

折射型微透镜列阵的光刻热熔法研究*

许 乔 叶 钧 周光亚 侯西云 杨国光

(浙江大学高技术现代光学中心, 杭州 310027)

包正康 余中如

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 研究了制作折射型微透镜列阵的一种新方法——光刻胶热熔成形法, 获得了 20×20 的折射型微透镜列阵, 单元微透镜相对口径为 $F/2$, 单元透镜直径为 $90 \mu\text{m}$, 中心间隔 $100 \mu\text{m}$, 透镜的波像差小于 1.3 波长。本文详细阐述了光刻热熔法的基本原理及微透镜设计方法, 并讨论了工艺参数对微透镜列阵质量的影响。

关键词 微透镜列阵, 微光学, 测试, 光刻胶.

1 引 言

作为微光学元件的重要分支的折射型微透镜的制作日益引起人们的关注。目前, 制作折射型微透镜的方法主要有模压成型法^[1]、离子交换法^[2]、光敏玻璃热成形法^[3]和光刻胶热熔成形法等。其中光刻胶热熔成形法, 具有工艺相对简单, 对材料和设备的要求不高, 工艺参数稳定且易于控制, 复制容易等优点, 很适于制作较大相对口径的微透镜。这种折射型微透镜列阵可用作三维照相术中的关键器件——逆反射屏和集成成像屏^[4], 还可作为焦平面列阵上的微集光器, 以提高探测器的性能^[5]。因此, 该方法自从 Poporic 于 1988 年提出后^[6], 已引起广泛的兴趣。如美国马省理工学院林肯实验室的 Jay 等就工艺参数对微透镜质量的影响进行了研究^[7], 并提出了预成形光刻胶热熔法^[8], AT&T 贝尔实验室的 Feldblumng^[9] 等对这种微透镜列阵的测试进行了研究。本文也对这种方法进行了实验研究。

在实验中, 运用光刻胶热熔成形的方法, 得到了 20×20 的 $F/2$ 微透镜列阵, 单元微透镜的口径为 $\phi 90 \mu\text{m}$, 单元之间中心距为 $100 \mu\text{m}$ 。本文详细阐述了热熔法制作微透镜列阵的工艺流程和微透镜工艺参数设计原理方法, 并讨论了热熔工艺参数对微透镜列阵面形及透镜光学性能的影响, 最后对微透镜列阵的几何面形、光学质量等性能指标进行了综合的测试, 实验结果表明, F 数为 2 的微透镜的波像差小于 1.3 波长。

2 工艺过程及设计原理

* 本文得到国家自然科学基金的资助。

收稿日期: 1995年6月5日; 收到修改稿日期: 1995年9月18日

用光刻胶热熔成型的方法来制作折射型微透镜列阵,是将有一定厚度的光刻胶在具有适当孔径的圆形图案的掩膜的遮蔽下,进行紫外曝光,经过显影后在基底上就形成了相对应的孤立的岛状圆柱形胶体;再进行热处理,加热光刻胶至熔融态温度,此时熔融的光刻胶由于表面张力的作用,形成了以图案孔径为边界的光滑的球面,从而就得到折射型微透镜的表面结构。整个工艺过程可分为如图 1 所示的三步:1) 光刻胶板在掩膜的遮蔽下进行紫外曝光;2) 对已曝光的光刻胶板进行显影和清洗;3) 热熔成型。

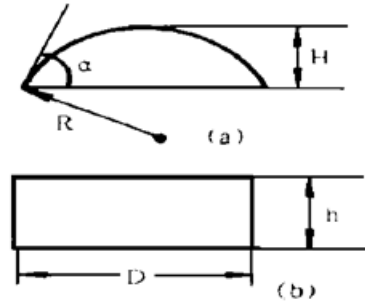


Fig. 1 Fabrication sequence of the refractive microlens Fig. 2 Schematic representation of design model

