

100 mm × 100 mm 镀金反射光栅的制作与测量

卜凡涛^{1**}, 鲁云开^{2,3}, 李民康^{2,3}, 周常河^{2,3*}

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072;

²中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 衍射光栅在各行各业有着广泛的应用,这就要求光栅必须具有良好的质量。在制作大尺寸光栅的各种方法中,激光直写技术具有明显优势,采用并行激光直写技术制作出了尺寸为 100 mm×100 mm、线数为 1780 line/mm 的正弦形光栅。首先对光栅进行理论分析,找出正弦形光栅在效率最高时的槽深;然后用激光直写技术制作光栅,最后在光栅表面镀上一层金膜。测量了光栅的衍射效率,并预估光栅的均匀性。结果表明:光栅的衍射效率约为 90%,与理论值接近,而且分布很均匀,证明了并行激光直写技术制作高质量、大尺寸光栅的可行性。

关键词 光栅; 镀金光栅; 测量; 激光直写; 衍射效率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0904001

Fabrication and Measurement of Gold Reflective Grating with Size of 100 mm × 100 mm

Bu Fantao^{1**}, Lu Yunkai^{2,3}, Li Minkang^{2,3}, Zhou Changhe^{2,3*}

¹School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

²Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Diffraction grating is widely used in a variety of applications, which requires the grating to have good quality. Among various methods of making large-sized gratings, laser direct writing has obvious advantages. We use the parallel direct laser writing technology to produce a sinusoidal grating with size of 100 mm×100 mm and line number of 1780 line/mm. Firstly, the grating is analyzed theoretically to find a groove depth where the sinusoidal grating can reach its highest efficiency, then the grating is produced by laser direct writing and finally coated with a layer of gold. We introduce the diffraction efficiency measurement of the grating, and estimate the uniformity of the grating. The result shows that the diffraction efficiencies of the grating are around 90%, which is close to the theoretical calculation. Meanwhile, the efficiency distribution is uniform. Experimental results demonstrate that the developed parallel direct laser writing technology is feasible for producing high quality and large-sized gratings.

Key words gratings; gold-coated grating; measurement; laser direct writing; diffraction efficiency

OCIS codes 050.2770; 050.1950; 120.4640

1 引言

衍射光栅是一种周期结构衍射元件,应用范围几乎覆盖各个领域。光栅必须具备高分辨能力、高信噪比和高衍射效率。光栅的制备方法主要有机械刻划法、全息法、无掩模光刻技术及掩模光刻技术。

机械刻划法是最早的制备光栅的方法^[1],它是利用光栅刻划机配备的金刚石刻刀在光栅基底表面上刻划出一系列光栅刻线来制备光栅的。全息法是盖伯于 1948 年提出的,美国利弗莫尔国家实验室采用该方法成功制作了直径为 940 mm 的平面脉冲压缩光栅。但这种方法存在明显的局限性,且在技术和经

收稿日期: 2018-01-31; 修回日期: 2018-03-20; 录用日期: 2018-03-26

基金项目: 上海市科委项目(15JC1403500,16DZ2290102)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC014)

* E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn; ** E-mail: 1029424984@qq.com

费上面临很大挑战。无掩模光刻技术中的激光直写技术为大尺寸光栅的制造提供了解决方案,且具有价格相对较低,不需要掩模的优点。本课题组利用激光直写技术成功制作了尺寸为 100 mm × 100 mm 的光栅,为了了解该光栅的质量,对其效率进行测量,评估其均匀性,从而验证所提方法的正确性,为下一步制作光栅积累经验。

2 基本原理

2.1 严格耦合波理论

在分析高线数光栅效率时,通常使用基于矢量衍射理论的严格耦合波理论^[2-3],将一维光栅在空间上分为三个区域:入射介质区 I、光栅区、基底区 II。光栅周期为 A , 占空比为 f , 光栅槽深为 d , 可以得到横磁(TM)波和横电(TE)波入射下反射波的衍射效率为^[4-5]:

$$\eta_{R_i} = \operatorname{Re} \left(\frac{k_{1,z_i}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) |R_i|^2, \quad (1)$$

$$k_{1,z_i} = \begin{cases} +k_0 [n_1^2 - (k_{x_i}/k_0)^2]^{1/2}, & k_0 n_1 > k_{x_i} \\ -jk_0 [(k_{x_i}/k_0)^2 - n_1^2]^{1/2}, & k_{x_i} > k_0 n_1 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为真空中光的波长; n_1 为区域 I 的折射率; R_i 为区域 I 中第 i 级后向衍射(反射波)的复振幅; θ 为入射角度; k_{1,z_i} 为第 i 级衍射波波矢的 z 方向分量; j 为虚数单位; i 为衍射级次; k_{x_i} 为第 i 级衍射波波矢的 x 方向分量, $k_{x_i} = k_0 [n_1 \cdot \sin \theta - i(\lambda_0/A)]$ 。

