

## Difracción por dos redes holográficas de volumen en disposición paralela

### Diffraction by two volume holographic gratings in a parallel arrangement

A. M. Caravaca-Aguirre<sup>(1,\*)</sup>, O. Martínez-Matos<sup>(1)</sup>, M. P. Hernández-Garay<sup>(1,S)</sup>,  
J. A. Rodrigo<sup>(2)</sup>, P. Cheben<sup>(3)</sup> y M. L. Calvo<sup>(1,S)</sup>

1. Grupo Interdisciplinario de Computación Óptica (GICO-UCM). Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Avda. Complutense S/N, 28040, Madrid, España.
2. Departamento de Imágenes y Visión, Instituto de Óptica Daza de Valdés, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Serrano 121, 28006, Madrid, España.
3. Institute for Microstructural Sciences, National Research Council of Canada, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A0R6, Canada.

(\*) Email: caravaca86@gmail.com

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 23/09/2009. Versión revisada / Revised version: 09/11/2009. Aceptado / Accepted: 10/11/2009

#### RESUMEN:

En este trabajo se realiza un análisis teórico-experimental de la difracción originada por un sistema óptico formado por dos redes de difracción de volumen, idénticas, en disposición paralela registradas en un vidrio fotopolímero. Se demuestra que la difracción originada por el sistema se hace menos tolerante a incidencias fuera de la condición Bragg. Se propone utilizar esta propiedad para incrementar la resolución de microscopios confocales holográficos y analizadores espectrales sustituyendo los elementos difractivos de estos sistemas por dos redes de difracción paralelas.

**Palabras clave:** Holograma de Volumen, Redes de Difracción, Fotopolímeros.

#### ABSTRACT:

In this work is analyzed theoretically and experimentally the diffraction originated by an optical system composed by two identical and parallel volume holographic gratings recorded in a photopolymerizable glass. This optical system exhibit a tolerance reduction for out of the Bragg resonance. This property is studied to increase the resolution of confocal holographic microscopes and spectral analyzers by substituting the diffractive elements of these systems by two identical and parallel diffraction gratings.

**Key words:** Volume Holography, Diffraction Gratings, Photopolymers.

#### REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] R. R. A. Syms, *Practical Volume Holography*, Oxford University Press (1990).
- [2] G. Barbastathis, M. Balberg, "Confocal microscopy with a volume holographic filter", *Opt. Lett.* **24**, 811-813 (1999).
- [3] S. Habraken, Y. Renotte, St. Roose, E. Stijns, Y. Lion, "Design for polarizing holographic optical elements", *Appl. Opt.* **34**, 3595-3602 (1995).
- [4] O. Martínez Matos, J. A. Rodrigo, P. Cheben, M. L. Calvo "Polarization and phase shift properties of high spatial frequency holographic gratings in a photopolymerizable glass", *Opt. Lett.* **34**, 485-487 (2009).
- [5] T.-Y. Yang, P.-P. Ho, A. Katz, R. R. Alfano, R. A. Ferrante, "Femtosecond laser pulse compression using volume phase transmission holograms", *Appl. Opt.* **24**, 2021-2023 (1985).
- [6] H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram grating", *Bell. Syst. Tech. J.* **48**, 2909-2947 (1969).
- [7] P. Cheben, M. L. Calvo, "A photopolymerizable glass with diffraction efficiency near 100% for holographic storage", *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1490-1492 (2001).

- [8] F. del Monte, O. Martínez-Matos, J. A. Rodrigo, M. L. Calvo, P. Cheben, "A volume holographic sol-gel material with large enhancement of dynamic range by incorporation of high refractive index species", *Adv. Mater.* **18**, 2014-2017 (2006).
- [9] O. Martínez Matos, M. L. Calvo, J. A. Rodrigo, P. Cheben, F. del Monte, "Difusion study in tailored gratings recorded in photopolymer glass with high refractive index species", *Appl. Phys. Lett.* **91**, 141115 (2007).
- [10] M. L. Calvo, P. Cheben "Photopolymerizable sol-gel nanocomposites for holographic recording", *J. Opt. A Pure Appl. Opt.* **11**, 024009 (2009).
- [11] M. L. Calvo, P. Cheben, O. Martínez-Matos, F. del Monte, J. A. Rodrigo, "Experimental detection of the optical Pendellosung effect", *Phys. Rev. Lett.* **97**, 084801 (2006).

