

# 大 $F$ 数硅微透镜阵列的制作及 光学性能测试研究\*

何 苗 易新建 程祖海 黄 光

刘鲁勤

(华中科技大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

(航天机电集团二院二部 北京 100854)

**提要** 提出了一种补偿刻蚀法:在经过常规光刻热熔成形和离子束刻蚀技术制成的硅微透镜阵列上再涂敷几层光刻胶,以降低各单元微透镜的曲率,然后再次进行加热固化和离子束刻蚀。扫描电子显微镜(SEM)显示微透镜阵列为表面极为平缓的球冠形阵列,表面探针测试结果显示用补偿刻蚀法制作的微透镜的  $F$  数和  $F'$  数分别可达到 31.62 和 35.88,而常规光刻热熔法很难制作出  $F$  数和  $F'$  数分别超过 1.00 和 4.00 的微透镜阵列。光学填充因子也由常规方法的 64.3% 提高至 78.5%,并且微透镜的点扩散函数也更接近理想值。

**关键词** 微透镜阵列,离子束刻蚀,光刻胶,点扩散函数

## 1 引 言

由于折射型微透镜阵列器件在焦平面集光、激光准直、大面阵显示、光效率增强、光计算、光互联及微型光扫描等方面获得越来越广泛的应用,它的制作工艺和方法得到了日益深入的研究。其中光刻/热熔成形/离子束刻蚀技术具有工艺简单、成本低廉、工艺参数易于控制及环境污染小等优点,但以下原因严重限制了大  $F$  数(即面形较为平缓的)微透镜的制作:首先,微透镜在热熔成形过程中受表面张力的影响将出现临界角效应<sup>[1]</sup>;另外,离子束刻蚀过程中硅衬底具有比光刻胶更大的刻蚀速率,光刻胶掩膜图形不能精确地转移到硅衬底上,刻蚀后微透镜的曲率变大了<sup>[2]</sup>。鉴于大  $F$  数微透镜阵列在微光学和自适应光学中有着非常重要的作用,最近,一些学者提出了许多改变微透镜  $F$  数的方法<sup>[3~6]</sup>,如阶梯光刻热熔法,该法采用控制曝光时间使光刻胶不完全曝光,使图形边界残留一薄层曝光不足的光刻胶,即改变了常规热熔法<sup>[7,8]</sup>的边界条件,使微透镜的面形更趋和缓。本文提出了补偿刻蚀法:通过涂胶形成更为平缓的胶层表面轮廓,经热处理和离子束刻蚀转移至硅衬底中。该法大大提高了硅微透镜阵列的  $F$  数,  $F'$  数和填充因子,并大大改善了通过微透镜成像的像质,使点扩散函数更接近理想值。

## 2 补偿刻蚀法

图 1 所示为用补偿刻蚀法在硅基片上制作微透镜阵列的工艺流程。

\* 国家 863 高技术发展计划资助项目资助课题。

收稿日期: 1999-04-19; 收到修改稿日期: 1999-09-24

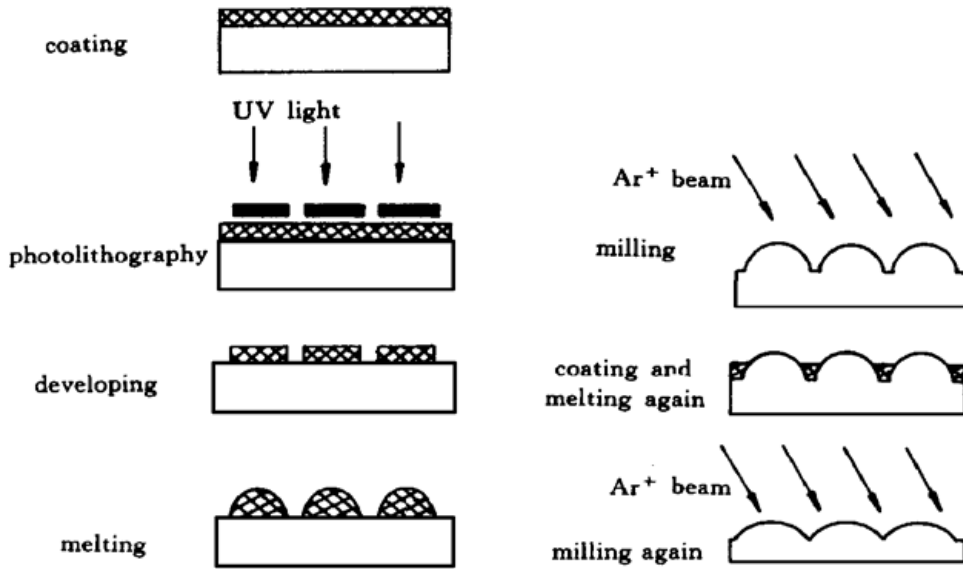


图1 128×128元硅折射型微透镜阵列的制备工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of fabrication of 128×128 Si refractive microlens array

