

一种制作凹形聚二甲基硅氧烷微透镜阵列的方法

钟可君^{1,2} 高益庆^{1,2} 李 凤² 张志敏²

(¹ 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016
² 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要 提出一种制作凹形聚二甲基硅氧烷(PDMS)微透镜阵列的方法。用数字微镜器件(DMD)代替物理掩模,建立数字灰阶无掩模光刻系统,在光刻胶上制作正方形基底凸形微透镜阵列,以此阵列为母板,采用复制方法,制作了高填充因子的正方形基底凹形 PDMS 微透镜阵列。实验和测试结果表明:数字灰阶无掩模光刻系统制作的微透镜阵列表面光滑,形貌良好;复制的 PDMS 微透镜阵列边缘清晰,表面光滑,焦面光斑光强均匀。为制作凹形微透镜阵列提供了一条制作简单、效率高、成本低、可大规模制作的新途径。

关键词 光学器件;微光学元件;凹形微透镜阵列;数字灰阶无掩模光刻;模型复制技术;聚二甲基硅氧烷

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0310002

A Method of Fabricating Concave Polydimethylsiloxane Microlens Array

Zhong Kejun^{1,2} Gao Yiqing^{1,2} Li Feng² Zhang Zhimin²

¹ College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 20016, China

² Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract We present a method for fabrication of concave polydimethylsiloxane (PDMS) microlens array. A digital maskless grayscale lithography system based on digital micromirror device (DMD) is established. Microlens array with a square base is fabricated in photoresist by the system, which is used as replication model. By replica molding technique, a concave PDMS microlens array with a square base is fabricated. Experimental and test results show that the edges of PDMS microlenses are clear, the surfaces are smooth, and the spotlight performances are favorable. The light intensities which transit the microlens array are uniform. The approach described in the paper is a new method for fabrication of concave PDMS microlens, which has advantages of facile, effective, low cost, and arrays can be replicated by larger scale.

Key words optical devices; micro-optical element; concave microlens array; digital maskless grayscale lithography; replica molding technique; polydimethylsiloxane

OCIS codes 230.3990; 230.4000; 130.3990; 160.4670

1 引 言

微透镜阵列是一种重要的微光学器件,通过对形状、排布、占空比等参数的设计,微透镜阵列可以实现扩散、整形、均匀、聚焦、成像等功能,被广泛应用于光学信息处理、光互连、光束整形、成像等领域。

凹形微透镜阵列是微透镜阵列的一种重要类型,在像差调整、光电探测器件、凸形微透镜及二元光学元件的匹配耦合等方面有重要的应用。目前制作凹形微透镜阵列主要采用飞秒激光和酸腐蚀^[1-2]、离子束刻蚀^[3]和模型复制^[4-5]等方法。前两种方法需要

收稿日期: 2013-08-22; 收到修改稿日期: 2013-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(61261026)、航天科技创新基金(CASC201105)

作者简介: 钟可君(1978—),男,博士研究生,主要从事微纳光子器件方面的研究。E-mail: kjzhong@126.com

导师简介: 高益庆(1951—),男,教授,博士生导师,主要从事微纳光子器件和二元光学等方面的研究。

E-mail: gyqniat3@msn.com

昂贵的仪器,生产效率也不高,而且酸腐蚀或离子束刻蚀难以精确控制微透镜的形貌;而通过模型复制的方法,可以实现大规模的精确复制,效率高,成本低,是制作凹形微透镜阵列的有效方法。

模型复制方法制作凹形微透镜阵列的一个重要的步骤是要先制作结构相反的母板,即制作凸形微透镜阵列。主要方法有激光直写^[6]、质子或离子束光刻^[7]、灰度掩模光刻^[8]、压印法^[9]和热熔法^[10]等。激光直写和质子束(离子束)光刻仪器昂贵,效率低;灰阶掩模光刻和压印法需要使用掩模,掩模的制作成本较高;热熔法使用二元掩模光刻,然后热熔成型,相对而言成本较低,效率高,但是热熔过程中难以精确控制微透镜的面型结构,而且热熔法主要适合于制作圆形基底的微透镜阵列。文献^[11]提出一种基于数字微镜(DMD)的并行光刻技术,该技术用DMD代替二元掩模,采用并行光刻,降低了成本,提高了效率。但由于需要结合热熔法,仍然没有克服热熔过程难以精确控制微透镜形貌的不足。本文利用DMD代替灰阶掩模,建立数字灰阶无掩模光刻系统,采用面曝光方式,一次曝光成型,在光刻胶上制作微透镜阵列母板。该方法可以精确控制微透镜阵列的形貌,成本低,效率高。

聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种高分子有机硅化合物,具有化学结构稳定、机械性能好、容易复制、无毒、生物相容等特性,广泛应用于微电子机械系统(MEMS)^[12]、微传感器^[13]和生物芯片^[14-15]等领域。另外,PDMS光学透明,衰减系数小,价格便宜,是一种很好的光学材料,已经有文献利用PDMS制作了高性能的光波导^[16]、光栅^[17-18]和非涅耳透镜^[18]等光学元器件。本文以PDMS为材料,采用模型复制的方法制作凹形微透镜阵列。模型复制方法可以实现大面积的复制,而且PDMS容易复制不变形。因此,模型复制的方法为制作凹形PDMS微透镜阵列提供了一条制作简单、效率高、成本低、可大规模制作的新途径。

2 数字灰阶无掩模光刻系统

系统结构示意图如图1所示。主要由光源系统、DMD、精缩投影系统、CCD校正系统、移动平台 and 控制系统组成。光源是高压汞灯,通过365 nm波长滤波片后以一定角度入射到DMD表面;DMD由 1024×768 个正方形铝合金镜片组成,每个镜片的边长为 $13.68 \mu\text{m}$,可沿对角线 $\pm 12^\circ$ 偏转。当镜片 $+12^\circ$ 偏转时,反射光进入投影系统,形成亮态;当

镜片 -12° 偏转时,反射光不能进入投影系统,形成暗态。通过脉冲电压控制各个镜片的偏转角度和时间,可以实现256灰阶显示^[19]。相对于其他光空间调制器,DMD具有占空比高、响应速度快、光能利用率高、寿命长等优点。把用画图软件设计的掩模图形输入到DMD显示,显示图像微缩投影到基片光刻胶表面,一次曝光成型。由于用DMD代替了物理灰阶掩模,降低了制作成本;掩模的设计简单灵活,使用普通画图软件即可;DMD采用面曝光方式,提高了效率;且DMD显示可以用程序实现数字化动态控制,因此该系统是一种成本低、效率高、数字化的灰阶动态无掩模光刻系统。

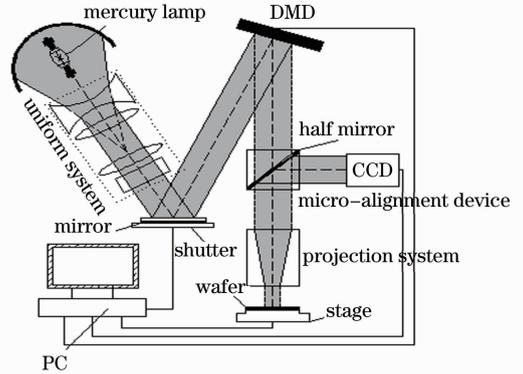


图1 数字无掩模光刻系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the digital maskless lithography system

3 实 验

3.1 微透镜阵列母板的制作

首先测试光刻胶刻蚀深度与灰阶关系曲线,设计掩模。实验中使用GP-28正性光刻胶,开始以500 r/min转速、时间5 s,再以1100 r/min转速、时间30 s旋转涂在基片上;然后在对流烘干机中以 90°C 温度烘烤约20 min。利用画图软件设计20至

