

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SHEARING EFFECTS
IN BLEACHED HOLOGRAMS

ANALISIS EXPERIMENTAL DE EFECTOS DE TIPO
CORTE EN HOLOGRAMAS BLANQUEADOS

A. BELENDEZ*, I. PASCUAL y A. FIMIA
*Laboratorio de Optica. Dep. Interuniversitario de Optica.
Universidad de Alicante. Apdo. 99. Alicante 03080 (España).*
** Departamento de Ingeniería de Sistemas y Comunicaciones.
Universidad de Alicante. Apdo. 99. Alicante 03080 (España).*

ABSTRACT

Experimental analysis of the effects of shearing on thick holograms formed in bleached silver halide emulsions are presented. In order to separate the shearing effect and the shrinkage of emulsion layer, a rehalogenating bleach without fixing is used because this bleach bath introduces a minimal change in the thickness of the emulsion. Experimental results obtained with transmission and reflection gratings are presented and the values of the shear angles are calculated.

RESUMEN

Se presenta el análisis experimental de los efectos de tipo corte que tienen lugar en hologramas de volumen registrados en emulsiones fotográficas blanqueadas. Para separar estos efectos de corte o cizalladura de las posibles variaciones de espesor, se utiliza un blanqueo de rehalogenación sin fijado porque haciendo uso de este blanqueador no se introducen cambios apreciables en el espesor del material. Se muestran, asimismo, los resultados experimentales obtenidos tanto con redes holográficas por transmisión como por reflexión, y se calculan los valores de los correspondientes ángulos de corte que caracterizan este tipo de deformaciones.

1. INTRODUCCION

Los elementos ópticos holográficos normalmente se registran como hologramas de volumen y de fase en emulsiones de haluro de plata. Sin embargo, el procesamiento de estas emulsiones fotográficas introduce cambios en el índice de refracción promedio así como deformaciones en el material de registro. Estas variaciones dan lugar a un reordenamiento de la estructura interna de franjas de interferencia almacenada en la etapa de registro del holograma, de forma que los elementos ópticos holográficos antes y después del procesamiento son diferentes. Como resultado de estas variaciones es necesario cambiar la geometría de reconstrucción (correspondiente a máximo rendimiento en difracción) con respecto a la geometría de obtención del elemento.

Vilkomerson y Bostwick (1) propusieron un modelo que era capaz de explicar las variaciones de espesor en el medio de registro holográfico debidas al procesamiento químico del mismo. Este modelo ha sido verificado experimentalmente obteniéndose buena concordancia entre los resultados teóricos y experimentales, especialmente en hologramas por reflexión (2). Sin embargo, Syms y Solymar (3) han analizado lentes holográficas cuyas franjas de interferencia estaban poco inclinadas con respecto a la normal (montajes cercanos al simétrico) y registradas en emulsiones fotográficas blanqueadas, obteniendo variaciones de espesor de hasta el 28% (cuando hacían uso del modelo de variación de espesor propuesto por Vilkomerson y Bostwick), aunque no es posible obtener experimentalmente dichas variaciones de espesor con el procesamiento que ellos

utilizaron (3). Esto indica que el modelo propuesto por Vilkomerson et al. no es del todo correcto, siendo necesario desarrollar un nuevo modelo que sea capaz de justificar los valores anómalos de variaciones de espesor antes señalados.

En anteriores trabajos (4, 5) hemos presentado y desarrollado un nuevo modelo geométrico (el "Modelo de la Red Holográfica Efectiva", MRHE) para analizar los efectos del procesado sobre el medio de registro en hologramas de volumen. En este modelo introducimos una deformación homogénea del medio de registro y esto implica considerar efectos de tipo corte o cizalladura debidos al procesado, los cuales no habían sido considerados hasta entonces en la bibliografía. En este modelo introducimos un nuevo parámetro, el "espesor efectivo", que incluye dos efectos de deformación: la variación de espesor de la emulsión y los efectos de tipo corte. Suponiendo que el procesado químico produce estos dos efectos sobre el medio de registro, hemos modificado la expresión para el rendimiento en difracción propuesta por Kogelnik para redes por transmisión de volumen y de fase (6). Además se ha utilizado el modelo para optimizar la geometría de reconstrucción en lentes holográficas de volumen (7).

