

一种二维金属光栅的制备及其光学应用

牛棚楷¹, 胡雪芳¹, 陶卫东², 董建峰^{1*}

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 理学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于飞秒激光双光子技术在载玻片上制备了两个方向相互正交且相邻分布的光刻胶线栅阵列样品, 然后通过真空镀膜技术将该样品镀上一层 50 nm 厚的银膜, 再将光刻胶清除制成二维的金属光栅. 提出了一种基于该二维金属光栅的探测激光二维方位角及波长的方法, 并用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器测试了所设计的激光报警系统. 实验结果表明: 其方位角的定位精度以及波长测量能适应很多领域的要求. 最后提出了一种可以直观地通过衍射图案来大致估算激光入射角的新方法, 并测试了该样品的衍射特性.

关键词: 双光子聚合; 金属光栅; 二维方位角; 报警系统; 衍射特性

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 06-0016-05

随着微纳加工技术的发展以及光电子器件的小型化、集成化, 各种微结构比如光子晶体^[1]、光栅^[2-3]、超材料^[4]等已经在各个领域得到了广泛的应用. 其中, 微结构光栅在 X 射线^[5]、太空应用^[6]、太阳能电池^[7]、生物医学^[8]和量子力学^[9]等领域有着潜在的应用价值, 引起了学者们的广泛关注. 利用光栅的衍射特性可用来测量光学系统的属性^[10]、高温力学行为^[11]、液体折射率^[12]、pH 值^[13]等.

另一方面随着激光技术的应用与普及, 激光入射方位角的测量也受到了人们的重视. 目前, 单激光报警系统中实现激光方位角的探测与计算过程十分复杂^[14], 因此实现激光入射方位角的实时快速测量, 具有非常深远的前景与意义. 利用光栅衍射法测量激光方位角是目前较为实用的方法^[15], 但在测量过程中, 对光栅的分辨率和精度有较高的要求. 传统制备光栅的方法不仅需要掩模板, 且制作工艺复杂、精度较低. 而利用飞秒激光双光子微加工技术, 再结合磁控溅射镀膜技术, 可以制备出稳定性强、精度高的金属光栅, 更适于激光方位角的测量. 本文制备了一个二维金属光栅, 根据其衍射特性可以精确测量激光的二维方位角及波长, 并分析了该金属光栅的衍射特性, 结果表明它在

光谱分频领域也有着潜在的应用价值^[16].

1 金属光栅的制备

本文所使用的飞秒激光微加工系统主要包括两个部分, 一部分是飞秒激光器系统, 另一个部分是三维位移微加工系统. 所采用的飞秒激光器是相干公司(Coherent)的 mira-900f, 其频率为 76 MHz, 输出波长为 700~1 000 nm 可调. 所用的三维位移加工台是 Newport 公司提供的 uFAB 微加工工作台, 可以通过电脑连接的控制器以及电脑配套的软件控制三维位移工作台 X、Y、Z 三个方向的移动. 将载玻片滴上光刻胶, 并盖上盖玻片使光刻胶均匀分布, 放置在三维位移工作台上, 待飞秒激光输出功率稳定后通过透镜聚焦到三维位移台上载玻片的光刻胶上, 因为光刻胶只有在透镜焦点附近才会发生双光子聚合而固化, 未固化的光刻胶可以用酒精清除, 所以通过控制三维位移工作台就能制备出任意的三维结构.

首先利用和三维位移微加工台配套的 uFAB 软件设计出两个方向相互正交且相邻分布的光栅, 其长度为 400 μm , 周期为 5 μm , 共 80 条. 飞秒激光器锁模后, 通过 uFAB 软件将功率设定为 2%即

收稿日期: 2017-04-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61475079).

