

文章编号: 0253-2239(2008)11-2220-05

# 微型可编程光栅最大闪耀角的理论分析与实验

虞益挺 苑伟政 王兰兰 乔大勇 梁庆

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 在机电系统技术的基础上,采用两层多晶硅表面微加工工艺,设计并加工制作了一种闪耀角可调式的微型可编程光栅。介绍了微型可编程光栅的基本工作原理及结构设计特点,针对其最主要的一个光学参量——最大闪耀角,根据设计的光栅结构尺寸进行了理论计算,并利用 ANSYS 有限元仿真结合 Matlab 软件的数据处理功能进行了数值模拟。设计并搭建了一个简单易操作的光学实验系统,对最大闪耀角进行了实际测量。结果表明,理论计算、数值模拟以及实际测量的最大闪耀角非常吻合,制作的微型可编程光栅的最大闪耀角超过  $5^\circ$ 。

**关键词** 机电系统; 微型可编程光栅; 闪耀角; 表面微加工工艺

**中图分类号** TN303 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2220

## Theoretical Analysis and Experimental Measurement on the Maximum Blazing Angle for Microprogrammable Gratings

Yu Yiting Yuan Weizheng Wang Lanlan Qiao Dayong Liang Qing

(MEMS/NEMS Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xian, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** Based on the microelectromechanical systems (MEMS) technology, a new microprogrammable grating with tunable blazing angle was designed and fabricated by using the two-layer polysilicon surface micromachining process. The basic operational principle and structural characterizations fabricated grating were briefly introduced and then the maximum blazing angle, the most important optical parameter, was theoretically computed according to the designed structural dimensions and numerically simulated by combining the finite element simulation tool of ANSYS with Matlab's data processing functionality. A simple but efficient optical system was set up for measuring the maximum blazing angle. The results from simulation, calculation and experiments agree very well with each other. The maximum blazing angle of the fabricated micro programmable grating is larger than  $5^\circ$ .

**Key words** MEMS; microprogrammable gratings; blazing angle; surface micromachining process

### 1 引言

光栅作为一种重要的分光元件近年来在计量、成像、信息处理、集成光学和光通信等新兴领域被越来越多地采用<sup>[1~7]</sup>。然而,以传统技术制作的光栅其光栅常数、闪耀角等结构参数都无法随应用的实时要求而改变,即实现工作过程中的动态控制,因此其应用受到很大程度的限制<sup>[8]</sup>。近年来,以微机电

系统(MEMS)技术以及微光机电系统(MOEMS)技术为代表的微纳米技术以其体积小、重量轻、性能稳定、成本及功耗低等显著优点在光学领域得到了广泛应用,使光学元件的尺寸大幅度减小,并实现了光学元件由静到动的飞跃,为开发新型功能光器件开辟了一条全新的发展道路<sup>[9~11]</sup>。

MEMS 微型可编程光栅是在 MOEMS 以及光

**收稿日期**: 2008-02-25; **收到修改稿日期**: 2008-03-27

**基金项目**: 教育部高等学校科技创新工程(706055)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0869)、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)资助课题。

**作者简介**: 虞益挺(1980—),男,博士研究生,主要从事微光机电系统以及微机电系统微加工工艺等方面的研究。

E-mail: yyt@mail.nwpu.edu.cn

**导师简介**: 苑伟政(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事微/纳机电系统、精密制造技术等方面的研究。

E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn

栅技术的基础上诞生的一个新的研究领域,它是一种全新概念下的光栅,具有软件可编程控制的高灵活性特点,并表现出独特的能量再分布能力,是一种新型的多功能光学器件<sup>[12~15]</sup>。MEMS 技术的采用不仅实现了光栅的微型化和集成化,易于构造大面阵光栅阵列,同时显著降低了制造成本、提高了器件的工作性能,并且使光学片上系统(System on a chip, SOC)的最终实现成为可能,其中在结合了 MEMS 技术、微电子技术、精密机械加工技术和封装技术等基础上发展起来的微型光谱仪<sup>[16~18]</sup>就是最典型的例子。