En el presente trabajo vamos a considerar el análisis experimental de los efectos de tipo corte antes mencionados, introducidos por el procesado químico en hologramas blanqueados. Para separar las variaciones de espesor de los efectos de tipo corte hemos considerado un blanqueo de rehalogenación R-10 (8) directamente después del revelado, sin etapa de fijado (9), pues sabemos que utilizando este blanqueador las variaciones de espesor son muy pequeñas ($< 0.05 \mu\text{m}$ para la emulsión Agfa 8E75 HD cuyo espesor nominal es de $6 \mu\text{m}$) (10, 11). Por otra parte, haciendo uso de este blanqueo de rehalogenación es posible suponer que el índice de refracción prácticamente no cambia durante el procesado (11). Teniendo en cuenta estas dos últimas consideraciones podremos relacionar directamente las variaciones en el ángulo de Bragg (ángulo de reconstrucción para máximo rendimiento en difracción) con los efectos de corte en la emulsión debidos al procesado.

Aunque el MRHE aparece completamente descrito en la referencia 5, la sección 2 la hemos dedicado a presentar brevemente los efectos del procesado químico sobre el medio de registro, así como las relaciones que existen entre los vectores de la red antes y después del procesado, introduciendo el ángulo de corte, δ , y el espesor efectivo t_e . Por otra parte, en la sección 3 se analizan los resultados experimentales obtenidos con redes holográficas por transmisión y reflexión,

registradas en emulsión fotográfica blanqueada utilizando un blanqueo de rehalogenación del tipo R-10. Finalmente, las conclusiones se presentaran en la sección 4.

2. TEORIA BASICA

Consideremos las franjas de interferencia almacenadas en un medio fotosensible situado en aire y debidas a dos haces colimados de luz monocromática de longitud de onda λ_R , tal y como se muestra en la figura 1. Los vectores polarización de las dos ondas son perpendiculares al plano de la figura, siendo t_R y n_R el espesor y el índice de refracción iniciales del medio, respectivamente. El vector de la red K es perpendicular a las franjas de interferencia, también llamadas planos de Bragg, y su módulo es $|K| = 2\pi/\Lambda$, donde Λ es el período de la red y corresponde al espaciado entre los planos de Bragg medido normalmente a los mismos. Por otra parte, ϕ es el ángulo de inclinación de las franjas respecto al eje Z. La expresión del vector de la red viene dada por $K = k'_R - k'_O$ (12), donde k'_O y k'_R son los vectores de onda de los haces objeto (O) y referencia (R), respectivamente, en el medio de registro. En la figura 1, α'_O y α'_R son los ángulos de incidencia de los haces objeto y referencia, también en el medio (α_O y α_R en aire).

Si designamos con el índice (*) a los parámetros de la red holográfica tras el procesado, ésta vendrá caracterizada mediante un vector de la red K^* , un ángulo de inclinación de las franjas ϕ^* y un período Λ^* . Supondremos que tanto el espesor como el índice de refracción del medio cambian debido al procesado, siendo tras éste, t_C y n_C , respectivamente. En la figura 2 se han representado los distintos parámetros de la red holográfica antes y después del procesado. Ahora la ley de Bragg se escribirá en la forma $K^* = k'_C - k'_I$, donde k'_C y k'_I son los vectores de onda de los haces de reconstrucción (C) e imagen (I) en el medio de índice de refracción promedio n_C .

Haciendo uso del MRHE, consideramos dos hipótesis de partida. En primer lugar suponemos que el medio de registro se deforma homogéneamente, de modo que tras el procesado los planos de Bragg siguen siendo planos. En segundo lugar, suponemos que los puntos del medio de registro en contacto con el soporte de vidrio no cambian de posición debido al procesado. Teniendo esto en cuenta se llega a la conclusión de que, debido al procesado, se producen dos deformaciones en el material de registro: una variación de espesor, que caracterizamos mediante el parámetro T, y la aparición