### 2.1 常规光刻/热熔成形/氩离子束刻蚀法

在经清洗的硅基片上用旋转离心法涂布光刻胶薄膜, 实验中采用国产 BP212 紫外正型光刻胶, 再将光刻胶膜通过铬板在紫外线下接触曝光, 掩模版为直径 45 μm, 圆心间距为 50 μm

的 128×128 二维阵列, 经显影和冲洗后得到光致抗蚀剂圆柱体阵列. 后置于加热炉中在氮气气氛下加热至 200℃ 左右, 圆柱体状的光致抗蚀剂图形在加热熔融的过程中由于表面张力的作用转变为球冠形微透镜图形, 然后通过离子束刻蚀将球冠形光致抗蚀剂微透镜图形转移到硅衬底上. 为了使图形尽可能不失真地转移, 应使光刻胶层与硅具有较为接近的稳定的刻蚀速率, 因此在制作微透镜之前应进行一系列实验, 以求得硅与光刻胶的刻蚀速率对刻蚀角的依赖关系, 从中选出适当的刻蚀参数来. 实验表明: 氩离子能量低于 300 eV 的阈值时, 离子束刻蚀将不能进行; 氩离子能量高于 900 eV 时, 由于注入和散射效应, 刻蚀速率很慢; 当氩离子能量在 600 eV 附近时, 刻蚀速率最稳定. 图 2

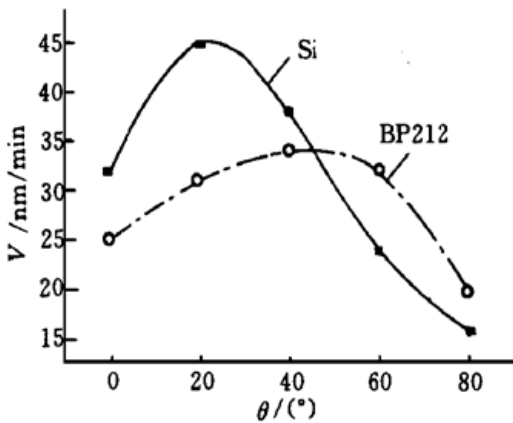


图2 离子束刻蚀速率与入射角的关系曲线  
Fig. 2 Dependence of milling rate on incident angle

所示为硅与光刻胶的刻蚀速率与刻蚀角的关系曲线, 其中束能为 600 eV, 束流密度为 0.63 mA/cm<sup>2</sup>. 实验在国产 LD-3 型离子束刻蚀机上进行, 采用 Kaufman 离子源, 真空工作室的本底真空度为 6.0×10<sup>-4</sup> Pa, 工作物质为 Ar, 工作气压为 4.0×10<sup>-2</sup> Pa, 氩离子能量为 600 eV, 氩离子束流为 50 mA, 氩离子入射角选为 45°.

### 2.2 补偿刻蚀法

以上述常规方法制成的微透镜阵列为基底, 在其上再涂敷适当厚度的光刻胶, 胶体将在重力作用下由凸起的微镜图形处流向低凹的图形交界处, 这样低凹的图形交界处将会聚集相对

更多的胶体, 大大降低了微透镜阵列的面形曲率, 同时表面张力的作用使微透镜胶体表面能保持一定曲率的凹面, 重力和表面张力的平衡使微透镜阵列的面形更为平缓, 然后加热固化成形, 最后再次进行氩离子束刻蚀, 更为平缓的胶层表面轮廓最终转移至硅衬底上。

补偿刻蚀法的提出基于以下物理机理: 光刻胶的主要成分是感光树脂, 它是一种橡胶态胶体, 有较大的粘滞系数, 当胶体覆盖在一个类山峰阵列的硅基底上时(如果胶量不足以淹没山峰), 胶体与硅之间接近浸润的情况, 将有较多的胶体附着于“山坡”上, 且越接近“谷底”胶层越厚。另外, 较大的粘滞系数使胶体表面存在较大的表面张力, “谷底”上方的胶体表面将在表面张力的作用下形成曲率很小的凹面, 这样, 原来“山坡”与“山谷”的衔接处存在的曲率突变被这层胶体所平滑, 胶体表面最终形成起伏很小的类丘陵阵列。经加热固化后, 胶体便与硅衬底构成一个整体。

