Diffraction gratings over cylindrical surfaces by laser ablation

Redes de difracción sobre superficies cilíndricas mediante ablación láser

Maite Irigoyen^(*), Isidoro Jiménez-Castillo, Francisco Javier Salgado-Remacha,
Luis Miguel Sánchez-Brea^(S), Eusebio Bernabeu^(S)

Departamento de Óptica, Universidad Complutense de Madrid, Av. Complutense S.N., 28040 Madrid, Spain.

^(*) Email: maiteirigoyen@ucm.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 17/05/2013. Revised / Revisado: 02/07/2013. Accepted / Aceptado: 03/07/2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.46.3.275>

ABSTRACT:

We present a system for diffraction gratings engraving over cylindrical substrates. The manufacturing of the gratings is performed using a Q-switched nanosecond pulsed laser. We have used a mechanical system with six motorized stages. Five of them are linear stages, and the other one is a high precision rotator. The assembly also comprises various devices that monitorize in real time the manufacturing process. A home-made software synchronizes and controls the entire system.

Key words: Optical Encoder, Laser, Diffraction Grating, Laser Ablation, Annular Substrates.

RESUMEN:

En este trabajo presentamos un sistema para realizar la grabación de redes de difracción sobre sustratos cilíndricos. La grabación de dichas redes se realiza mediante un sistema de laser pulsado de nanosegundos modulado por Q-switching. Disponemos de un sistema mecánico de seis ejes motorizados (cinco de ellos lineales paso a paso, más un motor rotador de alta precisión) con el fin de desplazar verticalmente el cabezal laser y girar angularmente el anillo de forma sincronizada para realizar la grabación de las redes. Se dispone también de diversos dispositivos que monitorizan en tiempo real el proceso de grabación. Se ha realizado un software de control para sincronizar todo el sistema. Por último mostraremos diversos resultados obtenidos tanto de los pasos previos al grabado como de las redes de difracción grabadas.

Palabras clave: Codificador Óptico, Láser, Red de Difracción, Ablación Láser, Sustratos Anulares.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1]. H. Cho, *Optomechanics, Fusión of Optical and Mechatronic Engineering*, CRC Press (2006).
- [2]. I. Alejandre, M. Artés, "Análisis de la pérdida de precisión en codificadores ópticos lineales por deformación de la retícula grabada", *Información Tecnológica* **17** (6), 7-12 (2006). [DOI](#)
- [3]. J. B. Sáez Landete, *Generación de Señales Ópticas de Referencia para Posicionamiento Absoluto de Alta Resolución*, PhD Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Spain (2006).
- [4]. RSM PowerLine E. Maintenance and Integration Manual. Rofin Baasel. (2010).
- [5]. J. C. Miller, R. F. Haglund, *Laser Ablation and Desorption*, Academic Press (1998).
- [6]. F. J. Salgado-Remacha, *Diffraction Optical Elements by Nanosecond Pulsed Laser*, PhD Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Spain (2011).
- [7]. E. Keren, O. Kafri, "Diffraction effects in moiré deflectometry", *J. Opt. Soc. Am. A* **2**, 111-120 (1985). [DOI](#)
- [8]. F. J. Salgado-Remacha, F. J. Torcal-Milla, L. M. Sanchez-Brea, E. Bernabeu, "Use of steel substrates in diffractive optics: Near field of high surface quality steel tape gratings," *Opt. Laser Eng.* **49**, 356-360 (2011). [DOI](#)

- [9]. F. J. Salgado-Remacha, L. M. Sanchez-Brea, E. Bernabeu, "Effect of fill-factor on the Talbot effect of diffraction gratings," *J. Eur. Opt. Soc. – Rapid Pub.* **6**, 11055 (2011). [DOI](#)
- [10]. F. J. Torcal-Milla, L. M. Sanchez-Brea, E. Bernabeu, "Talbot effect with rough reflection gratings", *Appl. Opt.* **46**, 3668-3673 (2007). [DOI](#)
- [11]. L. M. Sanchez-Brea, F. J. Torcal-Milla, E. Bernabeu, "Talbot effect in metallic gratings under Gaussian illumination," *Opt. Commun.* **278**, 23-27 (2007). [DOI](#)
- [12]. F. J. Torcal-Milla, L. M. Sánchez-Brea, F. J. Salgado-Remacha, E. Bernabeu, "Self-imaging with curved gratings", *Opt. Commun.* **283**, 3869-3873 (2010). [DOI](#)

