

White-light optical vortices generated with holographic optical elements

Vórtices ópticos de luz blanca generados con elementos ópticos holográficos

J. Marín-Sáez¹, M.V. Collados^{1,S}, I.J. Sola^{2,S}, J. Atencia^{1,S*}

1. Universidad de Zaragoza. Departamento Física Aplicada. Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Facultad de Ciencias. Pedro Cerbuna, 12. 50009 ZARAGOZA (España)

2. Universidad de Salamanca. Departamento de Física Aplicada. Plaza de la Merced s/n, 37008 SALAMANCA (España)

*E-mail: atencia@unizar.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 01/06/2015

Accepted / Aceptado: 11/06/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.2.129

ABSTRACT:

A photograph of a white-light vortex obtained by means of volume phase holographic optical elements that allow creating achromatic vortices for a wide spectral range is shown. The elements have been recorded in dichromated gelatin and have a high damage threshold, so they are suitable for the generation of optical vortices with ultraintense femtosecond laser pulses.

Key words: Holographic optical elements, Volume gratings, Optical vortices, Aberration compensation, Optics education

RESUMEN:

Se presenta una fotografía de un vórtice de luz blanca obtenido mediante elementos ópticos holográficos de volumen y fase que permiten generar vórtices acromáticos para un amplio rango espectral. Los elementos se han registrado en gelatina dicromatada y presentan un alto umbral de daño, por lo que son adecuados para la generación de vórtices ópticos a partir de pulsos ultraintensos de femtosegundos.

Palabras clave: Elementos ópticos holográficos, Redes de volumen, Vórtices ópticos, Compensación de aberraciones, Educación en óptica

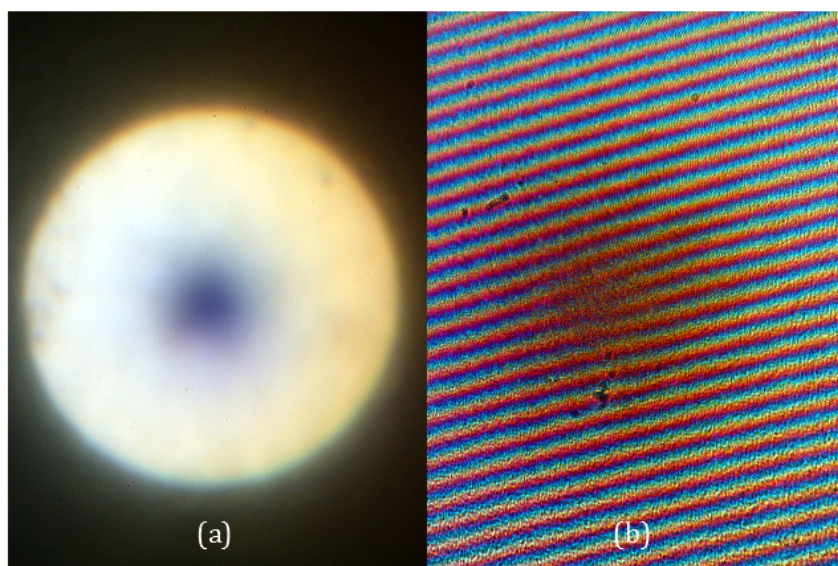


Fig.1. (a) Vórtice acromático de luz blanca (b) Interferencia del vórtice con una onda plana.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J.E. Curtis, B. A. Koos, D.G. Grier, "Dynamic holographic optical tweezers," *Opt. Comm.* **207**, 169-175 (2002).
[http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)01524-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0030-4018(02)01524-9)
- [2] G.A. Swartzlander, Jr., "The optical vortex lens," *Optics & Photonics News* **17**, 37-41 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1364/OPN.17.11.000039>
- [3] S. Fürhapter, A. Jesacher, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, "Spiral interferometry," *Opt. Lett.* **30**, 1953-1955 (2005).
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.30.001953>
- [4] G. Molina-Terriza, J. P. Torres, L. Torner, "Twisted photons," *Nat. Phys.* **3**(5), 305-310 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1038/nphys607>
- [5] M. S. Bigelow, P. Zerom, R. W. Boyd, "Breakup of ring beams carrying orbital angular momentum in sodium vapor," *Phys. Rev. Lett.* **92**(8), 083902 (2004).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.083902>
- [6] Z. Chen, M. F. Shih, M. Segev, D. W. Wilson, R. E. Muller, P. D. Maker, "Steady-state vortex-screening solitons formed in biased photorefractive media," *Opt. Lett.* **22**(23), 1751-1753 (1997).
<http://dx.doi.org/10.1364/OL.22.001751>
- [7] M. Fisher, C. Siders, E. Johnson, O. Andrusyak, C. Brown, M. Richardson, "Control of filamentation for enhancing remote detection with laser induced breakdown spectroscopy," *Proc. SPIE* **6219**, 621907-5 (2006).
<http://dx.doi.org/10.1117/12.663824>
- [8] A. Villamarín, J. Atencia, M. V. Collados, M. Quintanilla, "Characterization of transmission volume holographic gratings recorded in Slavich PFG04 dichromated gelatin plates," *Appl. Opt.* **48**, 4348-4353 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.48.004348>
- [9] Z.S. Sacks, D. Rozas, G.A. Swartzlander Jr., "Holographic formation of optical-vortex filaments", *J. Opt. Soc. Am. B* **15**, 2226-2234 (1998).
<http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.15.002226>
- [10] J. Atencia, M.V. Collados, M. Quintanilla, J. Marín-Sáez, I.J. Sola, "Holographic optical element to generate achromatic vortices" *Opt. Express* **21**, 21057-21062 (2013).
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.21.021057>
- [11] P. Bañares-Palacios, S. Álvarez-Álvarez, J. Marín-Sáez, M.V. Collados, D. Chemisana, J. Atencia, "Broadband behaviour of transmission volume holographic optical elements for solar concentration" *Opt. Express* **23**, A671-A681 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1364/OE.23.00A671>