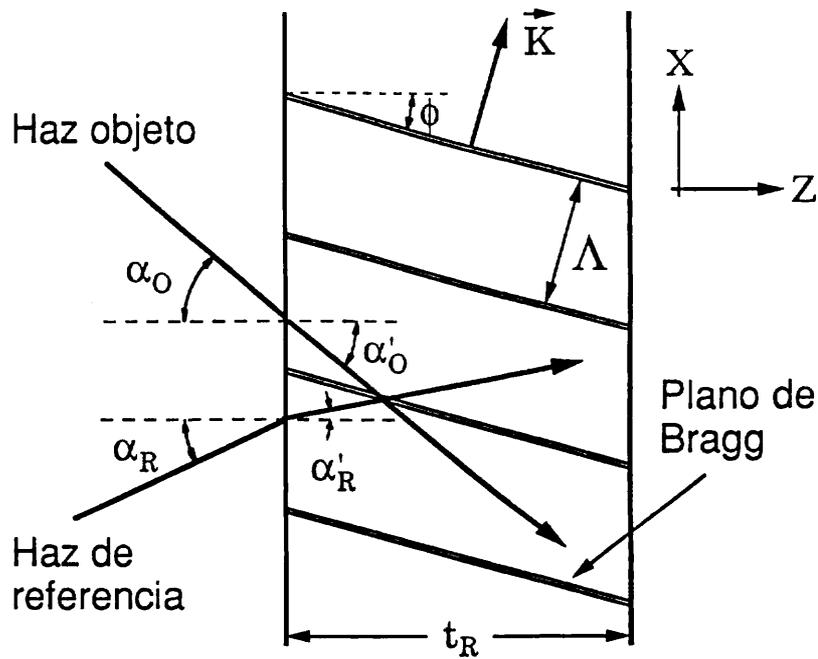


Fig. 1.— Definición de los distintos parámetros de la red holográfica de volumen.

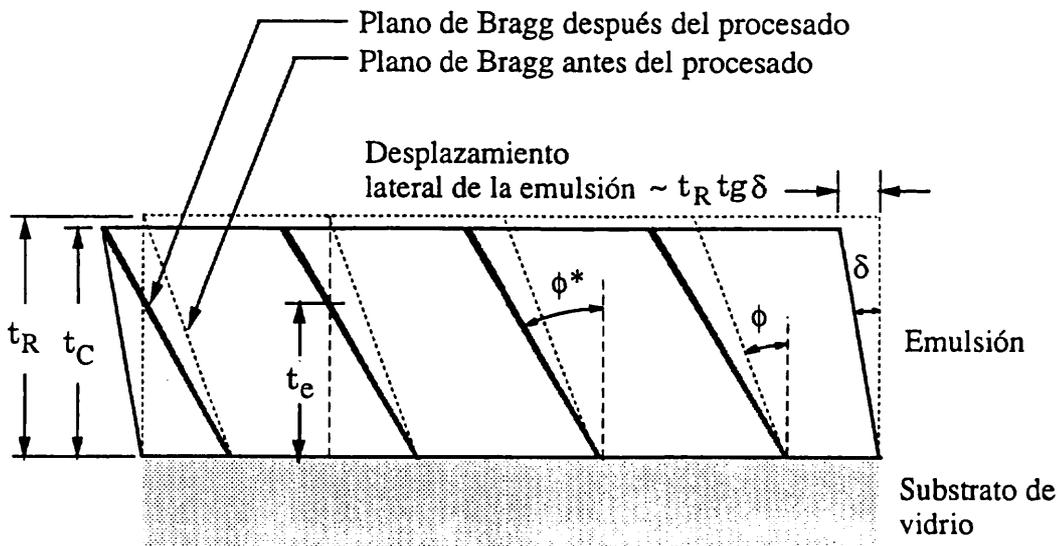


Fig. 2.— Parámetros de una red holográfica antes y después del procesamiento y definición del ángulo de corte, δ , y el espesor efectivo, t_e .

de una deformación de corte o cizalladura, caracterizada por el ángulo de corte δ . Además, las relaciones que existen entre las componentes de los vectores de la red antes, \mathbf{K} , y después del procesamiento, \mathbf{K}^* , pueden escribirse como (5):

$$K_x^* = K_x, \quad K_z^* = \frac{K_z}{T_e} \quad [1]$$

La segunda ecuación es similar a la expresión conocida $K_z^* = K_z/T$ (13, 14), excepto que ahora T_e no representa el cociente entre los espesores reales del material de registro después y antes del procesado ($T = t_C/t_R$), sino que $T_e = t_e/t_R$, siendo t_e el "espesor efectivo" de la red holográfica (ver figura 2). El parámetro T_e relaciona los ángulos de inclinación de las franjas de interferencia antes y después del procesado, ϕ y ϕ^* , mediante la ecuación:

$$\operatorname{tg} \phi^* = \frac{\operatorname{tg} \phi}{T_e} \quad [2]$$

El parámetro T_e y el ángulo de corte δ pueden calcularse mediante las ecuaciones (5):

$$T_e = \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \delta + \operatorname{tg} \phi} T \quad [3]$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{T - T_e}{T_e} \operatorname{tg} \phi \quad [4]$$

Como puede verse en la figura 2, el ángulo de corte δ es similar a los descritos en teoría de la elasticidad cuando se considera la deformación de corte o cizalladura.

