

Determinación de las constantes ópticas y el espesor de materiales holográficos

A. BELÉNDEZ¹, M. ORTUÑO², S. GALLEGU², T. BELÉNDEZ¹, C. NEIPP¹, I. PASCUAL²

¹Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal Universidad de Alicante. E03080 Alicante.

²Departamento Interuniversitario de Óptica Universidad de Alicante. E03080 Alicante.

Se presenta una técnica experimental para determinar el índice de refracción, el coeficiente de absorción y el espesor de materiales de registro holográfico. Los materiales están depositados como capas finas sobre una lámina planoparalela de vidrio. Se determina experimentalmente la reflectancia en función del ángulo de incidencia para luz polarizada linealmente paralela al plano de incidencia, de modo que los valores del índice de refracción, el coeficiente de absorción y el espesor se obtienen ajustando la ecuación de la reflectancia teórica a los datos experimentales. Como ejemplos se han analizado emulsiones fotográficas y fotopolímeros, obteniéndose un buen ajuste entre la función teórica y los datos experimentales.

Palabras clave: Materiales de registro holográfico, Capas delgadas, Constantes ópticas.

Determination of the optical constants and thickness of holographic materials

A technique to evaluate the refractive index, the absorption coefficient and the thickness of holographic recording materials is presented. The materials are in the form of a thin layer of film deposited on a thick glass plate. The experimental reflectances of *p*-polarized light are measured as a function of the incident angle, and the values of refractive index, thickness and absorption coefficient of the layer are obtained using the theoretical equation for reflectance. As examples, holographic silver halide emulsions and photopolymers are analyzed. The agreement between the calculated reflectances, using the thickness and refractive index obtained, and the measured reflectances is satisfactory.

Keywords: Holographic recording materials, Capas delgadas, Constantes ópticas.

1. INTRODUCCIÓN

Conocer el índice de refracción y el espesor de un medio de registro holográfico es fundamental para su caracterización y para muchas aplicaciones. Por ejemplo, para obtener experimentalmente los rendimientos en difracción y transmisión de una red de difracción holográfica es necesario corregir los valores experimentales para tener en cuenta las pérdidas por reflexión en las interfaces del holograma (aire-película, película-vidrio y vidrio-aire). Para ello hay que conocer los índices de refracción de la película y el vidrio y aplicar las fórmulas de Fresnel. En este trabajo se muestra un método de medida del índice de refracción, el espesor y el coeficiente de absorción de materiales holográficos. Las experiencias se han realizado con emulsiones fotográficas [1] y fotopolímeros [2] depositados sobre vidrio. El método utilizado está basado en el propuesto por Tholl et al. [3] con modificaciones en lo relativo al desarrollo experimental, al tratamiento de los datos y al ajuste de las funciones teóricas a los mismos.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Sea una placa holográfica formada por dos capas de distinto material (Figura 1). La primera es el material de registro y la segunda es el sustrato de vidrio, cuya misión es dotar al medio de estabilidad mecánica. Si sobre la capa de material holográfico incide un haz de luz colimado que forma un ángulo θ con la normal a la placa, parte de la luz se transmite a través del material, mientras que otra parte de la luz se refleja. Sin embargo, como la capa de material holográfico se encuentra depositada sobre un sustrato de vidrio, en la superficie de separación capa-vidrio se produce también una reflexión de la luz incidente, así como en la superficie vidrio-aire del soporte, dando lugar

a un patrón interferencial de muy alta frecuencia [4] ya que el espesor del vidrio es del orden del milímetro. Por esta razón hay que eliminar la luz reflejada en la superficie de separación vidrio-aire para que el patrón interferencial sea debido únicamente a la interferencia de los haces reflejados en la primera cara (superficie aire-capa) y en la segunda cara del material de registro (superficie capa-vidrio). La frecuencia de este patrón interferencial ya no es grande al ser los espesores de las capas $< 100 \mu\text{m}$. Para eliminar la reflexión en la segunda cara del vidrio (superficie vidrio-aire) se coloca una cinta de PVC negro sobre el vidrio, en la parte posterior de la placa [4] (Figura 1). La amplitud de la luz reflejada es el resultado de la superposición de un número infinito de ondas de igual diferencia de fase ϕ , provenientes de las múltiples reflexiones que se producen en la dos caras de la capa de material, donde ϕ viene dado por la ecuación:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} n_e d \cos \theta' \quad (1)$$