## 1. Introducción

Un holograma es el registro de un interferograma generado por la superposición coherente de luz procedente de una escena (haz objeto) con un haz de referencia [1]. Si los haces de escritura están colimados, entonces se obtiene un holograma con una estructura regular correspondiente a una red de difracción (RD) lineal de periodo bien definido. Este tipo de estructuras han sido empleadas como elementos difractivos en dispositivos optrońicos con aplicaciones al análisis y modulación de haces de luz. Las redes de difracción se han empleado en microscopios confocales holográficos [2], polarizadores holográficos [3-4] y analizadores espectrales (AE) [1], entre otros. En el marco de la modulación de los haces de luz es destacable la utilización de las RD como compresor y dilatador de pulsos ultracortos, en particular pulsos de duración femtosegundos [5].

Las prestaciones de estos dispositivos optrońicos dependen de las características de las redes de difracción empleadas. En particular, las redes de fase en geometría de transmisión y régimen de Bragg (holografía de volumen) quedan completamente caracterizadas una vez determinado el periodo  $\Lambda$ , espesor  $d$  y modulación del índice de refracción  $\Delta n$ . Teniendo en cuenta la teoría de dos ondas acopladas [6], estos parámetros definen la eficiencia de difracción  $\eta$  de la red y la tolerancia de la misma en incidencias fuera de la condición Bragg, características fundamentales para realizar un diseño óptico apropiado para cada aplicación. A modo de ejemplo, la resolución de dispositivos optrońicos tales como microscopios confocales holográficos y analizadores espectrales está íntimamente ligada a la tolerancia que ofrece la red de difracción a incidencias fuera de la condición Bragg. La reducción de esa tolerancia mejoraría la resolución de tales sistemas.

El haz difractado en el interior de una red de volumen que opera en régimen de Bragg se interpreta como la superposición de múltiples haces difractados en cada plano de refracción. Se producirá interferencia constructiva cuando la diferencia de caminos ópticos entre dos haces difractados en planos consecutivos sea un múltiplo de  $\lambda$ . Esta condición se conoce como ley de Bragg y solo se satisface para un ángulo de incidencia concreto (ángulo de Bragg,  $\theta_B$ ) cuando la red de difracción es iluminada con una fuente de luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$ . En este caso la eficiencia de difracción será máxima. Ángulos de incidencia cercanos a la condición Bragg producirán haces difractados de menor eficiencia. La representación de  $\eta$  en función del ángulo de incidencia se denomina curva de selectividad angular (CSA), depende de  $\Lambda$ ,  $d$  y  $\Delta n$  y caracteriza por completo la red de difracción. Una CSA muy estrecha representa una red de difracción con muy baja tolerancia a incidencias fuera de la condición de Bragg. Por otro lado, la lectura de redes de difracción con haces policromáticos hace que únicamente la longitud de onda que cumpla la ley de Bragg se difracte apreciablemente. La eficiencia de difracción en función de  $\lambda$  para un ángulo de incidencia fijo se denomina curva de selectividad espectral (CSE) y está íntimamente relacionada con la CSA. Así pues, una CSA estrecha necesariamente implica a su vez una CSE estrecha. Los valores de  $\Lambda$ ,  $d$  y  $\Delta n$  que definen la CSA y la CSE quedan restringidos por la propia naturaleza del material holográfico utilizado, lo que limita el rango de aplicabilidad de los dispositivos optrońicos planteados. Para salvar estas limitaciones, en este artículo proponemos el empleo de dos redes de difracción idénticas en disposición paralela y que operen como un único sistema óptico en lugar de usar una única red de difracción. Demostraremos que la CSA y la CSE del sistema

completo se reduce mejorando así la resolución de microscopios confocales holográficos y analizadores espectrales.

