

Fabricación de redes de difracción en vidrios con un láser Nd:YVO₄

Diffractive gratings fabrication on glass with a laser Nd:YVO₄

Ana I. Gómez-Varela^(1,S), Antonio Castelo⁽¹⁾, Carlos Gómez-Reino^(1,S),
Xermán F. de la Fuente⁽²⁾, María Teresa Flores-Arias^(1,*)

1. Departamento de Física Aplicada, Área de Óptica, Facultade de Física, Universidade de Santiago de Compostela, 15782, Santiago de Compostela, España.
2. Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, Universidad de Zaragoza-CSIC, M^a de Luna, 3 50018, Zaragoza, España.

(*) Email: maite.flores@usc.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 20/11/2009. Versión revisada / revised versión: 20/02/2010. Aceptado / Accepted: 21/02/2010

RESUMEN:

Se presenta un método alternativo para la fabricación de redes de difracción de fase, rápido y de una sola etapa, que consiste en la modificación de las características de un sustrato de vidrio mediante la ablación de muestras metálicas. La configuración experimental es sencilla y la repetibilidad del proceso alta, siendo posible obtener elementos de diferentes características reajustando los parámetros láser. Con este procedimiento, se graban redes de difracción sobre un sustrato de vidrio sodo-cálcico haciendo ablación de un blanco de latón mate con un láser Nd:YVO₄. La caracterización física de las redes se hace por microscopía confocal. Se estudia la eficiencia difraccional del primer orden para una longitud de onda de 632,8 nm.

Palabras clave: Redes de Difracción, Ablación Láser, Láser Nd:YVO₄, Microscopía Confocal, Eficiencia Difraccional.

ABSTRACT:

An alternative, rapid and one-step method for the fabrication of phase diffractive gratings consisting of the sequential ablation of metallic samples to change the features of a glass substrate is proposed. The experimental set-up is simple and the process presents a high repeatability, making it possible to obtain elements with different features by readjusting the laser parameters. According to this method diffraction gratings are written on a sodo-calcic glass substrate making ablation on a brass target with a Nd:YVO₄ laser. The gratings are characterized in terms of their physical properties by confocal microscopy. The first-order diffraction efficiency at normal incidence under 632.8 nm wavelength is measured.

Key words: Diffractive Gratings, Laser Ablation, Nd:YVO₄ Laser, Confocal Microscopy, Diffraction Efficiency.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] M. Flury, A. Benatname, P. Gérard, P. C. Montgomery, J. Fontaine, T. Engel, J. P. Schunck, E. Fogarassy, "Excimer laser ablation lithography applied to the fabrication of reflective diffractive optics", *Appl. Surf. Sci.* **208-209**, 238-244 (2003).
- [2] M. R. Wang, H. Su, "Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication", *Appl. Opt.* **37**, 7568-7576 (1998).
- [3] M. B. Flemming, M. C. Hutley, "Blazed diffractive optics", *Appl. Opt.* **36**, 4635-4643 (1997).
- [4] L. Li, A. Y. Li, C. Huang, D. A. Grewell, A. Benatar, Y. Chen, "Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process", *Opt. Eng.* **45**, 113401 (2006).
- [5] T. J. Suleski, D. C. O'Shea, "Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers", *Appl. Opt.* **34**, 7507-7517 (1995).

