágenes holográficas empiezan a almacenarse a partir de $I = 1.20 \pm 0.01$ mW/cm². En cuanto al almacenamiento de información, hay que destacar que el fotopolímero es más rápido cuanto mayor es la intensidad de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (C.I.C.Y.T.) del Ministerio de Educación y Ciencia, mediante el proyecto MAT 97-0705-C02-02.

BIBLIOGRAFÍA

1. R. A. Lessard, R. Changkakoti y G. Manivannan, *Opt. Mem. Neural Networks* **1**, 307-369 (1992).
2. D. H. Close, A. D. Jacobson, J. D. Margerum, R. G. Brault y F. J. McClung, *Appl. Phys. Lett.* **14**, 159-160 (1969).
3. J. A. Jenney, *J. Opt. Soc. Am.* **60**, 1155-1161 (1990).
4. Bruce M. Monroe, William K. Smothers, Dalen E. Keys, Robert R. Krebs, Daniel J. Mickish, Albert F. Harrington, Scott R. Schicker, Mark K. Armstrong, Dominic M.T. Chan y Carolyn I. Wheathers, *J. Imaging Sci.* **35**, 9-25 (1991).
5. Bruce M. Monroe, *J. Imaging Sci.* **35**, 25-29 (1991).
6. D. J. Lougnot, D. Ritzenthaler, C. Carre y J. P. Fouasier, *J. Appl. Phys.* **63**, 4841- 4848 (1988).
7. D. J. Lougnot and C. Turck, *Pure and Appl. Opt.* **1**, 251-268 (1992).
8. B. L. Booth., *Appl. Opt.* **14**, 593-601 (1993).
9. W.K. Smothers, B. M. Monroe, A.M. Weber y D.E. Keys, *Practical Holography IV*, SPIE **1212**, 20-29 (1990).

10. K. Curtis y D. Psaltis, *Appl. Opt.* **33**, 7425-7428 (1992).
11. S. Martin, C.A. Feeley and V. Toal, *Appl. Opt.*, **36**, 5757-5768 (1997).
12. M. J. Jeudy y J.J. Robillard, *Opt. Com.* **13**, 25, (1975).
13. S. Calixto, *Appl. Opt.* **26**, 3904-3910, (1987).
14. S. Blaya, L. Carretero, R. Mallavia, A. Fimia, M. Ulibarrena y D. Levy, *Appl. Opt.* **37**, 7604-7610 (1998).
15. R.T. Ingwall y H.L. Fielding, *Applications of Holography*, *SPIE* **523**, 306-312, (1985).