Las redes de difracción consideradas en este trabajo se han registrado en un material holográfico del tipo vidrio sol-gel fotopolimerizable [7], modificado con especies de alto índice de refracción incorporadas a nivel molecular (HRIS) [8-11]. Este material se sintetiza a partir de la técnica sol-gel y está formado por una matriz de sílice inerte que contiene elementos fotoactivos uniformemente dispersos tales como monómeros acrílicos fotosensibles, HRIS y elementos fotoiniciadores. En el proceso de registro dos haces coherentes entre sí se solapan en el interior del vidrio sol-gel formando un patrón estable de franjas de interferencia. En las zonas de máxima iluminación se induce una polimerización mediante la reacción química de monómeros fotoexcitados, por lo que se genera un gradiente de concentración de monómero: en las zonas iluminadas decrece su concentración mientras que en las zonas oscuras no se ve modificada. Debido a la porosidad de la matriz se induce una difusión de monómero y HRIS [9,10] de las zonas de menor iluminación a las de mayor iluminación para alcanzar el equilibrio químico. Este proceso, además de generar un gradiente de masa neto, favorece la polimerización. El registro finaliza cuando se consume todo el monómero libre, dando lugar a una distribución de franjas espaciales que replica el patrón interferencial. En el estado final se ha producido un cambio químico y de concentración periódico que modula el índice de refracción con una amplitud  $\Delta n$ . En el vidrio sol-gel utilizado se pueden obtener valores de  $\Delta n \sim 10^{-2}$  [8]. Las principales ventajas que ofrece el vidrio sol-gel son: alta calidad óptica, alta eficiencia de difracción, bajo scatterig coherente e incoherente, alto rendimiento, bajo coste y versatilidad de diseño, pudiéndose obtener espesores altos apropiados para generar hologramas de volumen que operen en régimen de Bragg.

## 2. Montaje experimental

El registro holográfico y la lectura de cada una de las redes que componen el sistema óptico, así como la lectura del sistema total, se ha realizado utilizando el montaje de la Fig. 1. El haz colimado proveniente de un láser continuo Nd:YAG ( $\lambda=532$  nm) se divide mediante un cubo separador de haz,

formando los dos brazos de un interferómetro de Mach-Zehnder. Para realizar el registro holográfico de cada una de las dos redes, se redirigen los haces del interferómetro mediante espejos de manera que solapen justo donde se sitúa el vidrio sol-gel. Se utiliza una lámina  $\lambda/2$  para que la polarización de los haces de escritura sea perpendicular al plano de incidencia maximizando la visibilidad del patrón interferencial. El ángulo de incidencia de los dos haces de registro se ha escogido para lograr una configuración simétrica que genere redes holográficas de transmisión de 500 líneas/mm.

Una vez registradas las redes holográficas se procede a su caracterización determinando las curvas de selectividad angular. Para ello, se bloquea uno de los dos brazos del interferómetro y se utiliza el otro como haz de lectura. Las placas holográficas están colocadas sobre una plataforma rotatoria de alta precisión (0,001 grados) conectada a un ordenador, a través del cual se modifica el ángulo de incidencia. El registro de la intensidad del campo difractado en función del ángulo de incidencia (CSA) se realiza mediante un fotodetector de dos canales. Primeramente se obtiene la lectura de las dos redes de difracción individualmente y por último se realiza la lectura del sistema completo formado por las dos redes de difracción en disposición paralela con una separación de 2 cm. En este último caso las dos redes giran simultáneamente con la rotación de la plataforma manteniendo así el paralelismo entre ellas.