- [6] J. Kim, D. C. Joy, S.-Y. Lee, "Controlling resist thickness and etch depth for fabrication of 3D structures in electron-beam grayscale lithography", *Microelectron. Eng.* **84**, 2859-2864 (2007).
- [7] M. T. Gale, C. Gimkiewicz, S. Obi, M. Schnieper, J. Söchtig, H. Thiele, S. Westenhöfer, "Replication technology of optical microsystems", *Opt. Lasers Eng.* **43**, 373-386 (2005).
- [8] V. Kalima, J. Pietarinen, S. Siitonen, J. Immonen, M. Suvanto, M. Kuittinen, K. Mönkkönen, T. T. Pakkanen, "Transparent thermoplastics: Replication of diffractive optical elements using micro-injection molding", *Opt. Mater.* **30**, 285-291 (2007).
- [9] A. Y. Yi, Y. Chen, F. Klocke, G. Pongs, A. Demmer, D. Grewell, A. Benatar, "A high volume precision compression molding process of glass diffractive optics by use of a micromachined fused silica wafer mold and low T_g optical glass", *J. Micromech. Microeng.* **16**, 2000-2005 (2006).
- [10] A. Castelo Porta, *Diseño y Fabricación de Dispositivos Híbridos Planares para Micro-Óptica mediante Irradiación y Ablación Láser de Substratos de Vidrio*, Tesis de Doctorado, Universidad de Santiago de Compostela, España (2008).
- [11] M. T. Flores-Arias, A. Castelo, C. Gómez-Reino, G. F. de la Fuente, "Phase diffractive optical grating on glass substrates by laser ablation", *Opt. Commun.* **282**, 1175-1178 (2009).
- [12] M. T. Flores Arias, A. Castelo Porta, C. Gómez-Reino Carnota, G. de la Fuente Leis, "Procedimiento de obtención de redes de difracción de fase en un sustrato mediante ablación láser de un blanco", Patente No. Registro Español: P 2007 03475, No. Registro Internacional: PCT/ES2008/070241, Fecha de registro: 28/12/2007.
- [13] D. Nieto, C. Gómez-Reino, M. T. Flores Arias, "Fabricación de microlentes con un láser de Nd:YVO₄", *Opt. Pura Apl.* **42**, 241-244 (2009).

1. Introducción

Los elementos ópticos difractivos están adquiriendo cada vez más importancia en muchas aplicaciones, como interconexiones ópticas, aplicaciones de almacenamiento de datos, microscopía confocal, etc. [1,2]. Aunque en la actualidad existen numerosas tecnologías para fabricar estos elementos, la mayor parte de ellas se llevan a cabo en dos pasos. El primero es la obtención de un molde con las características deseadas. Las técnicas más utilizadas en la fabricación de moldes son el corte con punta de diamante [3,4] y la litografía [5,6]. El segundo paso consiste en el replicado masivo de estos elementos empleando materiales de bajo coste. Los principales métodos de replicado son el moldeo por inyección y el grabado en relieve con calor en el caso de polímeros [7,8], así como el moldeo por compresión para vidrios [9]. La ablación láser presenta potenciales ventajas frente a las técnicas anteriores como la simplicidad, flexibilidad y rapidez del proceso [10,11].

En este trabajo se aplica un método alternativo de fabricación de redes de difracción de fase sobre sustratos de vidrio basado en la Patente P200703475 [12]. Este procedimiento ha sido aplicado por alguno de los autores en la fabricación de microlentes [13] y se estudia ahora su aplicación en la fabricación de redes de difracción de fase. Las redes de difracción se obtienen provocando la

ablación de un blanco metálico de latón con el fin de conseguir la transferencia de partículas procedentes del mismo a un sustrato de vidrio sodocálcico comercial. Para ello se utiliza un láser Nd:YVO₄ operando en régimen Q-switch con longitud de onda de 1064 nm y una anchura del pulso de nanosegundos. Las redes fabricadas se caracterizan con microscopía confocal y se mide la eficiencia del primer orden de difracción para una longitud de onda de 632,8 nm.

2. Experimento

La Fig. 1 muestra la configuración experimental utilizada para fabricar las redes de difracción de fase. Se usa un láser Nd:YVO₄ bombeado por diodos operando en régimen Q-switch a una longitud de onda de 1064 nm. Sobre un blanco metálico de latón-mate se coloca un sustrato de vidrio sodocálcico. Estos materiales han sido elegidos como los más adecuados para la fabricación de las redes tras realizar un mapa de compatibilidad entre distintos sustratos de vidrios comerciales y blancos metálicos, estudiándose la modificación de sus características después de la ablación con el láser utilizado. Los vidrios de tipo sodocálcico son de bajo coste y alta disponibilidad comercial. En su composición se encuentran presentes, entre otros, SiO₂ (70%), Na₂O (15%) y CaO (6%). El láser atraviesa el vidrio y se focaliza

sobre la superficie del blanco metálico. Un sistema de dos espejos galvanométricos permite controlar, mediante software comercial, el desplazamiento del haz para realizar la estructura deseada. Asimismo, este software permite controlar los parámetros de operación del láser tales como la frecuencia de repetición, la potencia y la velocidad de desplazamiento entre otros.