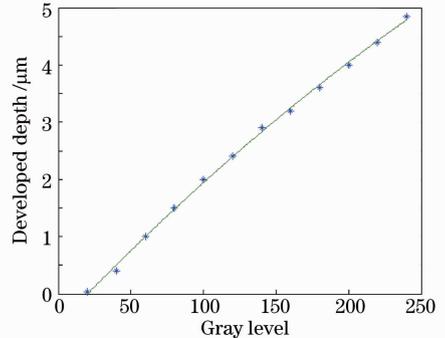


图2 刻蚀深度与灰阶的关系曲线

Fig. 2 Relationship between the developed depth and gray levels

240 灰阶的掩模,同时输入至 DMD,通过图 1 所示光刻系统曝光 40 s,用 0.5% NaOH 溶液显影,显影时间为 10 s;然后风干,测试各灰阶的刻蚀深度,结果如图 2 所示。从图 2 可以看到,DMD 显示的灰阶与光刻胶的刻蚀深度基本上成线性关系。

填充因子是指单位面积内有效微透镜面积的比例,是衡量微透镜阵列性能参数的一个重要指标。填充因子越高,光信息、光能量的利用率也越高。半径相同时,不同基底形式的微透镜阵列有不同的填充因子。图 3 是两种不同基底形式的微透镜阵列,(a)是正方形基底,(b)是圆形基底。假设微透镜直径为 D ,任意两个相邻的透镜之间的距离为 d ,则可以推算出正方形基底微透镜阵列的填充因子为 $\eta_1 = D^2/(D+d)^2$,圆形基底微透镜阵列的填充因子为 $\eta_2 = \pi D^2/4 \times (D+d)^2$ 。取 $D = 80 \mu\text{m}$, $d = 5 \mu\text{m}$,则正方形基底微透镜阵列的填充因子约 0.89,而圆形基底微透镜阵列约为 0.7,比较可知正方形基底的微透镜阵列具有更高的填充因子。

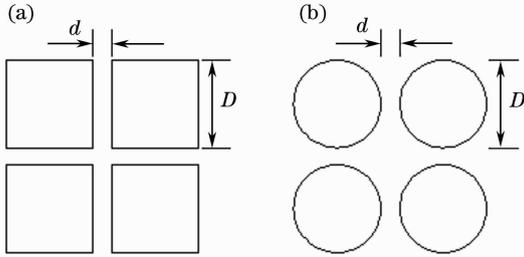


图 3 (a) 正方形基底形式的微透镜阵列;
(b) 圆形基底形式的微透镜阵列

Fig. 3 (a) Microlens array with a square base;
(b) microlens array with a circular base

由外向内灰阶从 230 至 40 灰阶,利用画图软件,设计如图 4 所示的正方形基底的微透镜阵列灰阶掩模。把设计好的掩模输入计算机,通过图 1 光刻系统,在上述实验条件下,在光刻胶上得到凸型微透镜阵列,如图 6 所示。

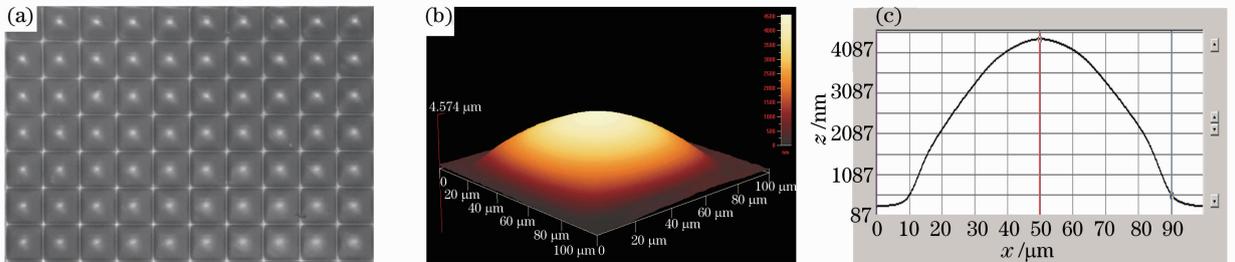


图 6 光刻胶上的正方形基底凸形微透镜阵列。(a) 放大图片;(b) 单个微镜三维轮廓图片;(c) 单个微镜截面轮廓图
Fig. 6 Convex microlens array with a square base on photoresist. (a) Magnified image; (b) 3D profile of single microlens;
(c) cross-section profile of single microlens

