

ALGUNAS CUESTIONES DE CIENCIA
Libro homenaje al profesor Manuel Quintanilla

Jesús Atencia Carrizo (editor)

Departamento de Física Aplicada
Universidad de Zaragoza



Prensas Universitarias de Zaragoza

FICHA CATALOGRÁFICA

ALGUNAS cuestiones de ciencia : libro homenaje al profesor Manuel Quintanilla / Jesús Atencia Carrizo (editor). — Zaragoza : Prensas Universitarias de Zaragoza, 2007

667 p. ; 24 cm

ISBN 978-84-7733-921-2

1. Quintanilla, Manuel. II. Atencia Carrizo, Jesús. III. Prensas Universitarias de Zaragoza

53 Quintanilla, Manuel (082.2)

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, ni su préstamo, alquiler o cualquier forma de cesión de uso del ejemplar, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

© Los autores

© De la presente edición, Prensas Universitarias de Zaragoza

1.^a edición, 2007

Prensas Universitarias de Zaragoza. Edificio de Ciencias Geológicas, c/ Pedro Cerbuna, 12
50009 Zaragoza, España. Tel.: 976 761 330. Fax: 976 761 063
puz@unizar.es <http://puz.unizar.es>

Prensas Universitarias de Zaragoza es la editorial de la Universidad de Zaragoza, que edita e imprime libros desde su fundación en 1542.

Impreso en España

Imprime: Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

D.L.: Z-2700-2007

APLICACIONES HOLOGRÁFICAS DE PELÍCULAS DE FOTOPOLÍMERO

Elena Fernández, Celia García, Concepción González, Rosa Fuentes,
Inmaculada Pascual

Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, Universidad de Alicante

1. Introducción

La holografía comenzó su andadura en el año 1947 de la mano de Denis Gabor [1] y posteriormente el desarrollo del láser en la década de los 60 posibilitó el auge de la misma. Entre sus aplicaciones cabe destacar la interferometría holográfica, la espectroscopia holográfica, la elaboración de memorias holográficas [2] o la fabricación de elementos ópticos holográficos (EOHs) [3, 4]. Uno de los elementos principales para el desarrollo de estas dos últimas aplicaciones es el material de registro utilizado. En este sentido se ha realizado un gran esfuerzo en el campo de los materiales de registro holográfico, en especial con los polímeros. Dentro de este grupo están los fotopolímeros que destacan por sus buenas características ópticas, su bajo coste y su facilidad de procesado.

Con estos materiales se pueden obtener películas de fotopolímero de gran espesor que pueden ser utilizadas en la fabricación de memorias holográficas o películas de bajo espesor con las que se pueden obtener elementos ópticos holográficos.

En este sentido, en este trabajo se plantea la utilización de un fotopolímero basado en polivinilalcohol y acrilamida en dichas aplicaciones [5, 6]. En primer lugar se va a utilizar el material para la fabricación de lentes holográficas, que posteriormente se caracterizarán y analizarán, lo que va a permitir plantear su utilización en aplicaciones tales como interconexiones ópticas, procesado óptico

de la información o concentradores de energía solar, en las que habitualmente se usan EOHs.

En segundo lugar se utiliza este material para multiplexar varias redes combinando dos técnicas de multiplexado: el multiplexado angular y el multiplexado peristrófico con el fin de evaluar la capacidad de almacenamiento de dicho material.

2. Material de registro

Como se ha señalado en la introducción los fotopolímeros son materiales con un gran interés en el campo de la holografía dado que en ellos se pueden almacenar hologramas con una alta modulación del índice de refracción, alta calidad óptica, no requieren proceso de revelado, tienen un bajo coste y se pueden variar fácilmente sus propiedades modificando su composición. Los componentes básicos de un fotopolímero en capa sólida son el sistema fotoiniciador, uno o más monómeros y una matriz de polímero. En nuestro caso el fotopolímero está formado por polivinilalcohol como matriz, acrilamida y N',N-metilenbisacrilamida como monómeros, trietanolamina como coiniador y como sensibilizador se han utilizado dos colorantes: eosina amarillenta que presenta su absorción máxima entre 510 nm y 545 nm y azul de metileno cuya absorción máxima está próxima a la longitud de onda de emisión del láser de He-Ne (633 nm).

En trabajos previos se ha optimizado la composición del material tanto para la elaboración de capas gruesas (Composición A) como para la elaboración de capas finas (Composición B) [6,7]. En la Tabla 1 se muestran las concentraciones de cada uno de los componentes de las composiciones óptimas obtenidas.