Las redes de difracción de fase se graban sobre el sustrato de vidrio realizando una serie de barridos con el haz láser focalizado sobre la superficie del blanco, situado en contacto con el vidrio, con una lente de 100 mm de distancia focal que permite trabajar en un área de $80 \times 80 \text{ mm}^2$. El diámetro nominal del haz es de $15 \text{ }\mu\text{m}$. La pluma de ablación generada se dirige hacia el sustrato de vidrio y provoca que iones del blanco metálico se transfieran al mismo. Estos iones modifican la composición y propiedades (el índice de refracción, entre otros) de las zonas del sustrato deseadas, formándose una red de difracción de fase. Con la configuración sustrato-blanco en contacto se consigue la actuación más eficiente de la pluma de ablación sobre el sustrato. Durante la ablación el blanco metálico se calienta y, al encontrarse en contacto con el vidrio, hace que funda la capa superficial, favoreciendo así la incorporación de las partículas metálicas arrancadas del metal. Además, se reduce la expansión de la pluma hacia los bordes del sustrato y se evita la oxidación del material del blanco en su camino hacia el sustrato que tendría lugar al atravesar una atmósfera reactiva.

Tras la irradiación, una cierta cantidad de residuos metálicos, que no se han incorporado al sustrato, quedan depositados sobre la superficie del vidrio. Estos son eliminados introduciendo el vidrio en un baño de *aqua regia* durante 1 hora. Este proceso de limpieza de la muestra es muy importante para evitar que se produzcan fenómenos de difusión en los residuos depositados.

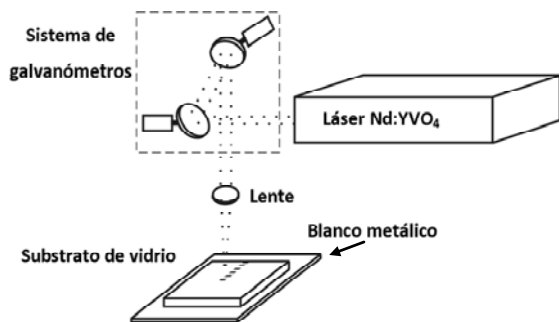


Fig. 1. Configuración experimental con sistema de galvanómetros.

3. Resultados y discusión

Se realizaron una serie de pruebas preliminares para conocer los parámetros de trabajo más adecuados para realizar ablación de blancos de latón-mate sobre sustratos de vidrios sodo-cálcicos con el láser Nd:YVO₄. Se encontró que los mejores parámetros de trabajo son 3 W (potencia láser), 200 KHz (frecuencia de repetición) y 450 mm/s (velocidad de desplazamiento del haz). La optimización de estos parámetros se basa en dos condiciones imprescindibles para la fabricación de las redes: (a) que el daño practicado sobre la superficie del sustrato sea mínimo; y (b) superar el umbral de ablación del metal.

Una de las cuestiones más interesantes en lo que a la fabricación de redes de difracción se refiere es la posibilidad de elegir los períodos de las mismas. Para ello, el período o separación entre los barridos realizados con el láser para obtener la red, se puede controlar modificando el valor de un parámetro que llamaremos "factor de superposición". En la Fig. 2 se muestran algunos de los resultados obtenidos que han sido analizados con microscopía confocal. Son fotografías de la superficie de tres muestras fabricadas con distintos factores de superposición e idénticos parámetros de trabajo: 450 mm/s, 200 KHz y 3 W. En a) y b) se aprecia claramente un patrón regular grabado sobre el vidrio, mientras que en c) no es posible distinguir ningún tipo de patrón debido a que el alto factor de superposición provoca la deposición irregular de material a lo largo de la superficie del sustrato.