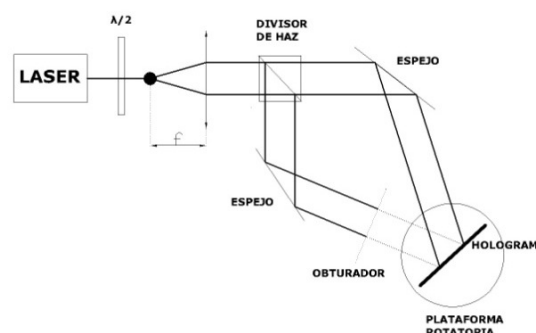


Fig. 1. Montaje para el registro y lectura de cada una de las redes holográficas del sistema, así como la lectura del sistema completo formado por dos redes en disposición paralela.

### 3. Desarrollo teórico

El desarrollo teórico que interpreta el comportamiento de la difracción de la luz en redes periódicas de volumen está basado en la teoría de dos ondas acopladas desarrolladas por H. Kogelnik [6]. Para el caso particular de redes de fase en geometría de transmisión se considera que la red de difracción está formada por la modulación periódica del índice de refracción.

El campo difractado  $S$  a la salida de la red de espesor  $d$  viene dado por la expresión

$$S(d) = R(0) \frac{\sin \left[ \left( \left( \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda \cos \theta_B} \right)^2 + \left( \frac{d \cdot \Delta \theta \cdot K}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{\left( 1 + \left( \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda \cos \theta_B} \right)^{-2} \left( \frac{d \cdot \Delta \theta \cdot K}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

donde  $R(0)$  es la amplitud del campo incidente,  $\Delta \theta$  es la desviación angular con respecto a la incidencia Bragg y  $K=2\pi/\Lambda$  es el vector de red de periodo  $\Lambda$ .

Se define la eficiencia de difracción como la relación entre la intensidad del haz difractado a la salida del holograma entre la intensidad del haz incidente:

$$\eta = \frac{|S(d)|^2}{|R(0)|^2}. \quad (2)$$

La CSA de una única red de difracción es la representación de  $\eta$  en función de  $\Delta \theta$ . Como se observa en (1) y (2),  $\eta$  depende del espesor de la muestra, del ángulo de Bragg  $\theta_B$ , de la desviación  $\Delta \theta$  con respecto a  $\theta_B$ , de la modulación del índice de refracción  $\Delta n$ , de la longitud de onda  $\lambda$  y del modulo de vector de la red  $\Lambda$ .

A continuación se analiza la eficiencia de difracción del sistema formado por dos redes de difracción con el mismo periodo en disposición paralela (ver Fig. 2). Para ello se define  $R_i(0)$  como la amplitud del haz incidente sobre la red  $i$ ,  $S_i(d_i)$  la amplitud del haz difractado a la salida de la red  $i$  de espesor  $d_i$ , siendo  $i=1,2$ .

Las eficiencias de difracción correspondientes a las redes 1 y 2 vienen dadas por las expresiones:

$$\eta_1 = \frac{|S_1(d_1)|^2}{|R_1(0)|^2}, \quad (3)$$

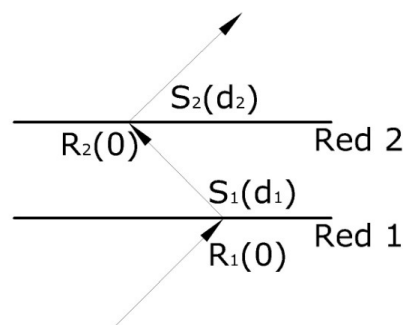


Fig. 2. Sistema compuesto por redes de difracción dispuestas en paralelo.

$$\eta_2 = \frac{|S_2(d_2)|^2}{|R_2(0)|^2} = \frac{|S_2(d_2)|^2}{|S_1(d_1)|^2} = \frac{|S_2(d_2)|^2}{\eta_1 |R_1(0)|^2}, \quad (4)$$

donde se ha considerado que la amplitud del campo difractado por la red 1 coincide con la amplitud del campo incidente sobre la red 2 ( $R_2(0)=S_1(d_1)$ ), salvo un factor de fase.