donde n_e es el índice de refracción de la capa de material holográfico y d es su espesor. Como los índices de los materiales analizados (emulsiones fotográficas, $n_e \sim 1.6$, y fotopolímeros, $n_e \sim 1.5$) no son muy diferentes del índice n_v del sustrato de vidrio ($n_v \sim 1.5$), el coeficiente de reflexión para la superficie de separación capa-vidrio, r_{ev} , será muy pequeño ($r_{ev}^2 \sim 0.1\%$ en incidencia normal). El coeficiente de absorción α de estos materiales también es pequeño [1] y como las amplitudes de las ondas reflejadas decrecen con una razón geométrica, en el análisis sólo se considerará la primera reflexión interna, de modo que la amplitud U reflejada será (Figura 1):

$$U = U_1 + U_2 \quad (2)$$

donde U_1 es la amplitud de la onda reflejada en la superficie de separación aire-capa de material, y U_2 la de la onda proveniente de la primera reflexión interna en la superficie de separación capa-vidrio (Figura 1). Las amplitudes U_1 y U_2 , vienen dadas por:

$$U_1 = r_{ae} U_0 \tag{3}$$

$$U_2 = t_{ae} r_{ev} t_{ea} \exp(-\alpha s / 2) \exp(j\phi) U_0 \tag{4}$$

donde U_0 es la amplitud de la onda incidente. La reflectancia R se calcula mediante:

$$R = \frac{|U_1 + U_2|^2}{|U_0|^2} \tag{5}$$

Utilizando las ecuaciones (3)-(5), R toma la forma:

$$R = r_{ae}^2 + (t_{ae} r_{ev} t_{ea})^2 \exp(-\alpha s) + 2 r_{ae} t_{ae} r_{ev} t_{ea} \exp(-\alpha s / 2) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} n_e d \cos \theta'\right) \tag{6}$$

En las ecuaciones (3)-(6), r_{ij} y t_{ij} son los coeficientes de amplitud de Fresnel de reflexión y transmisión de una onda plana atravesando la superficie que separa el medio i del medio j , yendo desde i hasta j [5], λ es la longitud de onda en aire, $s = d / \cos \theta'$ y θ' es el ángulo del haz en el interior de la capa. Ajustando la función teórica de la ecuación (6) a los datos experimentales de R en función de θ puede obtenerse información del índice de refracción, el espesor y el coeficiente de absorción de la capa de material si se conoce el índice de refracción del vidrio.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para determinar R en función de θ se consideró el dispositivo experimental de la Figura 2. La luz proveniente de un láser de He-Ne, polarizada paralela al plano de incidencia, se divide mediante una lámina separadora en dos haces. Uno de ellos incide sobre la placa holográfica colocada en un dispositivo de rotación motorizado controlado por ordenador con una sensibilidad de 0.001° , y el otro sobre un detector, F1. Sobre la placa holográfica se coloca un espejo perpendicular a la misma, de manera que la dirección del haz reflejado por el conjunto formado por la placa y el espejo sea independiente del ángulo que forma el haz incidente con la normal a la placa. El haz proveniente de la placa holográfica incide finalmente sobre un detector, F2, situado en el plano focal imagen de una lente convergente. Para calibrar el sistema se utilizó una lámina planoparalela de vidrio BK7 de Newport, de diámetro 50.8 mm, espesor 10 mm y con una planitud de la superficie $\leq \lambda/10$ para $\lambda = 633$ nm. El índice de refracción de esta lámina es $n = 1.5151$ para $\lambda = 633$ nm. A partir de las medidas experimentales se determina el cociente R' entre la intensidad de la luz reflejada, I_r , incidente sobre F2, y la intensidad I_i incidente sobre F1:

$$R' = \frac{I_r}{I_i} \tag{7}$$

La relación entre la reflectancia teórica R_{BK7} para la lámina de vidrio BK7 para $\lambda = 633$ nm, y la reflectancia R'_{BK7} experimental proporciona un factor de calibración f para cada θ :

$$f(\theta) = \frac{R_{BK7}(\theta)}{R'_{BK7}(\theta)} \tag{8}$$

La reflexión que se produce en las superficies de separación vidrio-aire de la lámina planoparalela de vidrio BK7 se eliminó mediante una cinta adhesiva de PVC negro pegada en las dos caras del vidrio (Figura 3). Conocido el factor de calibración para cada ángulo, $f(\theta)$, se

