

光栅光阀器件的结构改进与制作工艺研究*

张巍, 耿煜, 侯昌伦, 杨国光

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要:根据光栅光阀的工作原理,在结构上对传统的光栅光阀器件进行了改进,分析了改进后光栅光阀器件的光学特性、结构特性,以及制作工艺流程.改进后的光栅光阀结构中硅基底上设有二氧化硅隔离层,隔离层上沉积无定形硅作为牺牲层,可动梁的材料是氮化硅,固定梁为蒸镀的金属铝层.通过离子刻蚀的方法刻蚀图形,用化学腐蚀方法掏空牺牲层得到所需桥梁状结构.研究表明改进后的器件黑区范围小,驱动电压较低,光学效率较高,具有潜在的应用前景.

关键词:光栅光阀;结构改进;微加工;刻蚀

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-1926-6

0 引言

光栅光阀(Grating Light Valve, GLV)最早于 1992 年发明,它是一种基于 MEMS 技术的反射式相位光栅器件.该器件利用静电对间隔的活动微光栅条进行控制达到对入射光的强度和反射方向进行控制,具有响应速度快,光学效率高^[1],成像稳定,使用寿命长等优点,特别是可以经受极高的光能强度.自问世以来 GLV 已成功应用于光开关、光衰减器、高清晰电视显示、计算机直接制版机以及光纤通信等众多领域^[2].

GLV 器件单元一般由偶数个平行梁结构组成,每个单元有 6 根梁,分别为相间排列的固定梁和可动梁,采用氮化硅(Si_3N_4)材料制作,表面镀有金属铝层以提高反射率.梁的两端固定,中间悬浮在空气层中.在工作状态下,在可动梁和基底上施加电压,通过静电力的作用使可动梁中间的悬浮部分向基底方向移动,与固定梁之间形成相位光栅,此时 GLV 器件单元处于衍射状态.通过施加不同大小的电压,可以改变移动梁的位移量,产生不同的相位差,完成对入射光的调制.

本文提出了一种对传统光栅光阀结构进行改进的方法,即采用可动梁和固定梁分离制作的方法.可动梁用氮化硅材料制作,固定梁采用在基底上蒸镀金属铝层制作.与传统的光栅光阀相比,该改进的结构有助于简化制作工艺的步骤,降低制作难度,具有较高的可操作性和重复性,并且通过较低的外加电压即可得到需要的形变结构.

1 光栅光阀的工作原理

传统 GLV 器件结构如图 1^[3-4],器件的工作原

理如图 2.图 2 中 w_r 是可动梁的宽度, w_g 是相邻两根可动梁与固定梁之间的间隔, h 是可动梁和基底之间的距离, Λ 是可动梁之间的距离, δ 是可动梁与固定梁之间的距离.

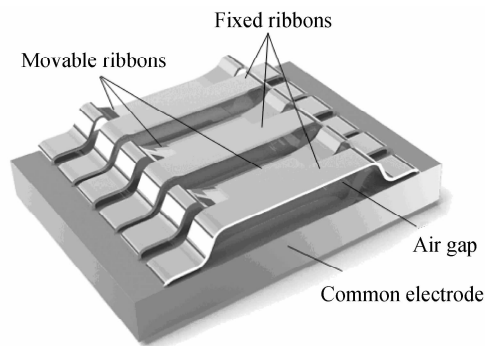


图 1 GLV 的结构
Fig. 1 Structure of GLV

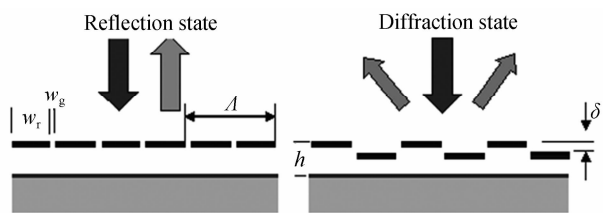


图 2 GLV 的工作原理
Fig. 2 Principle of GLV

在不加电压时,也就是非工作状态下,可动梁不会移动,整个单元形成一个平坦的表面,此时的光栅光阀起到一个平面镜的作用,处于完全反射的状态;当在基底与可动梁之间施加电压时,由于静电力的作用,吸引可动梁向基底的方向弯曲移动,整个器件成为一个衍射光栅.在衍射状态下,固定梁和可动梁反射出的光波前之间存在相位差,假设入射光强为 1,文献[5]给出了 0 级光和 1 级光衍射效率的表达式,经过简化运算去掉常量项得到