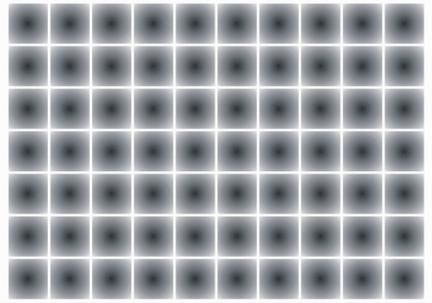


图 4 正方形基底微透镜阵列的灰阶掩模
Fig. 4 Grayscale mask of microlens array with a square base

3.2 PDMS 微透镜阵列的制作

以制作好的正方形基底凸形微透镜阵列作为母板,通过模型复制方法,制作凹形 PDMS 微透镜阵列,制作流程如图 5 所示。

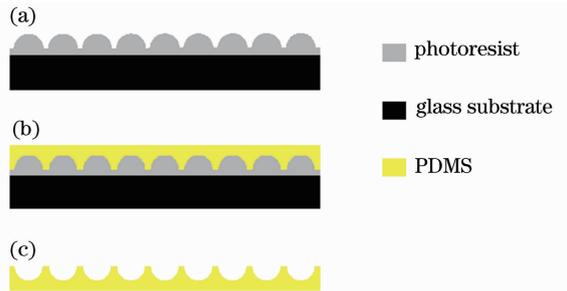


图 5 制作凹形 PDMS 微透镜阵列的工艺流程
Fig. 5 Technological process of fabricating concave PDMS microlens array

图 5(a)是制作好的凸形微透镜阵列母板,把 PDMS 主剂与固化剂按体积比 10:1 混合,搅拌均匀后静置约 30 min,直至气泡完全消失,然后缓慢地浇铸在母板上,如图 5(b)所示;将基板平置在烤箱内,以 80 °C 温度烘烤约 20 min,使 PDMS 充分固化后,轻轻地从母板上剥下,即得到凹形 PDMS 微透镜阵列,如图 5(c)所示。

4 实验结果与测试

用显微镜和 KLA-Tencore 公司的 MicroXAM-100 型白光干涉三维轮廓仪分别测试实验结果的放大图片和二维、三维形貌。图 6 是在光刻胶上的正方形基底凸形微透镜阵列,从图中看到,光刻胶微透镜的直径为 $80\ \mu\text{m}$,球冠高度约为 $3.8\ \mu\text{m}$;边缘清

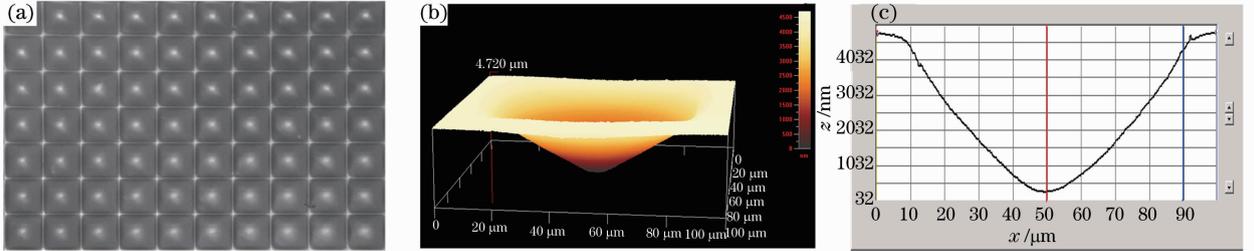


图 7 凹形 PDMS 微透镜阵列。(a) 放大图片;(b) 单个微镜三维轮廓图片;(c) 单个微镜截面轮廓图
Fig. 7 Concave PDMS microlens array. (a) Magnified image; (b) 3D profile of single microlens;
(c) cross-section profile of single microlens