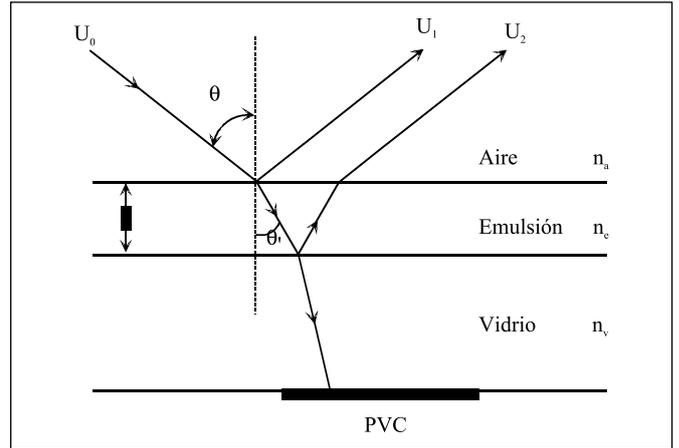


Figura 1.- Reflexiones producidas en una placa holográfica.

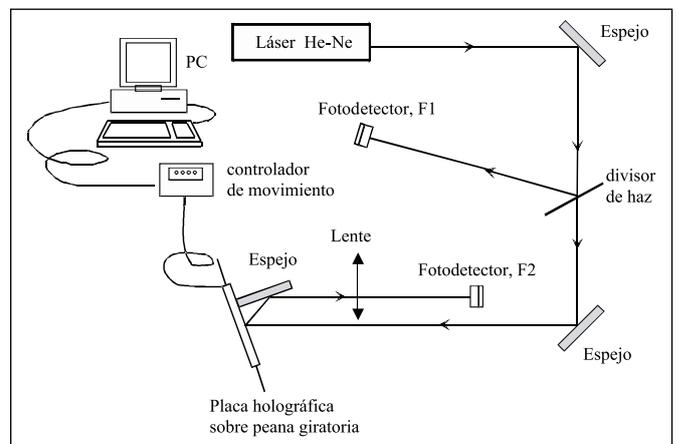


Figura 2.- Dispositivo experimental utilizado para la medida del espesor, índice de refracción y el coeficiente de absorción de los materiales de registro holográfico analizados.

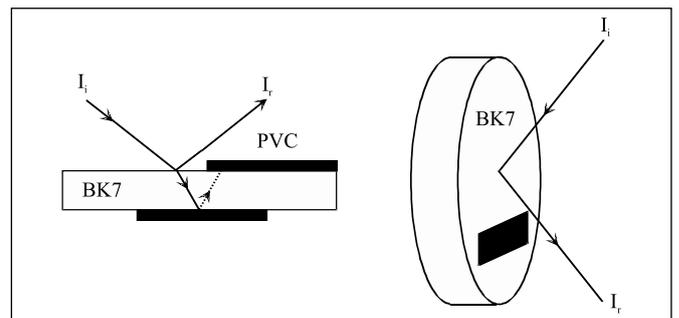


Figura 3.- Reflexiones producidas en la lámina de vidrio BK7 utilizada para calibrar el sistema.

puede determinar el valor de la reflectancia experimental, R_{exp} para la placa holográfica:

$$R_{exp}(\theta) = f(\theta) R'(\theta) \tag{9}$$

donde R' viene dada por la ecuación (7) y f por la ecuación (8). El estudio de la reflectividad se realizó utilizando luz polarizada paralela al plano de incidencia, tal y como se discute en la referencia [3], en la que se simula teóricamente la estructura de la función chi-cuadrado χ^2 en el espacio paramétrico bidimensional (n_e, d) , donde χ^2 se tomó [3]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{R_i - R(\theta_i; d, n_e)}{\sigma_i} \right)^2 \tag{10}$$

siendo R_i son los datos experimentales, $R(\theta_j; d, n_e)$ la reflectividad teórica dada por la ecuación (6) con $\alpha = 0$, y σ_i la desviación estándar de R_i . En las simulaciones se sustituyeron los datos experimentales (R_i) por un proceso gaussiano con media $R(\theta_j; d, n_e)$ y desviación estándar σ_i . La función chi-cuadrado para la luz polarizada linealmente paralela al plano de incidencia posee menor número de mínimos que la correspondiente a la luz polarizada perpendicularmente a dicho plano [3], de forma que la posibilidad de quedar atrapado en un mínimo local que no es el mínimo absoluto es menor para la polarización paralela que para la polarización perpendicular.