$$\eta_0 = [1 + \cos(4\pi\delta/\lambda)]/2 \quad (1)$$

$$\eta_{\pm 1} = (2/\pi^2)(1 - \cos 4\pi\delta/\lambda) \quad (2)$$

当可动梁向下移动的距离为入射光波长的四分

*浙江省科技计划项目(2006C31003)资助

Tel: 0571-87953986-804 Email: hedgehogzw@gmail.com

收稿日期: 2008-07-02

修回日期: 2008-11-06

之一,即 $\delta=\lambda/4$ 时,衍射光强达到最大.通过控制外加电压的大小,可以使可动梁的移动距离控制在零至四分之一波长的距离,从而控制衍射光的比例,进行模拟调制.

2 光栅光阀的结构改进与特性分析

2.1 光栅光阀的结构改进

图2中,光栅光阀的可动梁和固定梁之间的间隔对整个器件的功能影响很大,间隔 w_g 越小,光栅光阀的光学效率就越高.在现有的实验制造工艺水平上,如果在同一个平面内制作可动梁与固定梁,要得到很小的梁间距 w_g 非常困难.因此,本文对传统的光栅光阀结构进行了改进,可动梁和固定梁用不同的材料制作,而且不在同一个平面内.这样改进后的光栅光阀不但降低了加工难度,并且有效的减小了黑区范围,提高了光学效率.

改进后的光栅光阀结构如图3.采用p型单晶硅做基底,厚度为 $500\ \mu\text{m}$;在单晶硅上生长一层二氧化硅做隔离层,厚度为 $700\ \text{nm}$;然后沉积 $1\ \mu\text{m}$ 厚的无定形硅作为牺牲层,该牺牲层被掏空后成为可动梁与基底之间的空气层;牺牲层上的可动梁是氮化硅制成,厚度为 $150\ \text{nm}$,表面蒸镀 $100\ \text{nm}$ 的金属铝膜增加反射率并充当上电极;固定梁由直接蒸镀在硅基底上面的金属铝层充当,厚度也为 $100\ \text{nm}$.

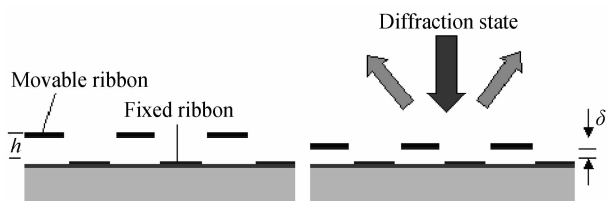


图3 改进后的GLV结构

Fig. 3 Improvement structure of GLV

非工作状态下,可动梁和固定梁不在同一个平面上,它们之间的高度差就是牺牲层无定形硅的厚度.当对可动梁施加电压时,通过静电力可动梁会向基底方向移动,按照前面提到的工作原理,施加适当的电压,使可动梁移动适当的位置,即可得到最大的衍射光强.

2.2 改进的光栅光阀的光学特性

可动梁的移动距离不但与外加电压的大小相关,还与可动梁的长度、厚度和初始应力等参量有关.文献[6]给出了GLV模型可动梁移动量的表达式,通过简化得到近似的可动梁中心处最大位移表达式为

$$\delta = \epsilon_0 V^2 L^2 / (16 \delta_0 H g_0^2) \quad (3)$$

式(3)中真空电容率 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-2}$.根

据实验中的具体样品参量,经计算当氮化硅梁的厚度 $H = 150\ \text{nm}$,氮化硅梁的长度 $L = 200\ \mu\text{m}$,空气层厚度 $g_0 = 1\ \mu\text{m}$,初始应力 $\delta_0 = 200 \times 10^6\ \text{Pa}$ 时可动梁中心处的最大移动量与施加的电压大小之间的关系如图4.