图 2 示意地给出了圆柱形光刻胶体热熔前后几何面形上的变化。图 2(a) 为热熔后得到的微透镜的截面示意图,由几何光学透镜成像公式可知,透镜的曲率半径可表达为:

$$R = (n - 1)DF^{\#} \quad (1)$$

式中 n 为折射率, D 为透镜口径, $F^{\#}$ 为透镜 F 数。

图 2(b) 是光刻胶曝光后呈现的圆柱体,比较图 2(a) 和图 2(b),圆柱形胶体的体积为 $V_c = (\pi/4)D^2h$,球状微透镜胶体的体积为 $V_s = \pi H^2R - (\pi/3)H^3$,热熔前后光刻胶体积可近似地认为不发生变化,于是

$$h = [4H^2(R - H/3)/D^2] \quad (2)$$

式中 h 为初始涂抹光刻胶的厚度, H 为微透镜矢高, D 为掩膜口径。由(1)式、(2)式即可计算出在制作所需孔径和光焦度的微透镜时,初始涂抹光刻胶所要求的胶层厚度。

在实验中,作者发现,并非任意大小厚度的圆柱胶体热熔后都能形成良好的球面面形,能否形成球面以及球面的形状是由光刻胶与基底的浸润程度所决定的。通常情况下,光刻胶对某一材料的浸润程度是一定的,即光刻胶在熔融状态时与基底的附着力是一定的,这样热熔成型后,微透镜的球面轮廓与基底之间存在着一定的夹角,可称之为临界角(图 2(a) 中的 α)。微透镜的面形形成与否及面形的质量均决定于临界角。由于临界角的存在,当胶层厚度不足时,胶体并不能形成一半径较大的球面。如图 3(a) 中的微透镜表面轮廓曲线,表示口径为 $180 \mu\text{m}$ 的微透镜在初始涂胶量不足时热熔得到的面形:边缘保持一定的曲率,中间部分下凹;图 3(b) 显示了口径为 $180 \mu\text{m}$ 的微透镜在足够的胶层厚度下,正常成形后的面形轮廓。因此,临界角的存在实际上限定了微透镜的数值孔径,要得到不同 $F^{\#}$ 的微透镜,可以通过改变光刻胶与基底的材料或引入中间层,从而改变临界角的大小来达到目的^[6]。

按照以上设计模型,作者设计得到了 $F/2$ 的 20×20 的微透镜列阵,单元微透镜口径为 $\Phi 90 \mu\text{m}$,中心距为 $100 \mu\text{m}$ 。实验中采用玻璃基板,用一定的方法在上面形成厚度约为 $8 \mu\text{m}$ 的 AZ1375 胶层,用掩模接触曝光,显影后在 190°C 热熔 5 分钟形成微透镜列阵。图 4 是微透镜列阵的显微照片(由 JSM-T20 型扫描电子显微镜摄得)。

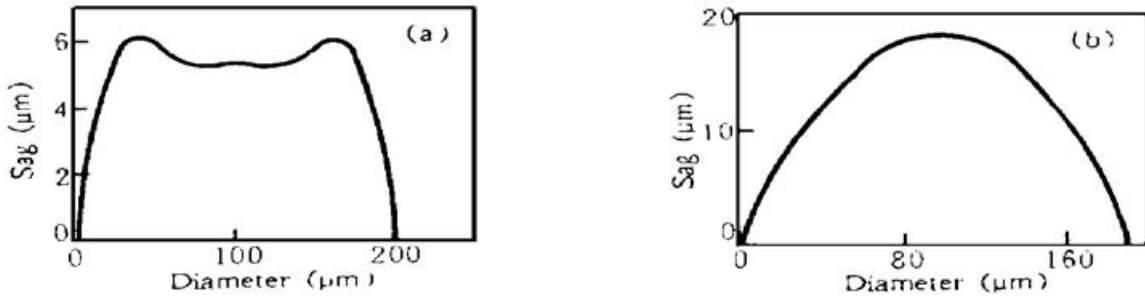


Fig. 3 Effects of photoresist's thickness on microlens' surface: (a) profile of $\phi 180$ microlens with insufficient photoresist; (b) profile of $\phi 180$ microlens with excellent formation