	Composición A. Sensibilizador EA	Composición B. Sensibilizador AM
PVA	13.50 % m/v	8.00 % m/v
AA	0.31 M	0.33 M
BMA	0.04 M	0.03 M
TEA	0.12 M	0.20 M
Sensib.	$9 \cdot 10^{-4}$ M	$2.1 \cdot 10^{-4}$ M

Tabla 1: Concentraciones de las dos composiciones de fotopolímero empleadas.

El método de depositado de la disolución varía en función del espesor final deseado. En el caso de capas gruesas, que serán utilizadas para el multiplexado de redes, la disolución final se deposita por gravedad en unos moldes y se deja secar 5 días, siendo el espesor final de $700 \pm 10 \mu\text{m}$. Para la obtención de capas finas el material se deposita sobre un vidrio de $23 \times 40 \text{ cm}^2$ colocado sobre un depositador automático que extiende la disolución con una velocidad uniforme sobre todo el vidrio. En este caso el tiempo de secado es de 1 día y el espesor final de las placas es de $70 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$. Estas placas se han utilizado para fabricar las lentes holográficas.

3. Obtención de lentes holográficas y evaluación de la calidad de imagen proporcionada por dichas lentes

Para la obtención de las lentes holográficas (LHs) en el fotorpolímero se ha utilizado el montaje de la figura 1. Está formado por un laser de He-Ne emitiendo a una longitud de onda de 633 nm. El haz procedente del láser se divide en dos mediante una lámina separadora, el haz objeto y el haz de referencia que son filtrados espacialmente y colimados. El haz objeto pasa por una segunda lente (LR) de la que sale un haz convergente, la distancia de esta lente al material y su focal determinarán la focal de la lente holográfica resultante. Tanto el haz objeto como el haz de referencia interfieren de forma simétrica en el plano en el que se coloca el fotorpolímero con un ángulo (θ) de 20.7° respecto a la normal.

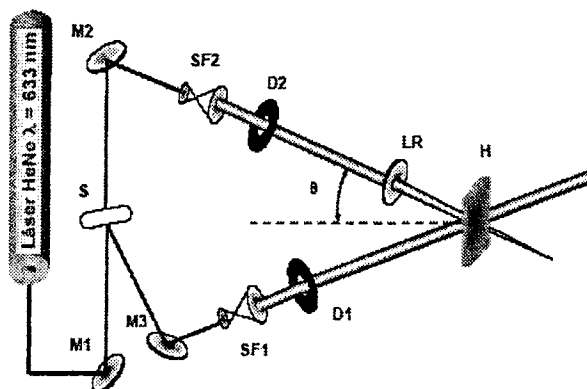


Figura 1: Dispositivo experimental utilizado para el registro de las LHs. S: separador de haz, Mi: espejos, SFi: filtros espaciales, Di: diafragmas, Li: lentes, H: placa holográfica.

Con este dispositivo se han obtenido LHs de distinta focal y diámetro. En este apartado únicamente se van a analizar LHs de diámetro 15 mm y focales 100 mm, 150 mm y 250 mm.

Para evaluar la calidad de imagen de las LHs y compararlas con las lentes refractivas (LRs) utilizadas en el registro, ambas son iluminadas únicamente con el haz de referencia. El frente de onda reconstruido es capturado por una cámara CCD colocada en su foco. El criterio utilizado para evaluar la calidad de imagen de dichas lentes es la MTF. La MTF se obtiene a partir de la PSF definida como la función que describe la respuesta del sistema a un punto de luz. En el caso de luz coherente la PSF es la función de distribución de intensidades en el plano imagen ($I(x',y')$). La transformada de Fourier de la PSF es la función de transferencia óptica (OTF: Optical Transfer Function). Y el módulo de la OTF es la MTF que es una medida de la resolución del contraste de la imagen respecto al que tenía el objeto. Mientras que la fase de la OTF es la función de transferencia de fase (PTF: Phase Transfer Function).

En la figura 2 se representa la MTF experimental para las LHs y las LR de 15 mm de diámetro y distinta focal. De ambas figuras se deduce que al aumentar la focal la frecuencia de corte disminuye tal y como predice la teoría [8]. Por otra parte al comparar las LHs con su correspondiente LR se concluye que la frecuencia de corte para las LHs es mayor que para las LR correspondiente debido a que la focal de la LH es menor que la de la LR.