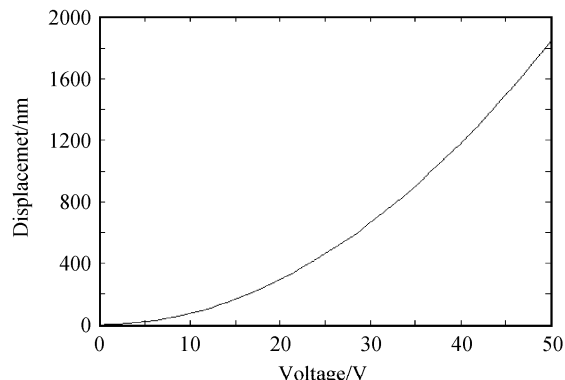


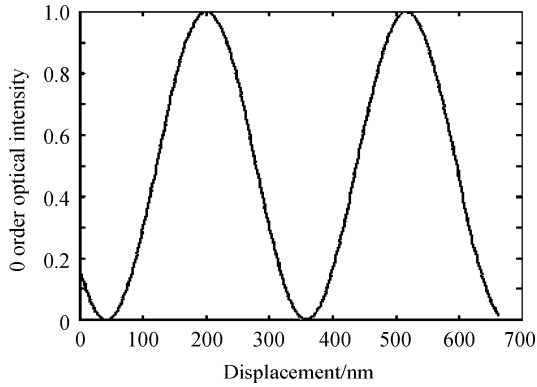
图4 可动梁移动量与外加电压的关系

Fig. 4 Displacement of movable ribbon versus applied voltages

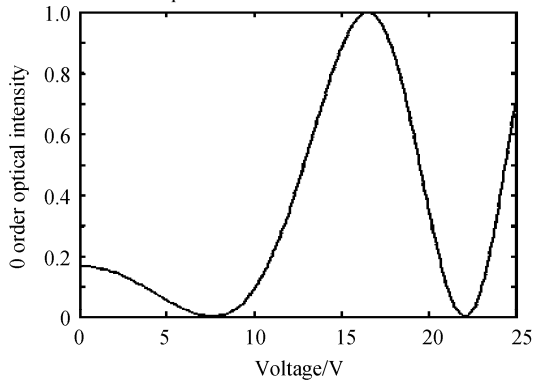
由式(2)中通过计算得,在改进后的光栅光阀结构中,可动梁与固定梁之间的距离 δ 为 $(2n+1)\lambda/4$ 时,1级光衍射光强都能达到最大.假设入射光波长 $\lambda = 632.8\ \text{nm}$,在可能的范围内, δ 可以取的数值为 $\lambda/4 = 158.2\ \text{nm}$ 、 $3\lambda/4 = 474.6\ \text{nm}$ 、 $5\lambda/4 = 791\ \text{nm}$ 和 $7\lambda/4 = 1107.4\ \text{nm}$.当可动梁移动到距离固定梁 $\lambda/4$ 距离时,可动梁的移动距离为 $1000\ \text{nm} + 150\ \text{nm} - 158.2\ \text{nm} = 991.8\ \text{nm}$,带入式(3)可以得到此时需要加入的加压为 $36.7\ \text{V}$,即外加 $36.7\ \text{V}$ 的电压,可以使可动梁移动到距离固定梁 $\lambda/4$ 波长距离的位置,得到最大衍射光强.同理,当可动梁移动到距离固定梁 $5\lambda/4$ 时,也可获得最大衍射光强.此时移动距离为 $1000\ \text{nm} + 150\ \text{nm} - 791\ \text{nm} = 359\ \text{nm}$.带入式(3)可以得到此时需要加入的加压为 $22.1\ \text{V}$.