### 3 测量结果及讨论

#### 3.1 硅折射微透镜阵列的微观表面形貌测试

图 3 所示为用日本 JSM 扫描电子显微镜(SEM)拍摄的 7<sup>#</sup> 微透镜阵列 SEM 照片, 它显示出微透镜阵列为平缓的球冠形阵列。图 4 所示为用英国 Detak-A 型轮廓仪测量的微透镜阵列表面微观形貌的表面探针曲线, 其中 (a) 为常规光刻/热熔成形/氩离子束刻蚀方法制成的 1<sup>#</sup> 微透镜阵列(显示 2 个周期), (b) 为光刻胶层过薄产生的 4<sup>#</sup> 类环形火山阵列(显示 2 个周期), (c) 为补偿刻蚀法制成的 7<sup>#</sup> 微透镜阵列(显示 4 个周期)。

图 5 所示为微透镜图形特征参数示意图。其中  $h$  为微透镜的冠高,  $s$  为物距,  $s'$  为像距, 硅微透镜材料的折射率  $n_0 = 3.44$  ( $3 \sim 5 \mu\text{m}$  大气窗口),  $n$  和  $n'$  分别

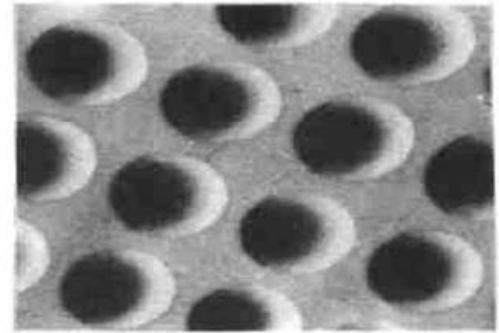


图 3 128×128 元 Si 球冠形微透镜阵列的 SEM 照片(360×)

Fig. 3 SEM photograph (360×) of 128×128 Si spherical microlens arrays

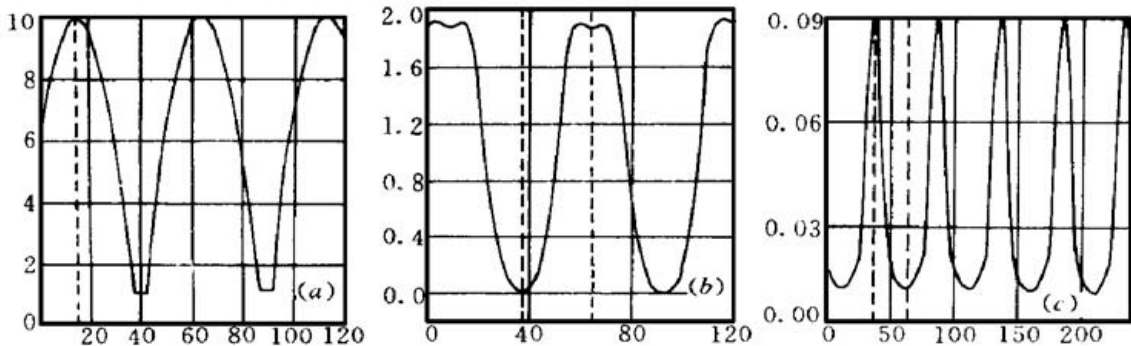


图 4 用表面探针测量的 128×128 元硅球冠形微透镜表面轮廓

(a) 1<sup>#</sup> 微透镜(垂直 9.040, 水平 25.043); (b) 4<sup>#</sup> 微透镜(垂直 1.804, 水平 24.981);

(c) 7<sup>#</sup> 微透镜(垂直 0.081, 水平 25.012)

Fig. 4 Profile of 128×128 Si spherical microlens arrays measured by the surface stylus

(a) 1<sup>#</sup> microlens (vertical 9.040, horizontal 25.043); (b) 4<sup>#</sup> microlens (vertical 1.804, horizontal 24.981);

(c) 7<sup>#</sup> microlens (vertical 0.081, horizontal 25.012);