1. Introducción

Los codificadores ópticos de la posición (encóderes) son dispositivos opto-mecatrónicos que generan una serie de señales digitales con el objeto de medir desplazamientos lineales o angulares [1]. Hay dos conceptos que son fundamentales en todos los dispositivos destinados a la metrología, como es el caso[2]: la precisión, que es el error mínimo que se puede cometer con dicho instrumento; y la resolución, que corresponde al mínimo incremento en la magnitud física que es capaz de resolver el sistema de medida entre dos puntos consecutivos [2]. La tecnología utilizada en los codificadores industriales actuales depende en gran medida de la resolución y la precisión que se desea obtener. Para equipos de baja precisión (del orden de décimas de milímetro) se emplean preferentemente sistemas magnéticos e inductivos y, en menor medida, capacitivos. Para resoluciones elevadas, del orden de micras, se emplean mayoritariamente los dispositivos ópticos, que pueden ser de doble red o interferométricos. En aplicaciones industriales se utilizan los codificadores de doble red. Estos sistemas registran electrónicamente las variaciones de irradiancia de luz que se producen al desplazar un cierto sistema óptico a lo largo del patrón de medida, grabado en un soporte físico al que se suele llamar escala. La exploración optoelectrónica de la escala se realiza mediante un sistema electro-óptico denominado cabeza lectora, que incluye una fuente de luz con la que se ilumina el patrón situado en la regla, un sistema de captación y una cierta electrónica de acondicionamiento de las señales. La cabeza lectora se desplaza respecto al patrón fijo de referencia, que en el caso de los sistemas difractivos, es una red de difracción [3].

Existen distintos materiales sobre los que realizar la red del codificador, o escala. En las redes de cromo sobre vidrio, la luz que proviene del LED atraviesa el vidrio que tiene grabada la retícula y parte se refleja en el cromo que forma la retícula. En las redes formadas sobre escalas de materiales metálicos, toda la luz que incide en la red es reflejada por la escala, atravesando otra red que será la que forme la imagen de la red con la ayuda de una lente cilíndrica en el plano imagen. La luz reflejada es captada por los fotodiodos receptores, tanto si el codificador es de reflexión o de transmisión, y realizan la lectura de las señales eléctricas generadas. La señal recibida por el fotodetector varía en intensidad dependiendo de si la luz reflejada proviene de una zona de luz o de oscuridad. Si la luz incide en una zona sin grabar, en la que no hay ninguna franja grabada, la intensidad de la luz reflejada será superior que si procede de la reflexión en una zona grabada. El periodo de estas señales eléctricas es igual al paso de grabado de las franjas. Por tanto el periodo entre franjas será el que defina la precisión de la red. Las redes lineales grabadas sobre acero se utilizan cuando los requisitos ambientales son elevados, debido a la fragilidad del vidrio.

La forma de los codificadores depende del desplazamiento a medir. Así tenemos, encóderes lineales o rotativos. Este último tipo de codificadores se utilizan como sensores de medición para movimientos giratorios y velocidades angulares en varios tipos de máquina herramienta y en aplicaciones robóticas. Aunque la escala tenga diferente forma según se trate de desplazamientos lineales o angulares, el procedimiento de lectura de dichas escalas es similar para el caso de codificadores lineales y rotativos.