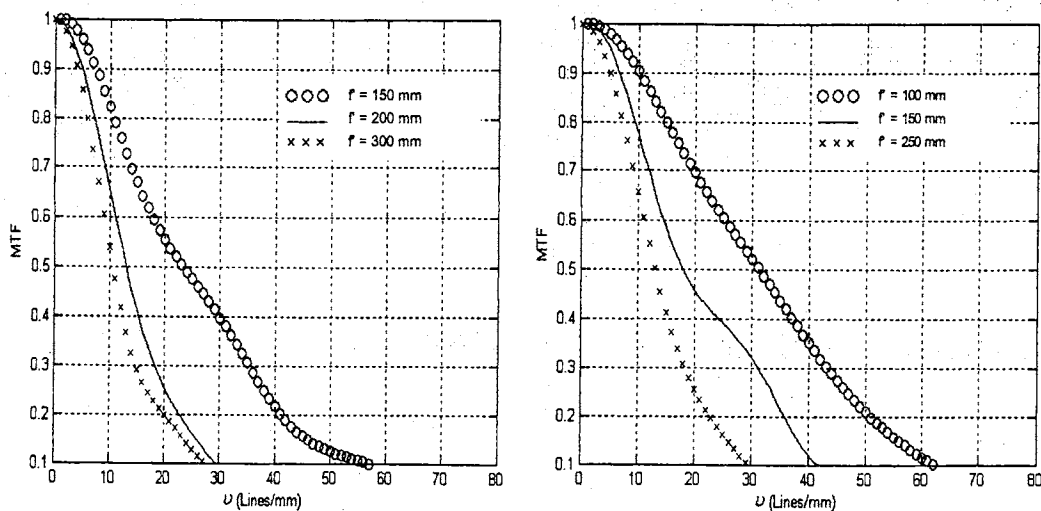


Figura 2. MTF experimental: a) LRs y b) LHs.

Además del cálculo de la MTF se han evaluado las imágenes de un "Test Target" proporcionadas por dichas lentes. Este método permite evaluar de

manera cualitativa la calidad de imagen del sistema. A modo de ejemplo en la figura 3a se muestra la imagen proporcionada por la LH de 150 mm de focal. A partir de esta imagen se va a calcular el contraste para la máxima frecuencia que se resuelve (20 líneas/mm) obteniéndose un valor de 0.31. Todas las imágenes proporcionadas por las LHs tienen en común que para la frecuencia que ya no son capaces de resolver las barras brillantes comienzan a juntarse perdiéndose las transiciones a negro y llegando al extremo de tener una mancha blanca de tamaño las cinco barras brillantes originales y sus transiciones a negro. Debido a esto se propone un proceso de mejora que se centra en perfilar los bordes para esas transiciones.

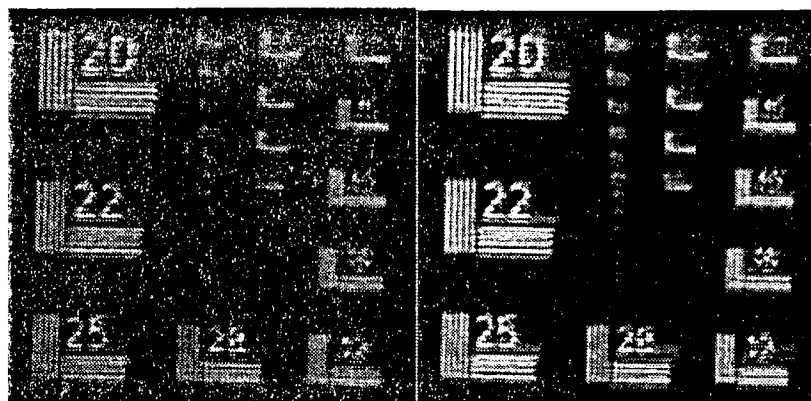


Figura 3 a) Imagen original b) Imagen procesada de la LH de 150 mm de focal.

En concreto se va a aplicar un filtrado frecuencial paso alto, filtro de Butterworth, que atenúa las componentes de baja frecuencia sin modificar la información de la transformada de Fourier contenida en las componentes de alta frecuencia. En la figura 3b se muestra la imagen proporcionada por la LH una vez que ha sido procesada.

Al procesar la imagen se produce un aumento en el nivel de intensidad de las barras brillantes. Si se calcula el contraste para la misma frecuencia (20 líneas/mm) de la imagen procesada se obtiene un valor de 0.41 mientras que para la imagen sin procesar el valor era de 0.31. De manera que al aplicar el filtro se aumenta el contraste para una frecuencia dada. Esta tendencia se ha comprobado que es válida para cualquiera de las imágenes proporcionadas por las LHs de distinta focal.