本文采用 MEMS 技术,设计并加工制作了一种新型的微型可编程光栅,对其最重要的一个光学参量——最大闪耀角,进行了理论的仿真分析与实际测量。

## 2 微型可编程光栅

图 1 所示为设计的微型可编程光栅的部分结构版图,图 2 是用于制作微型可编程光栅的表面微加工工艺示意图。

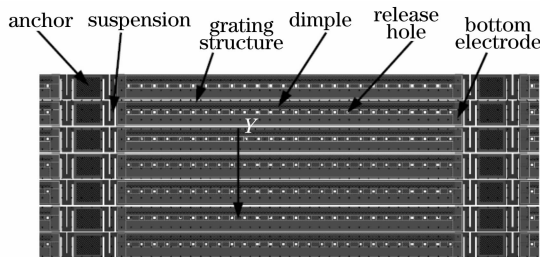


图 1 微型可编程光栅的结构版图

Fig. 1 Layout for the designed micro programmable gratings

整个光栅在 Y 方向上(如图 1)共有 120 行,每

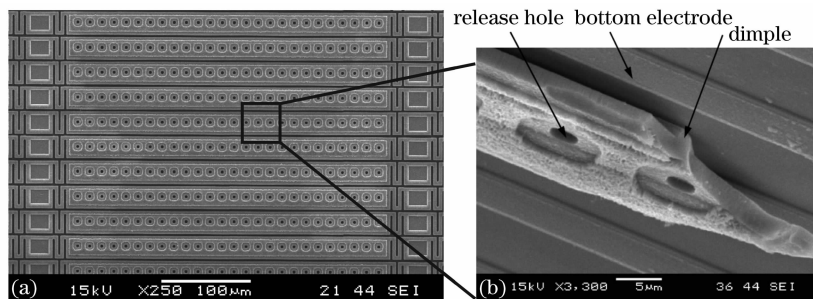


图 3 微型可编程光栅的扫描电镜照片(a)及其局部放大图(b)

Fig. 3 SEM photograph (a) and partial enlarged drawing (b) for micro programmable gratings

## 3 最大闪耀角的仿真分析

表 1 给出了设计的微型可编程光栅的主要结构

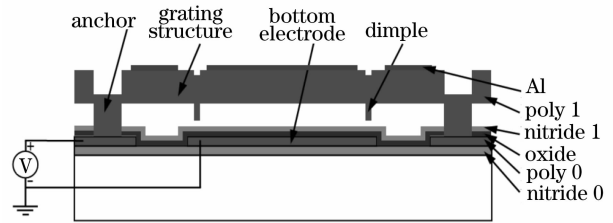


图 2 制作微型可编程光栅的表面微加工工艺示意图  
Fig. 2 Schematic of surface micromachining process for fabricating the microprogrammable gratings

一行由 8 个基本的光栅单元组成。光栅单元主要由光栅结构、支撑梁、锚点、下电极、凸点(Dimple)和释放孔组成,其中光栅结构是其主体部分,由两边的支撑梁悬空连接在锚点上,并通过锚点固定于基底上;光栅结构以及下电极均由掺杂的多晶硅制成,能够导电,从而构成一可变的平板电容器(光栅结构作为上极板),在光栅结构与下电极之间施加电压,产生的静电吸引力使光栅结构绕支撑梁发生扭转,扭转的角度即为微型可编程光栅的闪耀角;光栅结构的表面溅射一层金属铝以提高器件的反射率。值得注意的是:在加工过程中,为了缩短牺牲层的腐蚀时间、使光栅结构尽快释放,在结构上设计了一定数量的释放孔,同时释放孔的存在还可减小空气阻尼,有利于结构的动态工作性能;实际工作时,光栅结构除了绕支撑梁产生扭转外,还存在垂直基底方向上的变形,因此设计了凸点结构,它是光栅结构底部的小凸块,当光栅结构向下运动一定距离时,小凸块先与基底接触,从而在进一步增加电压时消除了结构在该方向上的变形,而只作单纯的扭转。

图 3(a)所示为制作的微型可编程光栅的扫描电镜(SEM)照片,从图 3(b)的局部放大图可见光栅结构底部的凸点结构以及下电极。

参量以及工艺参量。采用有限元分析软件中的多物理场求解器(Multi-field solver)对光栅单元进行三

维(3D)耦合场静态仿真分析,其中结构域包括实体单元 SOLID92 以及接触对单元 TARGE170 和 CONTA175,电场域包括静电场单元 SOLID123。分析过程中所用的多晶硅材料属性如下:杨氏模量 163 GPa,泊松比 0.22,密度  $2.33 \text{ g/cm}^3$ 。