En este trabajo nos planteamos diseñar y construir una máquina de uso industrial para la

grabación de redes de difracción sobre superficies cilíndricas metálicas. Para ello hemos desarrollado un sistema de micro-grabación láser de redes de difracción en sustratos anulares partiendo de un equipo compuesto por una mesa óptica con seis motores y tres cabezales láser de distintas longitudes de onda. Se ha puesto en marcha un sistema mecánico que desplaza tanto el láser como el anillo para realizar la grabación láser de la escala, es decir, redes de difracción en torno a la superficie externa del anillo, para realizar codificadores anulares. El material de los anillos sobre los que vamos a grabar es acero inoxidable. Entre los materiales que componen el acero de los anillos, destaca la concentración de cromo y molibdeno que son los que proporcionan las características mecánicas al material. El diámetro exterior de los anillos con los que vamos a trabajar es de 10,43 cm de diámetro. El periodo de las redes de difracción va a depender directamente del diámetro del anillo, y para un correcto funcionamiento de los codificadores ópticos, es conveniente que el número de líneas sea una potencia de 2. Dadas las dimensiones del anillo, vamos a grabar 16.384 líneas (2^{14}), que corresponde a un periodo espacial en torno a 20 μm (en concreto 19,99 μm , lo que nos permite trabajar con cabezas comerciales).

2. Sistema de micro-grabación láser

El sistema de micro-grabación está diseñado para fabricar redes de difracción de periodos del orden de decenas de micras en la generatriz de sustratos cilíndricos, con el fin de realizar escalas para codificadores angulares de la posición. El sistema se divide en un sistema de grabación, un sistema mecánico y un sistema de monitorización. Todos los componentes del sistema están instalados sobre una bancada de granito de 3.500 Kg de peso y dimensiones de 160×140×43 cm. Esta bancada de granito está instalada sobre unas patas con un sistema neumático de control del flujo de aire con el fin de aislar el sistema de vibraciones externas. La presión de aire es proporcionada por un compresor y con un regulador debe mantenerse constante a 6 bares, que visualizamos a través de un manómetro situado en las patas de la mesa.

2.a. Sistema mecánico

El sistema mecánico está compuesto por un conjunto de seis motores, cinco de ellos son motores lineales paso a paso y el sexto es un motor rotador de alta precisión.

El motor rotador dispone también de un sistema de suspensión de aire que nos permite realizar movimientos libres de rozamientos y evitar las oscilaciones presentes en los mismos movimientos de la grabación. El motor dispone de un codificador óptico angular con un sistema de dos cabezas lectoras, que proporciona una precisión en su movimiento de 0,016 segundos de arco. Sobre este motor rotador se coloca la plataforma en la que se ancla el sustrato anular a grabar, lo que nos permitirá mover el anillo angularmente a lo largo de su perímetro. En la Fig. 1 podemos ver el motor rotador (nombrado como motor 1 o A) así como el resto de los motores que componen el sistema mecánico, su nomenclatura y dirección de giro.

El conjunto de motores que componen el sistema de desplazamiento lineal consta de cinco motores: el motor X (movimiento en el eje x), tiene una precisión en su movimiento de 12,5 μm . Acoplado a él está el motor Z (movimiento en el eje z), con una precisión de 2 μm . Éste dispone de una plataforma plana sobre la que se sitúa el láser, permitiendo su movimiento en los ejes de coordenadas z y x . Disponemos de otros dos motores, U y V, con movimientos en los ejes x e y respectivamente. Ambos tienen una precisión 5 μm . Sobre ellos se anclará el dispositivo de centrado del anillo del que

Fig. 1. Montaje completo del equipo con la nomenclatura de los motores y ejes de coordenadas.

hablaremos en la siguiente sección. Por último, tenemos el motor W, con movimiento a lo largo del eje z, con una precisión de 5 μm .

2.b. Sistema láser

Disponemos de tres láseres de Nd:YAG con bombeo óptico de Rofin-Baasel. Las longitudes de onda de cada uno de ellos son 1064 nm (que es la emisión normal de este tipo de láseres), 532 nm (que se consigue con un módulo doblador de frecuencia SHG, Second Harmonic Generator), y 355 nm (utilizando un módulo triplicador de frecuencia THG, Third Harmonic Generator). Cada láser tiene una lente de enfoque, de 198 mm, 56 mm y 30 mm respectivamente. Los componentes principales del equipo láser son los siguientes: el cabezal láser en el que se genera el haz, el cabezal de marcado donde se direcciona al haz y el armario de abastecimiento con todos los componentes necesarios para la alimentación y la refrigeración del láser. El diámetro del haz a la salida del cabezal láser es de 1 mm. Los cabezales de los láseres de 1064 nm y 532 nm llevan incorporado un expansor de haz, siendo el diámetro del haz antes de la lente de enfoque es de 3 mm. Mostramos los parámetros del equipo láser en la Tabla I, siendo $P_{\text{máxima}}$ la potencia máxima entregada por el láser, f la focal de las lentes de cada uno de los láseres, ω_0 la semi-anchura del haz en la zona de enfoque en la que la anchura del haz es mínima y F la fluencia de los pulsos. Esta magnitud corresponde a la densidad de energía por unidad de área irradiada con cada pulso, y viene definida por la ecuación:

$$F = \frac{E_{\text{pulso}}}{S_{\text{spot}}}. \quad (1)$$

Debido a que el sustrato donde hay que grabar las redes de difracción es acero, hemos optado por utilizar un láser pulsado de nanosegundos, puesto que la energía que presentan los pulsos es capaz de producir el

fenómeno de la ablación láser, retirando material. Trabajando en régimen pulsado, el Q-switching se enciende y apaga con una frecuencia típica de hasta 200 kHz. El láser emite entonces pulsos con la frecuencia prefijada y una duración del pulso típica desde 10 ns hasta unos 100 ns [4]. Cada uno de los tres láseres de los que disponemos entrega una potencia óptica distinta en función de la intensidad de bombeo, parámetro que también depende del valor de la frecuencia del Q-switching seleccionado.

Tras realizar las primeras pruebas para calibrar y caracterizar los tres láseres sobre sustrato plano, encontramos diferencias entre la apariencia de las grabaciones de las tres longitudes de onda. Como vemos en la Fig. 2(a), las redes grabadas con el láser ultravioleta presentan irregularidades, las franjas son inhomogéneas y el comportamiento de la red no será fiable. En la Fig. 2(b) vemos una red grabada con el láser visible, con el que se consiguen redes uniformes, bien definidas y con bordes homogéneos. En la Fig. 2(c) tenemos una red, grabada con el láser infrarrojo, de 100 μm de periodo espacial, que presenta una buena apariencia de las líneas. Sin embargo, este láser no dispone de lentes de focal corta, por lo que la menor distancia espacial entre líneas que podemos conseguir es de 40 μm , lo que no nos permite acercarnos a nuestro objetivo de redes de periodo en torno a las 20 μm . A la vista de la calibración de las tres longitudes de onda, optamos por trabajar con el láser verde, que presenta mejor apariencia de las líneas grabadas y en consecuencia, la red tendrá mejor comportamiento óptico.

En función de la densidad de energía del láser se producen distintos efectos en el material tras la interacción con el láser, como la irradiación, marcado, o ablación dependen de la densidad de energía [5]. La intensidad está relacionada con la potencia de pico y la anchura del haz. La ablación

Tabla I.
Parámetros del equipo láser para cada una de las configuraciones de trabajo.

λ (nm)	$P_{\text{máxima}}$ (W)	E_{pulso} (mJ)	f (mm)	ω_0 (μm)	A_{foco} (cm^2)	F (J/cm^2)
1064	17.5	0.350	198	51.2	$82.3 \cdot 10^{-6}$	4.24
532	11.8	0.237	56	8.2	$2.1 \cdot 10^{-6}$	112
355	2.2	0.044	30	8.8	$2.4 \cdot 10^{-6}$	18.1

Fig. 2. Redes de difracción sobre sustrato plano grabadas con a) el láser de 355 nm, 15 kHz de frecuencia de disparo del Q-switching, velocidad de 6 mm/s de los galvos y 20 A de intensidad de bombeo, b) láser de 532 nm, 150 kHz, 6 mm/s y 15 A y c) láser de 1064 nm, 100 kHz, 20 mm/s y 16 A.

consiste en retirar material de un sustrato mediante la utilización de un haz láser muy energético y altamente focalizado y es un fenómeno que precisa de una intensidad óptica umbral elevada. La primera acción del láser sobre la superficie del sustrato conduce a la liberación de las partículas producida por la ionización del material, debido a que la temperatura de la superficie se calienta instantáneamente y alcanza su temperatura de vaporización, formándose la nube de plasma conocida como pluma de ablación. La segunda acción es la conducción de calor desde el punto de incidencia del haz al resto del material [6]. En la zona contigua al punto de ablación se crearán paredes más verticales que en la zona de absorción térmica. En los bordes de la zona de ablación se suele encontrar material que se ha solidificado después de fundirse por efectos térmicos (proceso conocido como “melting”), y también se encuentra material depositado después de haber sido volatilizado (zona de escombros o gotas, “droplets”). Vemos estos efectos en la Fig. 3.