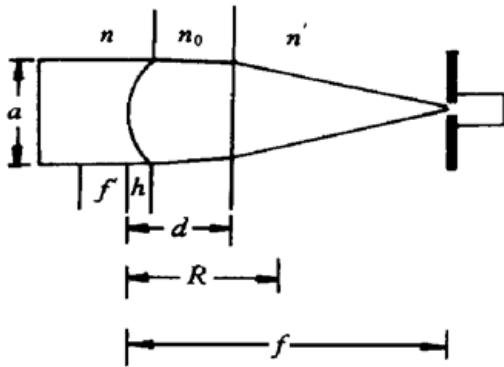


图 5 硅折射型微透镜图形的特征参数示意图  
Fig. 5 Diagram of characteristic parameters of Si refractive microlens pattern

为物方和像方的折射率, 如果物与像都在空气中, 则  $n = n' = 1$ 。对于常规光刻热熔法制成的微透镜阵列, 其口径  $a = 45 \mu\text{m}$ , 光学填充因子为  $3.14 \times 45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m} / (4 \times 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}) = 64.3\%$ ; 而对于补偿刻蚀法, 其口径  $a \approx 50 \mu\text{m}$ , 因此光学填充因子为  $3.14 \times 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} / (4 \times 50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}) = 78.5\%$ , 曲率半径  $R = (a^2/4 + h^2)/2h$ , 物方焦距  $f = nR/(n_0 - n)$ , 物方  $F = f/a$ 。

由于微透镜厚度  $d \approx 300 \mu\text{m}$  与像距  $s'$  相比不可忽略, 因此像方焦距  $f'$  的计算不能采用薄透镜近似, 于是本文从单球面的物像距公式  $n/s + n'/s' = (n' - n)/R$  出发推导出厚透镜公式

$$\text{像方焦距} \quad f' = n'R/(n_0 - n) + (1 - n'/n_0)d$$

当  $f' < d$ , 即像方焦点悬在微透镜中时,  $n' = n_0, f' = n_0R/(n_0 - n)$ , 像方  $F' = f'/a$ 。

表 1 为用以上公式计算的 7 个微透镜阵列的特征参数。从 1# 至 4# 的微透镜阵列均由常规光刻热熔法制备, 其涂胶层厚逐次递减, 可以看出不断降低胶层的厚度并不能无限制地提高  $F$  数和  $F'$  数, 因为胶层过薄将产生一种类环形火山阵列(如图 3(b) 所示的 4# 样品)。1# 至 3# 微透镜阵列的  $f'$  都很小, 像方焦点悬于微透镜中, 像方焦面无法实现焦平面集光的作用; 且物方焦距  $f$  也太小, 与红外探测器阵列的对接将十分困难。5# 至 7# 是分别以 1# 至 3# 作为中间产品用补偿刻蚀法制作的, 它们的像方焦点均在微透镜外, 可以实现焦平面集光的功能, 且物方焦距  $f$  也较大, 可供实用。

表 1 7 个球冠形微透镜阵列的特征参数

Table 1 Calculation results of the characteristic parameters of 7 spherical MLAs with various  $F$  (unit:  $\mu\text{m}$ )

	$h$	$R$	$f$	$F$	$f'$	$F'$
1#	9.040	32.52	13.33	0.30	45.85	1.02
2#	4.376	60.03	24.60	0.55	84.62	1.88
3#	2.421	105.80	43.36	0.96	149.16	3.31
4#	Too thin	Glue layers	Result in	Annular	Volcano	- Like array
5#	0.800	391.03	160.26	3.21	372.43	7.44
6#	0.585	534.48	219.05	4.38	431.84	8.64
7#	0.081	3858.02	1581.16	31.62	1793.95	35.88

### 3.2 微透镜的点扩散函数测量与像质评价

无穷远点源经光瞳衍射造成的点扩散函数的一般表达式为

$$h(x', y') = \left| \iint_{-\infty}^{+\infty} \tilde{i}(\xi, \eta) \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda s'}(x'\xi + y'\eta)\right] d\xi d\eta \right|^2$$

其中  $(x', y')$  和  $(\xi, \eta)$  分别代表像面和衍射屏(即透镜平面)上点的坐标,  $s'$  为像距,  $\lambda$  为光波波长,  $\tilde{i}(\xi, \eta)$  为屏函数, 微透镜可简化成圆形光瞳, 其聚焦作用只是将成在无穷远处的像平移至微透镜焦平面上, 点扩散函数保持不变, 于是  $s' = f$ , 最后可推导出微透镜的点扩散函数

$$h(x', y') = (\pi a^2/4\lambda f)^2 [2J_1(\alpha)/\alpha]^2, \quad r = \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad \alpha = \pi ar/\lambda s'$$