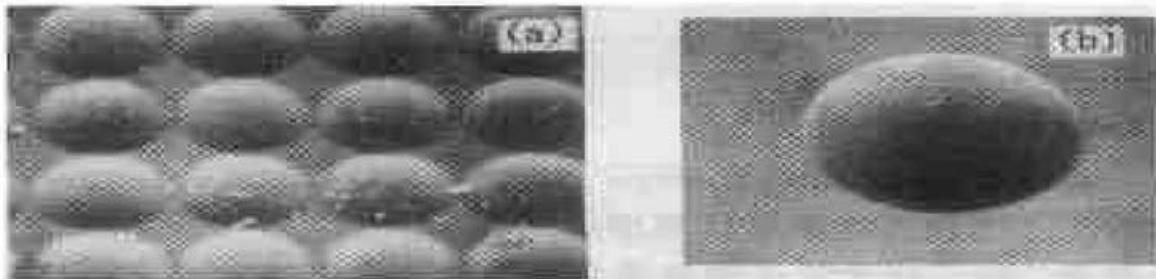


Fig. 4 Micrographs of refractive microlens : (a) SEM (scanning electron microscopy) micrograph of microlens array; (b) SEM micrograph of a single microlens (500 \times)

3 热熔工艺参数

要获得一定孔径的热熔型折射微透镜列阵，主要是控制微透镜凸起的球冠的矢高，这与初始涂抹光刻胶的胶层厚度、紫外曝光时间、显影参数及热熔的温度、时间有密切的关系，只有对这些工艺参数进行最优化处理，才能得到高质量的微透镜列阵。

实验采用的是 AZ- 1375 型的正性光刻胶，这种光刻胶的一些基本特性如表 1 所列

Table 1 Characteristics of AZ- 1375 photoresist

Viscosity (cSt, at 25°C)	90 \pm 6				
Spin Speed (rpm)	3000	4000	5000	6000	7000
Thickness (μm)	3.24	2.88	2.63	2.44	2.29

制作微透镜列阵时，对涂抹光刻胶这一道工序的要求较高：既要得到设计要求厚度的胶层，又要使胶层厚度达到一定的均匀性，否则就不能得到光学性能一致的列阵。从表 1 可以看出 AZ- 1375 可得到的厚度范围为了 2.29~ 3.24 μm ，这个范围对制作微透镜列阵显然不够。实验采用控制涂胶量、涂胶转速和涂甩时间等手段来控制胶层厚度，这样可获得厚达 16 μm 的胶层，且胶层厚度不均匀度小于 0.3 μm (用 SPGIII型数字波面干涉仪测得)。

热熔光刻胶法制作折射型微透镜列阵，关键工艺在于控制各级烘烤温度。前烘温度应控制在 90 \pm 5°C 的范围内，后烘温度为 120°C，这样可增强光刻胶对基板的附着，而且不至于破坏光刻胶的曝光特性。而控制热熔温度则显得尤为重要：若热熔温度偏低，未达到光刻胶的玻璃态温度，光刻胶不能完全自由流动，就无法形成球面面形；若热熔温度偏高，则光刻胶极易热分解，即使形成了球面，也会出现焦糊、内部有气泡等现象出现，影响微透镜的光学性能。图 5(a) ~ 图 5(e) 口径为 180 μm 的圆柱胶体在不同温度下形成的面形，温度范围为

