

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0035-05

# 一种基于移动掩模光刻制作四棱锥反射镜的方法

王爱娜 姚 军 蔡冬梅 潘 丽 李 飞

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

**摘要** 提出了基于微细加工的移动掩模光刻(MML)法制作四棱锥反射镜的方法。通过移动掩模光刻,在光刻胶上得到棱锥结构,然后将其线性传递到硅基底上,进行金属化处理以提高反射率。棱锥结构的底面尺寸为 1 mm×1 mm,四个反射面与底面成 3.7°的倾角。尖端和棱边的尺寸被控制在 6 μm 左右,呈现出非常好的刀口状,镜面粗糙度的均方根误差(RMS)为 77 nm,均满足红外波段的波前传感系统的要求。

**关键词** 光学器件;四棱锥反射镜;反射式棱锥波前传感器;移动掩模光刻

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0035

## A Pyramidal Mirror Fabricated by Moving Mask Lithography Method

Wang Aina Yao Jun Cai Dongmei Pan Li Li Fei

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

**Abstract** A new manufacturing method for the pyramid sensor using mask moving lithography (MML) process is proposed. Firstly, there is one time moving mask exposure in both two orthogonal directions, and then a pyramidal structure is formed in the photoresist after development. Secondly, the structure will be transferred into the substrate of silicon. Lastly, metallization is carried out to increase the reflectivity of the pyramidal mirror. The completed pyramidal mirror has a square base of 1 mm length and mirror-like for side-facets inclined to the base at 3.7° with knife edges and sharpening tip. The sizes of pyramid tip and turned edges are both at about 6 μm, and the root mean square (RMS) of the four mirror-like facets is approximately 77 nm.

**Key words** optical device; pyramidal mirror; reflective pyramid wavefront sensor; mask moving lithography

### 1 引 言

1996年,意大利的 Ragazzoni<sup>[1]</sup>提出了利用四棱锥透镜进行波前探测的思想,相对于常用的夏克-哈特曼传感器来说,其具有更高的灵敏度和闭环带宽。作为一种具有明显优势的新型波前传感器,透射式的棱锥波前探测技术在理论分析和实际应用中都得到了广泛的关注和快速的发展<sup>[2~7]</sup>。

反射式棱锥波前传感器(PWFS)工作方式与透射式的棱锥波前传感器类似,只是棱锥镜将各子光束反射而不是折射出去<sup>[1]</sup>。相对于目前理论和实验都比较成熟的透射式棱锥波前传感器,反射式棱锥波前传感器被认为是另一种可选的方法<sup>[5]</sup>,并且和

透射式相比具有很多优势:不用考虑色散、可以用在紫外波段(玻璃会吸收紫外光)、对棱锥的平顶效应敏感度低等<sup>[1]</sup>。

目前常用两种方法加工棱锥结构。一种是传统的抛光法,这种方法很难将四个棱锥面交于一点,也很难得到尖锐的顶尖,棱锥尖端宽度通常大于 70 μm<sup>[6]</sup>,同时也无法实现微型化。另一种是光刻电铸压膜(LIGA)工艺,由于这种方法需要用同步辐射来产生 X 射线,且需制作 X 射线掩模版,因此成本很高;同时每个棱锥面都需要用 1 h 的曝光时间,即使在搅拌条件下显影时间都要长达 24 h<sup>[8,9]</sup>,因此这种方法的周期很长且工艺过程苛刻;最重要的

**基金项目:** 国家自然低维量子结构与调控教育部重点实验室(湖南师范大学)(QSQC0909)和中国科学院光电技术研究所(C06K022)资助课题。

**作者简介:** 王爱娜(1984—),女,硕士研究生,主要从事微光机电系统和微细加工技术等方面的研究。

E-mail: wangaina1984@163.com

**导师简介:** 姚 军(1973—),男,研究员,博士,主要从事激光技术、微光机电系统及其应用等方面的研究。

E-mail: junyao@ioe.ac.cn

是得到的棱锥的顶尖和棱边的尺寸为  $30\ \mu\text{m}$ , 仍然无法满足系统要求的  $10\ \mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>。以上的这些缺点导致了这项新技术缺乏吸引力。

本文提出了用移动掩模光刻(MML)法制作棱锥反射镜, 首先需要在两个相互垂直的方向上分别进行一次移动掩模曝光, 在光刻胶上得到棱锥结构; 然后利用电感耦合等离子(ICP)刻蚀技术将光刻胶上的棱锥线性传递到硅上, 最后进行金属化处理。测量结果显示这种方法制作的棱锥满足系统的光学要求。