Este desplazamiento lateral en el medio de registro puede ser explicado considerando fuerzas laterales de corte que hacen desplazarse a las franjas de interferencia (5), o, en otras palabras, considerando la tendencia del medio de registro a moverse lateralmente debido a la propia inclinación de dichas franjas de interferencia, y además es de esperar que los valores del ángulo δ sean pequeños.

De la ecuación [3] se deduce que para redes holográficas por transmisión simétricas ($\phi = 0^\circ$), δ será igual a 0° , y T_e será igual a T ; y para redes holográficas por reflexión ($\phi \sim 90^\circ$), $T_e \approx T$, de manera que para este tipo de redes los efectos de corte no son importantes, aumentando drásticamente su importancia en el caso de ángulos de inclinación de las franjas pequeñas.

El espesor efectivo juega un papel fundamental en las redes holográficas de volumen pues está directamente relacionado con el ángulo de reconstrucción que satisface la ley de Bragg, α_{Bragg} . Es posible obtener el valor del cociente T_e/N experimentalmente haciendo uso de la siguiente expresión que se ha obtenido para redes por transmisión (5):

$$\frac{T_e}{N} = \frac{\operatorname{sen} \alpha_R + \operatorname{sen} \alpha_O}{2 \operatorname{sen} \alpha_{\text{Bragg}} + \mu (\operatorname{sen} \alpha_O - \operatorname{sen} \alpha_R)} \quad [5]$$

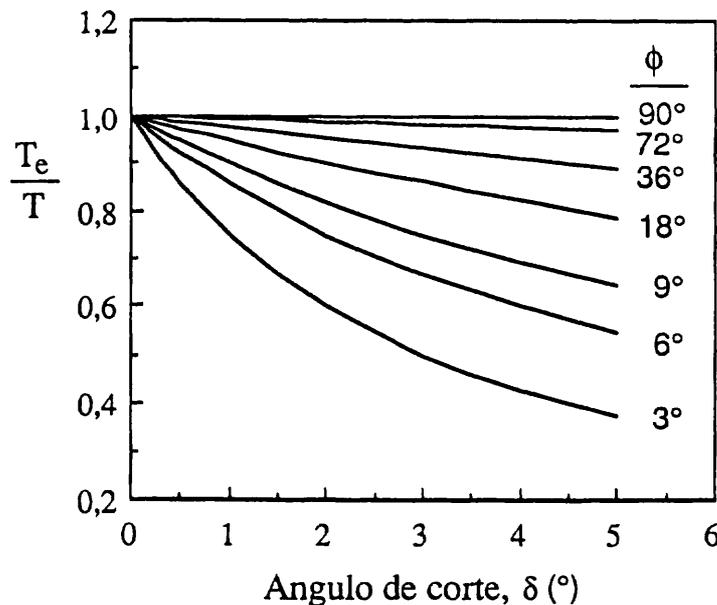


Fig. 3.— Cociente T_e/T en función del ángulo de corte δ para diferentes valores del ángulo de inclinación de los planos de Bragg, ϕ , para las redes holográficas por transmisión.

donde $N = n_C/n_R$, λ_C es la longitud de onda de reconstrucción y $\mu = \lambda_C/\lambda_R$. De la ecuación [5] se deduce que la medida de los ángulos objeto y referencia y del ángulo de Bragg (α_{Bragg}) no nos proporciona el espesor real tras el procesado, sino que nos da el valor del espesor efectivo. Para una red holográfica por reflexión se cumple que (5):

$$T_e = \frac{\mu}{N} \quad [6]$$

Sin embargo sabemos que en el caso de las redes holográficas por reflexión el cociente μ/N proporciona los valores adecuados del parámetro T (2).