根据几何光学知识,微透镜的曲率半径 R 和焦距 f 分别为

$$R = \frac{(h^2 + r^2)}{2h}, \quad (1)$$

$$f = \frac{R}{(n-1)}, \quad (2)$$

式中微透镜球冠高度 $h=3.8\ \mu\text{m}$,底面的半径 $r=40\ \mu\text{m}$,PDMS 折射率为 $n=1.45$,可以计算出微透镜的焦距为 $f=472\ \mu\text{m}$ 。

图 8 是测试微透镜阵列焦距和成像光斑的装置示意图。He-Ne 激光发出波长 $632.8\ \text{nm}$ 的光束经准直扩束系统后照射到微透镜阵列,经过显微物镜成像到 CCD。把 CCD 和显微物镜固定在导轨上,沿导轨方向移动微透镜阵列,使微透镜阵列底部和

晰,轮廓光滑,可以用来作为复制与其结构相反的微透镜阵列的母板。

制作的正方形基底凹形 PDMS 微透镜阵列如图 7 所示。从图中可以看到,PDMS 微透镜的直径和冠高与母板的尺寸基本一致,而且轮廓清晰,表面光滑,说明 PDMS 复制效果良好。

焦点光斑分别成像到 CCD,移动的距离就是微透镜的焦距长度,约为 $500\ \mu\text{m}$ 。实测焦距与理论值有一定误差,造成误差主要有两个方面的原因:一是由于导轨的精度不高带来读数误差;二是由于 PDMS 材料比较软,测试过程中有细微的形变,也会带来误差。图 9 是焦点光斑图像,其中(a)为光斑平面图,(b)是相对光强曲线。从图中可以看到,光斑分布基本均匀。

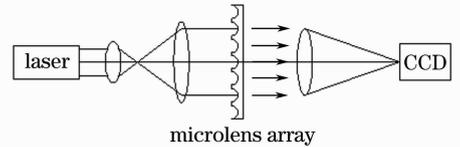


图 8 微透镜阵列测试装置图
Fig. 8 Experimental setup for microlens array

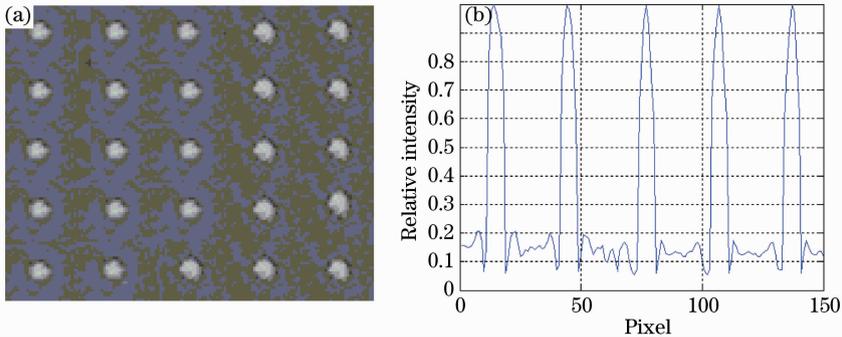


图 9 (a) 焦平面光斑图;(b) 焦平面光强分布曲线
Fig. 9 (a) Light spot in the focal plane; (b) light intensity in the focal plane

5 结 论

PDMS 是一种很好的光学材料,成本低,容易复

制,且具有弹性。用其制作的凹形 PDMS 微透镜阵列具有柔性,可以弯曲,可与其他探测器结合,扩大

视野;或应用到柔性显示器,比如有机发光二极管(OLED)显示器上,以提高 OLED 的取光效率和显示性能。建立了数字无掩模光刻系统,结合模型复制方法,制作了高填充因子的正方形基底凹形 PDMS 微透镜阵列。实验和测试结果表明,制作的 PDMS 微透镜阵列形貌完好,表面光滑,光学性能好。为制作凹形微透镜阵列提供了一条制作简单、成本低、可大规模制作的新途径。