表 1 微型可编程光栅的主要结构参量以及工艺参量

Table 1 Main structural and process parameters for the microprogrammable gratings

Parameters	Value / $\mu\text{m}$
Length of grating structure	350
Width of grating structure	25
Thickness of grating structure	2
Width of suspension	4
Length of bottom electrode	350
Width of bottom electrode	10
Thickness of bottom electrode	0.3
Thickness of sacrificial layer	2
Depth of dimple	1.75
Side length of release hole	3
Critical dimension of layout	2

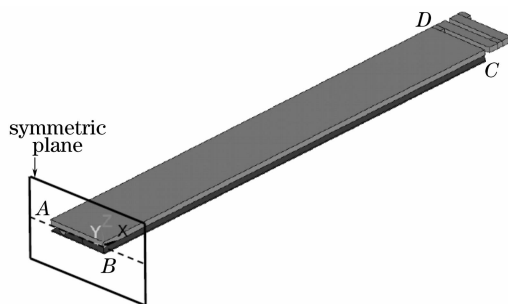


图 4 光栅单元的有限元模型

Fig. 4 Finite element model for the grating element

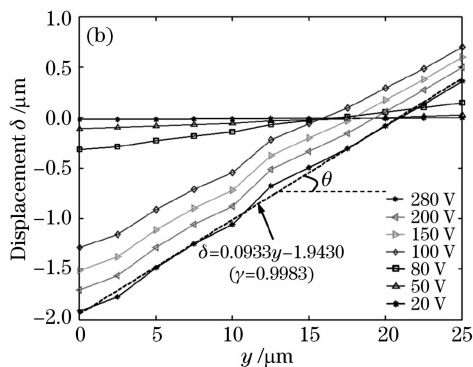
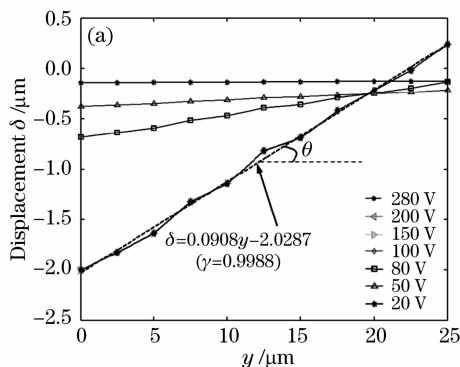


图 6 不同电压作用下 AB (a)与 CD (b)直线上各等分点的变形量

Fig. 6 Displacement of equidistant points in line AB (a) and CD (b) at different driving voltage

#### 4 最大闪耀角的实验测量

为了既简单又快速地测得制作的微型可编程光栅的最大闪耀角,设计并搭建了如图 7 所示的光学

图 4所示为微型可编程光栅的有限元模型,为了减小建模难度、提高求解效率,只分析一半的光栅单元,这通过对称截面处施加对称边界条件来实现,同时不考虑光栅结构上的释放孔以及金属铝膜的影响。图 5 给出了光栅单元的基本工作原理,假设光栅结构的的上表面在结构的工作过程中始终保持平整,根据设计的基本结构参量( $l=19.5 \mu\text{m}$ , $h=1.75 \mu\text{m}$ ),可求出光栅单元工作时的最大闪耀角  $\theta_{\text{max}}=5.128^\circ$ 。

