

文章编号 1004-924X(2006)02-0197-05

一种可控曲面光栅的研制

何世平¹, 叶超¹, 谢永军², 付绍军²

- (1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027;
2. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要:提出了一种制作曲面变间距光栅的方法。首先在平面基片上制作光栅,然后通过一种高分子材料(PDMS)作为载体将光栅转移到曲面上,而事先涂在曲面上的混合溶胶-凝胶取代了传统的光刻胶,使得光栅的制作效率大大提高。采用这种方法在曲率半径为100 mm的凹球面基底上制作了平均线密度为80 l/mm的光栅,并用环境扫描电镜以及数字图像处理法检测了光栅的线密度分布。检测结果表明:光栅质量好,条纹清楚,衍射效率也没有降低。所制曲面光栅具有平面光栅和透镜两种光学器件的功能,可用曲面变间距光栅一种光学元件取代透镜和平面光栅两种光学元件,简化了光路,提高了制作效率,降低了成本。

关键词:变间距光栅; 曲面光栅; 聚二甲基硅氧烷(PDMS); 混合溶胶-凝胶玻璃

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A

Fabrication of a controllable curved surface grating

HE Shi-ping¹, YE Chao¹, XIE Yong-jun², FU Shao-jun²

- (1. *Department of Morden Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;*
2. *National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

Abstract: A fabrication method of VLSG (Varied-line-space Grating) was presented. The grating was fabricated on plane substrate, and then it was transferred on curved surface by a macromolecule material (PDMS) used as a carrier. The hybrid gel film on curved surface can replace traditional light-sensitive lacquer, and improve the grating's stability. The VLSG with the line density of 80 l/mm was fabricated on a concave lens surface with curved radius of 100 mm. The grating line density distribution was detected with SEM and digital image process technique. For having the functions of the lens and plane grating, the results show that the high quality grating can replace lens and plane grating in good processing, efficiency and cost.

Key words: varied-line-space grating; curved surface grating; polydimethylsiloxane (PDMS); hybrid sol-gel glass

1 引言

变间距光栅的栅距按照一定的规律变化,具有自聚焦、像差矫正、高分辨率、平焦场等一些特殊性能,在激光受控核聚变装置、同步辐射应用、太空探测器、航空航天飞行器(如战斗机上的姿态控制传感器)等尖端科技中有着重要和广泛的应用^[1-2]。

变间距光栅的制作方法主要有机械刻划和全息光刻两种。机械刻划的制作效率低、制作线密度有限,而且有鬼线,杂散光比较多。变间距光栅全息制作法的优点是制作效率比较高,适合制作大口径、高线密度的变间距光栅,制作的光栅没有鬼线、没有杂散光,而且制作成本比较低,是目前国际上制作变间距光栅的主流技术。由于变间距光栅的制作技术难度大,目前只有少数发达国家的实验室拥有该制作技术,国内所用的变间距光栅绝大部分都是靠进口。为了满足我国核科学、空间科学以及军事和国防发展的需要,中国科技大学国家同步辐射实验室展开了变间距全息光栅的研制工作^[3-6]。

全息光刻的制作过程主要分两步:先将需要的光栅制作在光刻胶上,再通过蚀刻的方法将光刻胶上的光栅转移到基片上去。但是,蚀刻转移的方法非常耗时和昂贵,尤其是在多级或连续层面上进行光栅制作。

近几年,利用混合溶胶-凝胶进行变间距光栅制作的方法已经引起人们广泛的关注^[7,8]。溶胶-凝胶溶液在很宽的波长范围里都拥有良好的机械性能、化学稳定性和高传递性,且可以改变材料的性能,非常适用于光栅的制作。

曲面变间距光栅同时具有透镜和平面变间距光栅两种光学元件的功能,可用曲面变间距光栅一种光学元件取代透镜和平面变间距光栅两种光学元件,不仅简化了加工过程、提高了制作效率、降低了制作成本,而且大大简化了光学系统,提高了系统的稳定性。本文提出一种曲面变间距光栅的制作方法,首先在平面基片上制作光栅,再利用一种特殊材料(PDMS)将光栅转移到曲面上,避开了直接在曲面上进行光栅制作的步骤,且所制光栅性能稳定,光栅质量好。文中对所研制的曲面光栅进行了实验验证,并利用环境扫描电镜检