Definiendo la eficiencia de difracción total del sistema  $\eta_{total}$  como la relación entre la intensidad del haz difractado en la red 2 entre la intensidad del haz incidente sobre la red 1 y teniendo en cuenta la expresión anterior, se llega a

$$\eta_{total} = \frac{|S_2(d_2)|^2}{|R_1(0)|^2} = \eta_1 \cdot \eta_2. \quad (5)$$

Esta expresión depende de la desviación angular del haz de lectura con respecto a la incidencia Bragg  $\Delta \theta$  y por tanto su representación será la curva de selectividad angular total del sistema.

### 4. Resultados experimentales

En la Fig. 3a) y 3b) se representa las CSA asociadas a cada una de las redes de difracción (círculos) y su ajuste (línea continua) al modelo de dos ondas acopladas (fórmulas 1 y 2). Los parámetros de ajuste correspondientes a cada una de las redes de difracción son: (a)  $d_1=120 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_1=2,1 \times 10^{-3}$  y (b)  $d_2=111 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_2=2,1 \times 10^{-3}$ .

El modelo reproduce fielmente los resultados experimentales, incluyendo máximos y mínimos secundarios. Cabe destacar la alta eficiencia de difracción obtenida para las dos redes que se aproximan al límite teórico del 100% cuando se incide bajo condición Bragg ( $\Delta \theta=0$ ). Así mismo, la simetría de la CSA y los mínimos de intensidad

cercanos a cero indican la alta calidad y uniformidad de las redes registradas. El parámetro de calidad  $Q$ , también denominado de Klein-Cook [1], asociado a cada una de las redes es

$$Q_1 = \frac{2\pi\lambda d}{n\Lambda^2} = 66,85, \quad (6a)$$

$$Q_2 = 61,83, \quad (6b)$$

manifestando el comportamiento en régimen de Bragg (hologramas de volumen), ya que valores  $Q \gg 10$  indican régimen de Bragg,  $Q < 1$  régimen de Raman-Nath y cualquier otro valor régimen intermedio.

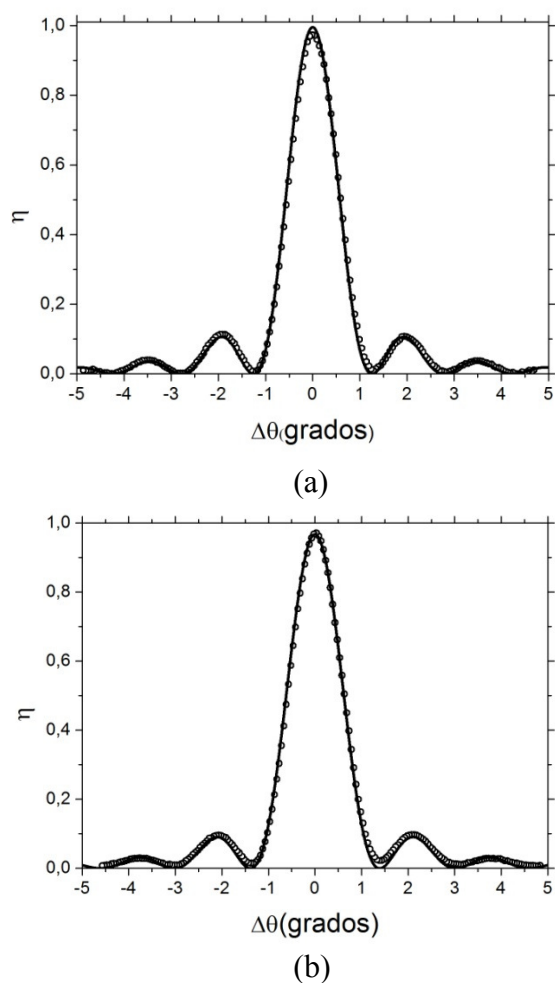


Fig. 3. Curvas de selectividad angular asociada a cada una de las redes de difracción de 500 líneas/mm analizadas por separado. Los círculos indican los datos experimentales y la línea continua el ajuste utilizando los parámetros (a)  $d_1=120 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_1=2.1 \times 10^{-3}$  y (b)  $d_2=111 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_2=2.1 \times 10^{-3}$ .