En la figura 3 se ha representado el cociente T_e/T en función del ángulo de corte δ , utilizando la ecuación [3], para diferentes valores del ángulo de inclinación de los planos de Bragg, ϕ . De esta figura se deduce que para ángulos ϕ pequeños existen grandes diferencias entre los valores de T_e y T , mientras que cuando los valores de ϕ se acercan a 90° (lo que implica analizar los casos de redes por reflexión), todas las curvas tienden al valor $T_e/T = 1$, independientemente del valor del ángulo δ . Este hecho es importante pues indica que los datos de variación de longitud de onda de reconstrucción de redes holográficas por reflexión, para rendimiento en difracción máximo, están directamente relacionados con los espesores reales o físicos del medio tras el procesado, pues para redes por reflexión se cumple que $T_e \approx T = \mu/N$. La figura 3 también muestra que las deformaciones de tipo corte, aunque son despreciables

en términos de desplazamientos relativos, pueden llegar a ser muy importantes en términos de ángulos, sobre todo si el ángulo de inclinación de los planos de Bragg no es muy grande (como sucede en las redes por transmisión).

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para analizar experimentalmente las deformaciones de corte en emulsiones fotográficas, se realizaron primeramente redes holográficas por transmisión en emulsión Agfa 8E75 HD, haciendo interferir dos haces colimados de luz monocromática de igual intensidad provenientes de un láser de He-Ne ($\lambda_R = 633 \text{ nm}$). El índice de refracción promedio de esta emulsión antes del procesado es de 1.64 (11). El conjunto de redes holográficas se registró con diferentes valores de la exposición y de manera que el ángulo entre los haces objeto y referencia en aire ($|\alpha_R| + |\alpha_O|$) fuera 40° . Las distintas geometrías de registro utilizadas junto con los correspondientes valores de los ángulos de inclinación de los planos de Bragg, las frecuencias espaciales y los periodos de la red se muestran en la tabla I. En todos los casos elegidos se cumple que $\phi < 12^\circ$, pues es precisamente con pequeños valores del ángulo ϕ con los que el modelo propuesto por Vilkomerson y Bostwick no proporciona resultados satisfactorios.

Las placas expuestas se procesaron con revelador AAC compuesto por ácido ascórbico (18 g) y carbonato sódico anhidro (60 g) diluidos en 1 litro de agua destilada. Después de un baño de paro se blanquearon sin etapa de fijado (8). El blanqueador usado en el

TABLA I

Geometrías de registro junto con los correspondientes valores del ángulo de inclinación de los planos de Bragg (ϕ), los periodos de la red (Λ) y las frecuencias espaciales (f).

α_R	α_O	ϕ	Λ (μm)	f (líneas/mm)
0°	-40°	11.5°	0.965	1015
5°	-35°	8.7°	0.947	1044
10°	-30°	5.8°	0.935	1064
15°	-25°	3.4°	0.928	1077
20°	-20°	0.0°	0.925	1081

estudio de las deformaciones de corte es un blanqueo de rehalogenación R-10 (8) compuesto por dicromato potásico (2 g) (oxidante), bromuro potásico (35 g) (agente rehalogenante), y ácido sulfúrico (10 ml) disueltos en 1 litro de agua destilada. Es importante señalar que el cambio de espesor introducido en la emulsión, —cuyo espesor inicial es 6 μm (10)—, con este tipo de procesado es muy pequeño (10, 11) (<0.05 μm), y esto implica que $T > 0.99$. Además, con este procesado el índice de refracción promedio no cambia apreciablemente (11) por lo que podemos hacer la aproximación $n_C \approx n_R$. Teniendo todo esto en cuenta, los parámetros T_e y δ pueden calcularse considerando que $T = t_C / t_R \sim 1$ y $N = n_C / n_R \sim 1$. Con estas aproximaciones las ecuaciones [3]–[6] pueden escribirse en la forma:

$$T_e = \frac{\text{tg } \phi}{\text{tg } \delta + \text{tg } \phi} \quad [7]$$

$$\text{tg } \delta = \frac{1 - T_e}{T_e} \text{tg } \phi \quad [8]$$

$$T_e = \frac{\text{sen } \alpha_R + \text{sen } \alpha_O}{2 \text{ sen } \alpha_{\text{Bragg}} + \mu (\text{sen } \alpha_O - \text{sen } \alpha_R)} \quad [9]$$

$$T_e = \mu \quad [10]$$

Las redes holográficas, una vez procesadas, se reconstruyeron con un haz colimado de luz monocromática proveniente del mismo láser de He-Ne utilizado en el registro ($\lambda_C = \lambda_R = 633 \text{ nm}$, $\mu = 1$) para encontrar el ángulo de reconstrucción (α_{Bragg}) que proporcionaba máximo rendimiento en difracción. Para el caso simétrico, es decir, cuando $\alpha_R = -\alpha_O$ ($\phi = 0^\circ$), el ángulo de Bragg coincide con el ángulo del haz de referencia, tal y como se ha señalado en la sección 2. Con excepción de este caso simétrico, en todos los demás casos analizados existe un desplazamiento del ángulo de reconstrucción para rendimiento en difracción máximo respecto al ángulo que formaba el haz de referencia. En la figura 4 se han representado, en función de la exposición, los datos experimentales correspondientes al rendimiento en difracción máximo obtenido y las correspondientes desviaciones angulares entre el ángulo de Bragg y el ángulo del haz de referencia ($\Delta\theta = \alpha_{\text{Bragg}} - \alpha_R$), para diferentes valores del ángulo