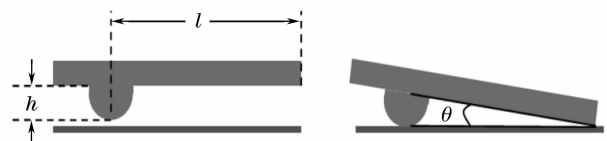


图 5 光栅单元的基本工作原理

Fig. 5 Operational principle for the grating element

对光栅单元进行有限元分析可得到的直接结果是光栅结构上的不同位置随驱动电压的变形量,为了得到闪耀角参量,需要对结果作一些处理,基本的思路如下:在光栅结构的的上表面取四个顶点,分别记为 A、B、C 和 D,如图 4,将直线 AB 和直线 CD 十等分,记录下不同驱动电压作用时各等分点的变形量,并用 Matlab 软件绘于图 6;对同一电压进行一阶拟合,得到该电压作用下变形量  $\delta$  与坐标位置  $y$  的关系式(图 6 给出了 280 V 下的拟合关系式, $\gamma$  为相关系数),拟合得到的直线与横轴的夹角即为光栅单元的闪耀角  $\theta$ 。仿真结果可见,光栅单元的静电下拉电压在 97 V 左右。从图 6 可推得,直线 AB 附近的最大闪耀角为  $5.188^\circ$ ,直线 CD 附近的最大闪耀角为  $5.330^\circ$ 。

系统,其中激光器采用的波长分别为 632.8 nm(红色)和 532 nm(绿色),狭缝用于校正初始状态下(不施加驱动电压时)光栅单元的表面与入射光束的垂

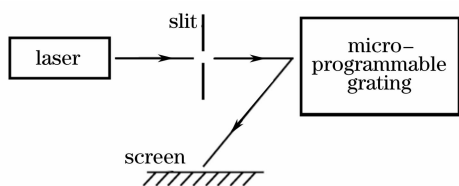


图 7 测量微型可编程光栅最大闪耀角的光学系统

Fig. 7 Experimental setup for measuring the maximum blazing angle of micro-programmable grating

直。测试系统的工作原理如下：当不施加驱动电压时，调整激光器与微型可编程光栅的相对位置，使入射光束与经过光栅面反射的出射光束完全重合；然后，给微型可编程光栅施加一驱动电压，使光栅结构发生扭转，扭转角度即为闪耀角  $\theta$ ，根据基本的光学原理，此时出射光偏离入射光的角度为  $2\theta$ ，因此通

过测得该角度，其  $1/2$  就是微型可编程光栅的扭转角。该系统具有测量方便快捷、实验现象明显、成本低等特点。

图 8 给出了驱动电压为 180 V 时，在接收屏上观察到的出射光的光强变化，光强最大的一行是微型可编程光栅的主衍射方向，理想情况下的衍射图案是一维的，然而由于微加工工艺的特殊性以及周期分布的释放孔的存在，得到的衍射图案呈二维分布。从图 8 可很明显的看出，红色激光束的最大偏转方向在其 +8 级上，测得的最大偏转角度为  $10.6^\circ$ ；绿色激光束的最大偏转方向在其 +9 级上，测得的最大偏转角度为  $10.2^\circ$ 。因此，采用两种激光测得的微型可编程光栅的最大闪耀角分别为  $5.3^\circ$  和  $5.1^\circ$ ，与仿真分析结果非常接近。

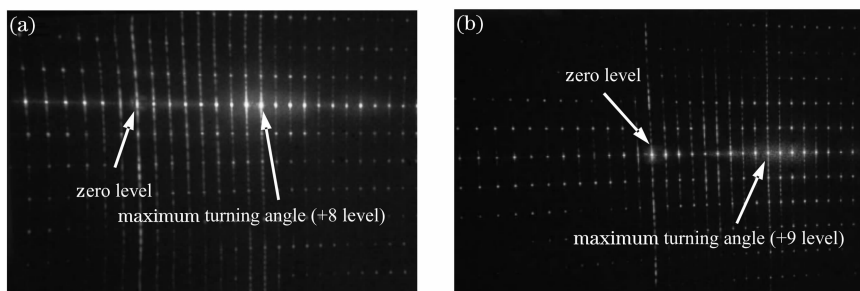


图 8 驱动电压 180 V 情况下接收屏上观察到的光强变化。(a) 红色；(b) 绿色

Fig. 8 Change of the optical intensity observed on the screen at 180 V. (a) Red laser (632.8 nm), (b) green laser (532 nm)

## 5 结 论

设计并加工制作了一种基于 MEMS 技术的微型可编程光栅，并对器件的最大可工作的闪耀角进行了仿真分析与实际测量，结果表明，两者得到的结果非常吻合，制作的微型可编程光栅的最大闪耀角超过  $5^\circ$ 。

对于不同驱动电压与闪耀角的变化关系，采用介绍的仿真分析方法以及测试系统也可很方便地获得。另外，微型可编程光栅的机械性能也是器件正常工作必须考虑的，可采用激光多普勒技术得到不同驱动电压作用下光栅结构不同位置处的变形量以及器件的共振频率，同时采用这种方法也可定量测出驱动电压与闪耀角之间的相互关系。