En la Fig. 4 se representa la CSA asociada al sistema compuesto por las dos redes en disposición paralela. Los puntos indican las medidas experimentales mientras que la línea continua es el ajuste empleando la expresión (5) y los parámetros de ajuste encontrados para cada una de las redes holográficas.

La eficiencia de difracción máxima (sin contar las pérdidas por reflexión de Fresnel) apenas se ha reducido, pasando de un 98% para una sola red a un 96% cuando se utilizan las dos redes en paralelo. Este resultado es destacable a la hora de implementar el sistema compuesto como sustituto de una única red, ya que la pérdida de energía al introducir un mayor número de elementos ópticos no sería significativa. Por otro lado, la anchura a mitad de altura de la CSA ha disminuido considerablemente, del orden de un 30%, en relación a las CSA de las redes holográficas analizadas por separado. La tolerancia del sistema se reduce a incidencias fuera de Bragg. Este resultado es de gran interés en dispositivos ópticos con elementos difractivos puesto que una sustitución adecuada del elemento por el sistema formado por dos redes reduciría la CSA y la CSE un 30%. Así mismo, cabe destacar la ausencia de máximos secundarios, responsables del crosstalk cuando el sistema compuesto se emplea como separador de canales (demultiplexador) o/y analizador espectral.

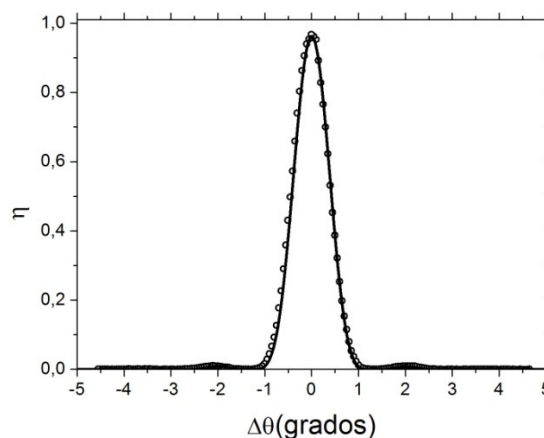


Fig. 4. CSA experimental (círculos) y ajuste (continua) del sistema óptico formado por dos redes holográficas del mismo periodo en disposición paralela. Los parámetros de ajuste son los indicados en la Fig. 3.

A modo de comparación, se presenta en la Fig. 5 las CSA asociadas a las dos redes individuales y al sistema completo.

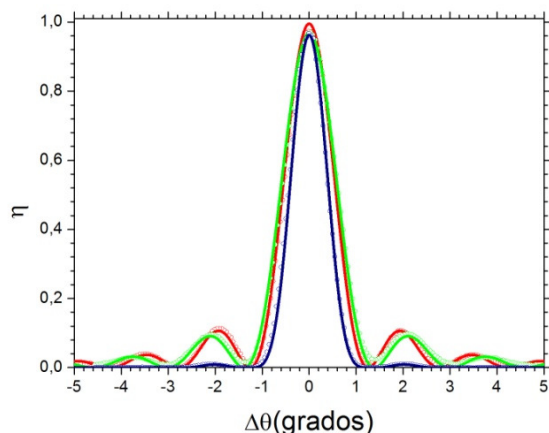


Fig. 5. Representación de las curvas de selectividad angular asociadas a las dos redes de difracción por separado (rojo y verde) y al sistema formado por dos redes en paralelo (azul). También se representan los correspondientes ajustes.