de inclinación de los planos de Bragg, ϕ . De la figura se deduce que para todos los casos analizados se cumple que $|\Delta\theta| \leq 8^\circ$, y además es importante señalar que el valor $|\Delta\theta| = 8^\circ$ es bastante grande pues corresponde a un ángulo del haz de referencia $\alpha_R = 15^\circ$.

Si se conoce el ángulo de Bragg, utilizando las ecuaciones [8] y [9] puede calcularse el ángulo de corte δ y el parámetro T_e . En la figura 5 se han representado, en función de la exposición, los valores calculados de T_e y δ para los diferentes valores del ángulo de inclinación de los planos de Bragg de las redes por transmisión analizadas. Como puede observarse en la figura, se tiene que $0.4 < T_e < 1$, mientras que para el blanqueo de rehalogenación utilizado $T \sim 1$. Además, los valores más pequeños de T_e corresponden a las geometrías más cercanas a la simétrica (menores valores del ángulo ϕ) tal y como se deduce teóricamente de la ecuación [3]. Vemos como con este tipo de blanqueo aparecen efectos de corte intensos y que éstos son la causa del importante desplazamiento lateral que da lugar a valores del ángulo

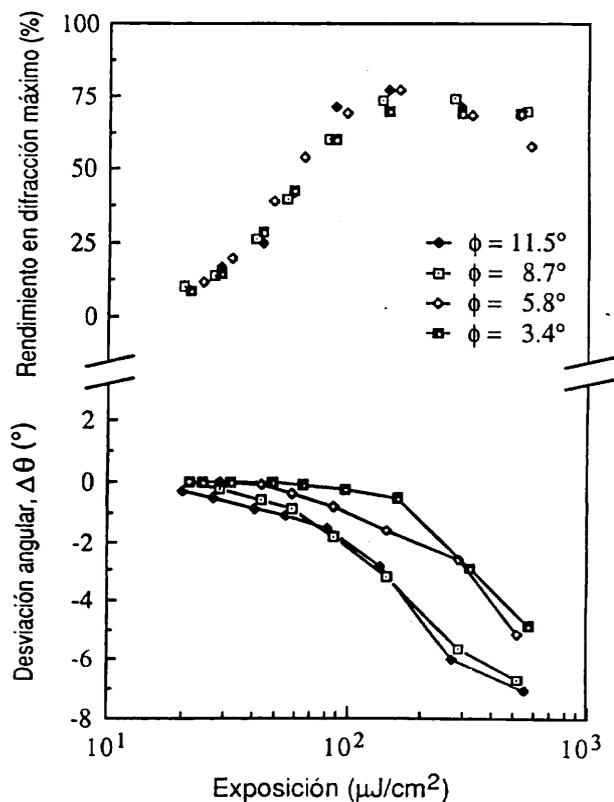


Fig. 4.— Rendimiento en difracción máximo y desviación entre el ángulo de Bragg y el ángulo del haz de referencia, en función de la exposición y para diferentes valores del ángulo de inclinación de los planos de Bragg, ϕ , para las redes holográficas por transmisión.