其中  $a$  为微透镜的直径,  $J_1$  为一阶 Bessel 函数。

微透镜点扩散函数测量的实验装置如图 6 所示, 光源采用波长  $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$  的红外激光器, 斩波器调制频率为 570 Hz, 光阑口径为  $50 \mu\text{m}$ , 微透镜阵列置于精度为  $5 \mu\text{m}$ ,  $xyz$  三个方向均可调、存在两个转动自由度且转动精度为 1 mrad 的微调架上, 实验中微调架每次调动  $50 \mu\text{m}$ , 使微透镜单元逐个进入测量光路, 由于光阑口径与微透镜的口径相同, 所以能确保每次只有一个微透镜进入测量光路。对  $3\sim 5 \mu\text{m}$  敏感的红外探测器与口径为  $5 \mu\text{m}$  的小光阑贴紧且胶合在一起(以克服小光阑的衍射效应), 并置于精度为  $1 \mu\text{m}$ ,  $xyz$  三个方向均可调、存在两个转动自由度且转动精度为 0.1 mrad 的微调架(美国进口)上, 实验中微调架每次调动  $5 \mu\text{m}$ (峰值附近调动  $2.5 \mu\text{m}$ ), 探测信号经精度为 nV 的 EG&G PARC5209 锁相放大器(美国进口)放大, 最后输入计算机处理。整个测量过程实质上是一个机械扫描过程, 由于阵列单元数为  $128 \times 128 = 16384$ , 数目极为庞大, 要测量每一个单元是困难的, 因此实验中选取位于阵列中心的 1000 个单元进行测量, 将它们的结果加以平均。从实验数据可以计算出: 3<sup>#</sup> 微透镜阵列  $D^*$  的非均匀性不大于 15%, 7<sup>#</sup> 微透镜阵列  $D^*$  的非均匀性不大于 14%, 经过平均的微透镜的点扩散函数如图 7 所示, 其中横坐标  $x'$  是沿径向伸展的像面坐标, 为了便于对 3 条曲线进行比较, 我们没有给出点扩散函数的立体图, 只给出了  $x'$  方向的剖面图。从图 7 还可看出, 7<sup>#</sup> 微透镜的点扩散函数比 3<sup>#</sup> 微透镜的更接近理想值, 这是由于用补偿刻蚀法制作的 7<sup>#</sup> 微透镜比常规光刻热熔法制作的 3<sup>#</sup> 微透镜的焦距长, 像差小, 所以像点的扩展程度也轻。

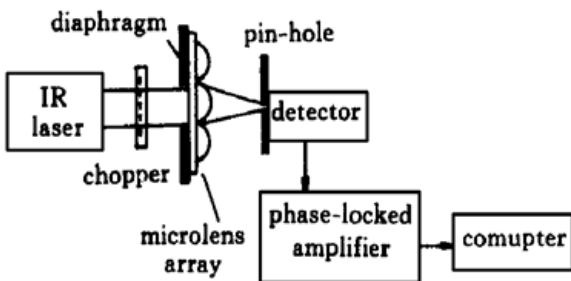
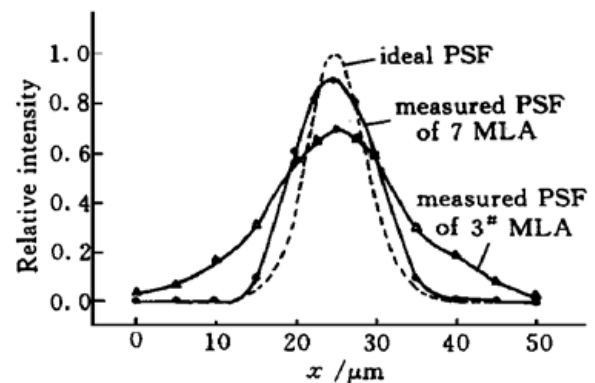


图 6 测量微透镜点扩散函数的实验装置简图

Fig. 6 Schematic diagram of PSFs of MLA measuring system



7 球冠形硅微透镜的点扩散函数(波长  $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ )

Fig. 7 Point spread functions of Si spherical microlens arrays (wavelength  $\lambda = 3.8 \mu\text{m}$ )