Cuando la duración de los pulsos es del orden de los femto-segundos, los efectos térmicos pueden evitarse. Pero cuando la duración del pulso láser es de nanosegundos y la radiación incidente es alta, la vaporización de la materia es el proceso dominante. La disipación de calor y vaporización son rápidos en comparación con la duración del pulso del láser. Las propiedades térmicas y ópticas de la muestra influyen en la cantidad de material eliminado durante el pulso del láser. Por lo tanto, controlando los parámetros de la ablación podremos obtener distintos resultados en las grabaciones.

Fig. 3. Procesos térmicos producidos en la ablación láser.

2.c. Sistema de monitorización

Con el fin de monitorizar en tiempo real tanto el proceso de centrado del anillo sustrato respecto a su eje de rotación como el proceso de grabación y el resultado final de las redes de difracción, se han ensamblado en el equipo tres componentes adicionales: un palpador mecánico, una cámara CMOS y un microscopio.

El palpador es un dispositivo mecánico que se sitúa encima de una plataforma que está anclada a los motores U y V. Mediante el movimiento de estos motores posicionamos su extremo en contacto con la superficie del anillo. Dispone además de un tornillo micrométrico para acercar o alejar el palpador manualmente. Al girar el anillo, obtenemos la lectura de la desviación de la superficie del anillo a lo largo de todo su diámetro con respecto a una posición de referencia. Sumando esta información a la proporcionada por el encóder del motor rotador,

Fig. 4. a) Imagen del sistema de monitorización compuesto por el palpador mecánico, la cámara CMOS y el microscopio. b) representación de la desviación del anillo respecto a su eje de giro a lo largo de una vuelta completa.

podemos determinar la excentricidad del anillo y su desviación con respecto a su eje de rotación para cada posición angular. Se ha desarrollado un protocolo de centrado del anillo, mediante 6 tornillos que nos permiten desplazar el anillo manualmente. Por motivos metrológicos pretendemos que la precisión en el centrado del anillo sea del orden de 3. Una vez centrado, se fija el anillo con los tornillos de sujeción que lo anclan a la plataforma del rotador. En la Fig. 4(a) se muestra una imagen del palpador mecánico en contacto con la superficie del anillo y en la Fig. 4(b) vemos la representación de la desviación del anillo respecto a su eje de rotación a lo largo de todo su diámetro. Comprobamos que la desviación máxima es de 2,8.

En la Fig. 4(a) igualmente vemos la posición en la que está colocada la cámara CMOS. También está anclada a los motores U y V que nos permitirá desplazar la cámara hasta situarla perpendicular al borde del anillo, tomando imágenes de la zona de ablación. En esta posición durante el proceso de grabación podremos visualizar el haz láser y por lo tanto la pluma de ablación que se genera al entrar en contacto el haz láser con la superficie del anillo.

El último elemento que se ha montado en la mesa es un microscopio óptico de tipo metalográfico con iluminación por reflexión. La finalidad es monitorizar las grabaciones realizadas sobre la superficie del anillo. Resulta necesario disponer de un sistema para visualizar las grabaciones para control del proceso en tiempo real. Está montado sobre una estructura con un tornillo micrométrico con el que nivelamos la altura para poder posicionarlo

enfocando a una altura del anillo variable, ya que la lente del microscopio tiene 100 aumentos y en la pantalla de visualización no podemos ver todo el espesor del anillo.