测了光栅的线密度分布。

2 曲面光栅的制作

2.1 材料准备

曲面变间距光栅的研制过程中主要使用两种材料。

光栅制作过程中所使用的第一种材料是聚二甲硅氧烷,简称为 PDMS。该材料在将平面光栅转移到曲表面的过程中起着重要的中间桥梁作用。PDMS 由基本样品和固化剂两种成分组成。为了改善 PDMS 的性能,使之更有利于光栅的转移,又以 1:49 的质量比,在 PDMS 中加入少量蒙脱石(montmorillonite),制成 PDMS 混合材料^[4]。

光栅制作过程中所使用的第二种材料为自制的溶胶-凝胶,其由以下 4 种成分构成:(1)由 DOW CORNING 公司提供的甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷;(2)由 STREM CHEMICALS 公司提供的异丁氧基铅;(3)甲基丙烯酸;(4)正丁醇。以异丁氧基铅为 HfO_2 的前驱体,以甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷为 SiO_2 的前驱体,按照下述步骤制备 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 溶胶:

(1)以异丁氧基铅为前驱体,以少量正丁醇为溶剂,以甲基丙烯酸为络合剂,并按异丁氧基铅:甲基丙烯酸=1:1 的比例加入,混合搅拌 3 个小时,使反应完全。

(2)将 1 摩尔甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷溶解在一定量的正丁醇中,再加入一定浓度的盐酸溶液作催化剂,混合搅拌 1 个小时,使甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷完全水解。

(3)再将上述两种溶液以 Si/Hf 摩尔比为 4:1 的量混合,搅拌 24 个小时后,溶液即变成溶胶。

该溶胶材料能将 PDMS 薄膜上的光栅转移固化到曲表面上,固化后具有玻璃的特性。

2.2 制作过程

曲面光栅制作过程的第一步是首先将平表面上的光栅转移到 PDMS 薄膜上。具体的操作步骤(见图 1)如下:

(1)在平板玻璃表面的光刻胶涂层上用全息干涉法制作等间距的平面光栅,见图 1(a);

(2)在光刻胶光栅表面蒸发一薄层脱膜油 [$\text{CF}_3(\text{CF}_2)_6(\text{CH}_2)_2\text{SiCl}_3$],再将含有蒙脱石的

PDMS 混合物注入光栅表面,并在 60°C 的温度下固化,见图 1(b);

(3)揭下 PDMS 薄膜,完成光栅从平表面到 PDMS 上的转移,见图 1。

本文中,PDMS 的厚度约为 $100\ \mu\text{m}$ 。

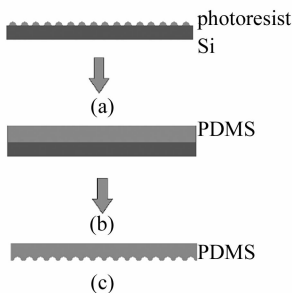


图 1 光栅从平面基底转移到 PDMS 上的过程

Fig. 1 Process of transferring grating from planar to PDMS

曲面光栅制作过程的第二步是将 PDMS 薄膜上的光栅转移到凹透镜的表面上。具体的操作步骤(见图 2)如下:

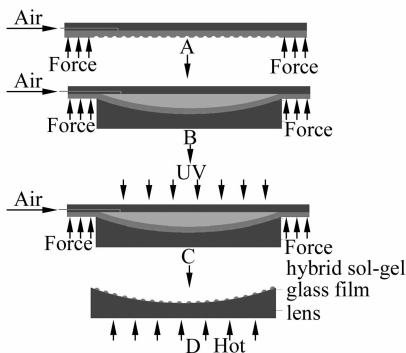


图 2 光栅从 PDMS 上转移到曲面上

Fig. 2 Process of transferring grating from PDMS to curved surface

(1)首先将制有光栅的 PDMS 薄膜压到一个平面透明玻璃平板上,然后用一圆形的固体框将 PDMS 光栅薄膜的边界固定,使 PDMS 光栅薄膜与平板透明玻璃之间密封,见图 2(a);

