

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0229-04

一种新的微型可编程光栅的研究及其应用

虞益挺 苑伟政 王兰兰 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 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, 研制了一种新型的微型可编程光栅, 利用静电驱动方式实现对光栅闪耀角的动态控制。该微型可编程光栅具有结构简单、大闪耀角可调等特点。通过对样件主要性能指标的测试, 得到光栅的下拉电压在 110~115 V 范围、回复电压在 74~65 V 范围、谐振频率约 78 kHz、调节时间约 12 μ s, 其最大可工作闪耀角超过 5°, 测量结果与仿真基本吻合。同时探讨了该微型可编程光栅作为光开关应用的可能性, 并针对现有样件存在的问题, 提出了改进意见。

关键词 机电系统; 微型可编程光栅; 表面微加工; 闪耀角; 光开关

中图分类号 TN303 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0229

A New Microprogrammable Grating and Its Potential Application

Yu Yiting Yuan Weizheng Wang Lanlan Yan Bin Li Taiping

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

Abstract Based on the microelectromechanical systems (MEMS) technology, a new microprogrammable grating with its blazed angle electrostatically modulated was developed using a two-layer polysilicon surface micromachining process, which has a simple structure and a large tunable capability in its blazed angle. A pull-in voltage of 110~115 V, restoring voltage of 74~65 V, resonant frequency of ~78 kHz, adjusting time of ~12 μ s, and maximum operational blazed angle of more than 5° were achieved. The measured results are basically consistent with the simulation. The possibility of using the new microprogrammable grating as an optical switch was discussed in detail. And a few recommendations were proposed for such application considering the existing problems of the grating.

Key words MEMS; microprogrammable gratings; surface micromachining; blazed angle; optical switch

1 引 言

光栅作为一种重要的分光元件, 在光谱分析、滤波、传感、计量、成像、光通信等领域具有广泛应用。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, 因此其应用受到很大程度的限制。近年来, 机电系统 (MEMS) 技术在光学领域得到了飞速发展, 诞生了微光机电系统 (MOEMS)。它使光学元件的尺寸大幅度减小, 实现了光学元件由静到动的飞跃, 为研究开发新型功能光器件开辟了一条新的发展道路^[1]。

MEMS 微型可编程光栅是一种全新概念的光

栅, 具有软件可编程控制的高灵活性特点, 具有独特的能量再分布能力, 是一种新型的多功能光学器件。1997 年, Burns 等最早报导了两种基于 MEMS 技术的闪耀角可调式微型可编程光栅^[2,3], 分别采用静电驱动以及热驱动两种工作方式, 三层多晶硅表面微加工工艺 (MUMPS) 制作而成。为了使光栅微梁在驱动力作用下产生扭转, 从而实现闪耀, 设计了较复杂的支撑梁结构。然而, 文献仅给出了实际测量的驱动电压与闪耀角的对应关系, 静电驱动以及热驱动实现的最大闪耀角分别为 2.5° 和 1.73°。随后, Ito^[4] 及 Li 等^[5] 分别报导了一种闪耀式的微

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: 虞益挺(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事微光机电系统以及 MEMS 微加工工艺研究。

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、精密制造技术等相关领域的研究。

E-mail: yuanwz@nwpu.edu.cn(通信联系人)

型可编程光栅。然而,这两种光栅在加工完以后的闪耀角是固定的,其可编程性分别在于光栅微梁的垂直运动^[4]以及水平运动^[5]。

本文以 MEMS 技术为基础,研制了一种新型的微型可编程光栅,采用静电驱动方式对其闪耀角进行动态调制;给出了其主要的机电以及光学性能指标的测量结果;就该微型可编程光栅的一个典型应用——光开关进行了讨论。

2 样件制备及其测试

2.1 工作原理

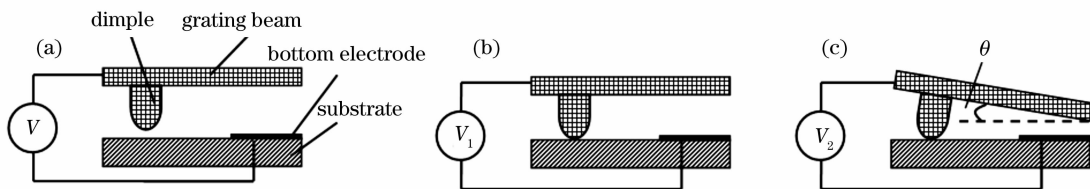


图 1 闪耀角可调式微型可编程光栅的基本工作原理

Fig. 1 Operational principle for the designed microprogrammable grating.

