

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0211-04

微型可编程光栅最大闪耀角测定及 光学性能优化

王兰兰 李晓莹 虞益挺 燕斌 李太平

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 作为一项重要的光学性能,微型可编程光栅的最大闪耀角决定了其可用光谱波段。提出了两种微型可编程光栅最大闪耀角的实验测量方法,同时搭建了一个简单的光学系统验证其可行性及有效性。测量结果与理论计算和数值仿真的结果比较吻合,相对误差均小于3.5%。结合实验现象,利用 Matlab 软件仿真分析了释放孔对衍射结果的影响,为提高微型可编程光栅的光学性能提供了技术参考。

关键词 微机电系统;微型可编程光栅;优化分析;最大闪耀角

中图分类号 TN303 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0211

Measurement of Maximum Blazed Angle and Optimization Analysis for a Micro Programmable Blazed Grating

Wang Lanlan Li Xiaoying Yu Yiting Yan Bin Li Taiping

(MEMS/NEMS Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract As an important optical performance, the maximum blazed angle decides the applicable spectrum band for the micro programmable grating. For achieving the maximum blazed angle of the fabricated micro programmable grating, two experimental measuring methods were proposed, and a simple optical system was set up for verifying their feasibility and efficiency. The measured results agree well with both the theoretical computation and numerical simulation, and the relative errors are less than 3.5%. In addition, according to the experimental phenomenon, a simulation with Matlab software was performed to analyze the influence of release holes on the diffraction pattern. It offers a technical reference for improving the optical performance of the micro programmable grating.

Key words micro-electronic-mechanical system (MEMS); micro programmable gratings; optimal analysis; maximum blazed angle

1 引言

光栅作为一种重要的分光元件在光谱分析、光通信、成像等领域被越来越多地采用,然而传统光栅的结构参数无法根据实时需要而改变,在很大程度上限制了光栅的应用。微型可编程光栅是一种基于微机电系统(MEMS)技术的衍射光学元件,具有体积小、重量轻、成本和功耗低等优点。尤其是结构参数的动态可控性,使其能够实现对衍射光强的重新分布,这是传统光栅所不具备的^[1]。通过前期研究,本实验室已成功研制出一种新型的微型可编程光栅^[2],它由双层多晶硅表面工艺制作,通过静电力驱

动使光栅微梁发生扭转,从而可根据实时需要对闪耀角进行动态控制。作为一项重要的光学性能,最大闪耀角决定着微型可编程光栅的可用光谱段及其应用领域。针对研制的微型可编程光栅,本文提出了最大闪耀角的两种实验测量方法并进行可行性验证,同时结合实验现象提出了一种优化光学性能的方法。

2 工作原理

图1为微型可编程光栅的扫描电镜(SEM)照片,光栅共有120行,每一行由8个基本的光栅单元

基金项目:西安应用材料创新基金(XA-AM-200610)和西北工业大学博士论文创新基金(CX200611)资助项目。

作者简介:王兰兰(1982—),女,硕士研究生,主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail:wanglanlan0412@126.com

导师简介:李晓莹(1968—),女,副教授,主要从事传感检测技术、微机电系统等方面的研究。

E-mail:xiaoy@nwpu.edu.cn(通信作者)

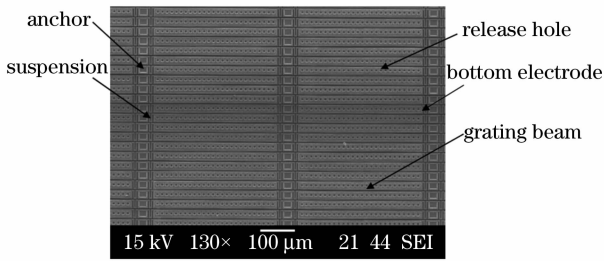


图1 微型可编程光栅的扫描电镜照片

Fig.1 SEM photo for the micro programmable grating 组成,光栅单元主要由光栅微梁、支撑梁、锚点、下电极组成,其中光栅微梁是其主体部分,由支撑梁悬空连接在锚点上,并通过锚点固定于基底上。光栅微梁表面溅射一层铝以提高器件的反射率。在加工过