150℃ 至 210℃, 以 20℃ 递增, 热熔时间为 5 分钟, 从图中可看出 190℃ 为最佳热熔温度, 210℃ 时微透镜内部已出现气泡、表面焦糊。

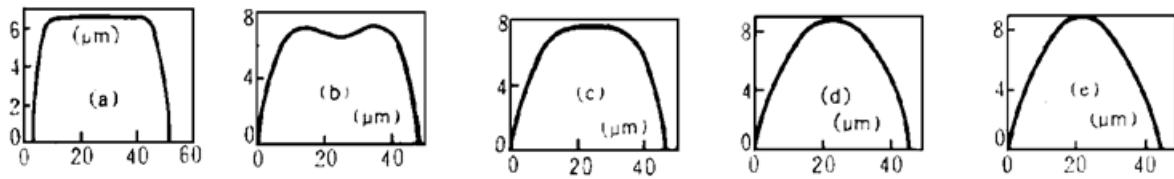


Fig. 5 The temperature effects on microlens' profile after 5 minute bake : (a) original profile of cylinder photoresist ;(b) profilometer trace at 150℃ ;(c) profilometer trace at 170℃ ;(d) profilometer trace at 190℃ ;(e) profilometer trace at 210℃

4 微透镜列阵测试结果

用前面所述方法制得的微透镜列阵具有很好的光学特性。用一束准直的 He-Ne 激光束 ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 照射到微透镜列阵上, 通过放置在微透镜列阵焦平面上的 CCD 摄像机接收, 可得到如图 6 所示的光点列阵。为考查微透镜列阵各个单元之间的均匀性, 用一显微物镜和 CCD 摄像机对微透镜的焦点位置进行探测, 从而精确得到透镜的焦距为 $182 \mu\text{m}$ 。实验结果表明, 对 $F/2$ 的 20×20 的微透镜列阵, 各单元之间焦平面位置的偏差小于 $1.2 \mu\text{m}$, 即列阵焦距的均匀性偏差小于 7%。

在对微透镜表面面形测试过程中, 采用了 Dektak III 型表面轮廓仪进行表面接触测试, 其结果如图 7(a) 所示, 曲线 1 表示实际测得的微透镜面形轮廓, 曲线 2 表示根据测试数据拟合的标准球面的面形轮廓, 微透镜面形与标准球面的偏差如图 7(b) 所示, 两者的偏差在 $1.3 \mu\text{m}$ 的范围内。从各次测试数据中可以发现, 测得的面形存在着相同规律的不对称偏差, 而采样位置是随机的, 这说明表面轮廓仪测试时存在着一定的系统误差。由于轮廓仪探针的直径有 $25 \mu\text{m}$, 在测量几十微米量级的微透镜时, 必然将自身的面形误差引入到测试数据中去, 污染实验结果。消除探针引入的面形误差后, 微透镜面形与标准球面的偏差在 $0.5 \mu\text{m}$ 以内。

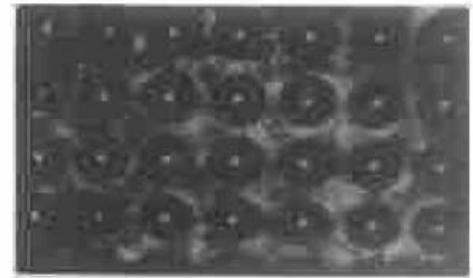


Fig. 6 The focusing spot of microlens array (at wavelength $0.6328 \mu\text{m}$)

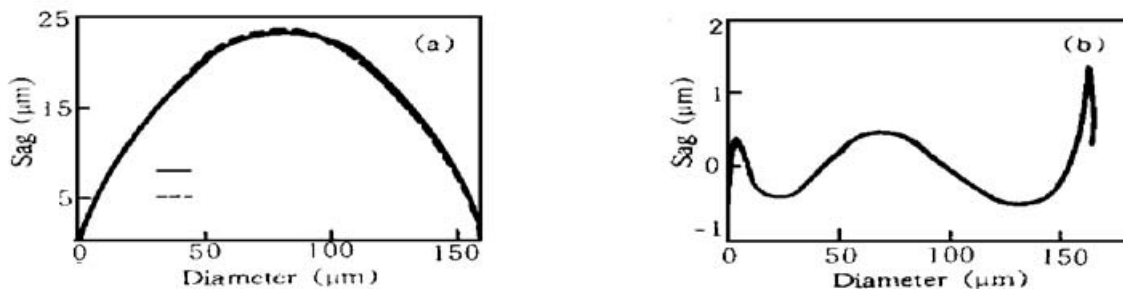


Fig. 7 Deviation from standard sphere (a) profile of microlens and sphere; (b) departure from sphere