(2)以 $3\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 的转速将溶胶混合物涂到凹透镜的凹面上,将凹透镜的凹面对着 PDMS 光栅薄膜放置;向密封的空间内充入气体,使平面 PDMS 光栅薄膜变形成一球面,当 PDMS 光栅薄膜变形到与凹透镜的内表面接触、并使溶胶混合物表面形成光栅时,停止充气,见图 2(b);

(3)在第二步操作约 $30\ \text{min}$ 后,等溶胶混合

物变成凝胶后,以 90°C 的温度烘焙约 $15\ \text{min}$ 后冷却,再用紫外光照射 $30\ \text{min}$ 左右,使溶胶-凝胶薄膜聚合,并与凹透镜内表面固化在一起,如图 2(c)。

(4)去除平板玻璃及 PDMS 薄膜,在 180°C 的温度下烘焙 $1\ \text{h}$ 左右,最终完成将 PDMS 薄膜光栅转移到凹透镜内表面的过程,如图 2(d)所示。

3 实验检测

为了验证所制光栅的质量以及求出光栅线密度的分布,本文利用环境扫描电镜对所制曲面光栅进行了实验检测。图 3 是通过环境扫描电镜拍摄的曲面光栅的图片,可以看出条纹的质量很好,没有出现扭曲,间断等现象,表明这种制栅工艺是可行的。

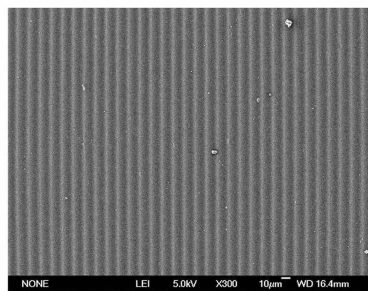


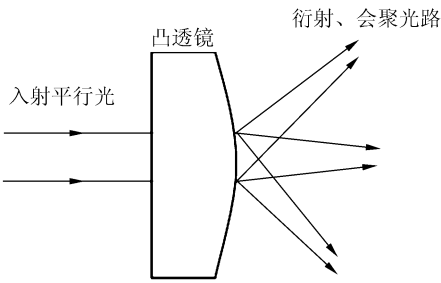
图 3 光栅的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM picture of the grating

普通的变间距平面光栅只具有光栅的功能,不具有会聚或扩散入射光的功能,而曲面变间距光栅是将透镜和光栅两种光学元件组合在一起,因此曲面变间距光栅不仅具有光栅的衍射功能,还具有透镜会聚或扩散入射光的功能。图 4 是验证曲面变间距光栅是否同时具有衍射、会聚或扩散入射光功能的实验光路示意图及其衍射谱。其中,图(a)和(b)是实验光路示意图,图(c)是被会聚了的光栅的衍射谱,而图(d)是被扩散了的光栅的衍射谱。实验验证结果表明,曲面变间距光栅确实同时具有衍射、会聚或扩散入射光的功能。

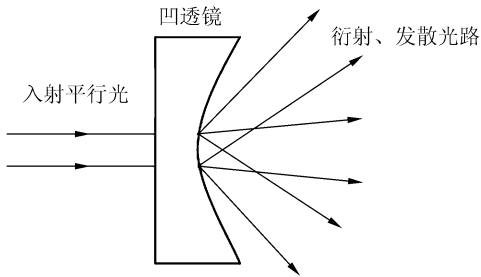
在本次曲面光栅的探索性研制中,光栅的有效面积约为 $\varphi 15\ \text{mm}$ 的圆形曲面。光栅为单向栅,光栅栅线与 Y 轴平行(见图 5),光栅线密度约为 $80\ \text{l}/\text{mm}$ 。

为了检测光栅线密度在曲线上的分布,利用



(a) 会聚光路示意图

(a) Converging path



(b) 扩散光路示意图

(b) Diffusing path



(c) 会聚衍射谱

(c) Converging diffraction spectrum



(d) 扩散衍射谱

(d) Diffusing diffraction spectrum

图 4 曲面变间距光栅功能验证光路及其衍射谱

Fig. 4 Verify optical path of curved surface varied-line-space grating function and its diffraction spectrum