为了使光栅在驱动电压作用下实现闪耀,对 Dimple 结构进行了专门设计。目前,就表面微加工工艺而言,引入 Dimple 结构的主要目的在于释放过程中的防黏附,因为它大幅度减小了结构与基底之间的有效接触面积,其形式为结构底部的小凸块,深度一般为牺牲层厚度的 $1/4 \sim 1/3$ 。然而,本文设计的 Dimple 结构除了具有防黏附功能外,还是光栅微梁的一个有效组成部分,是保证闪耀角可调式微型可编程光栅正常工作、提高器件光学性能的关键,其深度接近牺牲层厚度。工作时,光栅微梁在静电力作用下产生扭转并向下运动;当电压达到 V_1 时(图 1(b)),Dimple 结构的底端开始与基底接触;在随后的加电过程中(图 1(c)),Dimple 结构一方面作为机械支撑阻止了光栅微梁在垂直方向上的进一步运动,另一方面作为扭转支撑点,使光栅微梁完全绕支撑梁扭转,从而最大限度保证了光栅的闪耀;当不施加电压时,光栅微梁将在支撑梁弹性回复力的作用下回到初始状态。这种设计充分利用了表面工艺中有限的空气间隙,实现了光栅可工作闪耀角的最大化。

2.2 加工制作

图 2 为闪耀角可调式微型可编程光栅的部分结构版图,图 3 是用于制作该光栅的两层多晶硅表面微加工工艺流程图示意图。

闪耀角可调式微型可编程光栅的基本工作原理如图 1 所示,它为光栅单元在宽度方向上的截面,整个光栅由成百上千个这种光栅单元组成。该光栅采用相对简单的两层多晶硅表面微加工工艺制作而成。第一层多晶硅用作下电极和引线;第二层多晶硅用作结构层,加工特定尺寸以及形状的光栅微梁。光栅微梁通过支撑梁悬置于基底上,而下电极位于光栅微梁的一侧。采用静电驱动工作方式,下电极以及光栅微梁构成一平板电容器,其上施加直流驱动电压 V ,如图 1(a)所示。

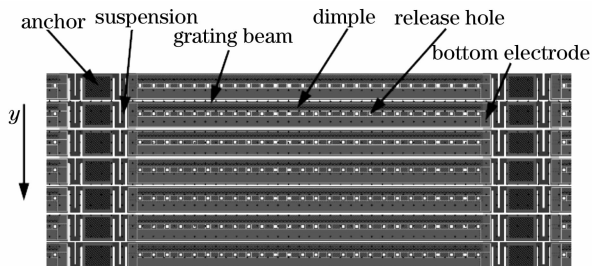


图 2 微型可编程光栅的部分结构版图

Fig. 2 Partial layout for the designed microprogrammable grating

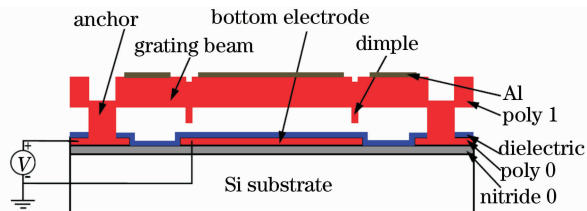


图 3 两层多晶硅表面微加工工艺流程图示意图

Fig. 3 Schematic of two-layer polysilicon surface micromachining process

整个光栅的有效光学面积约为 $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ 。如图 2 所示, y 方向上共包含 120 行栅条,每一行栅条又由 8 个基本的光栅单元组成,因此总的光栅单元数为 960 个。光栅单元主要包括光栅微梁、支撑梁、锚点、下电极、Dimple 以及释放孔。所有光栅单元的下电极均连在一起,统一接地。表 1

给出了设计的该微型可编程光栅的主要结构参量以及工艺参量。

表 1 设计的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 designed microprogrammable grating

Parameters	Value / μm
Length of grating beam	350
Width of grating beam	25
Thickness of grating beam	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
Critical dimension of layout	2