2.2 光栅衍射效率的理论计算

光栅衍射效率是一个非常重要的指标,很多因素均对它有很大影响^[6-7],如光栅的剖面形状、光栅材料和光束的入射角度等,所以制作光栅时必须研究这些因素与光栅衍射效率的对应关系。在仿真模拟中,除了要考虑算法效率外,还要考虑光栅区域的分层数和衍射级数目。在模拟中,光栅的槽型为正弦形,其表面镀金,设定入射光以 Littrow 角入射,在 TE 和 TM 模式下,研究光栅衍射效率与槽深的关系。参考文献[8]认为可以假设光栅由全黄金制作而成,图 1 和图 2 为 TM 和 TE 模式下计算得到的镀金光栅的衍射效率与槽深的关系。

图 1 给出了 TM 模式下,线数为 1780 line/mm 的镀金光栅的衍射效率随槽深的变化:衍射效率先随着槽深的增加而增加,然后随着槽深的增加而减小,大致呈现正弦的半周期变化;在槽深为 235 nm

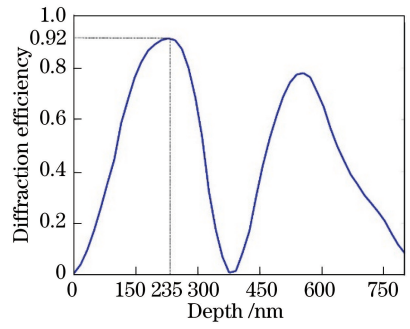


图 1 TM 模式下镀金光栅衍射效率与槽深的关系
Fig. 1 Relationship between diffraction efficiency of gold-coated grating and groove depth for TM mode

时,衍射效率达到最大,为 92%。参考此理论值,在制作光栅的前期工艺中,使槽深取效率最大值附近对应的值,并在最后测量衍射效率时,将测量值和此理论值比较。图 2 给出了 TE 模式下槽深和衍射效率的关系:衍射效率与槽深呈正相关关系,槽深为 235 nm 时对应的衍射效率为 31%。在测量衍射效率时,同时在两种模式下进行测量,其中 TM 模式下效率最大值对应的槽深为设计参考的槽深,通过 TE 模式下测量的效率值得到理论曲线中对应的槽深,证明 TM 模式下所取的槽深合理。

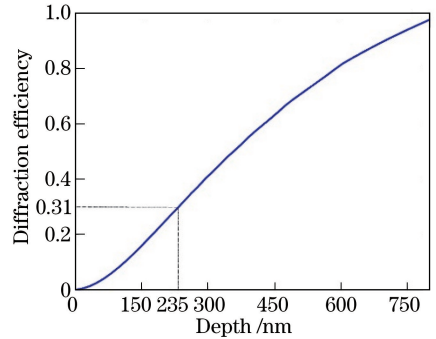


图 2 TE 模式下的镀金光栅衍射效率与槽深的关系
Fig. 2 Relationship between diffraction efficiency of gold-coated grating and groove depth for TE mode

3 测量与分析

如图 3 所示为达曼光栅的激光直写简图,图中主要有光源、自聚焦透镜、达曼光栅模块组、二维移动平台及其他器件。激光首先通过由达曼光栅组成的光学模块组,随后经过聚焦透镜。两个控制台分别控制二维移动平台的方向,并与上位机通信。红线表示栅线方向。

比较几种光栅的制备方法后可知,制作大尺寸光栅的理想方法是激光直写技术,但该技术也面临着一些挑战。比如:对于二维调整台的控制,其精度

误差需要保证在纳米级别,还要保证稳定运行过程中不能出现开环,这就对控制提出了很高的要求。

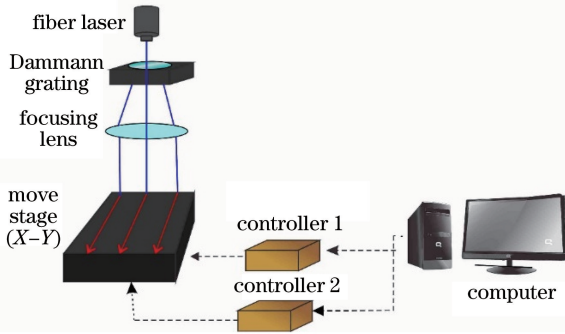


图 3 达曼光栅激光直写简图

Fig. 3 Direct laser writing system with a Damann grating

理论分析可知衍射效率最大时对应的槽深为 235 nm。在前期的工艺探索中通过胶配比得到与理论值近似的槽深,采用激光直写技术制作光栅,光栅的槽型与激光器的功率和曝光程度有关,可以得到正弦形或者矩形槽型。为了得到正弦形槽型,在实验中通过控制激光功率来改变曝光程度,在不断探索中得到正弦形槽型。激光直写技术是一种无掩模光刻技术,利用强度调制的激光束在涂有光刻胶的基板表面上变剂量曝光,显影后可在光刻胶层表面形成所要求的掩模图形。本课题组采用并行激光直写技术制作的光栅如图 4 所示,其表面镀金,线数为 1780 line/mm,尺寸为 100 mm×100 mm。为了评估其质量,对其衍射效率进行了测量。