1. Introducción

Un vórtice óptico es una onda plana con una singularidad de fase a lo largo de un eje, en el que está indefinida y la intensidad es nula. En un plano perpendicular a la dirección de propagación se observa un anillo de luz con una zona oscura en el centro. La fase varía de forma helicoidal alrededor de la singularidad, de 0 a $2\pi m$, siendo m un número entero que recibe el nombre de carga topológica.

Existen numerosos campos en los que en los últimos años se han desarrollado aplicaciones de los vórtices ópticos: pinzas ópticas para atrapar partículas neutras [1], ya que en el centro hay ausencia de gradiente de fuerza, coronografía estelar [2], interferometría [3], información cuántica [4]. Además, hay un gran interés por el estudio de la propagación no lineal de pulsos ultracortos y ultraintensos de vórtices ópticos [5,6], con posibles aplicaciones en espectroscopía láser remota de rotura inducida (LIBS) [7] y control de fase en generación de armónicos de orden superior.

Algunas aplicaciones emplean fuentes de luz de espectro ancho, por lo que es necesario conseguir el mismo momento angular y perfil espacial para todas las longitudes de onda del espectro, es decir, hay que obtener un vórtice acromático. Otro requisito para algunas aplicaciones en las que se emplea como fuente

de luz un láser que emite pulsos ultracortos y ultraintensos es que los elementos que generen el vórtice tienen que tener un alto umbral de daño sin distorsionar la anchura ni la forma del pulso.

Una manera de obtener un vórtice óptico es mediante un holograma, que es el registro en un material fotosensible de la interferencia entre dos ondas: una onda objeto y una onda de referencia. Cuando se ilumina el holograma con una onda similar a la de referencia se obtiene una onda similar a la objeto. Si registramos un holograma con un vórtice y una onda plana y después iluminamos con otra onda plana, produciremos un vórtice.

Los hologramas pueden clasificarse en hologramas de volumen o delgados según la relación entre el espesor del medio y el espaciado de las franjas de interferencia. En los hologramas de volumen se obtiene únicamente el haz transmitido (orden 0 de difracción), y el haz difractado (orden +1). En cambio, en los hologramas delgados aparecen múltiples órdenes de difracción. Los hologramas también pueden clasificarse según la respuesta del material fotosensible: si las variaciones de intensidad a lo largo del material en el registro se traducen en variaciones del coeficiente de absorción tenemos hologramas de amplitud, y si se traducen en variaciones del espesor o del índice de refracción son hologramas de fase.

La imagen de la Fig. 1 se ha obtenido mediante la combinación de dos elementos ópticos holográficos de volumen y fase, en el marco de nuestro trabajo para diseñar y construir un dispositivo holográfico que genere vórtices acromáticos, que pueda ser empleado con fuentes de luz policromáticas, y que presente un alto umbral de daño, para poder incidir sobre él con pulsos láser ultracortos y ultraintensos. En concreto se ha diseñado para poder ser empleado con los láseres de femtosegundo de la Universidad de Salamanca y del Centro de Láseres Pulsados (CLPU), centrados en 800 nm y con anchura espectral de 50 nm.

2. Realización

Para obtener la onda objeto portadora de un vórtice calculamos un holograma generado por ordenador (CGH) con la interferencia de una onda plana y un vórtice de carga topológica $m = 1$. El CGH se imprime en papel y se transfiere fotográficamente sobre película Kodak TMAX 100, obteniendo una red delgada de amplitud de 14,7 líneas/mm con una dislocación en el centro, como se muestra en la Fig. 2. EL CGH así registrado presenta una gran absorción, por lo que no puede ser iluminado con un láser de alta intensidad, ya que se dañaría. Por ello copiamos por contacto la figura de interferencia sobre gelatina dicromatada en placas comerciales Slavich PFG04 [8], de forma que obtenemos un holograma delgado de fase que ya puede ser iluminado con un láser, aunque por ser delgado se obtienen múltiples órdenes difractados y su eficiencia es baja.