En resumen se ha presentado un dispositivo óptico que permite almacenar LHs y evaluar de manera sencilla su calidad de imagen. Los resultados obtenidos a partir del cálculo de la MTF indican que las LHs tienen una mayor resolución que sus correspondientes LRs.

Por último se presenta un método de mejora de la calidad de imagen de las LHs mediante un filtrado frecuencial paso alto con el que se ha mejorado el contraste de las imágenes proporcionadas por dichas lentes.

4. Multiplexado de redes holográficas

Para multiplexar varias redes holográficas se utiliza el montaje representado en la figura 4. El láser utilizado en la etapa de registro es un láser Nd:YAG (Coherent Verdi V2) que emite un haz de 532 nm, al cual es sensible el material. El haz de registro se divide en dos mediante un divisor de haz, se pasa cada uno de los haces por un objetivo de microscopio y un pinhole para expandir y filtrar los haces y por una serie de lentes y diafragmas para colimar los haces y hacer que tengan el diámetro deseado (1.5 cm). Mediante una serie de espejos, se dirigen los haces para que incidan, con un ángulo de 17.4° , sobre la placa donde se colocará el material. Con este ángulo y mediante la ley de Bragg se puede calcular la frecuencia espacial con la que se van a almacenar los hologramas, que en este caso es de 1125 líneas/mm. La intensidad total de los haces de registro es de 5 mW/cm^2 con una relación de haces de 1:1.

En la etapa de reconstrucción, se emplea un láser de He-Ne de 633 nm que incide con un ángulo de 20.8° . Con este láser se puede observar, en tiempo real, la evolución de los haces difractado y transmitido. Esto se consigue mediante un programa de adquisición de datos instalado en un ordenador, que recibe los datos de intensidad transmitida y difractada por el holograma capturados mediante los radiómetros R1 y R2.

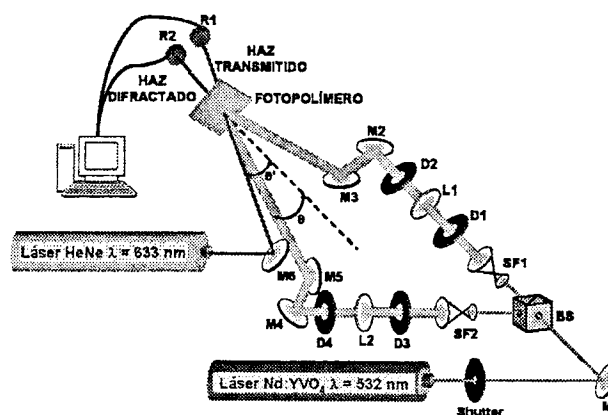


Figura 4: Dispositivo experimental utilizado para almacenar redes holográficas. Mi: espejos, BS: divisor de haz, Li: lentes, SFi: conjunto de filtro espacial y objetivo de microscopio, Di: diafragmas, Ri: radiómetros.

Con este sistema se van a almacenar 60 hologramas, en una misma posición del material, multiplexando los hologramas. Para conseguir aprovechar al máximo el rango dinámico del material utilizado, se han de almacenar el mayor número de hologramas posible, para lo cual se van a combinar dos métodos de multiplexado diferentes [9], el multiplexado peristrófico [10] y el multiplexado angular[11]. Así, si con uno de los métodos de multiplexado se pueden almacenar n hologramas, y con el otro m hologramas, combinando los dos métodos se pueden llegar a almacenar hasta $n \times m$ hologramas.

Se han almacenado con multiplexado angular 7 hologramas separados una distancia angular de 0.5° , en cada posición del multiplexado peristrófico. Y cada posición del multiplexado peristrófico se ha separado la una de la otra una distancia angular de 10° , almacenándose nueve posiciones peristróficas.

Por otra parte es necesario conseguir que todos los hologramas almacenados tengan igual rendimiento en difracción, y que sea lo más alto posible. Para ello, se emplea el *Exposure Schedule Method (ESM)* [10]. Este método utiliza el rango dinámico, el número de hologramas almacenados en el material, el rendimiento en difracción de cada uno de los hologramas almacenados, y la exposición con la que se registraron, para calcular con qué tiempos de exposición se deberían registrar estos hologramas para que todos alcancen el mismo rendimiento en difracción.