## 2 波前传感系统对棱锥反射镜的光学要求

这种新型的棱锥波前传感器工作在可见光和红外波段。如果系统工作波长为  $0.55\ \mu\text{m}$ , 成像焦比为 60, 它的衍射极限下的点扩展函数大约为  $40\ \mu\text{m}$ 。如果以能量损失 20% 作为棱锥制造误差的容限范围, 那么棱锥的顶点和边缘的制作误差应保证在  $10\ \mu\text{m}$  范围内<sup>[7]</sup>。实质上作为一个反射型的分束器, 棱锥的四个表面的均方根误差(RMS)应小于波长的  $1/10$ , 以限制由于散射造成的光能损失。棱锥的底边一般在毫米量级, 如意大利 TNG 和欧洲南方天文台用的圆底透射式棱锥的直径在  $6\sim 12\ \text{mm}$ <sup>[7,8]</sup>, 但若用微透镜聚焦光束, 棱锥的底边也可选用毫微米级尺寸。

棱锥的底角的大小主要取决于它前面聚焦透镜的  $F$  数, 可以很容易通过几何光学估算出底角的最小极限值, 如图 1 所示。可知  $\beta=90^\circ$  时为极限状况, 此时入射光束的边缘光线恰好与反射光束的边缘光线重合, 可推出

$$\gamma = \alpha \approx D/(2f), \quad (1)$$

式中  $D$  和  $f$  分别是聚焦透镜的直径和焦距,  $\gamma$  为反

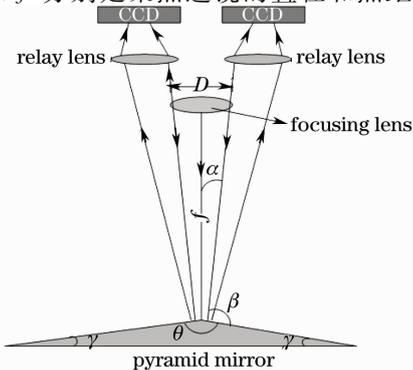


图 1 棱锥镜反射光路图

Fig. 1 Ray trace after being reflected by the pyramidal mirror

射式棱锥的极限小情况下的底角。若聚焦透镜的焦比为 60, 此时  $\gamma$  值大约为  $0.5^\circ$ 。因此可以看出反射式棱锥波前传感器不像透射式那样对底角要求苛刻(透射式的底角需小于  $1^\circ$ ), 只要大于  $0.5^\circ$  即可, 因此可以考虑选择多种工艺方案来实现。

## 3 设计方法

掩模移动光刻法如图 2 所示, 这种方法通常用来制作具有连续面型的微结构, 且掩模图案在移动的方向上具有周期性<sup>[11~14]</sup>。如果二元掩模在曝光过程中保持静止, 显影后掩模版图案将复制到光刻胶上。如果在曝光的过程中, 掩模在一个方向上移动一个或多个周期, 光刻胶里曝光量将被二元掩模图形连续调制。曝光剂量方程可表示为<sup>[12]</sup>

$$E(0, x) = I \frac{p(x)}{v}, \quad (2)$$

式中  $p(x)$  为掩模函数, 是想得到的微结构的投影;  $I$  是曝光系统的曝光密度,  $v$  是掩模移动的速度。从(2)式中可知通过移动掩模可在光刻胶中得到连续的曝光量, 这样显影后也就可以得到连续的面型, 如图 3(a) 所示。当浮雕深度为几个微米时, 即对应的是薄胶, 此时可以认为二元掩模函数线性地取决于结构的投影, 但随着浮雕厚度的增加, 它们之间将不再是线性关系, 必须考虑曝光量和结构面型之间的非线性关系<sup>[12]</sup>。

对于正四棱锥结构, 二元掩模图案在一个方向上( $x$  方向或  $y$  方向)是一个周期函数, 为了得到理想的浮雕面型, 考虑到非线性效应, 补偿后的局部掩模版图案如图 2(b) 所示。为了在光刻胶上得到一正四棱锥结构, 需要在两个相互垂直的方向上分别进行一次掩模移动曝光, 然后再用一个正方形的掩模进行第三次曝光, 使得光刻胶显影后只剩下正四棱锥结构。

## 4 工艺实现

利用移动掩模光刻法需要在光刻胶上得到一个正四棱锥, 其底边边长为  $1000\ \mu\text{m}$ , 高度为  $3\ \mu\text{m}$ , 顶尖和棱边的宽度需小于  $10\ \mu\text{m}$ 。