El ajuste de la reflectancia teórica (ecuación (6)) a los datos experimentales de R en función de θ se ha realizado minimizando:

$$\chi^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [R_{\text{exp}}(\theta_j) - R(\theta_j; n_e, d, \alpha)]^2 \quad (11)$$

donde $R_{\text{exp}}(\theta_j)$ son los datos experimentales, θ_j los ángulos de incidencia en aire, $R(\theta_j; n_e, d, \alpha)$ los valores teóricos calculados mediante la ecuación (6) y J es el número de ángulos de incidencia considerados. Para realizar el ajuste se toma como partida el valor de n_e que se obtiene de ajustar r_{ae}^2 a los datos experimentales. Es importante señalar que el índice del vidrio prácticamente no influye sobre los valores finales de n_e y d , aunque sí sobre el de α .

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 4 se muestran los resultados experimentales de la reflectancia junto con el ajuste de la función teórica de la ecuación (6) para la emulsión fotográfica BB-640 [6] fabricada actualmente por Colour Holographics (Inglaterra) y que con anterioridad era comercializada por HRT (Alemania). Ésta es una emulsión en la que el diámetro promedio de los granos de haluro de plata dispersos en la gelatina es $\delta = 22$ nm y la masa de haluro de plata por unidad de superficie es $m_{\text{AgBr}} = 3.5$ g/m² [7]. El mínimo de la función χ^2 es 1.00×10^7 y se obtiene para los valores $n_e = 1.624$, $d = 7.86$ μm y $\alpha = 0.081$ μm^{-1} . En la Figura 5 se han representado los resultados obtenidos para la emulsión fotográfica comercial PFG-01 [8] de Slavich (Rusia), caracterizada por $\delta = 40$ nm y $m_{\text{AgBr}} = 2.7$ g/m² [7], para la que se obtiene $n_e = 1.609$, $d = 7.31$ μm y $\alpha = 0.010$ μm^{-1} con $\chi^2 = 1.96 \times 10^7$. Finalmente, en la Figura 6 se muestran los resultados para un fotopolímero holográfico preparado en nuestro laboratorio y compuesto por acrilamida (4.4×10^{-1} M) como monómero, trietanolamida (2.0×10^{-1} M) como generador de radicales, eosina amarillenta (2.5×10^{-5} M) como sensibilizador y todo ello sobre una placa de vidrio de 20 cm x 40 cm que se seca en la oscuridad durante 24 horas a una temperatura entre 21° C y 23° C y una humedad relativa entre el 40% y el 60%. La línea continua corresponde al cálculo teórico para $n_e = 1.506$, $d = 64$ μm y $\alpha < 0.002$ μm^{-1} , con $\chi^2 = 4.80 \times 10^8$.

5. CONCLUSIONES

Mediante el método analizado es posible determinar el índice de refracción y el espesor de un material de registro holográfico con cierta precisión, mientras que el valor del coeficiente de absorción obtenido no es tan preciso al depender fuertemente del conocimiento preciso del índice de refracción de la lámina de vidrio sobre la se deposita la capa de material. El método está basado en el estudio de la reflectancia con luz polarizada linealmente paralela al plano de incidencia. Se ha comprobado la aplicabilidad del método con emulsiones fotográficas y fotopolímeros.

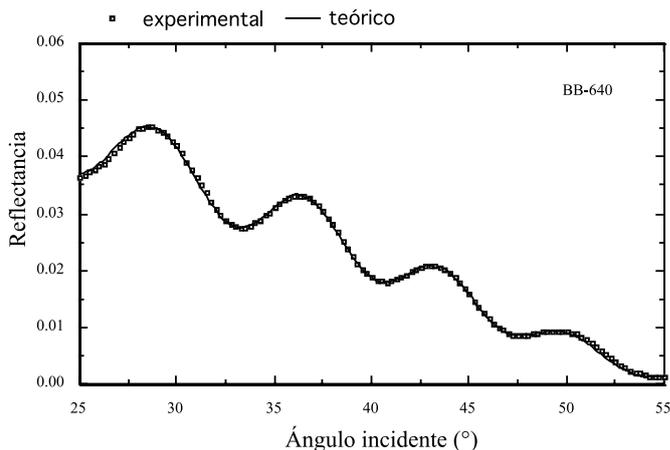


Figura 4.- Reflectancia en función del ángulo de incidencia para luz polarizada paralela al plano de incidencia para la emulsión BB-640.