David T Amm指出^[7],GLV器件的光学效率主要与结构中衍射效率、填充因子上表面铝膜反射率有关.衍射效率由可动梁和固定梁之间的距离 δ 决定,铝膜的反射率由蒸镀工艺决定.在以上两个量都确定的情况下,提高填充因子,可以增加器件的光学效率.填充因子的表达式为 $w_r / (w_g + w_r)$,比较改进前后的光栅光阀结构可以看出,改进后的结构中,较改进前有所减小,因此填充因子数值增大,有效的提高了器件的光学效率.

图5是0级光衍射效率与可动梁移动量以及外加电压之间的关系.图6是1级光衍射效率与可动梁移动量以及外加电压之间的关系.从图中可以看出,施加较低的电压,就可以得到很高的光学衍射效率.



(a) Relationship between 0 order optical intensity and displacement of movable ribbons



(b) Relationship between 0 order optical intensity and voltage applied

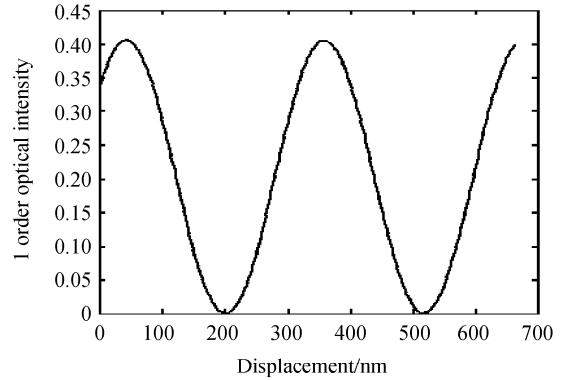
图 5 0 级光衍射效率与可动梁移动量以及外加电压之间的关系

Fig. 5 Relationship between 0 order optical intensity with displacement of movable ribbons and voltage applied

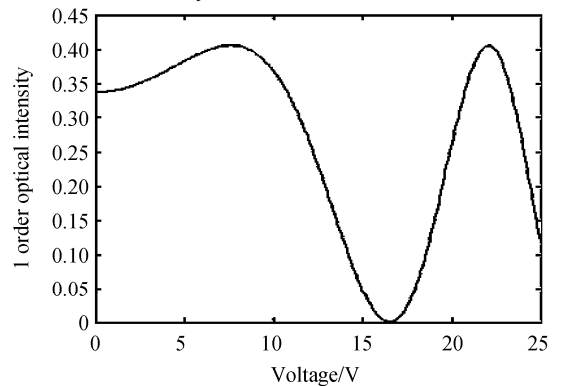
2.3 改进的光栅光阀结构特性

在光栅光阀的制作过程中,一个容易出现的问题是黏附现象.黏附现象^[8]是指悬空的结构相互之间,或者悬空结构与基底之间发生接触,从而引起结构永久黏连的一种现象,它是由制作过程中悬空梁上的去离子水在干燥过程中由液态变成气态时产生的表面张力所一起的.

光栅光阀结构中的悬空梁长度直接关系到是否会发生黏附现象,梁的长度越短,则刚性越大,越不



(a) Relationship between 1 order optical intensity and displacement of movable ribbons



(b) Relationship between 1 order optical intensity and voltage applied

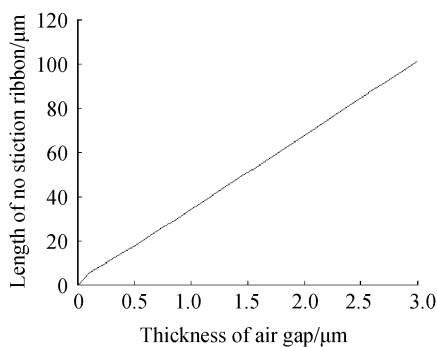
图 6 1 级光衍射效率与可动梁移动量以及外加电压之间的关系

Fig. 6 Relationship between 1 order optical intensity with displacement of movable ribbons and voltage applied

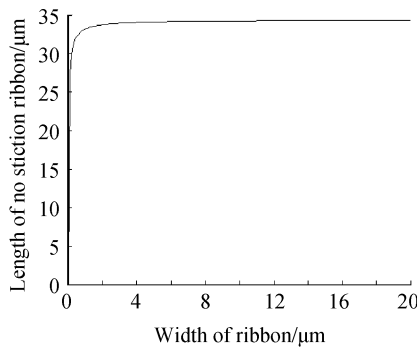
容易发生黏附现象.因此在一定的条件下,梁的长度小于某一临界长度时,就不会发生黏附.这个临界长度的计算,在文献^[9]中有较详细的介绍.