En la Fig. 3 se muestran los resultados del estudio de la dependencia del período de las redes fabricadas con el factor de superposición. Para estudiar la influencia de la potencia y la frecuencia de repetición sobre el período, se han fabricado redes con distintas condiciones de trabajo y factores de superposición, manteniendo fija la velocidad de desplazamiento del haz. Se observa que el período de las redes depende de forma lineal decreciente con el factor de superposición siendo, sin embargo, independiente del resto de parámetros de trabajo. Para factores de superposición comprendidos entre el 10% y el 80% se han obtenido redes de difracción de períodos que varían desde 90 a 20 μm , aproximadamente. Por otro lado, cabe destacar que se ha encontrado un límite a este proceso de fabricación ya que para factores de superposición superiores al 80% no ha sido posible grabar ningún patrón difractivo en la superficie del vidrio.

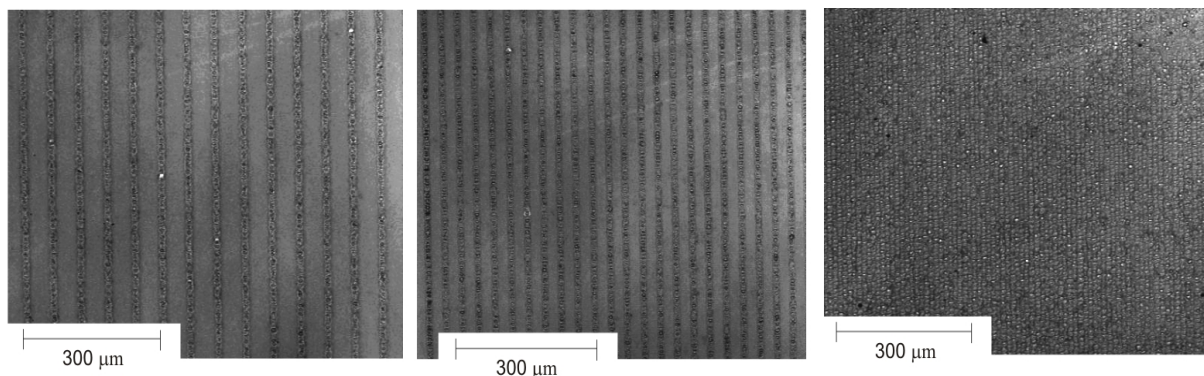


Fig. 2. Fotografías obtenidas mediante microscopía confocal de: a) y b) redes de difracción fabricadas con un factor de superposición del 40% y 60%, respectivamente, y c) depósito irregular de material para un factor de superposición del 90%. Parámetros de trabajo: 450 mm/s, 200 KHz y 3 W en todos los casos.

Finalmente, se han caracterizado las redes atendiendo a su eficiencia, obteniendo los mejores valores para las fabricadas con parámetros 450 mm/s, 200 KHz y 3 W. Se ha medido la eficiencia del primer orden, para una longitud de onda de 632,8 nm. En la Fig. 4 se puede ver el patrón de difracción producido por una red fabricada con dichos parámetros. La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos de la eficiencia alcanzando un valor máximo de 13% para una red de período 40 μm fabricada con un factor de superposición del 60%. Para factores de superposición mayores se observa una disminución importante de la eficiencia. Los valores encontrados se alejan de los que corresponden a una red de fase binaria ideal, lo que nos hace pensar que la red fabricada presenta una ligera modulación de amplitud. Asimismo, se produce una atenuación de la luz incidente en los depósitos de ablación que no se han conseguido eliminar totalmente de la superficie del vidrio.

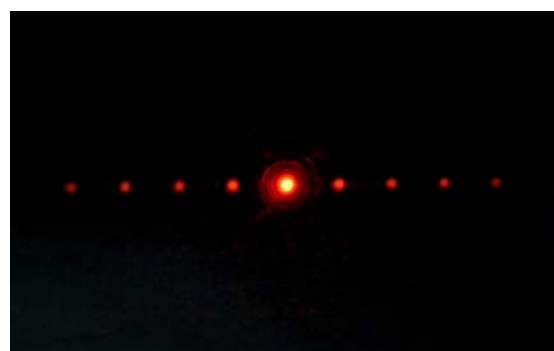


Fig. 4. Patrón de difracción obtenido para la red de difracción iluminada con una $\lambda = 632,8$ nm.