第一作者: 牛棚楷(1992-), 男, 河南新乡人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 光学微加工技术. E-mail: peng.kai@outlook.com

*通信作者: 董建峰(1964-), 男, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 负折射率材料和手征介质波导. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn

实际功率稳定在 12.5 mW, 激光刻线速度设定为 $100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 利用飞秒激光双光子微加工技术在载玻片上制备得到一个二维的光刻胶光栅样品, 将得到的样品用磁控溅射镀膜机镀上一层厚度为 50 nm 的银膜, 再将样品置于一烧杯中, 倒入适量的 N-Methyl Pyrrolidone(NMP)溶液使其完全浸没样品, 最后将烧杯放入超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司, 型号 KQ2200DB)中振荡, 并将功率设置为 40%, 温度设置为 40°C , 每隔 2 min 取出样品放在显微镜下观察, 选择合适的振荡时间, 待光刻胶全部清除后, 制备得到如图 1 所示的二维金属光栅。

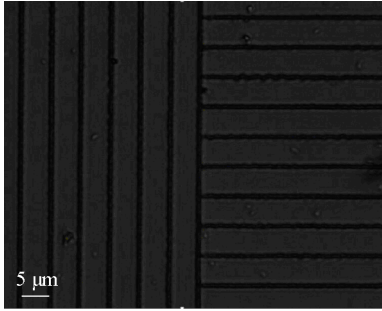


图 1 二维金属光栅的显微图样

2 探测原理

激光二维方位角及波长探测原理如图 2 所示。

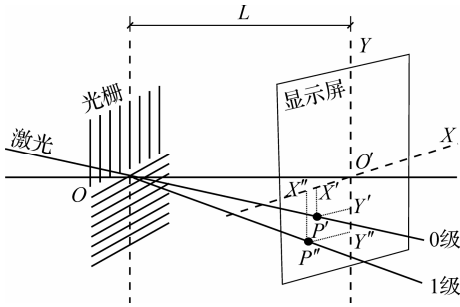


图 2 激光二维方位角及波长探测原理图

当激光以一定角度入射时, 其 0 级和 1 级衍射条纹在显示屏上的投影分别为 P' 和 P'' , P' 点在 X 轴和 Y 轴的投影分别为 X' 和 Y' , P'' 在 X 轴和 Y 轴上的投影分别为 X'' 和 Y'' , 设 $OO'=L$ (L 为系统中光栅与光屏间距离), $O'X'=D$, $O'Y'=M$, $P'X'=R$, $\angle O'OX'=\alpha$, $\angle O'OX''=\gamma$, $\angle O'OY'=\beta$, 根据衍射公式可得出^[17]:

$$D = L \tan \alpha, \quad (1)$$

$$R = L \tan \gamma, \quad (2)$$

$$d(\sin \gamma - \sin \alpha) = \lambda, \quad (3)$$

$$M = L \tan \beta. \quad (4)$$

因此二维入射角 α , β 和 λ 分别为:

$$\alpha = \arctan \frac{D}{L}, \quad (5)$$

$$\beta = \arctan \frac{M}{L}, \quad (6)$$

$$\lambda = d(\sin(\arctan \frac{R}{L}) - \sin(\arctan \frac{D}{L})). \quad (7)$$

如图 3 所示, 当激光以一特定角度入射时光栅的衍射条纹是以 Z' 为轴的圆锥面。

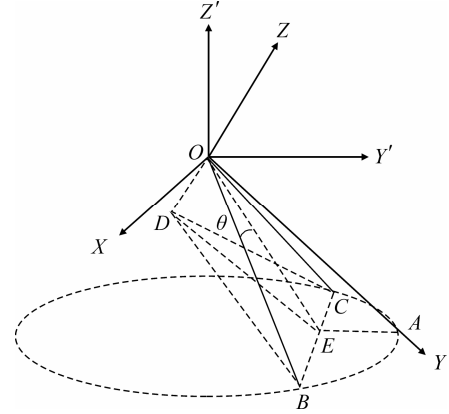


图 3 激光斜入射时光栅的衍射性质

令 $\eta = \overline{OD} / \overline{OA}$, 表示衍射光图案的垂直偏移量, 则 η 可以用以下表达式来表示^[18]:

$$\eta = \sin \phi (\cos \phi - \sqrt{\cos^2 \theta - \sin^2 \phi}), \quad (8)$$

其中 $\phi = \angle OAE = \angle ZOZ'$, θ 为衍射角. 用 MATLAB 编程可以得到 1 级衍射光线偏移量和入射角之间的关系, 如图 4 所示, 从中可以看出, 其垂直偏移量和入射角成正相关。