梁的临界长度跟一些结构参量有关.根据实验中的具体结构数值,空气层的厚度为 $1 \mu\text{m}$,可动梁厚度为 150 nm ,梁的宽度为 $5 \mu\text{m}$,得到不同参量选择与梁的临界长度之间的关系.

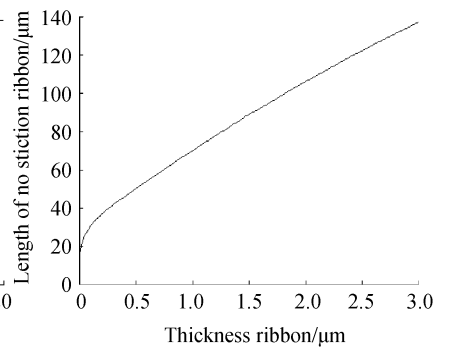
图 7(a)是空气层厚度与梁的临界长度之间的关系,图中可见梁的临界长度是随着空气层厚度的



(a) Relationship between thickness of air gap and critical length of ribbon



(b) Relationship between width of ribbon and critical length of ribbon



(c) Relationship between thickness of ribbon and critical length of ribbon

图 7 不同参量与梁的临界长度之间的关系

Fig. 7 Relationship between different parameters and critical length of ribbon

增加呈线性增加.图 7(b)是梁的宽度与梁的临界长度之间的关系,可以看出梁的临界长度随着梁宽度的增加先迅速增加,等梁宽度增加到一定量后,临界长度趋于稳定.图 7(c)是梁的厚度与梁的临界长度之间的关系,与图 7(a)类似,临界长度的增长也基本呈现线性趋势.

除了临界长度,光栅光阀的谐振频率也是衡量一个器件好坏的重要指标.梁的振动频率方程比较复杂,通过简化和近似计算以后,得到振动频率的表达式为

$$f_n = \frac{\lambda_n H}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \quad (4)$$

式中 $\rho=3\ 000\ \text{kg/m}^3$ 是氮化硅薄膜的密度,杨氏模量 $E=160\ \text{GPa}$,梁的厚度 $H=150\ \text{nm}$,梁的长度 $L=200\ \mu\text{m}$,当只考虑一阶和二阶状态的情况下, $n=1$ 时 $\lambda_1=4.73$, $n=2$ 时 $\lambda_2=7.86$,代入式(4)得到一阶和二阶振动频率为: $f_1=28\ 150\ \text{Hz}$, $f_2=77\ 733\ \text{Hz}$.

通过建模计算,得到了一阶和二阶频率的振形图,如图 8.图中的一阶频率为 $28\ 048\ \text{Hz}$,二阶频率为 $78\ 204\ \text{Hz}$,通过跟解析式所得的数值对比发现误差均小于 1% .