3. Micrograbación de redes de difracción

El objetivo principal es conseguir redes de difracción con periodos de 20 μm y anchura de las líneas de 10 μm o menores en el diámetro exterior de sustratos cilíndricos. La grabación de redes de difracción de 20 μm de periodo es un estándar en los sistemas de codificación óptica pues supone un compromiso entre la precisión que dichos sistemas pueden proporcionar y las tolerancias mecánicas en el posicionado de los elementos optomecánicos, que están gobernadas por el efecto Talbot [7], como se analizará más adelante. A continuación analizamos los resultados experimentales de las grabaciones realizadas utilizando dos métodos de grabación diferentes: grabación *línea a línea* y grabación *en vuelo*.

3.a. Grabación *línea a línea*

Este modo de trabajo consiste en grabar las franjas desplazando el cabezal del láser verticalmente con el motor Z. El láser se activa en la posición inicial de la línea y se desconecta en la posición final, que corresponden con los extremos superior e inferior del espesor del anillo. El motor Z recorre una distancia previa y posterior al grabado en la que alcanza velocidad constante, con lo que aseguramos que las franjas serán uniformes. Después de grabar cada línea, movemos el anillo un ángulo equivalente a las 20

μm del periodo. Ahora la siguiente línea que grabemos estará separada de la anterior en una distancia de $20\ \mu\text{m}$. La anchura de la línea grabada ($10\ \mu\text{m}$) se controla con la potencia del haz láser. Vemos un esquema de este modo de trabajo en la Fig. 5. Optamos por desplazar el cabezal láser para grabar las franjas en vez de desplazar el haz láser mediante el movimiento de los escáneres galvanométricos o galvos de la cavidad láser. Hemos detectado que para las precisiones que necesitamos el sistema galvanométrico no tiene suficiente estabilidad. Las líneas que se consiguen no son completamente rectas sino que tienen unos trazos ondulantes.

Para este modo de trabajo hemos seleccionado los parámetros de grabado que nos dieron unos mejores resultados en sustratos planos del mismo material. Tras realizar una serie de pruebas, los mejores resultados se han obtenido con el láser verde (de longitud de onda de $532\ \text{nm}$ y anchura del haz de $2\omega_0=16,4\ \mu\text{m}$), por lo que todos los resultados mostrados a continuación se refieren a este láser. La frecuencia del *Q-switching* seleccionada para grabar la red es de $150\ \text{kHz}$. En la Fig. 6 se muestran varias imágenes tomadas con el microscopio que se ha desarrollado para este trabajo, donde vemos el aspecto de las franjas y comprobamos (con las herramientas del software de la cámara que procesa la imagen del microscopio) el periodo de las redes a distintas intensidades. Como vemos, al disminuir la intensidad de bombeo, el periodo de la red se conserva y lo que varía es el factor de relleno de las redes, disminuyendo la anchura de las líneas. Las zonas desenfocadas en los laterales de las

Fig. 5. Esquema del método de grabación línea a línea.

imágenes se deben a que, como el sustrato es circular, estas zonas están fuera de foco.

En este modo de trabajo, los tiempos de producción de un anillo completo dependen del diámetro del anillo, en nuestro caso es de $10,43\ \text{cm}$, de la velocidad angular máxima del motor rotador, $60\ \text{grados/s}$, y de la velocidad máxima del motor que desplaza verticalmente el láser, $6\ \text{mm/s}$. El número de líneas a grabar en el diámetro del anillo es de 16.384 . Hay que tener en cuenta que la distancia entre las líneas inicial y final debe ser igual que el resto de las líneas grabadas, es decir, debe respetarse la periodicidad espacial para todas las líneas de la red. Si cada línea es de $1\ \text{cm}$ de longitud, el tiempo empleado en grabar todas las líneas, sumado al tiempo en el que el anillo se desplaza un ángulo proporcional a $20\ \mu\text{m}$ (que es despreciable frente al tiempo de grabación) será de algo más de 7 horas.