Para obtener eficiencia cercana al 100% necesitamos registrar un holograma de volumen. El montaje se esquematiza en la Fig. 2. El haz de 6 W y 532 nm de un láser Coherent Verdi se divide en dos haces que se filtran y expanden con los filtros espaciales FE_1 y FE_2 y se coliman con las lentes L_1 y L_4 . El haz correspondiente a la onda objeto incide sobre el CGH de fase para obtener, en el orden +1 difractado, una onda plana portadora de vórtice, que se propaga en dirección a la placa holográfica. Allí interfiere con el haz de referencia formando un determinado ángulo sobre una placa de gelatina dicromatada Slavich PFG04, donde se registra el holograma de volumen.

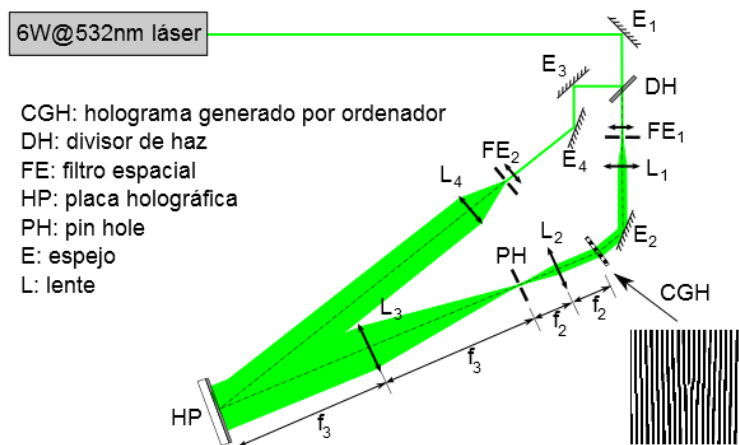


Fig.2. Montaje experimental para el registro de un holograma de volumen con una onda plana y un vórtice óptico, con filtrado 4f.

Hay diferentes efectos que modifican la distribución de intensidad alrededor del vórtice en la propagación. Un efecto habitual que se observa en los hologramas generados por ordenador es la difracción de luz en forma de estrella cuando el vórtice se ha propagado a lo largo de una distancia suficientemente grande, debido a la resolución espacial de la impresión [9]. Para solucionarlo se introduce en el montaje un filtro espacial $4f$, formado por las lentes L_2 y L_3 y un "pin hole" de 30 micras. La lente L_2 realiza la transformada de Fourier de la distribución de amplitud compleja del haz objeto en el plano del CGH; el "pin hole" filtra las frecuencias espaciales altas (debidas al pixelado, ruido...), que no focalizan en el eje, y bloquea el resto de órdenes de difracción producidos por el CGH. La lente L_3 realiza la transformada de Fourier inversa para conseguir en la placa holográfica la imagen de la distribución de amplitud compleja de la onda de vórtice que teníamos en el plano del CGH, escalada con una relación $-f_3'/f_2'$.

Dado que los hologramas son elementos que operan por difracción, si en la reconstrucción incidimos con un haz policromático, la luz de cada longitud de onda se difractará en una dirección distinta. Para conseguir un vórtice acromático se ha diseñado y construido un elemento óptico [10] compuesto por dos hologramas de volumen y fase: uno de ellos registrado con el montaje explicado anteriormente con un vórtice y una onda plana (H_{II}) y otro registrado con la interferencia de dos ondas planas (H_I), manteniendo el mismo ángulo entre haces. Si H_I y H_{II} están separados (Fig. 3(a)), al iluminar con un haz policromático en la reconstrucción con un ángulo α_c , el haz difractado por el holograma H_I tendrá una dirección α_i distinta para cada longitud de onda e incidirá en un punto distinto de H_{II} . A la salida de H_{II} , para todas las longitudes de onda la dirección será la misma (α_c) y el vórtice se encontrará en la misma posición, pero la distribución gaussiana estará desplazada. Si ambos se sitúan pegados (Fig. 3(b)), a la salida del elemento compuesto todas las longitudes de onda se difractan en la misma dirección α_c con la distribución gaussiana centrada, por lo que se obtiene un vórtice acromático, sin dispersión cromática espacial.