**致谢** 感谢北京大学微电子学研究院 MEMS 研究中心的张大成、杨芳等老师在器件的版图设计以及加工制作过程中提供的帮助。

## 参 考 文 献

1 Zhou Sumei, Zhou Changhe. Wavefront measurement by using

- quadratic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 1~4  
周素梅, 周常河. 二次光栅在波前测量中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 1~4
- 2 Zhang Haitao, Gong Mali, Zhao Dazun *et al.*. Design and error analysis of trapeziform grating for high density optical disk storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 92~98  
张海涛, 巩马理, 赵达尊等. 高密度光盘存储中的梯形光栅设计和误差分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 92~98
- 3 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. A high-sensitivity in-fibre Bragg grating pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 187~189  
傅海威, 乔学光, 贾振安等. 高灵敏度的光纤光栅压强传感器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 187~189
- 4 Rao Yunjiang, Luo Xiaodong, Ran Zengling. A 100 km fiber Bragg grating sensor system based on swept laser and optical amplification[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 680~683  
饶云江, 罗小东, 冉曾令. 基于扫描激光器和光放大的 100 km 光纤布拉格光栅传感系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 680~683
- 5 Huang Rui, Qu Ronghui, Fang Zujie. Analysis and fabrication of tunable edge fibre Bragg grating filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1189~1192  
黄锐, 瞿荣辉, 方祖捷. 带宽可调的斜边光纤光栅滤波器的设计与制作[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1189~1192
- 6 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Polarization modulation technology for a position sensor with grating imaging [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1397~1401  
胡建明, 曾爱军, 王向朝. 光栅成像位置传感器中的偏振调制技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1397~1401

- 7 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 272~274  
郭爱林,杨庆伟,谢兴龙等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 272~274
- 8 Yin Ling, Chen Feifan. Research on micromechanical characteristics of programmable phase grating[J]. *Microfabrication Technology*, 2003, (3): 72~76  
殷玲,陈非凡. 可编程相位光栅结构的微机械特性研究[J]. *微细加工技术*, 2003, (3): 72~76
- 9 A. M. Madni, L. A. Wan. Microelectromechanical systems (MEMS): an overview of current state-of-the-art[C]. *Proc. IEEE, Aerospace Conference*, 1998, **1**: 421~427
- 10 Fu Bo, Zhao Yueyue. Overview about recent development of MOEMS[J]. *Sensor World*, 2004, (10): 11~17  
付博,赵月月. 微光机电系统(MOEMS)研究综述[J]. *传感器世界*, 2004, (10): 11~17
- 11 H. Fujita. MEMS/MOEMS application to optical communication [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4557**: 11~17
- 12 D. T. Amm, R. W. Corrigan. Grating light valve<sup>TM</sup> technology: update and novel applications [C]. *Information Display Symposium*, Anaheim, CA, 19 May, 1998
- 13 T. S. Perry. Tomorrow's TV-the grating light valve[J]. *IEEE Spectrum*, 2004, **41**(4): 38~41
- 14 E. S. Hung, S. D. Senturia. Extending the travel range of analog-tuned electrostatic actuators[J]. *J. Microelectromech. System*, 1999, **8**(4): 497~505
- 15 J. C. Brazas, M. W. Kowarz. High-resolution laser-projection display system using a grating electromechanical system (GEMS) [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5348**: 65~75
- 16 J. T. Daly, E. A. Johnson, A. Bodkin *et al.*. Recent advances in miniaturization of infrared spectrometers[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **3953**: 70~87
- 17 S.-H. Kong, J. H. Correia, G. de Graaf *et al.*. Integrated silicon microspectrometers [J]. *IEEE Instru. Meas. Mag.*, 2001, **4**: 34~38
- 18 Shi Junfeng, Hui Mei, Wang Dongsheng *et al.*. Micromation and applications of spectrometers[J]. *Opt. Technol.*, 2003, **29**(1): 13~16  
史俊锋,惠梅,王东生等. 光谱仪的微型化及其应用[J]. *光学技术*, 2003, **29**(1): 13~16