图 4 为微型可编程光栅的扫描电镜 (SEM) 照片, 可以清楚地看到光栅微梁底部的 Dimple 结构以及下电极。实验中, 在光栅微梁的表面溅射一层金属铝以提高器件的反射率, 同时该层金属铝还被用于打线时的焊盘; 加工过程中, 为了缩短牺牲层的腐蚀时间、使结构尽快释放, 在光栅微梁上设计了一定数量的释放孔, 另外释放孔的存在还可以减小空气阻尼, 有利于器件的动态工作性能。

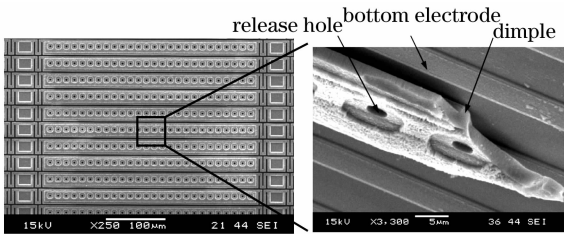


图 4 制作的微型可编程光栅的扫描电镜照片

Fig. 4 SEM photos for the fabricated microprogrammable grating

2.3 性能测试

设计并搭建了简单的光学测试系统, 用来测量微型可编程光栅的最大可工作闪耀角^[6], 利用高压直流电源给微型可编程光栅施加驱动电压, 借助高分辨率光学显微镜能够观察到光栅微梁的下拉及其回复, 从而得到其下拉电压以及回复电压。图 5 是显微镜下观察到的微型可编程光栅下拉状态, 其中深色的光栅微梁已发生下拉。受目前的工艺限制,

所有光栅微梁并不同步, 而是存在一定的差异性, 导致下拉电压以及回复电压均在某个范围内。最后, 利用激光多普勒测振仪 (图 6), 可以得到光栅微梁的频率响应、阶跃响应等动态响应特性, 并由此确定结构的谐振频率、品质因数、调节时间以及阻尼率等性能指标 (表 2)。微型可编程光栅的最大可工作闪耀角超过 5° , 是文献 [2, 3] 所报导的二倍。然而其驱动电压要高 50 V 左右, 这可以通过改进结构设计来减小。其他性能参数在文献 [2, 3] 中均没有提及。

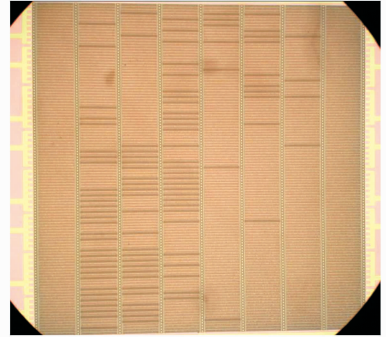


图 5 显微镜下观察到的微型可编程光栅下拉状态

Fig. 5 A picture of microprogrammable grating observed through the optical microscope for showing the pull-in state

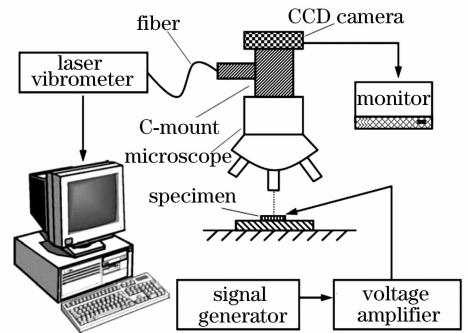


图 6 动态测量微型可编程光栅性能参量的实验装置

Fig. 6 Experimental setup for dynamically characterizing the microprogrammable grating.

表 2 微型可编程光栅样件的性能测试结果

Table 2 Measurement results for the fabricated microprogrammable grating

Performances	Value
Pull-in voltage $V_{\text{pull-in}}$	110~115 V
Restoring voltage V_{res}	74~65 V
Maximum blazed angle θ_{max}	$>5^\circ$
Resonant frequency f_r	78 kHz
Quality factor Q	2.89
Adjusting time t	12 μs
Damping ratio ζ	0.68

3 典型应用

闪耀光栅的光强分布公式为

$$I = I_0 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta\varphi}{\pi}\right) \left\{ \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \text{sinc}\left[N\left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi} - m\right)\right] \right\}^2,$$

式中 $\Delta\varphi = 2\pi d(\sin\beta + \sin\theta)/\lambda$, $\Delta\varphi = \pi d[\sin(\alpha - \theta) - \sin(\beta - \alpha)]/\lambda$, α 为闪耀角, β 为入射角, θ 为衍射角, λ 为波长, d 为光栅常数, N 为栅条总数, m 为衍射级次(取 $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)。