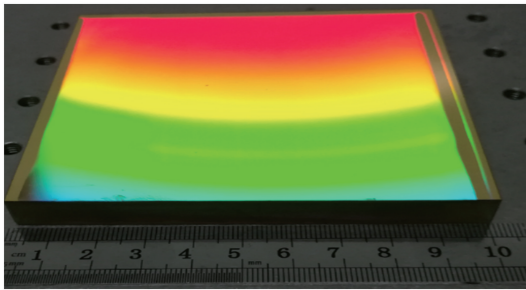


图 4 本课题组制作的镀金光栅

Fig. 4 Gold-coated grating prepared by our research group

通常情况下,光栅的衍射效率有三种定义方式。第一种:指某一级次衍射光的能量与入射光总能量之比;第二种:指某一级衍射光的能量与所有衍射光能量之比;第三种:以与光栅同种材料构成的平板反射光总能量为基准,某一级衍射光的能量与反射光总能量的比值。本研究选用第一种定义,并且采用如图 5 所示的测量装置对其衍射效率进行测量。该装置包括 808 nm 激光器(功率为 200 mW)、偏振分光棱镜(PBS)、功率计(型号为 PD300-3W)。其中:

激光器用来提供光源,该光源作为入射光;PBS 决定着偏振方向,根据 PBS 的不同放置可测量 TM 模式或 TE 模式下的衍射效率;功率计用来测量激光入射前和反射后的能量。图 5 为 TM 模式下的测量示意图,一束激光首先从激光器发出,经过 PBS 偏振为 TM,以 Littrow 角入射到光栅。用功率计测量入射前和反射后的能量,通过调节光栅下面的二维平台移动光栅到达不同的位置,依次测量不同位置的衍射效率。

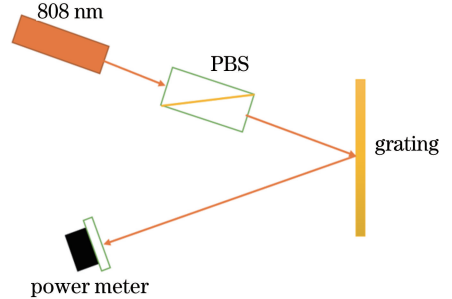


图 5 TM 模式下的测量装置示意图

Fig. 5 Schematic of measuring device for TM mode

图 6 为测量得到的衍射效率分布图, x 、 y 表示光栅的平面坐标^[9]。图 6(a)显示了 16×16 组数据点的平面分布图,从图中可知,整个光栅衍射效率分布很均匀,而且效率在 90%左右,平均值为 90.35%。将所有测量点平均分成 4×5 区域,每个区域取所在区域的测量点的平均值即可得到图 6(b)所示的区域分布图。从图 6(b)中可知,光栅中间的衍射效率最大,光栅边缘的衍射效率趋于一致。

同样,在 TE 模式下测量光栅衍射效率的分布,如图 5 所示改变 PBS 的放置位置将偏振方向改为 TE 即可得到 TE 模式下的测量装置。808 nm 激光器发出的一束光经过 PBS 以 TE 偏振出射,之后该光束以 Littrow 角入射到光栅,最后反射到功率计。测量入射和反射后的能量,得到如图 7 所示的衍射效率分布图。同样,通过调节光栅下面的二维调整架来改变入射位置,采集到 16×16 组数据。从图 7(a)中可以看出:光栅的衍射效率分布在 30%左右,平均值为 30.1%,且分布比较均匀。将平面分成 4×5 区域,每个区域取其所在测量点的平均值,得到图 7(b)所示的区域分布图,从图中可以看出平均值约为 30%,与理论计算的结果相差不大,且分布得很均匀。