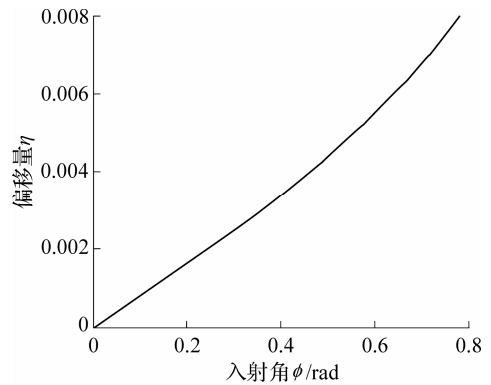


图 4 衍射光线偏移中心的距离和入射角的关系

3 实验分析

图5为实验所用的测试装置,当激光 OP 垂直样品入射时,其中央条纹亮斑在显示屏上的 O' 点,当激光以一定的角度 OP' 入射到两个垂直光栅的交界处时,其在显示屏上的0级和1级衍射条纹分别为 P' 和 P'' , P' 点在 X 轴和 Y 轴的投影分别为 X' 和 Y' , P'' 在 X 轴和 Y 轴上的投影分别为 X'' 和 Y'' ,显示屏后面有网络摄像头,可以实时拍摄激光经样品斜入射后在 X 轴和 Y 轴的偏移信息,并用MATLAB编程处理,根据公式(5)~(7)可以实时地计算出射激光的二维方位角及波长.

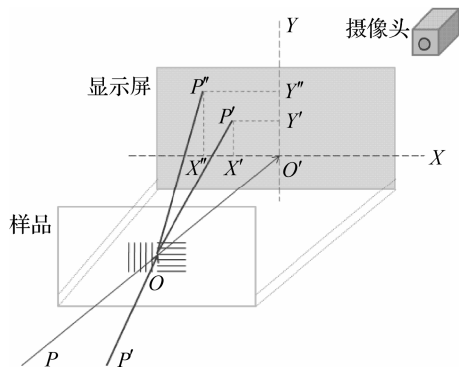


图5 实验测量装置

利用氦氖激光模拟激光武器,从 -60° 到 60° 的范围内,以间隔为 15° 分别测量 X 和 Y 方向上的数据,根据公式(5)~(6)计算得到其方位角如图6所示.

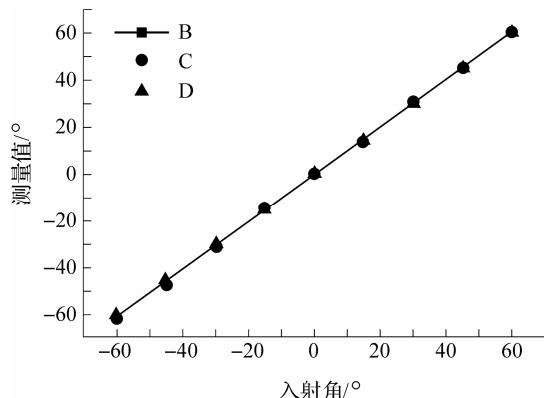


图6 用氦氖激光照射时 X 和 Y 方向测量数据

圆点表示在 X 方向上测得的方位角,三角形表示在 Y 方向上测得的方位角.结果表明所测得的方位角均分布在理想直线上,证明了该方法能满足定位的精度,所测的波长在 X 和 Y 方向上的误差分别为7.2和8.1 nm,通过两个方向上所测得的波长

进行对比,可以提高波长测量的精度.

在氦氖激光以 45° 角照射下,光栅的衍射图样如图7(a)所示,衍射图片对应的光强分布如图7(b)所示.通过分析图7(a)和(b),可以很明显地看到,其衍射条纹往入射方向相反的方向弯曲,且入射角度越大,弯曲程度越厉害.

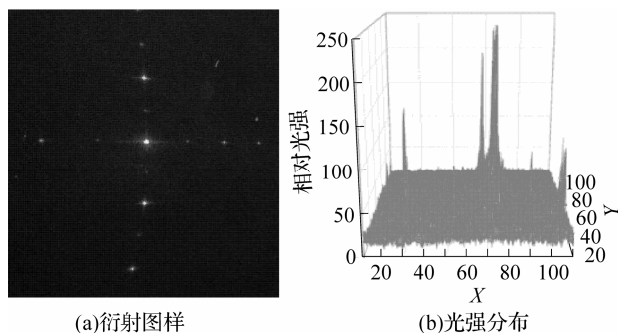


图7 激光以 45° 入射时的衍射图样与对应的光强分布

在此检测系统中考虑到光栅的独立性,只是在 X 轴方向上进行检测,所测得的入射角度和1级衍射条纹亮斑偏移距离之间的关系如图8所示,从图中我们可以看到,其偏移距离和入射角度呈正相关,这就为仅根据1级衍射条纹亮斑的偏移距离来大致估算激光的入射角度提供了一种可能.