程中,为了缩短牺牲层的腐蚀时间,使光栅微梁尽快释放,在它的上面设计了一定数量的释放孔。

图2(a)所示为当不施加驱动电压时光栅微梁不发生扭转,该微型可编程光栅相当于一个反射式平面光栅,此时衍射光谱的干涉零级和单槽衍射主极大重合在一起,入射光的大部分能量集中在干涉零级。图2(b)所示为当在光栅微梁与下电极之间施加驱动电压,产生的静电力使光栅微梁绕支撑梁发生扭转,扭转的角度即为该微型可编程光栅的闪耀角。闪耀角的存在使单槽衍射主极大发生偏移,使入射光的大部分能量转移到其他非零级次。通过静电力调节闪耀角,能够使微型可编程光栅在特定方向上产生最大强度衍射级次 k 。

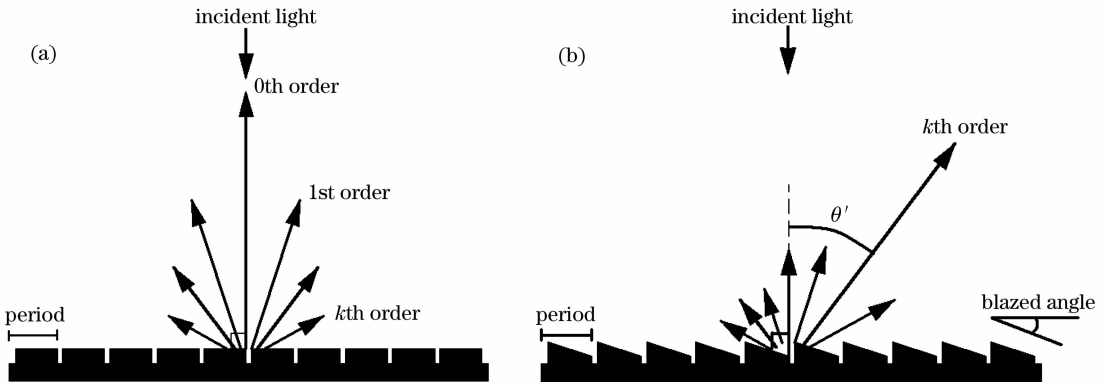


图2 衍射光强分布。(a) 不施加驱动电压;(b) 施加驱动电压

Fig.2 Intensity distribution of diffracted light. (a) without driving voltage; (b) with driving voltage

3 最大闪耀角测量

3.1 测量原理

当光栅微梁完全扭转时,最大闪耀角 θ_b 的测量原理如图3所示,为方便测量并考虑到入射角对闪耀级次的影响,使激光束 I 垂直光栅面入射^[3,4],图中 N 为光栅面法线, N' 为倾斜面法线, I' 为相对于

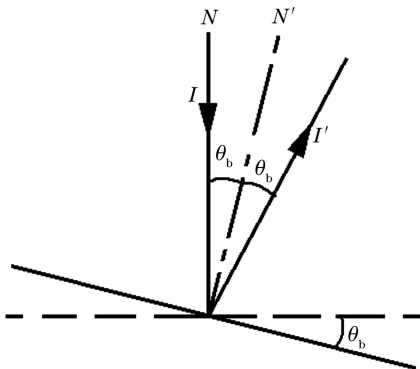


图3 最大闪耀角测量原理图

Fig.3 Sketch of measuring the maximum blazed angle

N' 满足反射定律的最大强度衍射级次 k 。

设光栅周期为 d , 衍射角为 θ' , 用光栅方程描述衍射级次有

$$d \sin \theta' = k \lambda, \quad (1)$$

设 λ_b 为 θ_b 对应的闪耀波长, 则相对于 N' 满足反射定律的最大强度衍射级次 k 有

$$d \sin(2\theta_b) = k \lambda_b, \quad (2)$$

所以最大闪耀角为

$$\theta_b = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{k \lambda_b}{d}\right), \quad (3)$$

且最大强度衍射级次 k 的衍射角 θ' 满足

$$\theta_b = \frac{1}{2} \theta', \quad (4)$$

(3),(4)式为测量微型可编程光栅最大闪耀角 θ_b 的计算公式。

方法1。采用(3)式计算:由于闪耀波长 λ_b 未知,采用实验光源 λ 代替 λ_b 即可得到 θ_b 的测量值 θ'_b , 相对误差为

$$\frac{\Delta\theta_b}{\theta_b} = \frac{k\lambda}{d \arcsin\left(\frac{k\lambda}{d}\right) \sqrt{1 - \frac{k^2\lambda^2}{d^2}}} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (5)$$