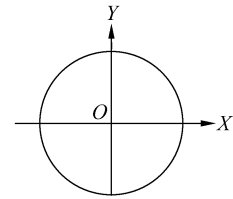


图 5 坐标示意图

Fig. 5 Coordinate chart

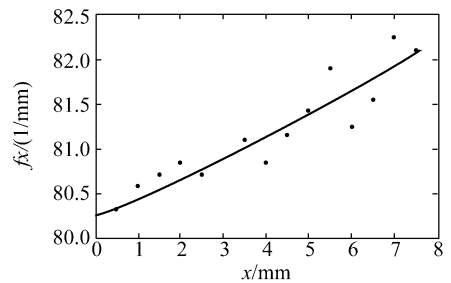


图 6 O-X 方向光栅线密度

Fig. 6 Grating line density along O-X direction

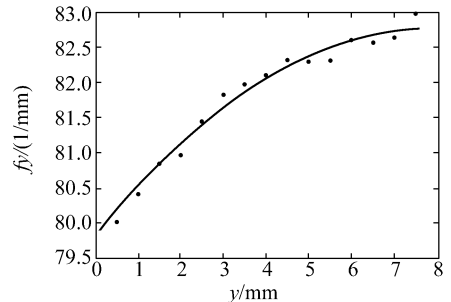


图 7 O-Y 方向光栅线密度

Fig. 7 Grating line density along O-Y direction

4 结论和讨论

本文对曲面变间距光栅的新制作法进行了探索性研究。利用复制有光栅图案的弹性基底,直接把光栅图案转移到球面基底上的凝胶玻璃中。由于直接转移到了玻璃中,避免了表面上的离子束刻蚀工艺。这是本文的一个创新点。虽然

研究工作还很初步,但研究结果表明,本文提出的曲面变间距光栅的制作方法是基本可行的,所制作的曲面光栅性能稳定、质量较好。

利用扫描电镜检测光栅的线密度,因为扫描区域很小,可以相当准确地求出光栅的线密度。如果利用衍射方法求光栅的线密度,由于激光照明光点远远大于扫描电镜的扫描区域,所以很难

得到比较准确的光栅线密度。

本文研制的曲面光栅的线密度比较低,光学元件也比较小,仅仅是探索性的研制,正在研制线密度比较密、曲表面比较大的曲面光栅。真正要研制实用的曲面光栅,还有不少技术及工艺需要进一步探索。

参考文献:

- [1] 王炜,杨厚民.平面变栅距光栅的原理及设计[J].光学学报,1999,19(9):1158-1162.
WANG W, YANG H M. Principle and design of varied line-space plane gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9):1158-1162. (in Chinese)
- [2] NAMIOKA T, KOIKE M. Aspheric wave-front recording optics for holographic gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34:2180-2186.
- [3] 朱向冰,付绍军,叶为全,等.消像差光栅的理论及实验研究[J].光学精密工程,2003,11(4):354.
ZHU X B, FU SH J, YE W Q, *et al.* The theory, design, manufacture and measurement of aberration reduced gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4):354. (in Chinese)
- [4] 朱向兵,何世平,付绍军.云纹法检测变间距光栅的线密度[J].光学精密工程,2002,10(3):285-289.
ZHU X B, HE SH P, FU SH J. Measurement of the line-density of varied-line-space grating by Moiré fringe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3):285-289. (in Chinese)
- [5] XIE Y J, FU SH J, HE SH P. Fabrication of varied-line-spacing grating by elastic medium[J]. *Opt. Express*, 2004, 12:3894-3899.
- [6] NAJAFI S C, TOUAM T, SARA R, *et al.* Sol-gel glass waveguide and grating on silicon[J]. *Lightwave Technol.*, 1998, 16:1640-1646.
- [7] COUDRY P, ETIENNE Y, MOREAU J, *et al.* Sol-gel channel waveguide on silicon: fast direct imprinting and low cost fabrication[J]. *Opt. Commun.*, 1997, 143:199-202.

作者简介:何世平(1943—),男,教授,主要研究方向为激光全息、激光散斑、干涉云纹等现代光测技术及其应用。E-mail:sphe@ustc.edu.cn

叶超(1981—),男,中国科学技术大学力学与机械工程系在读硕士研究生,研究方向为全息、离子束刻蚀衍射光栅制作技术及光栅线密度的检测。E-mail:yechao@mail.ustc.edu.cn