二元掩模版是由激光直写技术制作的, 图案部分为不透光的铬层, 透光部分为玻璃。实验选用硅作为基底, AZ1500 光刻胶为曝光材料, 曝光光源为汞灯, 中心波长为  $365\ \text{nm}$ 。在移动掩模曝光的过程中, 设备的移动方向和移动距离的精度都极为重要, 且掩模移动的距离必须是掩模版上图案周期的整数倍。曝光设备的最小移动距离为  $0.5\ \mu\text{m}$ , 设计的掩

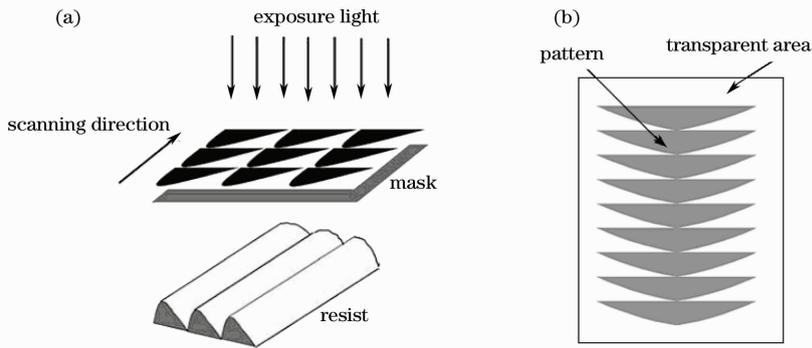


图 2 (a) 利用移动掩模光刻法形成的微结构；(b) 四棱锥结构的掩模版局部示意图

Fig. 2 (a) Microstructure formed using MML; (b) local pattern of the mask designed for fabricating pyramidal structure 模版的周期为  $100\ \mu\text{m}$ 。

在光刻过程中发现,如果移动光刻之前没有预曝光,显影后光刻胶会形成上底边宽为  $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 的棱台,如图 3(a)所示。从图中可知,从 a 点到 b 点之间光刻胶得到的曝光量小于它的曝光阈

值,而且 a 点和 b 点处的曝光量恰好等于光刻胶的曝光阈值。图 3(b)为 8 s 预曝光情况下的光刻胶面形,图 3(c)为显微镜下光刻胶上棱锥的照片。通过理论计算和多次的实验,得到了最佳的光刻工艺参数,如表 1 所示。

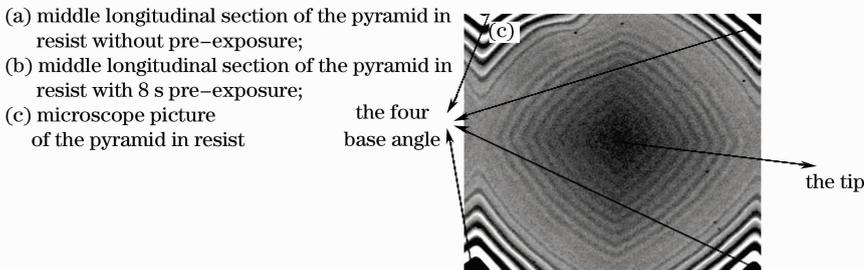
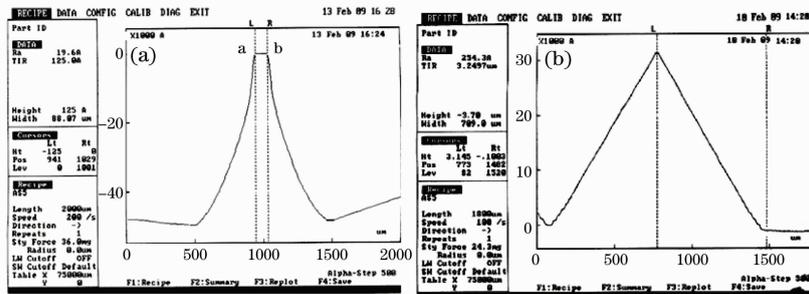


图 3 光刻胶上的棱锥结构

Fig. 3 Pyramid in resist

表 1 AZ1500 光刻工艺参数

Table 1 Processing parameters of AZ1500

Photolithography procedures	Processing parameters
Spin coating	Spin speed; 2000 r/m; Thickness; $4\ \mu\text{m}$
Soft bake	Hot plate, $100\ ^\circ\text{C}$ , 10 min
	Pre-exposure time; 6~9 s
UV-exposure	Mask moving exposure in x direction; moving step No. : 400, step length; $1\ \mu\text{m}$ , exposure time/step: 0.05 s
	Mask moving exposure in y direction; moving step No. : 400, step length; $1\ \mu\text{m}$ , exposure time/step: 0.05s
Development	AZ303K(1:4), $20\ ^\circ\text{C}$ , 90~100 s
Rinse	De-ionized water
Hard bake	Hot plate, $120\ ^\circ\text{C}$ , 20~50 min