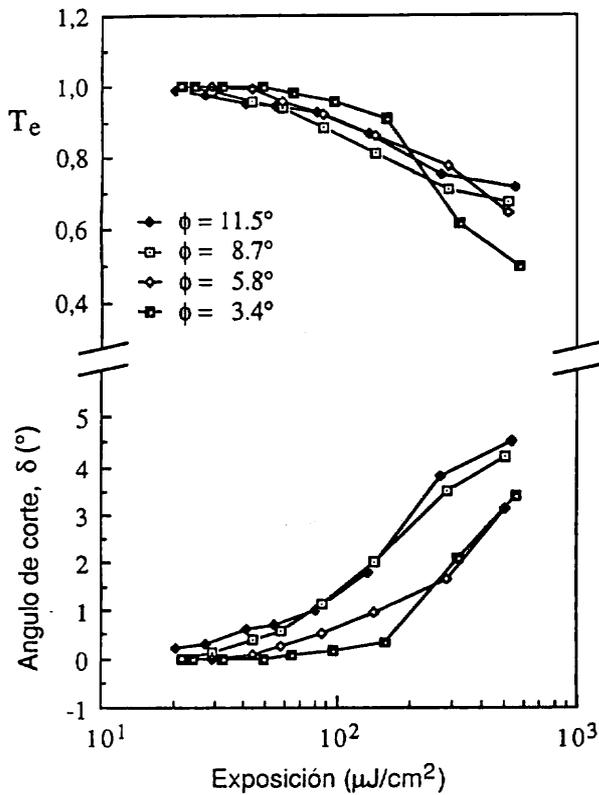


Fig. 5.— Parámetro T_e y ángulo de corte δ en función de la exposición y para diferentes valores del ángulo de inclinación de los planos de Bragg, ϕ , para las redes holográficas por transmisión.

δ entre 0° y 5° . Por otra parte, un ángulo de corte de 5° corresponde a un desplazamiento lateral máximo de la emulsión ($\sim t_R \cdot \text{tg } \delta$) de $0.5 \mu\text{m}$ en la superficie del holograma (ver figura 2). Este valor es despreciable si lo comparamos con las dimensiones longitudinales de una red holográfica que puede ser de unos centímetros. Todo esto demuestra que este pequeño efecto de corte (del orden de 0.0025% en una red de 2 cm de tamaño) puede llegar a jugar un papel fundamental en la nueva situación de los planos de Bragg y, por tanto, en el nuevo ángulo de reconstrucción para máximo rendimiento en difracción, como se ve en las figuras 4 y 5. Es importante tener en cuenta que considerar el parámetro T_e como la variación de espesor real, T , daría lugar a resultados físicamente imposibles pues indicaría que el procesado fotoquímico ocasionaría variaciones de espesor de más del 50%.

Finalmente, hemos analizado los efectos de corte en redes holográficas por reflexión. Para estas redes se tiene que $\phi \sim 90^\circ$, y de la ecuación [3], $T_e \sim T$. Se registraron redes por reflexión en emulsión fotográfica Agfa 8E75 HD con dos haces colimados de igual intensidad, incidiendo cada uno de ellos por una cara de la placa holográfica, con la luz proveniente de un láser de He-Ne ($\lambda_R = 633 \text{ nm}$). El ángulo entre los dos haces era de 150° , pero de manera que uno de ellos incidía sobre la placa normalmente. Como el índice de refracción de la emulsión Agfa 8E75 HD es 1.64 (11), el periodo de la red y el ángulo de inclinación de los planos de Bragg para las redes analizadas eran de $\Lambda = 0.195 \mu\text{m}$ y $\phi = 81.1^\circ$,

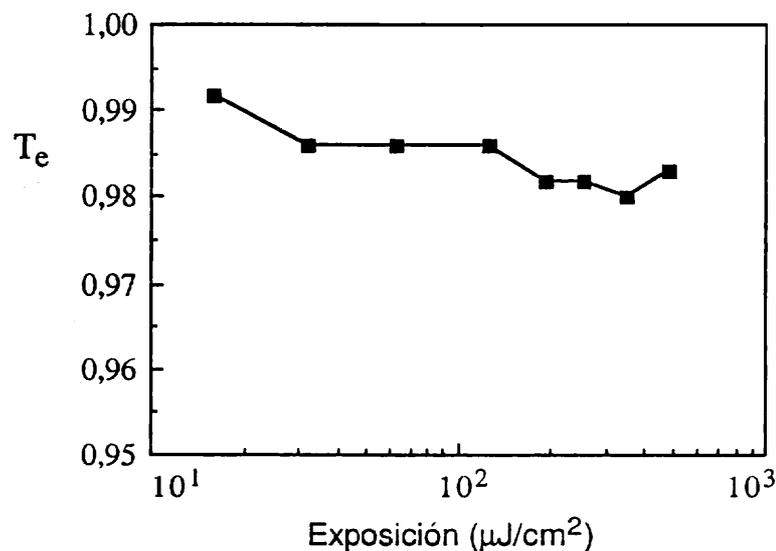


Fig. 6.— Parámetro T_e en función de la exposición para redes holográficas por reflexión.