方法2。采用(4)式计算：测量最大强度衍射级次 k 对应的衍射角 θ' ，其 $1/2$ 即为最大闪耀角 θ_b 的测量值 θ'_b ，相对误差为

$$\frac{\Delta\theta_b}{\theta_b} = \frac{\Delta\theta'}{\theta'}. \quad (6)$$

3.2 实验测量

研制的微型可编程光栅周期 $d = 27 \mu\text{m}$ ，利用 ANSYS 理论计算和数值仿真得到的最大闪耀角的理论值为 5.23° ^[1]。为了简单快速地测量出其最大闪耀角，设计并搭建了如图4所示的光学系统。

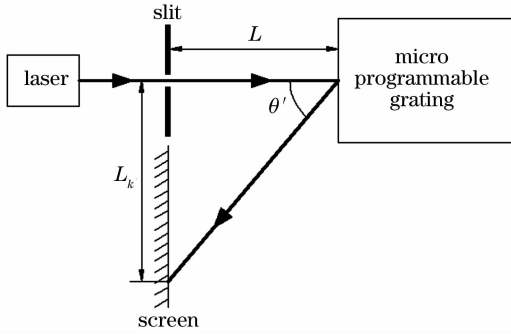


图4 测量最大闪耀角的光学系统

Fig. 4 Experimental setup for measuring the maximum blazed angle

实验光源采用波长为 632.8 nm (红色) 和 532 nm (绿色) 两种激光束，狭缝用于在不施加驱动电压时校准激光束完全垂直于光栅面入射。光屏和狭缝处于同一水平位置， L 为狭缝到光栅面的距离， L_k 为狭缝到最大强度衍射级次 k 的距离。该光学系统的测试原理如下：当不施加驱动电压时调整狭缝的位置，使入射激光束与干涉零级完全重合，激光束垂直于光栅面入射；然后给微型可编程光栅施加驱动电压，使光栅微梁完全扭转，此扭转角度即为微型可编程光栅的最大闪耀角 θ_b 。图5给出光栅微梁完全扭转的情况下，分别采用两种实验光源在接收屏上观察到的衍射光强分布，其中光强最强的一行是相对于 N' 满足反射定律的最大强度衍射级次 k 。

对于两种实验光源，由图5可知最大强度衍射级次分别为 $k=8, k=9$ ，代入(3)式中得到最大闪耀角的测量值及测量误差如表1所示， $\Delta\theta_b$ 为测量值与理论值之差， E 为相对误差。

由图4可知 $\tan \theta' = L_k/L$ ，代入(4)式得

$$\theta_b = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{L_k}{L}\right). \quad (7)$$

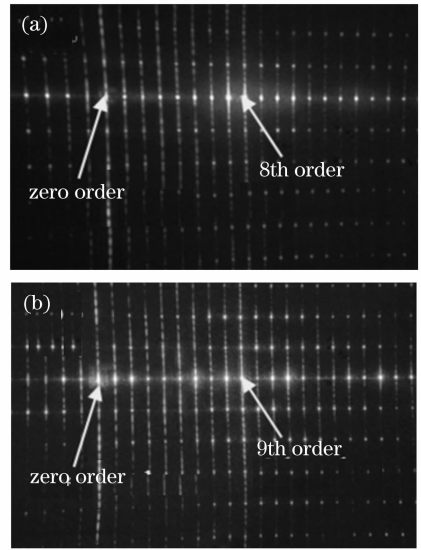


图5 接收屏上观察到的光强分布。(a) 红色；(b) 绿色

Fig. 5 Intensity distribution observed on the screen

(a) red laser; (b) green laser

表1 方法1的测量误差

Table 1 Errors measured by method 1

λ / nm	$\theta'_b / (^\circ)$	$\Delta\theta_b / (^\circ)$	$E / \%$
632.8	5.40	0.17	3.2
532	5.11	0.12	2.3

对于两种实验光源测得 $L_{k1} = 79.3 \text{ mm}$, $L_{k2} = 84.9 \text{ mm}$ ，且 $L = 445 \text{ mm}$ ，代入(7)式得到最大闪耀角的测量值及测量误差如表2所示。

表2 方法2的测量误差

Table 2 Errors measured by method 2

λ / nm	$\theta'_b / (^\circ)$	$\Delta\theta_b / (^\circ)$	$E / \%$
632.8	5.05	0.18	3.4
532	5.40	0.72	3.3

3.3 结果分析

由表1、表2可见，两种测量方法的相对误差均在 3.5% 以内，说明对于研制的微型可编程光栅均可比较准确地测量出其最大闪耀角，且测量方法简单可靠、便于操作、实验装置成本低。