为对微透镜的面形作出准确的评价, 本文利用光学干涉的方法进行了面形测试, 设计泰

曼-格林(Tayman-Green)干涉仪(图8(a))来度量单元微透镜与标准球面的偏差:准直的 He-Ne 激光束经显微物镜会聚在微透镜的球心,光束由球面反射,携带微透镜的面形误差沿原路返回,与另一路参考光束发生干涉,形成图8(b)所示的干涉条纹。干涉法测出的面形误差小于一个波长($\lambda = 0.6328\mu\text{m}$),这与前面的分析相吻合。

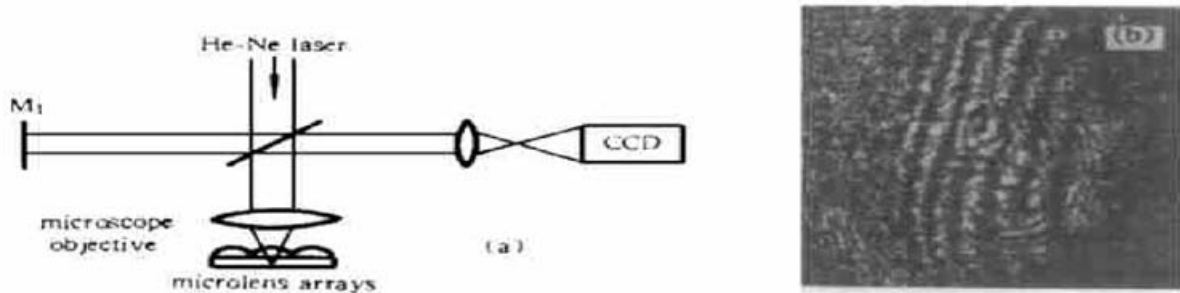


Fig. 8 Schematic of interferometric measurement system (a) and interferogram (b)

为评价微透镜的光学质量,实验用马赫-陈德尔干涉测试系统对微透镜的成像质量进行分析测试,如图9(a)所示,He-Ne激光束经准直后入射到微透镜的表面,微透镜将平行光会聚为会聚光束,用一透镜对这束会聚光束进行准直,然后与参考平面波发生干涉,干涉图像经透镜成像后由 CCD 摄像机接收,这样即可得到如图9(b)所示的干涉条纹图像,对条纹的计算结果表明微透镜的波像差小于 1.3λ 。

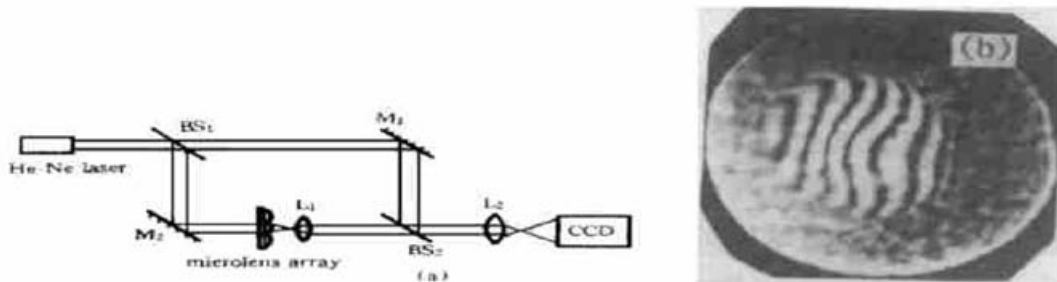


Fig. 9 Schematic of Interferometric measurement system and the the interferometric stripe of microlens