参 考 文 献

- Li Ming, Cheng Guanghua, Zhao Wei, *et al.*. Concave microlens arrays produced by femtosecond laser with HF acid etching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 547-550.
李明,程光华,赵卫,等.飞秒激光和酸刻蚀方法制作凹面微透镜阵列[J].*光子学报*, 2009, 38(3): 547-550.
- F Chen, H Liu, Q Yang, *et al.*. Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method [J]. *Opt Express*, 2010, 18(19): 20334-20343.
- Zhang Xinyu, Tang Qingle, Zhang Zhi, *et al.*. Concave refractive microlens arrays fabricated by ion beam etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(4): 485-490.
张新宇,汤庆乐,张智,等.凹折射微透镜阵列的离子束刻蚀制作[J].*光学学报*, 2001, 21(4): 485-490.
- Li Feng, Chen Sihai, Luo Huan, *et al.*. Fabrication and characterization of polydimethylsiloxane concave microlens array [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 1054-1059.
- Xi Ke, Jing Zhang, Haiyan Qiao, *et al.*. Fabrication of poly (dimethylsiloxane) concave microlens arrays by selective wetting and replica moulding[J]. *Micro & Nano Letters*, 2012, 11(7): 1121-1124.
- Sun Yanjun, Leng Yanbing, Chen Zhe, *et al.*. Square aperture spherical microlens array for infrared focal plane [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 399-402.
孙艳军,冷雁冰,陈哲,等.用于红外焦平面的正方形孔径球面微透镜阵列研究[J].*光子学报*, 2012, 41(4): 399-402.
- He Miao, Yi Xinjian, Cheng Zuhai, *et al.*. Research on fabrication and optical performance testing of silicon microlenses array with large F number[J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(12): 1097-1102.
何苗,易新建,程祖海,等.大 F 数硅微透镜阵列的制作及光学性能测试研究[J].*中国激光*, 2000, 27(12): 1097-1102.
- M H Wu, C Park, G M Whitesides. Fabrication of arrays of microlenses with controlled profiles using gray-scale microlens projection photo-lithography [J]. *Langmuir*, 2002, 18(24): 9312-9318.
- Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2869-2872.
王伟,周常河.一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J].*中国激光*, 2009, 36(11): 2869-2872.
- Li Feng, Chen Sihai, Lai Jianjun, *et al.*. Design and fabrication of polymer microlens array with self-written waveguide [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0310003.
李风,陈四海,赖建军,等.自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作[J].*中国激光*, 2011, 38(3): 0310003.
- Shen Su, Pu Donglin, Hu Jin, *et al.*. Fabrication of microlens arrays based on spatial light modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0316003.
申溯,浦东林,胡进,等.一种基于空间光调制器的微透镜阵列制备技术[J].*中国激光*, 2012, 39(3): 0316003.
- Guan Yanxia, Ling Yu. Development of a PDMS pneumatic peristaltic micropump [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012, (11): 151-152.
关艳霞,凌宇. PDMS 气动微泵的研制[J].*仪表技术与传感器*, 2012, (11): 151-152.
- F Liu, K B Tan, P Malar, *et al.*. Fabrication of nickel molds using proton beam writing for micro/nano fluidic devices [J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, 102: 36-39.
- A S Nezhad, M Ghanbari, C G Agudelo, *et al.*. PDMS microcantilever-based flow sensor integration for lab-on-a-chip [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(2): 601-609.
- Shuai Yu, Yi Qu, Te Li, *et al.*. Fabrication of PDMS microfluidic chip used in ultraviolet integrated biological chip[C]. *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, 2012, 8: 23-25.
- M Flegler, A Neyer. PDMS microfluidic chip with integrated waveguides for optical detection[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83: 1291-1293.
- Cui Min, Zhang Binzhen, Zhang Yong. A new fabricating method of tunable grating [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(3): 46-49.
崔敏,张斌珍,张勇.一种新型可调光栅的制作方法[J].*传感器与微系统*, 2013, 32(3): 46-49.
- R Huszank, S Z Szilasi, I Rajta, *et al.*. Fabrication of optical devices in poly(dimethylsiloxane) by proton microbeam[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(1): 176-180.
- P F V Kessel, L J Hornbeck, R E Meier, *et al.*. A MEMS-based projection display[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1687-1704.

栏目编辑:韩峰