参考理论计算得到的 TM 偏振下最大衍射(92%)对应的槽深(235 nm)可知,此光栅的 TM 偏振衍射效率基本符合理论计算值,且分布得比较均

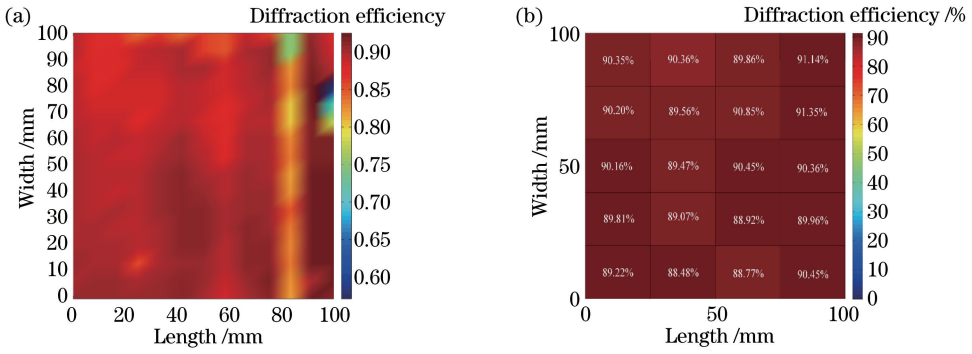


图 6 TM 模式下的衍射效率分布图。(a) 测量点分布图;(b)区域分布图

Fig. 6 Diffraction efficiency map for TM mode. (a) Distribution of measurement points; (b) areal map

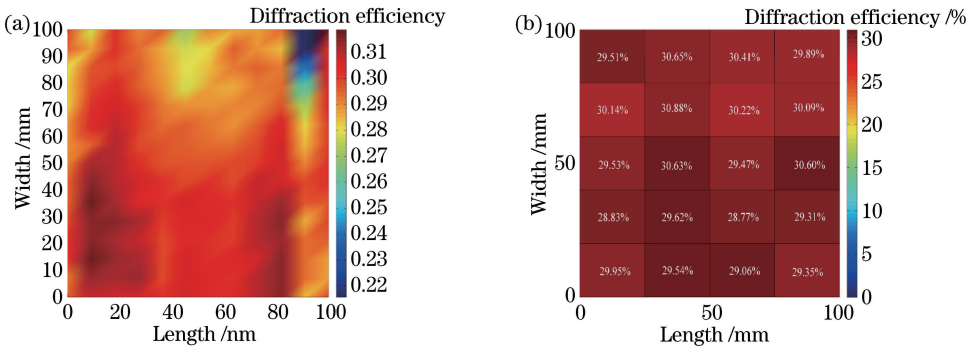


图 7 TE 模式下衍射效率的分布图。(a) 测量点分布图;(b)区域分布图

Fig. 7 Diffraction efficiency map for TE mode. (a) Distribution of measurement points; (b) areal map

匀。TE 偏振下的衍射效率也符合理论计算值。从以上分析可知,采用激光直写技术制作的光栅具有较高的质量,该技术具有较为广阔的发展前景。

4 结 论

本课题组利用激光直写技术成功制作出线数为 1780 line/mm、尺寸为 100 mm×100 mm 的镀金光栅,并对该光栅的衍射效率进行了测量。测量结果说明,该光栅的衍射效率很均匀,约为 90%,与理论计算结果相差不大,证明了激光直写技术制作光栅的可行性,为后续制作更大面积的高质量光栅提供了参考。

参 考 文 献

[1] Song N. The design of the ruling system of the large diffraction grating ruling engine and the mechanical correction of grating-line curve error [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 13-17.
宋楠. 大光栅刻划机刻划系统结构与刻线弯曲误差机械修正[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015: 13-17.

[2] Wang J. The fabrication of diffraction gratings based

on the direct laser writing system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 17-19.

王津. 基于激光直写系统的衍射光栅制备[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2017: 17-19.

[3] Wang J, Zhou C H, Ma J Y, *et al.* Highly efficient reflective Dammann grating with a triangular structure[J]. Applied Optics, 2016, 55(19): 5203-5207.

[4] Zhang J M, Wu X J, Ma X H, *et al.* Design and optimization of transmission grating for spectral beam combining technique [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1005001.
张俊明, 吴肖杰, 马晓辉, 等. 用于光谱合束技术的透射光栅设计与优化[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1005001.

[5] Tian K, Zou Y G, Hai Y N, *et al.* Design of subwavelength anti-reflective grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901004.
田锬, 邹永刚, 海一娜, 等. 亚波长抗反射光栅的设计[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901004.

[6] Wang J, Zhou C H, Ma J Y, *et al.* Modal analysis of 1×3 reflective triangular gratings under normal incidence[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(4): 040902.

- [7] Su S J. Research on theory and key technologies of long-range displacement measuring with nanometer resolution by grating [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001: 53-58.
苏绍璟. 大量程纳米光栅位移测量理论及关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001: 53-58.
- [8] Boyd R D, Britten J A, Decker D E, *et al.* High-efficiency metallic diffraction gratings for laser applications [J]. *Applied Optics*, 1995, 34 (10): 1698-1699.
- [9] Lu P P, Sun K X, Byer R L, *et al.* Precise diffraction efficiency measurements of large-area greater-than-99%-efficient dielectric gratings at the Littrow angle [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (11): 1708-1710.