## 5. Aplicaciones

### 5.a. Microscopio confocal holográfico

Una de las aplicaciones de las redes de difracción consiste en su empleo como filtro espacial en microscopios confocales holográficos [2]. Este montaje fue propuesto como sustituto del filtrado espacial realizado por el pinhole en el plano focal imagen de un microscopio confocal convencional por el filtrado espacial originado por una red de difracción de volumen, gracias a su selectividad angular. En este trabajo proponemos reducir la CSA del sistema sustituyendo la red individual por el sistema compuesto por dos redes de volumen dispuestas en paralelo. El montaje experimental se muestra en la Fig. 6.

El haz de referencia es redirigido por un divisor de haz y focalizado con un objetivo de microscopio sobre el objeto a analizar. La luz reflejada en la superficie vuelve a pasar por el objetivo de microscopio, que ahora actúa como lente colimadora, incidiendo posteriormente sobre el sistema formado por dos redes paralelas. Si la porción iluminada del objeto está situada en el plano focal objeto, la lente colima la luz reflejada que incide en condición Bragg sobre el sistema de redes difractándose con eficiencia cercana al 100 % (que es la intensidad que se detecta). Sin embargo, si el objeto no está situado en el plano focal, la lente colimadora no actuaría como tal y la luz que

ilumina el sistema de redes no incide en condición Bragg. En este caso la luz sería difractada con eficiencias muy reducidas. Mediante una plataforma x-y-z se hace un barrido adecuado del objeto obteniéndose su imagen 3-D con una resolución dada por la CSA del sistema de redes. CSA estrechas son convenientes para mejorar la resolución espacial por lo que el sistema de dos redes es un elemento óptico adecuado para tal fin, mejorando la resolución del microscopio en un ~30% en comparación con la utilización de una única red.

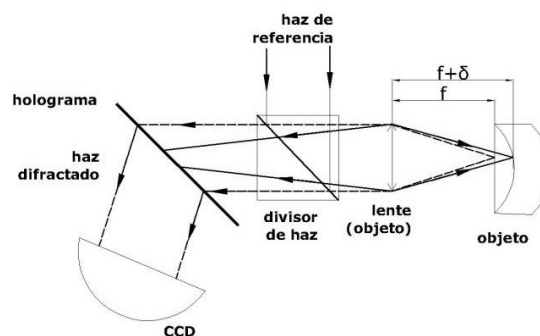


Fig. 6. Montaje esquemático de un microscopio confocal holográfico.

### 5.b. Analizador espectral

Una de las aplicaciones habituales de las redes de difracción es su uso como elemento dispersivo en analizadores espectrales o espectrómetros. La condición de Bragg no solo limita el ángulo de incidencia para el cual la eficiencia de difracción es máxima, sino que también limita la longitud de onda para la que esto ocurre. Este fenómeno es el principio operacional de los espectrómetros formados por redes de difracción. Por tanto, para iluminación con un haz colimado (una única dirección de propagación) y policromático la eficiencia será máxima para una única longitud de onda filtrando el resto de las frecuencias de acuerdo a las características o parámetros que definen la red. Según la teoría de ondas acopladas, el análogo espectral del campo difractado representado en Ec. (1) es:

$$S(d) = R(0) \frac{\sin \left[ \left( \left( \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda \cos \theta_B} \right)^2 + \left( \frac{d \cdot \Delta \lambda \cdot K^2}{8\pi n_l \cos \theta_B} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{\left( 1 + \left( \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda \cos \theta_B} \right)^{-2} \left( \frac{d \cdot \Delta \theta \cdot K}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

que relaciona la caída de la eficiencia de difracción con la desviación de la longitud de onda  $\Delta\lambda$  respecto la longitud de onda correspondiente a la condición Bragg. En la Fig. 7 se representa la CSE para una única red de difracción y para el sistema formado por dos redes en paralelo utilizando los parámetros obtenidos en la Fig. 3. Se observa que la anchura espectral a mitad de altura para una única red es de 120 nm, mientras que para el sistema formado por dos redes es de 90 nm. Por tanto se induce un incremento en la resolución del espectrómetro de un  $\sim 30\%$ , como queríamos demostrar. Además se reducen los máximos secundarios responsables del *crosstalk* a un 10% del valor correspondiente a una única red de difracción.