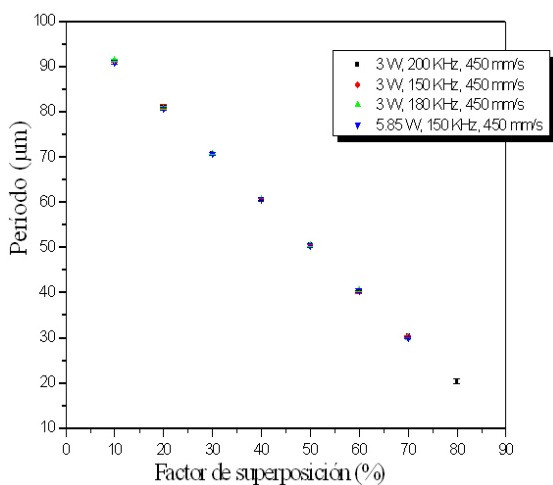


Fig. 3. Período frente al factor de superposición de las redes fabricadas con distintos parámetros de trabajo.

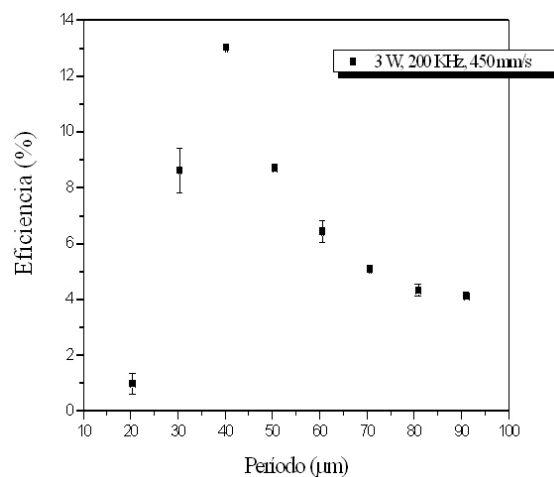


Fig. 5. Eficiencia del primer orden de difracción frente al período de la red fabricada con los parámetros de trabajo óptimos.

4. Conclusiones

Se aplica un método para la fabricación de redes de difracción de fase rápida y de una sola etapa, que no necesita la utilización de elementos externos como resinas o máscaras, lo que minimiza los errores. Este método consiste en la ablación

secuencial de muestras metálicas con el fin de lograr la modificación de las características del sustrato de vidrio; la configuración experimental es sencilla y la repetibilidad del proceso alta, siendo posible obtener elementos de diferentes características de forma sencilla reajustando los parámetros láser, y con un área de trabajo de hasta $80 \times 80 \text{ mm}^2$. Mediante la ablación láser de un blanco metálico se ha conseguido la modificación de las características de los sustratos de vidrio gracias a la transferencia de partículas metálicas al mismo. Siguiendo este procedimiento, se han grabado redes de difracción sobre un sustrato de vidrio sodo-cálcico usando un blanco de latón mate irradiado con un láser Nd:YVO₄. La caracterización física de las redes obtenidas se ha hecho por microscopía confocal. Se han obtenido redes de difracción de diferentes períodos, comprendidos entre 20 y 90 μm , y se ha mostrado que el período depende únicamente del solapamiento entre los diferentes barridos que realiza el haz láser, siendo

esta dependencia lineal decreciente con el factor de superposición. Finalmente, se ha obtenido que la mayor eficiencia difraccional del primer orden es del 13% para una red de período 40 μm fabricada con un factor de superposición del 60% y con parámetros de trabajo: 3 W, 200 KHz y 450 mm/s. Se ha comprobado que para factores de superposición superiores al 80% no se obtienen redes de difracción, sino depósitos irregulares de material sobre el sustrato.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos 2007/075 Grupos Emergentes de la Dirección Xeral de Promoción Científica e Tecnolóxica do SUG/FEDER e INCITE08PX1B206013PR de la Xunta de Galicia y TEC2006-10469 del Ministerio de Educación y Ciencia.