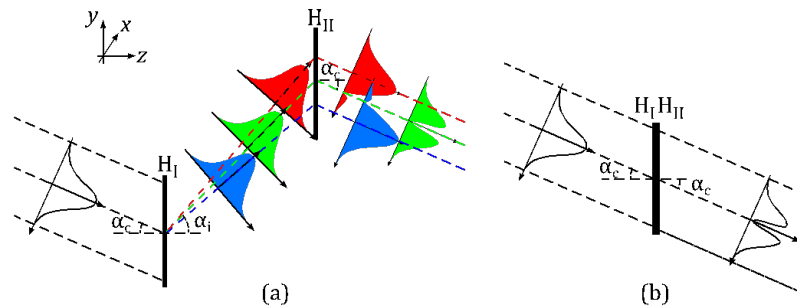


Fig.3. Onda de reconstrucción incidiendo en los hologramas H_I y H_{II} (a) separados y (b) pegados.

Durante el registro del holograma H_I se ha girado la placa holográfica un pequeño ángulo en torno al eje z , de forma que al unir los dos hologramas el orden 0 de difracción se propague en una dirección ligeramente distinta al orden 1 y después de una cierta distancia ambos órdenes se encuentren separados.

Debido a la selectividad cromática de los hologramas de volumen [11], el elemento holográfico presenta una eficiencia que varía con la longitud de onda. Los hologramas registrados se han optimizado para obtener máxima eficiencia a 800 nm. La Fig. 4 muestra la eficiencia difractiva en función de la longitud de onda medida para el elemento compuesto, que alcanza el 90% en condición de Bragg para 800 nm.

3. Resultado: la fotografía

Para obtener un vórtice con luz visible hemos iluminado el elemento óptico holográfico con una fuente de luz de tungsteno colimada de 5 mm de diámetro (Ocean Optics LS-1) con un espectro de anchura a mitad de altura de 250 nm, centrado en 630 nm. Dado que el elemento está optimizado para una eficiencia óptima a 800 nm, no difracta con tanta eficiencia en la zona central del espectro visible, pero ajustando la dirección de iluminación para obtener máxima eficiencia en torno a 500 nm se obtiene suficiente luz para realizar la fotografía. A la salida del elemento tenemos el orden 0 y +1 de difracción, ambos en luz blanca, que se propagan en una dirección ligeramente diferente debido al giro en z de los elementos

constituyentes explicado en el apartado 2, de forma que a una distancia de 1 m ambos haces están perfectamente separados.

Para obtener la fotografía de la Fig. 1(a) se ha colocado una cámara digital Canon EOS 1000D a 1 m de distancia del elemento holográfico, en perpendicular a la dirección de propagación del haz difractado. Se le ha quitado la óptica para que el haz incida directamente sobre el dispositivo CCD. Para obtener la fotografía de la Fig. 1(b) se ha colocado la CCD cerca del elemento holográfico, de forma que los órdenes 0 y +1 se superponen, dando lugar a un conjunto de franjas de interferencia que muestran claramente la dislocación en el centro y confirman la acromatización del vórtice generado para un amplio espectro.

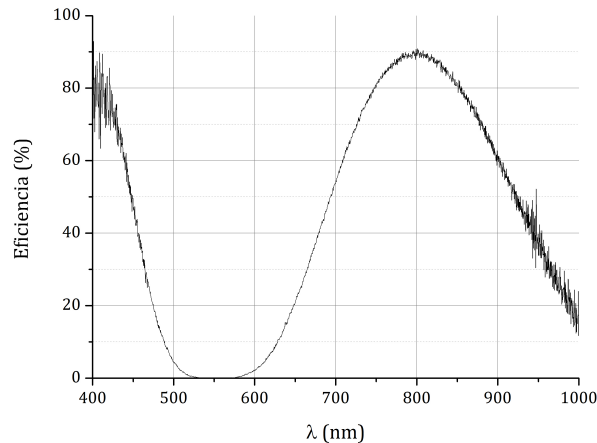


Fig. 4. Eficiencia del orden 1 de difracción en función de la longitud de onda de reconstrucción.

4. Conclusiones

Se ha obtenido un vórtice óptico a partir de un holograma generado por ordenador (CGH), que ha sido empleado como onda objeto en el registro de un elemento óptico holográfico de volumen y fase en una placa de gelatina dicromatada Slavich PFG04. Posteriormente se ha unido dicho elemento a un holograma de volumen y fase registrado con dos ondas planas para conseguir la acromatización del vórtice, construyendo así un dispositivo compacto y fácil de alinear. Gracias a la selectividad cromática y el alto umbral de daño del material fotosensible utilizado como medio de registro, el elemento holográfico compuesto puede ser iluminado con pulsos ultracortos y ultraintensos obteniendo un vórtice óptico acromático altamente eficiente. La fotografía presentada demuestra la acromatización del vórtice para luz de amplio espectro.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (proyecto FIS2012-35433) y la Diputación General de Aragón (Grupo Consolidado TOL, T76).