光刻胶上的图形做好后,用 ICP 刻蚀技术线性传递到硅上。为了得到符合光学要求的镜面,最佳的硅胶刻蚀比为 10:1。最终在硅基底上得到的棱锥结构如图 4 所示。台阶仪测量硅上的棱锥结构如图 5 所示,其高度为  $32\ \mu\text{m}$ ,可知棱锥镜的底角为  $3.7^\circ$ ,棱锥尖端的宽度为  $5\sim 6\ \mu\text{m}$ ,呈现出了良好的刀口状,远远满足了系统的要求。为了提高棱锥的反射率,对其进行金属化处理<sup>[15,16]</sup>,用三维轮廓仪测量镜面有用区(顶尖附近  $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ )的

RMS 为  $76.67\ \text{nm}$ ,如图 6 所示。

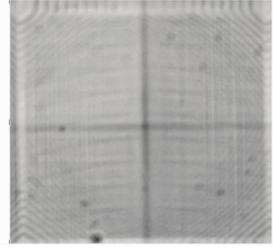


图 4 硅基底上棱锥结构在显微镜下的照片

Fig. 4 Photo of the pyramid in silicon

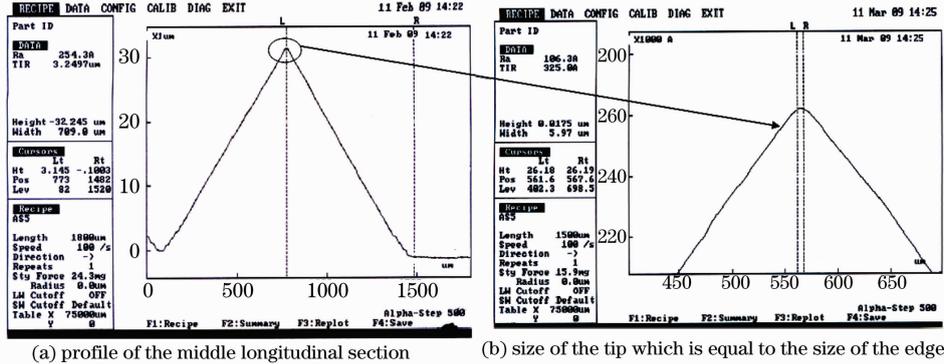


图 5 硅上四棱锥的测量结果

Fig. 5 Measurement results of the pyramid in silicon

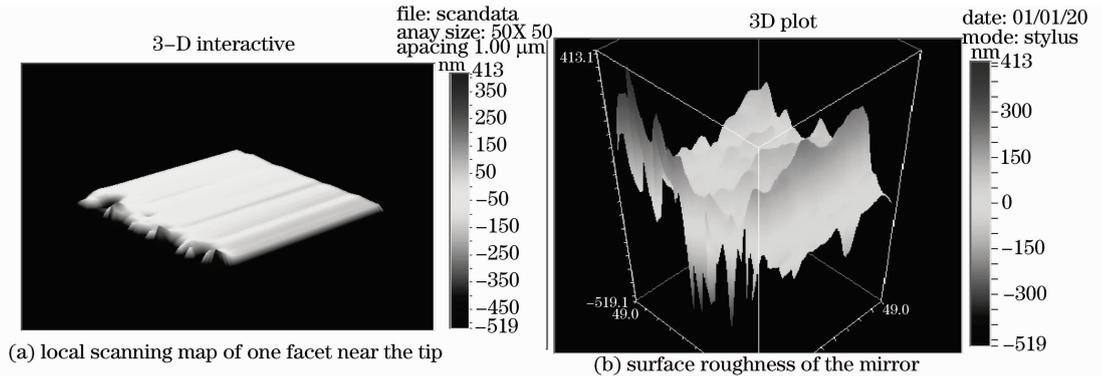


图 6 硅上四棱锥的测量结果

Fig. 6 Measurement results of the pyramid in silicon

## 5 结 论

四棱锥反射镜,是反射式棱锥波前传感系统中的关键光学器件。为了提高灵敏度和光能利用率,系统对棱锥镜的顶尖、棱边的尺寸要求保证在  $10\ \mu\text{m}$ 内,表面粗糙度要小于红外工作波长( $1.0\sim 2.35\ \mu\text{m}$ )的  $1/10$ 。利用基于微细加工的移动掩模光刻法,最终做出了符合要求的正四棱锥结构,工艺过程简单且成本低廉。通过控制预曝光量使得顶尖和棱边的尺寸控制在  $6\ \mu\text{m}$ 左右,呈现出非常好的刀口状,远远满足了系统的要求,也证明了用移动掩