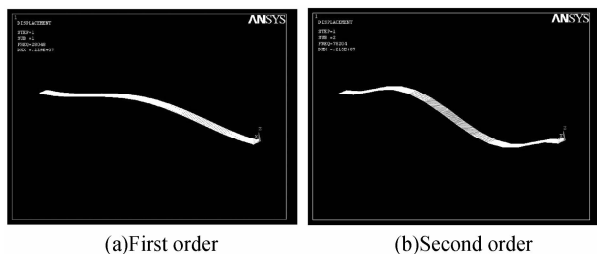


图 8 梁的振形

Fig. 8 Vibration shape of ribbon

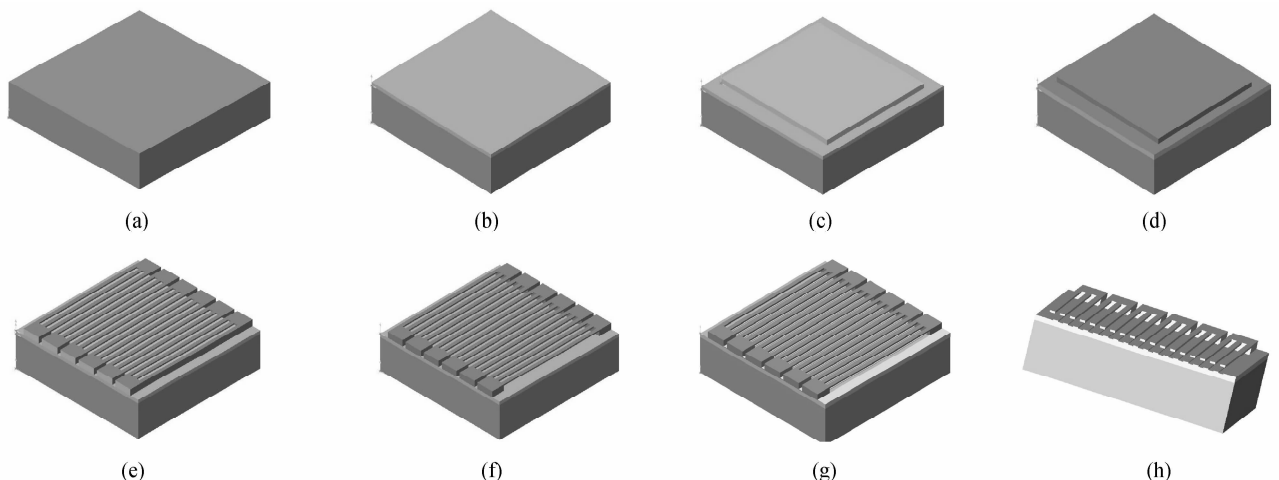


图 9 (a)-(h) GLV 加工工艺

Fig. 9 (a)-(h) The processing technology of GLV

3 改进后光栅光阀的加工工艺与测试

改进后的光栅光阀加工工艺是基于硅材料的微加工工艺^[10-11],具体步骤为:

1)基底是 $500\ \mu\text{m}$ 厚的双抛 $\langle 100 \rangle$ 晶向 p 型单晶硅(图 9(a)),电阻率 $7\sim 13\ \Omega\cdot\text{cm}$.

2)在单晶硅上氧化 $700\ \text{nm}$ 厚的二氧化硅作为隔离层(图 9(b)).

3)在二氧化硅上沉积 $1\ \mu\text{m}$ 的无定形硅为牺牲层.为了后面的化学腐蚀工艺,需要对牺牲层进行刻蚀以形成凸台结构.此处用光刻胶转移凸台图形,用离子刻蚀的方法刻出图 9(c)的图形.

4)用化学气相沉积法^[12]沉积一层 $150\ \text{nm}$ 厚的氮化硅层(图 9(d))作为可动梁结构的材料.

5)对氮化硅进行光刻和离子刻蚀,形成可动梁的结构.在光刻工艺中,旋涂 $2.2\ \mu\text{m}$ 厚的光刻胶,接触式曝光 $5\ \text{s}$,显影 $150\ \text{s}$.离子刻蚀 $30\ \text{min}$,得到可动梁的宽度和间距都是 $5\ \mu\text{m}$,梁的长度是 $200\ \mu\text{m}$ (图 9(e)).

6)用 $\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}:\text{异丙醇}=50\text{g}:100\text{mL}:10\text{mL}$ 的混和溶液^[13]在 80C 的温度下腐蚀掏空牺牲层无定形硅得到悬空的氮化硅可动梁结构(图 9(f)).

7)蒸镀 $100\ \text{nm}$ 厚的金属铝膜.氮化硅梁上的铝膜既是上电极,又可提高可动梁表面的反射率;可动梁之间的固定梁是蒸镀在基底上的铝膜(图 9(g)),同时也有提高反射率的作用.图 9(h)是完成的 GLV 器件剖视图.