结 论 通过对光刻胶热熔成形法制作折射型微透镜列阵的研究,得到了口径 $\phi 50\mu\text{m}$ 到 $\phi 200\mu\text{m}$ 、相对孔径范围 $F2 \sim F4$ 的微透镜和 20×20 的微透镜列阵,对焦距为 $182\mu\text{m}$ 的微透镜列阵,可保证其均匀性偏差小于 7% ,每个单元微透镜列阵的波像差小于 1.3λ ,与标准球面的面形误差小于 $0.5\mu\text{m}$ 。从工艺过程可以看出,这一新方法工艺简单,对材料和设备的要求不高,为制作具有较大数值孔径、高均匀度的微透镜列阵提供了便利。利用反应离子蚀刻^[10]、电铸及塑压成型的工艺均可对得到的器件进行复制生产,避免了诸如梯度折射率微透镜等平面微器件复制困难的麻烦,为实现大规模生产创造了条件。随着设计模型的完善和工艺参数的进一步优化,微透镜的光学性能可进一步增强,微透镜列阵的填充因子也将大大提高,这类微器件必将在提高探测器灵敏度和宽光谱微光学系统等领域有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] I. N. Ozerow , V. M. Petrov, V. a. Shishkina *et al.* , Shaping the contours of dies for manufacturing lens arrays having spherical elements. *Sov. J. Opt. Technol.* , 1981, **48**(1): 49~ 50
 [2] M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada *et al.* , Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion

- exchange technique. *Jpn. J. Appl. Phys.* , 1981, **20**(7): L296~ L298
- [3] N. f. Borrelli, D. L. Morse, R. H. Bellman *et al.* , Photolytic technique for producing microlenses in photosensitive glass. *Appl. Opt.* , 1985, **24**(16): 2520~ 2525
- [4] Takanori Okoshi, Three-dimensional displays. *Proc. IEEE* , 1980, **68**(5): 21~ 28
- [5] Michael W. Farn, Micro-concentrators for focal plane arrays. *Proc. SPIE* , 1992, **1751**: 106~ 117
- [6] Zoran D. Popovic, Robert A. Sprague, G. A. Nevile Connell, Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Appl. Opt.* , 1988, **27**(7): 1281~ 1284
- [7] T. R. Jay, M. B. Stern, R. E. Knowlden, Effect of refractive microlens array fabrication parameters on optical quality. *Proc. SPIE* , 1992, **1751**: 236~ 245
- [8] T. R. Jay, M. B. Stern, Preshaping photoresist for refractive microlens fabrication. *Proc. SPIE* , 1993, **1992**: 275~ 282
- [9] Avi Y. Feldblum, Casimir R. Nijander, Wesley P. Townsend *et al.* , Performance and measurement of refractive microlens arrays. *Proc. SPIE* , 1991, **1544**: 200~ 208
- [10] Margaret B. Stern, Theresa R. Jay, Dry etching for coherent refractive microlens arrays. *Opt. Engng.* , 1994, **33**(11): 3547~ 3551

Fabrication of Refractive Microlens Array by Melting Photoresist

Xu Qiao Ye Jun Zhou Guangya

Hou Xiyun Yang Guoguang

(*High Technology Optical Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

Bao Zhengkang Yu Zhongru

State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 5 June 1995; revised 18 September 1995)

Abstract A new method of fabricating refractive microlens by melting photoresist was presented in this paper. The microlens array composed of $20 \times 20 F/2$ microlens with $90 \mu\text{m}$ diameter on $100 \mu\text{m}$ centers have been obtained. The wave aberration of the microlens was estimated less than 1.3 wavelength. The principle of the method and the design model of refractive microlens are described. The effects of fabrication parameters on the quality of the microlens are discussed.

Key words microlens arrays, microoptics, measurement, photoresist.