3.b. Grabación en vuelo

Este modo de trabajo consiste en grabar las líneas de la red punto a punto haciendo girar el sustrato cilíndrico a la velocidad angular

Fig. 6. Redes de periodo de $20\ \mu\text{m}$, frecuencia de $150\ \text{kHz}$, y fluencias de a) $1,02\ \text{J/cm}^2$, b) $1,26\ \text{J/cm}^2$, c) $1,42\ \text{J/cm}^2$, y d) $1,82\ \text{J/cm}^2$.

máxima permitida por el motor rotador (60 grados/s). El anillo se hace girar a velocidad constante y la frecuencia de apertura del Q-switching se selecciona para que la incidencia de dos pulsos láser consecutivos del haz en la misma vuelta estén separados la distancia del periodo de la red, 20 μm . Cuando se ha completado una vuelta completa del anillo, la posición vertical del cabezal láser se desliza una distancia tal que en la siguiente vuelta, los cráteres ocasionados por la ablación estén solapados a los anteriores, movimiento similar a una espiral. De igual modo que en el método anterior, la anchura de las líneas se controla mediante la potencia del haz. Al completar el grabado de todo el espesor del anillo, si los cráteres correspondientes a cada una de las posiciones de cada vuelta están situados en la misma posición vertical, se habrán formado las franjas de la red, como vemos en el esquema de la Fig. 7.

Fig. 7. Esquema del método de grabación en vuelo.

En este modo de trabajo se utilizan para la grabación frecuencias muy bajas, ya que si queremos conseguir un pulso láser cada 20 μm , como la velocidad angular máxima del motor rotador es de 60 grados/s, podemos tener como mínimo un pulso láser cada 0,38 ms, es decir, la frecuencia de los pulsos tiene que ser de 2,6 kHz. Hay dos parámetros que debemos ajustar para este modo de grabación: la intensidad de bombeo y el periodo de 20 μm . Haciendo un barrido de intensidades, como vemos en la Fig. 8(a), obtenemos cráteres más definidos y con menor residuo en los bordes para la fluencia de 2,88 J/cm². En cuanto al periodo, tenemos que realizar una búsqueda más exhaustiva con el propósito de que el periodo seleccionado nos permita grabar puntos cada 20 μm , pero que a su vez grabemos todo el diámetro del anillo con líneas equidistantes entre sí. Si este parámetro

no está perfectamente ajustado y el disparo de los pulsos láser no está sincronizado de una vuelta a la siguiente, los cráteres ocasionados en el sustrato de una vuelta a otra no coincidirán en la misma posición de la vertical, como vemos en la Fig. 8(b), (donde la separación vertical de los cráteres es de 10 μm) y en la Fig. 8(c), (con separación vertical de 5 μm). Estas imágenes muestran un ejemplo de la mala sincronización entre la velocidad del motor rotador y la frecuencia de disparo del Q-switching (periodo temporal entre dos pulsos láser consecutivos). Conseguimos finalmente ajustar el periodo de pulsado del Q-switching con el movimiento angular del anillo, obteniendo una red completamente vertical, como la mostrada en la Fig. 8(d). A la vista de la comparación entre las Fig. 8(b) y Fig. 8(d) comprobamos también la importancia de seleccionar la separación vertical óptima entre los cráteres de una misma línea. Este parámetro marcará la diferencia entre tener líneas uniformes o líneas irregulares, inhomogéneas o incluso no se llegará a formar las líneas si los bordes de los cráteres no llegan a tocarse. El disponer de líneas con bordes bien definidos será muy importante para obtener un buen comportamiento óptico de las redes grabadas.

Fig. 8. a) Búsqueda de la intensidad óptima de grabación a la frecuencia de 2.6 kHz, y redes grabadas a la frecuencia de $f=2,6$ kHz y fluencias de $F \sim 2 - 3$ J/cm² con periodos angulares de b) 0,022°, c) 0,023°, y d) 0,0227°.

El tiempo de fabricación de un anillo completo mediante este modo de trabajo, depende de la velocidad angular máxima del motor rotador, 60 grados/s, que se mantiene constante durante todo el proceso y también dependerá de la separación vertical entre los cráteres de una vuelta y otra, a mayor separación vertical, cubriremos el espesor de anillo en menos tiempo. Si grabamos en un espesor del anillo de 1 cm y la separación entre vueltas es de 5 μm , el anillo dará un total de 2.000 vueltas, empleando un tiempo de 6 segundos por vuelta, y en la grabación total del anillo se emplearán 3,3 horas.