图 10 是加工完成的 GLV 光栅光阀器件在台阶仪和扫描电镜下看到的图形.可以看出,加工的

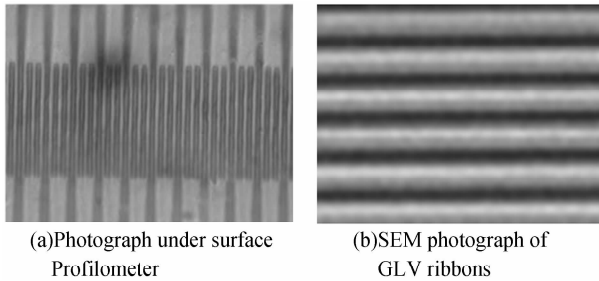


图 10 光栅光阀样品
Fig. 10 GLV sample pattern

GLV 器件均匀性较好,也没有出现黏附现象.说明实验参量的选择是可取的,制作工艺也是可行的.

以氮化硅表面的铝层为上电极,硅基底为下电极引出导线,通过对 0 级衍射光强的测试,得到衍射光强范围并不是严格按照图 5(b)所示的曲线进行变化,最高衍射效率仅为 83% 左右,达不到理论的 100%,最低值也达不到 0. 分析造成这个结果的原因可能有多:首先是刻蚀工艺的问题,通过干法和湿法刻蚀,得到的氮化硅梁表面的粗糙度是 20 nm 左右,这样会影响入射光的反射效率和衍射效率.其次是得到的氮化硅梁的机械性能不均匀,由于制作工艺水平的限制,无法做到每一根梁的长度和宽度都一样,导致在器件不同部位进行重复性实验,实验结果也略有出入.还有占空比的原因,设计的光栅光阀结构可动梁与固定梁的宽度都是 $5\mu\text{m}$,也就是占空比为 50%,这样占空比的器件应具有从 0 到 100% 的衍射效率变化范围.但是实际制作出来的光栅光阀结构并非这么均匀,离子刻蚀后在台阶仪下测量氮化硅的刻蚀情况,如图 11. 从图中可以看到,台阶高度大于氮化硅层的设计厚度 150 nm,说明氮化硅层已经被充分刻透.同时可以看到,氮化硅梁的宽度以及梁与梁之间的间距并不是严格等于设计的间隔 $5\mu\text{m}$,这是由前面光刻胶的曝光显影等步骤造成误差.这样的误差使器件的占空比不等于 50%,因此实际的光学效率变化范围有所减小.以上这些方面都可以在制作工艺的进一步深入研究中得到改善,以减小误差.

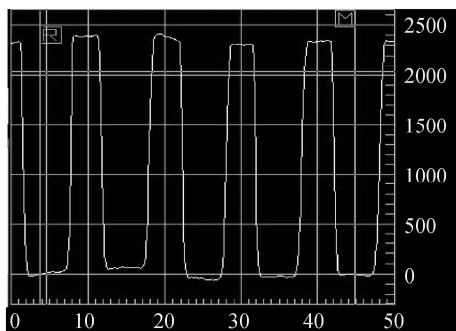


图 11 台阶仪下看到的离子刻蚀后氮化硅的形状
Fig. 11 Shape of silicon nitride ribbon after ion etching

4 结论

本文研究了一种光栅光阀器件结构改进的方法,介绍了改进后器件的特性,制作工艺,并对样品的相关特性进行了测试.在国内现有的技术条件下,采用该技术可以实现器件低成本、小体积等要求.此外,由于改进结构采用的固定梁和可动梁为不同材料,从而减小了黑区范围,并简化了制作工艺,提高了光学效率.实验测试获得了较为满意的结果.值得一提的是,通过对器件制作工艺的进一步完善,如解决好刻蚀的表面粗糙度和均匀性的问题,将可获得更好的加工形貌和结构参量,从而获取优良的光学效果.