4 光学性能优化

在测定最大闪耀角的实验过程中，发现微型可编程光栅的衍射图像呈现二维分布，如图5所示。而理想情况下的衍射图像应为一维分布。二维衍射将会降低主衍射级次上的衍射效率。经过分析讨论，认为二维衍射是由于光栅微梁上周期性分布的释放孔引起的。为了研究释放孔对衍射图像的影响，采用了基于 Matlab 软件的傅里叶光学实验模拟

方法对微型可编程光栅的衍射图像进行数值仿真^[5], 获得其仿真衍射图像如图 6(a)所示, 与实验观察到的衍射图像基本吻合。

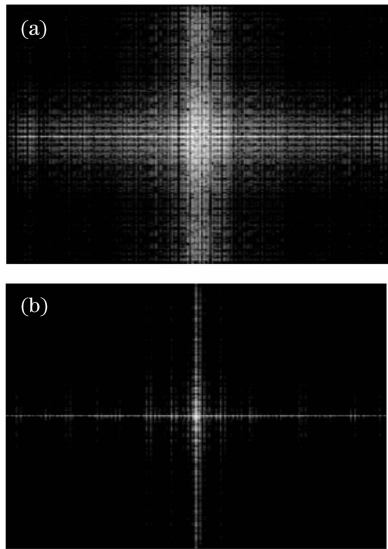


图 6 仿真衍射图像。(a) 含释放孔; (b) 不含释放孔
Fig. 6 Simulated diffraction patterns
(a) with release holes; (b) without release holes

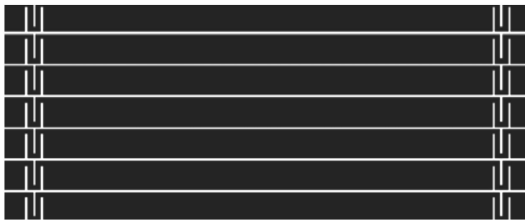


图 7 不含有释放孔的光栅微梁结构
Fig. 7 Grating structure without release holes on grating beams

为了进一步优化微型可编程光栅的光学性能, 设计了如图 7 所示的光栅微梁结构, 这种结构在光栅微梁上不含有释放孔, 对其仿真结果如图 6(b)所示, 可基本消除主衍射级次上的二维衍射。通过图

6(a), (b)对比可见, 释放孔的存在对衍射结果有较大影响, 是造成二维衍射的主要原因。在工艺允许的情况下应去除释放孔, 若必须设计释放孔, 则应尽量减少其数量。

5 结 论

提出了两种微型可编程光栅最大闪耀角的实验测量方法, 并通过搭建光学系统验证了其可行性和有效性, 测量误差均小于 3.5%, 研制的微型可编程光栅的最大闪耀角大于 5° , 可满足大部分的工程应用。对造成微型可编程光栅衍射图像二维分布的原因进行了仿真分析并提出了改进方案, 为优化其光学性能提供了技术参考。

参 考 文 献

- 1 Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao *et al.*. Optical characteristics analysis and simulation of grating light valve [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11):1452~1456
张 洁, 黄尚廉, 付红桥 等. 光栅光阀的光学特性分析与仿真 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(11):1452~1456
- 2 Yu Yiting, Yuan Weizheng, Wang Lanlan *et al.*. Analysis and experimental measurement on maximum blazed angle for micro-programmable gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10):2220~2224
虞益挺, 苑伟政, 王兰兰 等. 微型可编程光栅最大闪耀角的理论分析与实验 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10):2220~2224
- 3 Ren Keqin, Ma Mingzhu, Zhang Jingchao *et al.*. The simple measurement of grating constant [J]. *Laser Journal*, 1994, **15**(2):63~69
任克勤, 马明珠, 张景超 等. 光栅常数的一种简便测量方法 [J]. *激光杂志*, 1994, **15**(2):63~69
- 4 Wu Wenyun, Zhou Xiaoqing. A method for determining grating constant [J]. *Physical Experiment of College*, 2004, (4):18~21
邬文云, 周小清. 光栅常数测定的一种方法 [J]. *大学物理实验*, 2004, (4):18~21
- 5 Chen Cong, Li Dingguo. The numerical simulation of diffraction based on fast Fourier transform [J]. *College Physics*, 2004, (9):46~49
陈 聪, 李定国. 基于快速傅里叶变换的衍射现象的数值仿真 [J]. *大学物理*, 2004, (9):46~49