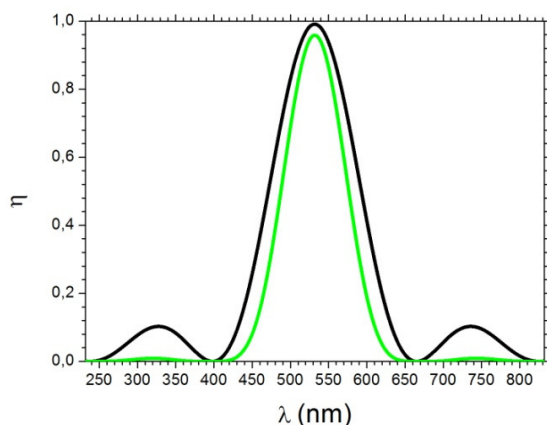


Fig. 7. CSE teórica de una única red de difracción (línea negra) y del sistema formado por dos redes en paralelo (línea verde) utilizando los parámetros indicados en el pie de la Fig. 3.

La resolución que ofrece el sistema es relativamente baja debido al periodo elevado de las redes de difracción utilizadas. Es esperable que redes de difracción con periodos reducidos mejoren notablemente la resolución del espectrómetro. Así, se estima que redes de 3000 líneas/mm y espesores similares a los estudiados en este trabajo darían lugar a una resolución del orden de 2.5 nm. El sistema de dos redes aquí propuesto, la reduciría en un  $\sim 30\%$  obteniéndose resoluciones de 1.8 nm. Estos valores son similares a los utilizados en espectrómetros convencionales cuyo elemento dispersivo consiste en redes de reflexión. Este tipo de redes son de fabricación compleja y de coste elevado a diferencia de las redes de transmisión holográficas propuestas en este trabajo. Además,

los espectrómetros convencionales requieren de un sistema formador de imagen que limita la cantidad de luz que llega al fotodetector, mientras que en el sistema propuesto formado por dos redes en disposición paralela se puede utilizar luz colimada evitando elementos ópticos extras y maximizando la cantidad de luz a analizar. Este aspecto es crítico, por ejemplo, en el análisis espectral de especímenes en experimentos de microscopía así como en astronomía para detectar astros lejanos de poca fluencia.

## 6. Conclusiones

En este trabajo hemos realizado un estudio de la difracción de la luz originada por un sistema óptico formado por dos redes de difracción de volumen en disposición paralela. Los resultados experimentales obtenidos se ajustan notablemente a la teoría de dos ondas acopladas cuando se analiza una única red de difracción, y al modelo desarrollado cuando se utiliza el sistema compuesto formado por dos redes de difracción en paralelo. Se demuestra que la curva de selectividad angular y espectral se estrecha un  $\sim 30\%$  para el sistema compuesto sin reducir prácticamente el valor de la eficiencia total. Este resultado es de gran interés en dispositivos ópticos con elementos difractivos puesto que una sustitución adecuada del elemento por el sistema formado por dos redes reduciría la CSA y la CSE un 30%. Aplicado a microscopios confocales holográficos y a espectrómetros supondría un incremento de la resolución en un 30% y una reducción del *crosstalk* debido a la ausencia de máximos secundarios en la CSA y CSE. Como ventaja adicional cabe destacar la sencilla fabricación y bajo coste de las redes de volumen fabricadas en el vidrio sol-gel, características idóneas para su fabricación a nivel comercial.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del Ministerio de Educación y Ciencia español TEC2008-04105.