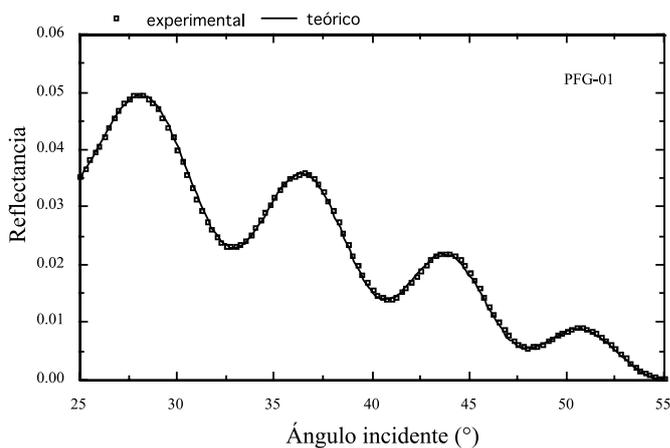


Figura 5.- Reflectancia en función del ángulo de incidencia para luz polarizada paralela al plano de incidencia para la emulsión PFG-01.

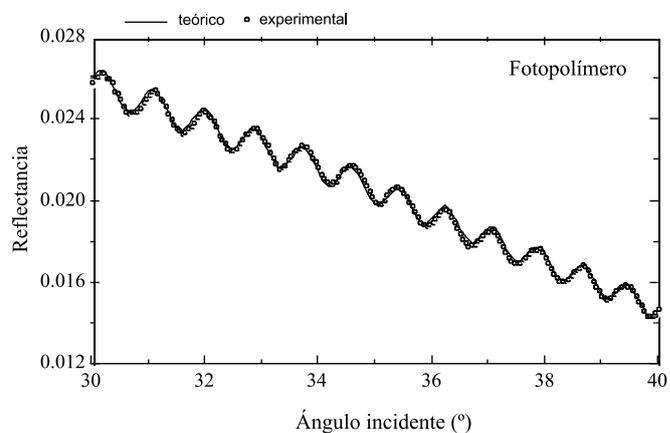


Figura 6.- Reflectancia en función del ángulo de incidencia para luz polarizada paralela al plano de incidencia para el fotopolímero analizado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por la CICYT (proyecto MAT2000-1361-C04-04) y la Oficina de Ciencia y Tecnología de la Generalitat Valenciana (proyecto GV01-130).

BIBLIOGRAFIA

1. H. I. Bjelkhagen, "Silver halide recording materials for holography and their processing" (Berlin: Springer-Verlag, 1993).
2. R. A. Lessard y G. Manivannan, "Holographic recording materials: An overview", *Proc. SPIE* **2405**, 2-23 (1995).
3. H. D. Thöll, M. Dömen y C. D. Stojanoff, "Determination of the mean refractive index and the thickness of dichromated gelatin holographic films using the thin film resonance method", *Proc. SPIE* **2405**, 76-87 (1997).
4. A. Beléndez, C. Neipp y I. Pascual, "Analysis and elimination of boundary reflections in transmission holograms", *Opt. Laser Tech.* **30**, 555-556 (1999).
5. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Oxford: Pergamon Press, 1993).
6. C. Neipp, I. Pascual y A. Beléndez, "Theoretical and experimental analysis of overmodulation effects in volume holograms recorded on BB-640 emulsion", *J. Opt. A* **3**, 504-513 (2001).
7. C. Neipp, I. Pascual y A. Beléndez, "Recent advances in new holographic silver halide materials" en *Recent Research Developments in Optics*, Vol. I, G. Pandalai, Ed. (Research Signpost Publishers, Trivadrurum, 2001), pp. 35-56.
8. C. Neipp, I. Pascual y A. Beléndez, "Bleached silver halide volume holograms recorded on Slavich PFG-01 emulsion: The influence of the developer", *J. Mod. Opt.* **48**, 1479-1494 (2001).
9. S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, C. García, A. Beléndez e I. Pascual, "Temporal evolution of the angular response of a holographic diffraction grating in PVA/acrylamide photopolymer", *Optics Express* **11**, 181-190 (2003), <http://www.opticsexpress.org>.

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03