4. Caracterización óptica de las redes de difracción

Cuando estudiamos el comportamiento de las redes de difracción en el régimen de Fresnel (campo cercano, cuando el período de la rejilla es mucho mayor que la longitud de onda) aparece el efecto Talbot [7-11]. Este efecto consiste en la aparición de una serie de autoimágenes de la red, que son planos separados periódicamente una distancia conocida como distancia de Talbot:

$$Z_t = \frac{p^2}{\lambda}, \quad (2)$$

donde p es el periodo de la red y λ la longitud de onda de la fuente de iluminación. Para redes con aplicaciones en codificadores ópticos, en las que se modula periódicamente la amplitud del campo, es importante que el contraste sea máximo.

La caracterización óptica de las redes grabadas consiste en realizar medidas del contraste de las autoimágenes de la red que se forman a distancias periódicas de ésta. Los planos de Talbot son las autoimágenes que se formarán a las distancias periódicas Z_t . Sabemos que para un periodo p de la red de 20 μm y una fuente de iluminación monocromática de longitud de onda λ (en nuestro caso vamos a utilizar un láser de 632 nm), el primer plano de Talbot se va a observar a una distancia de 0,63 mm de la superficie de la red. Como queremos observar al menos cuatro planos de Talbot, tomaremos imágenes alejándonos una distancia de 2,5 mm de la red del anillo. Aunque el aspecto

de las redes grabadas por ambos métodos es bueno a la vista del microscopio, su comportamiento difiere mucho. Así el contraste de los planos de Talbot para las grabaciones *en vuelo* es muy bajo y además decae con la distancia a la red, mientras que las medidas del contraste de las redes grabadas *línea a línea* son muy buenas y se mantienen con la separación. El motivo de este comportamiento tan diferente se encuentra en la rugosidad superficial de la red y en el aspecto de los bordes de las líneas grabadas[10,11] Este detalle es fundamental para el buen funcionamiento de un codificador óptico.

En la Fig. 9 se muestran las autoimágenes formadas a distancias periódicas de la red grabada línea a línea, que dependen de la distancia entre la red y el plano de observación, que vamos alejando hasta completar el recorrido de 2,5 mm, tomando un total de 700 imágenes. Como la red de difracción está grabada sobre una superficie curva, comprobamos que las autoimágenes de la red se curvan hacia abajo en la parte más positiva del eje X. Esto se debe a que la red está grabada en un cilindro, por lo que los planos de Talbot no son paralelos al eje X, sino que se curvan en los extremos [12]. Calculamos el contraste máximo y mínimo de los planos de

Fig. 9. Distribución de la intensidad en función de la distancia entre la red y el plano de observación.

Fig. 10. Medida del contraste de los planos de Talbot.

Talbot a través de la información procedente de la Fig. 9. Vemos las medidas del contraste en la Fig. 10, donde se observan 5 mínimos de contraste (tres de los cuales prácticamente llegan a un valor de contraste cero) que coinciden con los 5 planos que se observaban. Teniendo en cuenta que la superficie de nuestro sustrato es curva y que obtenemos unos máximos y unos mínimos muy diferenciados, deducimos que la red que estamos caracterizando tiene buena calidad y la diferencia de contrastes de las autoimágenes de la red tiene el rango adecuado, por lo que las redes fabricadas son válidas para su uso en codificación óptica de la posición.

5. Conclusiones

En este trabajo presentamos un sistema para micrograbación laser de redes de difracción sobre sustratos cilíndricos metálicos. Se han

diseñado e implementado dos técnicas de grabación, *en vuelo* y *línea a línea*, que nos permiten grabar las redes con distintos tiempos de fabricación y apariencia de las redes. Se ha realizado el centrado del anillo con respecto al eje de rotación del motor rotador con una precisión de $\pm 3 \mu\text{m}$. Se han conseguido grabar sobre el anillo de acero redes de $20 \mu\text{m}$ de periodo. Hemos obtenido una alta calidad en el acabado y un alto contraste de las líneas, por lo que será posible utilizar las redes fabricadas como escalas en codificadores ópticos de la posición.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido co-financiado por el proyecto DPI2011-27851 del "Ministerio de Ciencia e Innovación" de España y por el proyecto INNPACTO "FORE", IPT-020000-2010-9.