Por tanto, para almacenar los 60 hologramas, en primer lugar hay que escoger con qué tiempo de exposición se van a registrar. Conforme se van almacenando los hologramas, se va consumiendo el monómero y el colorante que tiene el material y, por tanto, se necesita una mayor exposición para conseguir que los últimos hologramas registrados tengan el mismo rendimiento en difracción que los primeros. Por este motivo, el tiempo de exposición que se va a emplear para almacenar los hologramas es el siguiente: 1 segundo los primeros 20 hologramas, y los siguientes, se van almacenando sumándoles medio segundo cada 5 hologramas almacenados.

En la figura 5, se ha representado el rendimiento en difracción frente al número de hologramas almacenados que se ha obtenido al registrar los hologramas con los tiempos de exposición anteriores. Los 60 hologramas se han almacenado con un rendimiento en difracción medio de 1.9%. Como se observa, los primeros cinco hologramas tienen un rendimiento en difracción muy superior a la media. Esto es debido a que el material, al principio, es muy sensible a la exposición aplicada. Conforme se van registrando hologramas, al ir consumiéndose el monómero y el colorante, se necesita una mayor exposición

para alcanzar el mismo rendimiento en difracción. Por este mismo motivo, los últimos hologramas almacenados tienen un rendimiento en difracción menor.

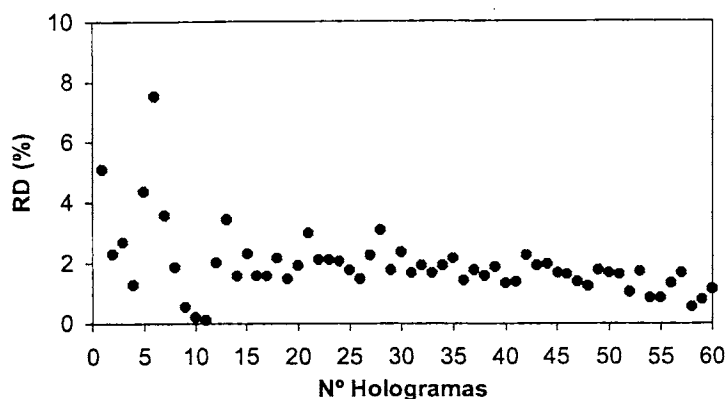


Figura 5: Rendimiento en difracción para cada uno de los 60 hologramas almacenados.

Con los datos obtenidos de la figura 5 se calcula la fuerza de red acumulativa (Cumulative Grating Strength) que se define como la suma de la raíz cuadrada del rendimiento en difracción, $\sum_{i=1}^N \eta_i^{1/2}$, donde η_i es el rendimiento en difracción de cada uno de los hologramas y N el número de hologramas registrados hasta ese momento. En la figura 6 se ha representado la fuerza de red acumulativa en función de la exposición. Como se puede observar, al saturar la curva se obtiene el valor del rango dinámico que es $M\#=8$.

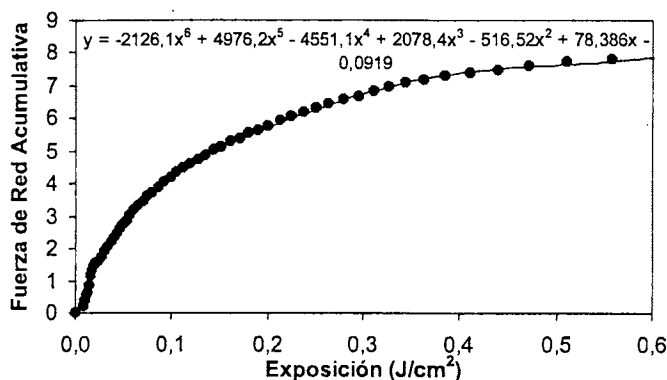


Figura 6: Fuerza de Red Acumulativa en función de la exposición.

Con el rango dinámico y el ESM [10] se pueden calcular los tiempos con los que habría que almacenar los 60 hologramas para que éstos alcanzaran rendimientos en difracción uniformes y cercanos al rendimiento en difracción

medio. Para calcular estos tiempos en primer lugar se ajustan los datos obtenidos en la figura 6 a la siguiente expresión teórica

$$A = a_0 + a_1E + a_2E^2 + a_3E^3 + a_4E^4 + a_5E^5 + a_6E^6 \quad (1)$$

donde A es la fuerza de red acumulativa y E es la exposición.