模光刻法得到的棱锥尖端和棱边的质量要高于抛光方法( $>70\ \mu\text{m}$ )和 LIGA 技术( $30\ \mu\text{m}$ )。通过控制硅和光刻胶的刻蚀比,使得棱锥四个镜面的 RMS 控制在  $77\ \text{nm}$ 左右,也满足了系统要求。需要解决的问题首先是由于在光刻显影过程中,光刻胶上的图形难免被污染,于是在刻蚀线性传递到硅上时,结构表面总会出现颗粒状瑕疵。其次是棱锥的底角太小,只有  $3.7^\circ$ ,和实际系统的兼容性较差。因此在以后的工作中需设法减少显影过程中光刻胶的污染;并尝试更厚的光刻胶或提高硅胶的刻蚀比,以得

到较大底角的棱锥镜。

### 参 考 文 献

- 1 R. Ragazzoni. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism[J]. *J. Mod. Opt.*, 1996, **43**(2): 289~293
- 2 A. Burvall, E. Daly, S. R. Chamot *et al.*. Linearity of the pyramid wavefront sensor[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 11925~11934
- 3 C. Véraud. On the nature of the measurements provided by a pyramid wave-front sensor [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**(1-3): 27~38
- 4 B. J. Bauman. Optical Design For Extremely Large Telescope Adaptive Optics Systems[D]. America: University of Arizona, 2003. 83~100
- 5 J. M. LeDue. A Study of the Pyramid Sensor; Analytic Theory, Simulation and Experiment[D]. Canada: Dalhousie University, 2002. 43~45
- 6 J. B. Costa. Development of a New Infrared Pyramid Wavefront Sensor[D]. Germany: University of Heidelberg, 2005. 53~56
- 7 Wang Shengqian. Study of the Performace of the Sparse Synthetic Aperture Imaging System With Four Sub-Apertures [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese academy of Science, 2008. 93~106  
王胜千. 一种四子孔径稀疏光学合成孔径成像系统性能研究 [D]. 成都:中国科学院光电技术研究所, 2008. 93~106
- 8 F. Pérennès, M. Ghigo, M. Tormen *et al.*. Production of identical pyramid wavefront sensors for multi-conjugate adaptive optic systems using the LIGA process [J]. *Microsystem Technologies*, 2004, **10**(6-7): 552~555
- 9 F. Pérennès, M. Ghigo, S. Cabrini. Characterisation of adaptive optic pyramid wavefront sensors fabricated by deep X-ray lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2003, **67-68**: 566~573
- 10 M. Ghigo, E. Diolaiti, F. Pérennès *et al.*. Use of the LIGA process for the production of pyramid wavefront sensors for adaptive optics in astronomy[C]. *SPIE*, 2003, **5169**: 55~61
- 11 Chen Bo, Guo Lurong, Tang Jiyue *et al.*. Novel method for making parabolic grating[C]. *SPIE*, 1996, **2687**: 142~149
- 12 Chunlei Du, Xiaochun Dong, Chuankai Qiu *et al.*. Profile control technology for high-performance microlens array[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(11): 2595~2602
- 13 Lifang Shi, Chunlei Du, Xiaochun Dong *et al.*. Effective formation method for an aspherical microlens array based on an aperiodic moving mask during exposure[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(33): 8346~8350
- 14 Chunlei Du, Xiaochun Dong, Qiling Deng *et al.*. Micro-optical structures formed by a mask moving method[J]. *Optoelectron. Lett.*, 2007, **3**(2): 95~98
- 15 Lü Guonuan, Li Dawei, Huang Jianbing *et al.*. Design and fabrication of graded reflectivity mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1240~1244  
吕国暖, 李大伟, 黄建兵 等. 渐变反射率镜的设计与制备[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1240~1244
- 16 Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan *et al.*. Laser reflection characteristics of cat eye effect of cassegrain lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1149~1155  
赵延伸, 宋丰华, 孙华燕 等. 卡塞格伦镜头的猫眼效应激光反射特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1149~1155