与理论值相比, 微透镜像质不够理想,  $D^*$  的非均匀性偏大, 这是因为: 首先, 在折射微透镜的实际制作过程中, 灰尘、污渍不可避免地进入光刻胶, 导致光刻胶体内部不均匀, 表面粗糙度增加, 且在进行氩离子束刻蚀时, 离子束的轰击将使灰尘和污渍脱落, 产生微米级的缺陷, 这些缺陷和不均匀性将最终转移至硅微透镜中, 导致透镜的形状不规则,  $D^*$  的非均匀性增大, 所以提高微透镜像质的关键在于微透镜制作过程中保持一个高度清洁的环境, 使微透镜单元具有很好的均匀性和重复性。其次, 匀胶过程中离心力的作用使胶层内薄外厚, 实际中应选择面积较大的硅片并只使用中心区域制作微透镜, 使胶层厚度变化不大。最后, 曝光过程中紫外光束中心强边缘弱, 容易造成中心区域的单元曝光过度而靠近边缘的单元曝光不足, 导致显影后的单元间存在差异, 因此, 应将硅片置于光束中心, 尽可能均匀地曝光。

## 4 结 论

临界角效应的存在使提高微透镜的  $F$  数不能单纯靠降低光刻胶层的厚度来实现, 因为使胶层过薄将不会产生凸透镜阵列, 而会形成类环形火山阵列(当然这为环形火山口式阴极发射体的制作提供了一条新途径)。本文提出的补偿刻蚀法是制作大  $F$  数微透镜阵列的有效方法, 它大大扩展了微透镜相对孔径范围, 从理论上说这种扩展是无止境的, 因为可以不断重复涂胶、加热和刻蚀过程, 它对工艺过程也没有提出新的更高的要求, 容易实现。同时, 它使面形更平缓, 微透镜之间的边界更模糊, 填充因子大为提高。另外, 微透镜阵列的点扩散函数更接近理想值, 像质大为改善。

### 参 考 文 献

- 1 Z. D. Popovic, R. A. Sprague, G. A. N. Connell. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(27): 1281~ 1284
- 2 Zhang Xinyu, Yi Xinjian, Zhao Xingrong *et al.*.  $128 \times 128$ -element microlens arrays fabricated by Ar ion beam etching for focal plane device. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1998, **10**(3): 445~ 448 (in Chinese)
- 3 S. Haselbeck, H. Schreiber, J. Schwider *et al.*. Microlenses fabricated by melting a photoresist on a base layer. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(6): 1322~ 1324
- 4 T. R. Jay, M. B. Stern. Preshaping photoresist for refractive microlens fabrication. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(11): 3552~ 3555
- 5 Lars Erdmann, Dirk Efferenn. Technique for monolithic fabrication of silicon microlenses with selectable rim angles. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(4): 1094~ 1098
- 6 Xu Qiao, Yang Liming, Shu Xiaowu *et al.*. Step heat-forming photoresist method for expanding the N. A. range of refractive microlens. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(8): 1128~ 1133 (in Chinese)
- 7 Zhang Xinyu, Yi Xinjian, He Miao *et al.*.  $128 \times 128$  element silicon microlens array fabricated by ion beam etching for PtSi IRCCD. *SPIE*, 1998, **3551**: 191~ 198
- 8 Zhang Xinyu, Yi Xinjian, Zhao Xingrong *et al.*. Fabrication of linear fused quartz microlens array using photolithography and Ar ion beam etching. *Chinese J. Quantum Electron.* (量子电子学报), 1998, **15**(1): 66~ 73 (in Chinese)

## Research on Fabrication and Optical Performance Testing of Silicon Microlenses Array with Large $F/\text{Number}$

He Miao<sup>1</sup> Yi Xinjian<sup>1</sup> Cheng Zuhai<sup>1</sup> Huang Guang<sup>1</sup> Liu Luqin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; <sup>2</sup>2nd Department, 2nd Academy, The Spaceflight Mechanical and Electrical Technology Group of China, Beijing 100854)

**Abstract** A new method, named curvature compansation milling, is proposed to increase  $F/$  of refractiave microlenses array (MLA). It is described as follows: in order to decrease curvature of MLA fabricated by the conventional method of photolithography/melting/ion beam milling, several new layers of photoresist are coated on MLA, then heated and consolidated, at last milled again. Scanning electron microscope (SEM) shows that microlens is gently spherical, and surface stylus measurement shows that  $F/$  number and  $F'/$  number of MLA, fabricated by the new method, is promoted to 31.62 and 35.88, respectively, compared with 1.00 and 4.00, hardly obtained by use of conventional way. And the filling factor is promoted from 64.3% to 78.5%. Using the new method, point spread funtions of MLAs are more ideal, and their image quality is improved.

**Key words** microlenses array, ion beam milling, photoresist, point spread funtion