参考文献

- [1] ZHANG Jie, HUANG Shang-lian, YAN Xu, *et al.* Optical performance analysis and simulation of reflector moving grating light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):824-827.
张洁,黄尚廉,闫许,等.反射镜平动式光栅光调制器的光学特性分析[J].光子学报,2006,**35**(6):824-827.
- [2] LI Jun, CHEN Hai-qing, YU Hong-bin, *et al.* Application, emulation and development trend of grating light valve[J]. *Semiconductor Technology*, 2005, **30**(7):11-15.
李俊,陈海清,余洪斌,等.光栅光阀的应用、模拟技术和发展趋势[J].半导体技术,2005,**30**(7):11-15.
- [3] BLOOM D M. The grating light valve: revolutionizing display technology[J]. *Proc SPIE, Projection Display III*, 1997, **3013**(2): 165-171.
- [4] SONG Jing-ming, RUAN Yu, YAN Yi, *et al.* Algorithm analysis of grating light valve(GLV) device and its application in DGE[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5):519-521.
宋镜明,阮玉,杨宜,等.对光栅光阀(GLV)器件进行数值分析及其在 DGE 上的应用[J].光学技术,2004,**30**(5):519-521.
- [5] TRISNADI J I, CARLISLE C B, MONTEVERDE R. Overview and applications of Grating Light Valve based optical write engines for high-speed digital imaging[C]. *Photonics West 2004-Micromaching and Microfabrication Symposium* January 26, 2004, San Jose, CA, USA.
- [6] OSTERBERG P, YIE H, CAI X, *et al.* Self-consistent simulation and modelling of electrostatically deformed diaphragms[C]. *MEMS'94*, 28.
- [7] AMM D T, CORRIGAN R W. Optical performance of the grating light valve technology[C]. *Part of the IS&T/SPIE Conference on Projection Displays V*, San Jose, California, January 1999, 71-78.
- [8] MABOUDIAN R, HOWE R T. Critical review: adhesion in surface micromechanical structures[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1997, **15**(1):1.
- [9] MASTRANGELO C H, HSU C H. Mechanical stability and adhesion of micro structures under capillary Forces-Part I: Basic theory[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1993, **2**(1):33.

- [10] HE Zhong-jiao. Analysis of stress birefringence for silica waveguide on silicon and SOI Rib waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 201-204.
何忠蛟. 硅基二氧化硅波导和 SOI 脊形波导应力双折射研究 [J]. 光子学报, 2006, **35**(2): 201-204.
- [11] MAO Rong-wei, CHEN Bu-wen, LI Chuan-bo, *et al.* The fabrication of low cost si-based continuously tunable 1.55 μm RCE photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1785-1787.
毛容伟, 成步文, 李传波, 等. 硅基 1.55 μm 可调谐共振腔窄带光电探测器的研究 [J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1785-1787.
- [12] PAN Yong-qiang. Properties of silicon nitride films deposited by radio frequency plasma enhanced chemical vapour deposition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1097-1101.
潘永强. 射频等离子体增强化学气相沉积 SiN_x 薄膜的研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 1097-1101.
- [13] ZHANG Zheng-yuan, XU Shi-liu, LIU Yu-kui, *et al.* An investigation into wet etching of si-trench for MEMS[J]. *Microelectronics*, 2004, **34**(5): 519-521.
张正元, 徐世六, 刘玉奎, 等. 用于 MEMS 的硅湿法深槽刻蚀技术研究 [J]. 微电子学, 2004, **34**(5): 519-521.

Grating Light Valve's Structure Improvement and Its Manufacture Technology

ZHANG Wei, GENG Yu, HOU Chang-lun, YANG Guo-guang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A grating light valve's structure improvement is proposed based on its working principle. The optical characteristics, structure characteristics and fabrication technology of the improved grating light valve are analyzed. In the improved structure, silicon dioxide layer is on silicon substrate as isolation layer and amorphous silicon is deposited on silicon dioxide layer as sacrificial layer. Movable ribbon's material is silicon nitride and fixed ribbon's is aluminium film. After ion etching and chemical etching, the structure of bridge-like shape is got. Through study, satisfactory results were obtained including small black area, low driving voltage and high optical intensity, and this kind of grating light valve has potential future in application.

Key words: GLV; Structure improvement; Micromachining; Etching



ZHANG Wei was born in 1979. Now he is working towards the Ph. D. degree at Zhejiang University. His research interests focus on micro-optics fabrication and measurement.