A partir de la ecuación 2 y de los coeficientes a_i obtenidos se calculan los tiempos de exposición necesarios para almacenar los hologramas.

$$t_n = \frac{A_{Sat}}{N \cdot I [a_1 + 2a_2B + 3a_3B^2 + 4a_4B^3 + 5a_5B^4 + 6a_6B^5]} \quad (2)$$

donde $B = \sum_{i=1}^{n-1} E_i$, A_{Sat} es el valor del rango dinámico, t_n es el tiempo de exposición con el que hay que almacenar el holograma n e I es la intensidad total del láser de registro.

Una vez que se han calculado los nuevos tiempos con la ecuación 2, se vuelven a almacenar los 60 hologramas. Los rendimientos en difracción obtenidos de estos 60 hologramas se representan en la figura 7. Al igual que antes, los primeros hologramas se han almacenado con un rendimiento en difracción superior a la media, pero si los comparamos con los resultados de la figura 5 en la que los primeros hologramas tenían un rendimiento en difracción máximo de 8%, los resultados han mejorado considerablemente. Además, los nuevos tiempos de exposición que ha proporcionado el ESM han hecho que el rendimiento en difracción medio experimental de todos los hologramas suba con respecto a los resultados de la figura 5 de 1.9% a 2.0%.

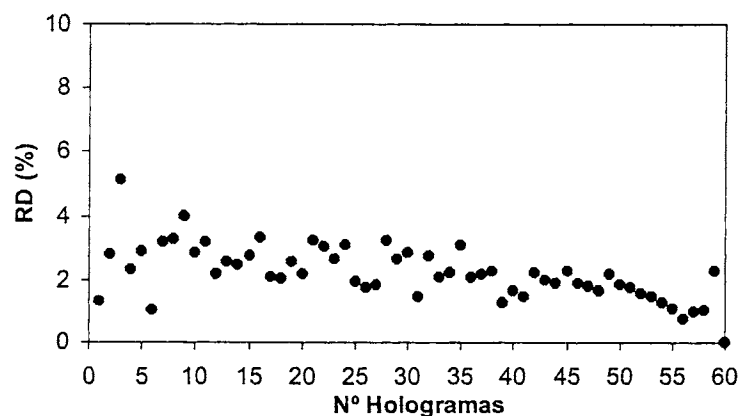


Figura 7: Rendimiento en difracción en función del número de hologramas.

A partir de los datos obtenidos de la figura 7, se ha vuelto a calcular el rango dinámico, siendo éste $M\# = 8.7$. Por tanto se puede concluir que se ha producido un incremento en el valor de $M\#$ debido a un mayor aprovechamiento del rango dinámico gracias a los nuevos tiempos de registro.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el "Ministerio de Educación y Ciencia"(España) mediante el proyecto FIS2005-05881-C02-01 y por la "Generalitat Valenciana" mediante los proyectos GV06/172 y ACOMP 2007/027.

Bibliografía

- [1] D. Gabor. *Nature* **161**, 777 (1948).
- [2] H. J. Coufal, D. P. Saltis y G. T. Sincebox. *Holographic Data Storage*, Springer Verlag, 2000
- [3] Thomas W. Store y Brian J. Thompson. *Holographic and Diffractive Lenses and Mirrors*, Spie Milestone Series, Vol **MS34**, 1991.
- [4] M. Quintanilla e I. Arias, "Holographic imaging lenses. Composite lens with high efficiency," *J. Opt.* **21**, 67–72 (1990).
- [5] C. Garcia, A. Fimia e I. Pascual. *Appl. Phys. B* **72** (3): 311-316 (2001).
- [6] M. Ortuño, S. Gallego, C. Garcia, C. Neipp, A. Belendez e I. Pascual. *Appl. Phys. B* **76**, 851-857, (2003).
- [7] S Blaya, L. Carretero, A. Fimia, R. Mallavia, R. F. Madrigal, R. Sastre, F. Amat-Guerri. *J. Modern Optics* **45**, 2573 - 2584 (1998).
- [8] W. J. Smith. "Modern Optical Engineering", Spie Press, McGraw-Hill, 2000.
- [9] E. Fernández, C. García, I. Pascual, M. Ortuño, S. Gallego, and A. Beléndez, *Appl. Opt.* **45**, 7661–7666 (2006).
- [10] Pu, K. Curtis, D. Psaltis, *Opt. Eng.* **35**, 2824-2828, (1996).
- [11] H. Sherif, I. Naydenova, S. Martin, C. McGinn, *Journal of Optics A: Pure and Appl. Opt.* **7**, 255, (2005).