respectivamente. El conjunto de redes por reflexión se procesó de la misma manera que las redes por transmisión antes estudiadas, es decir con el revelador AAC y el blanqueo de rehalogenación R-10. Tras el procesado, haciendo uso de un monocromador Oriol 7240, se midió la longitud de onda de reconstrucción λ_C que cumplía la ley de Bragg, con el haz de reconstrucción incidiendo normalmente sobre la placa. De esta manera es posible calcular fácilmente el parámetro $\mu = \lambda_C / \lambda_R$, para la longitud de onda que cumple la ley de Bragg. En la figura 6 se han representado los valores correspondientes del parámetro T_e en función de la exposición considerando que con este tipo de blanqueo $N \sim 1$ y haciendo uso de la ecuación [10], $T_e = \mu$. Como se observa en esta figura se obtiene en todos los casos que $T_e > 0.98$. Estos valores de T_e son similares a los de T obtenidos con este blanqueo de rehalogenación (9, 10). Esto se debe a que el valor del ángulo de inclinación de los planos de Bragg está cercano a 90° . Por otra parte, si consideramos que para estas redes por reflexión los ángulos de corte son de 5° (máximo valor obtenido con las redes por transmisión) y haciendo uso de la ecuación [3], se obtiene:

$$\frac{T - T_e}{T_e} \times 100 = \frac{\text{tg } \delta}{\text{tg } \phi} \times 100 = 1.37 \%$$

Este resultado indica que la influencia de los efectos de corte de la emulsión es despreciable para redes por reflexión.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado los desplazamientos de corte o cizalladura en hologramas blanqueados debidos al procesado fotoquímico. Estos efectos de tipo corte juegan un papel fundamental en la geometría de reconstrucción para máximo rendimiento en difracción en redes holográficas. Haciendo uso del MRHE desarrollado en anteriores trabajos se ha mostrado que es

posible explicar los valores anómalos obtenidos con el modelo de Vilkomerson y Bostwick teniendo en cuenta las variaciones de espesor (descritas por T) y los desplazamientos de corte (caracterizados por δ). Esto nos proporciona un nuevo parámetro a la hora de analizar los medios de registro que es el ángulo δ , el cual no había sido considerado previamente en la bibliografía por otros autores.

Como se ha mostrado en la sección 3, los resultados experimentales obtenidos con redes holográficas de volumen registradas en emulsión Agfa 8E75 HD sugieren que existe un efecto importante de tipo corte debido al procesado (figura 5), y el desplazamiento lateral de la emulsión puede calcularse midiendo el ángulo de Bragg para estas redes. Finalmente, estos efectos de tipo corte son más importantes cuando los ángulos de inclinación de los planos de Bragg son pequeños, mientras que para hologramas por reflexión la influencia del desplazamiento lateral de la emulsión es despreciable.

BIBLIOGRAFIA

1. D.H.R. VILKOMERSON y D. BOSTWICK: *Appl. Opt.*, **6**, 1270 (1967).
2. P. HARIHARAN y C.M. CHIDLEY: *Appl. Opt.*, **28**, 422 (1989).
3. R.R.A. SYMS y L. SOLYMAR: *Appl. Phys. B*, **32**, 165 (1983).
4. A. BELENDEZ, I. PASCUAL y A. FIMIA: *Proc. SPIE*, **1507**, 268 (1991).
5. A. BELENDEZ, I. PASCUAL y A. FIMIA: *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 1214 (1992).
6. A. BELENDEZ, I. PASCUAL y A. FIMIA: *J. Modern. Opt.*, **39**, 889 (1992).
7. A. BELENDEZ, I. PASCUAL y A. FIMIA: *Proc. SPIE*, **1574**, 77 (1991); *Opt. Appl.*, **21**, 225 (1991).
8. L. JOLY: *J. Photogr. Sci.*, **31**, 143 (1983).
9. J. CRESPO, A. FIMIA y J.A. QUINTANA: *Appl. Opt.*, **25**, 1642 (1986).
10. R.K. KOSTUK y G.T. SINCERBOX: *Appl. Opt.*, **27**, 2993 (1989).
11. R.K. KOSTUK: *Appl. Opt.*, **30**, 1611 (1991).
12. H. KOGELNIK: *Bell. System. Tech. J.*, **48**, 2909 (1969).
13. I.A. MIKHAILOV: *Opt. Spectrosc.*, **58**, 374 (1985).
14. Y.T. HUANG, M. KATO y R.K. KOSTUK: *Proc. SPIE*, **1211**, 166 (1990).

★★★★★