对于研制的微型可编程光栅,有 $d = 27 \mu\text{m}$, $N = 120$,因此由 Matlab 可以仿真得到入射角 β 为零(即垂直入射)时,波长 λ 为 532 nm 的绿光在不同闪耀角 α 下的衍射角 θ 以及衍射光强之间的对应关系,如图 7 所示。可以看出,随着闪耀角 α 的增大,衍射光强逐渐由低级次向高级次转移,并且特定的衍射级次始终位于固定的衍射方向上;同时,每一衍射级次,都能唯一地找到特定的闪耀角 α ,使其衍射光强达到最大。如对于前三级,闪耀角分别为 $0.565^\circ, 1.13^\circ$ 和 1.695° 。这种特性使闪耀角可调式微型可编程光栅非常适合用于光开关。本文研制的光栅样件,最大可工作闪耀角能达到 $5.1^\circ \sim 5.3^\circ$ ^[6]。仿真结果表明,当入射光波长为 532 nm 时,最大的闪耀级次能达到第 9 级。这说明随着驱动电压的增加(超过下拉电压),衍射光强将在 9 个方向上实现能量的转移,从而为实现单输入九输出(1×9)的光开关奠定了基础。

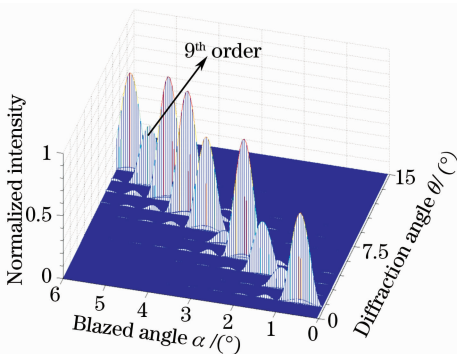


图 7 不同闪耀角情况下入射光波长 532 nm 的衍射强度分布

Fig. 7 Diffraction intensity distribution under different blazed angles for $\lambda = 532 \text{ nm}$

然而,光栅的第 2 及第 5 衍射级上的能量较其他衍射级要低得多,导致光开关在这两个通道上的能量损耗加大,对于光开关的整体工作性能不利。但是,图 7 只是针对特定的入射角、入射光波长以及特定的光栅结构尺寸的仿真结果,可以通过调整这些参数,使各个衍射级次上的光强分布达到一致。

另一方面,前面的仿真结果是针对理想情况下的微型可编程光栅而言的,即不考虑释放孔以及支撑梁的影响。而实际上,通过前期的实验观察,这两个因素对光栅的衍射性能有较大影响^[6],其衍射图像并非理想情况下的一维,而是二维。不过,这种影响可以通过结构版图以及加工工艺的优化设计来得到显著改善。

4 结 论

研制了一种基于 MEMS 技术的闪耀角可调式微型可编程光栅,具有结构简单、大闪耀角可调等特点,其最大可工作闪耀角超过 5° 。作为一种新型的光学元件,光开关是其潜在的一个典型应用领域。

参 考 文 献

- 1 M. C. Wu. Micromachining for optical and optoelectronic systems[J]. *IEEE*, 1998, **85**(11): 1833~1856
- 2 D. M. Burns, V. M. Bright. Micro-electro-mechanical variable blaze gratings[C]. *IEEE MEMS*, Nagoya, Japan, 1997. 55~60
- 3 D. M. Burns, V. M. Bright. Development of micro-electromechanical variableblaze gratings[J]. *Sensor. Actuat. A*, 1998, **64**: 7~15
- 4 Y. Ito, K. Saruta, H. Kasai *et al.*. High-performance blazed GxL™ device for large-area laser projector[C]. *SPIE*, 2006, 6114: No. 611401
- 5 X. Li, C. Antoine, D. Lee *et al.*. Tunable blazed gratings[J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2006, **15**(3): 597~604
- 6 Yu Yiting, Yuan Weizheng, Wang Lanlan *et al.*. Theoretical analysis and experimental study on the maximum blazed angle for micro programmable gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2220~2224
- 7 Xie Jinghui, Zhao Dazhun, Yan Jixiang. Physical Optics Guide[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005. 188~204
- 8 谢敬辉,赵达尊,阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005. 188~204