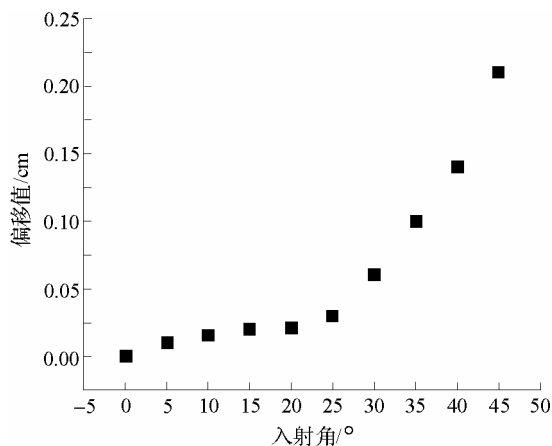


图8 不同入射角的偏移值

为进一步分析二维金属光栅的衍射特性,利用如图9所示的装置对其衍射特性进行测量,白光光源经透镜聚焦后,垂直照射在样品的正中心,样品固定在标有角度的转动台上,转动过程中可以读出其角度,转动台的后面固定有光谱仪探头,所测得的光谱数据可以通过电脑保存,当样品转动不同角度时,可以测得不同的光谱数据.

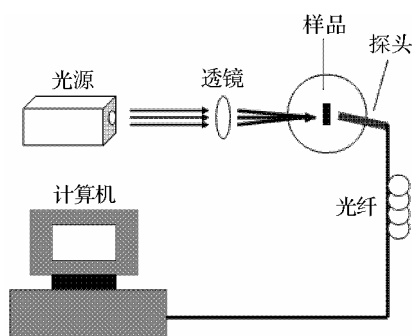


图9 光谱实验原理图

因为光栅的分频作用, 二维金属光栅的衍射条纹呈彩色, 如图 10(a)所示, 波长越长的光, 离中心光斑越远。当转动台分别转动 10° 、 20° 、 28° 、 31° 和 33° 时, 能够测得 5 个不同的光谱数据如图 10(b)所示。这为二维光栅在分频计上的应用提供了很好的参考。

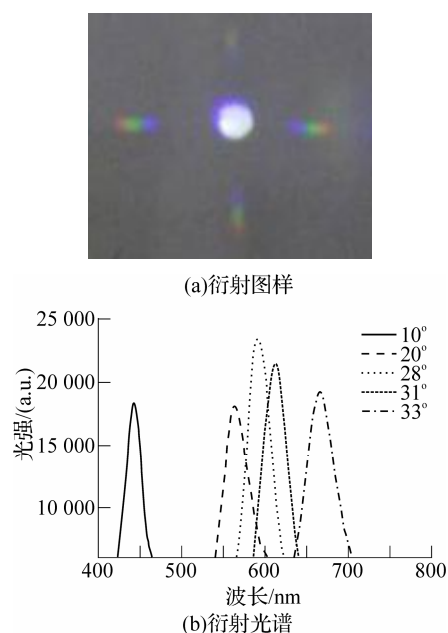


图10 白光照射下样品的衍射图样与光谱分布

4 结语

通过飞秒激光双光子微加工技术首先制备出两个方向相互垂直的光栅, 再经磁控溅射镀膜, NMP 溶液振荡去胶得到一个二维的金属光栅, 利用光栅的 0 级以及 1 级衍射光斑偏移的距离可以计算出入射激光的二维方位角及波长, 同时通过观察衍射条纹偏移中心光斑的距离, 可以大致估算出入射激光的方位角, 为光栅衍射法在激光报警

方面的应用提供了新的可能方法。此外, 通过进一步测量二维金属光栅的衍射特性, 可以促进二维金属光栅在分频计等方面的应用。

参考文献:

- [1] BREUER-WEIL A, ALMASOUD N N, ABBASI B, et al. Parametric simulations of slanted 1D photonic crystal sensors[J]. Nanoscale Research Letters, 2016, 11(1):1-10.
- [2] ZOU J, YU Y, ZHANG X. Single step etched two dimensional grating coupler based on the SOI platform[J]. Optics Express, 2015, 23(25):32490-32495.
- [3] LI Y, WANG Q, WANG J Y, et al. Design and optimization of wide-band filter based on guided mode resonant grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(4): 0423002.
- [4] JIA Y P, ZHANG Y L, DONG X Z, et al. Complementary chiral metasurface with strong broadband optical activity and enhanced transmission[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(1):011108.
- [5] HUANG C, ZHANG J C, CAO L F, et al. Numerical simulation for single order diffraction properties of sinusoidal grating in soft X-ray region[J]. Optik, 2014, 125(14):3653-3656.
- [6] MICHEL C, LOICQ J, THIBERT T, et al. Optical study of diffraction grating/Fresnel lens combinations applied to a spectral-splitting solar concentrator for space applications[J]. Applied Optics, 2015, 54(22):6666-6673.
- [7] HO C, MCKEON J, MACDONALD D, et al. Three-dimensional nanotub submicrometer diffraction gratings for solar cells[J]. Applied Optics, 2014, 53(29):6840-6845.
- [8] KOVAČIČ M, KRČ J, LIPOVŠEK B, et al. Modelling of diffraction grating based optical filters for fluorescence detection of biomolecules[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(7):2285-2300.
- [9] FIELD J H. Description of diffraction-grating experiments for photons and electrons in Feynman's spacetime formulation of quantum mechanics: The quantum origins of classical wave theories of light and massive particles[J]. European Journal of Physics, 2013, 34(6):1507-1531.
- [10] MIKS A, POKORNY P. Use of diffraction grating for measuring the focal length and distortion of optical systems[J]. Applied Optics, 2015, 54(34):10200-10206.
- [11] DAI X, XIE H, FAN B, et al. A six-spot grating diffraction strain gauge and its application to measuring

- high-temperature mechanical behavior[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9):1757-1767.
- [12] CALIXTO S, BRUCE N C, ROSETE-AGUILAR M. Diffraction grating-based sensing optofluidic device for measuring the refractive index of liquids[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1):180-190.
- [13] MARCHANT M, LABESSE-JIED F, GIPPIUS N A, et al. Modelling of a hydrogel diffraction grating used for pH-sensing[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2014, 342(12):706-713.
- [14] 李晓, 张瑞, 王志斌, 等. 二维激光告警光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6):1806-1810.
- [15] 曹俊卿, 赵冬娥, 王志斌, 等. 一种光栅型激光告警系统设计及实现[J]. 2015, 45(1):1-7.
- [16] 马培培, 刘杨阳, 吕群波, 等. 紧凑型图像复分光谱成像系统光学设计及优化[J]. *光子学报*, 2016, 45(7):0722004.
- [17] 苏平, 牛燕熊, 李大乾, 等. 基于面阵 CCD 的激光告警系统的图像采集与处理[J]. *激光技术*, 2013, 37(3):394-399.
- [18] 唐小村. 光线斜入射对光栅衍射的影响[J]. *实验技术与管理*, 2012, 29(7):42-44.

The fabrication and optical application of a two-dimensional metal grating

NIU Peng-kai¹, HU Xue-fang¹, TAO Wei-dong², DONG Jian-feng^{1*}

(1.Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Two orthogonal adjacent-distributed photoresist line arrays are prepared on a glass substrate based technology of two-photon polymerization (TPP). The two dimensional (2D) metal grating is fabricated by coating a 50 nm-thick Ag film on the above-mentioned line arrays using a vacuum coating machine and subsequently with the photoresist removed. A measuring method is proposed to detect the 2D incident angle and the wavelength of the laser. And the corresponding prototype of laser warning system is designed and its detecting ability is tested. Under the irradiation of the He-Ne laser with a wavelength of 632.8 nm, the results of the experiment show that the precision of recognizing the 2D incident angle and the wavelength can meet the requirement in many applied fields. A new method to estimate the incident angle of the laser visually through the diffraction pattern is also proposed in the end and a detail analysis about diffraction characteristic of the metal grating is conducted and presented.

Key words: two-photon polymerization; metal grating; two dimensional angle; warning system; diffraction characteristic

(责任编辑 韩 超)