

扩展微透镜数值孔径范围的 阶梯光刻热熔法研究*

许 乔

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

杨李茗 舒晓武 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 在微透镜阵列的光刻热熔制作法中, 临界角效应严重影响了微透镜的制作范围和面形质量。在对临界角效应定性研究的基础上, 提出了用阶梯光刻热熔法来扩展热熔型微透镜阵列的数值孔径范围。实验结果表明, 采用这一方法制作的微透镜, 其单元孔径范围扩展为 $50\sim 900\ \mu\text{m}$, 相对口径范围扩大到为 $F/1\sim F/10$, 并有效地改善了临界角效应对大孔径微透镜面形质量的影响。

关键词 微透镜阵列, 微光学, 光刻胶, 制作与测试。

1 引 言

在各种微透镜阵列的制作方法中, 用光刻热熔成形的方法来制作折射型微透镜阵列, 具有很多技术优势: 工艺简单, 对材料和设备的要求不高, 工艺参数稳定且易于控制等, 很适于制作较大相对口径的微透镜。但是由于微透镜在热成形过程中受到表面张力的影响, 会呈现明显的临界角现象, 面形曲率的成形范围大大受限, 不能形成比较“平坦”的球面面形。因此, 热熔微透镜的相对口径都比较大, 一般都在 $F/1\sim F/4$ 的范围内。要得到不同 $F^\#$ 的微透镜则显得比较困难, 而获得大 F 数的微透镜阵列就更加困难, 但这种类型的微透镜阵列在自适应光学^[1, 2]中有很大的用途, 在微型光学系统中也是不可缺少的。

目前为改变微透镜的 F 数、扩大其数值孔径范围, 已提出不少方法^[3, 4], 如 Poporic^[5]提出改变光刻胶与基底的材料, 通过选择不同的光刻胶或基底材料, 形成具有不同浸润程度的界面, 以达到获得不同 F 数制作范围的微透镜热熔加工技术的目的; 还提出在光刻胶和基底材料之间引入一中间层, 进行两次光刻, 光刻胶成形时边界部分所受到的限制是由中间层和光刻胶的材料特性决定的, 这样就可通过改变临界角的大小来达到目的。这些方法的出发点都是通过改变三相界面的材料特性和物理浸润特性, 从而来改变微透镜的相对口径。

本文通过对临界角效应的分析和研究, 在改变界面材料常数的指导思想下, 提出了阶梯

* 国家科委高技术项目资助。

收稿日期: 1997-09-18; 收到修改稿日期: 1997-11-06

光刻热熔的方法, 来制作具有较大数值孔径范围的微透镜阵列, 取得了很好的效果: 其孔径范围扩展为 50~ 900 μm , 相对口径范围扩大到为 $F/1 \sim F/10$, 并有效地减轻了临界角效应对微透镜面形质量的影响, 获得了高质量的微透镜阵列。

2 临界角效应

在光刻热熔微透镜的制作过程^[6]中, 并非任意厚度的圆柱胶体热熔后都能形成良好的球面面形。光刻胶热熔成形后的面形轮廓与基底间存在着一定的夹角, 称之为临界角。其大小是由熔融状态下的光刻胶分子结构、光刻胶与基底之间的相互作用力以及光刻胶分子间相互作用力等材料特性参数决定的^[7]。微透镜的面形形成与否及其质量均决定于临界角。

考虑到临界角效应对微透镜成形过程的影响, 可将微透镜的制作参数设计公式修正为:

$$\begin{cases} h' = [4H^2(R - H/3)]/D^2 \\ h = h'/T_p \end{cases} \quad h > h^* \quad (1)$$

式中 R 为透镜的曲率半径, D 为微透镜的口径(即为掩膜口径), h 为初始涂抹光刻胶的厚度, H 为微透镜的设计矢高, h' 为微透镜的有效初始涂抹厚度, 损耗因子 T_p 的存在主要是由于热熔过程中的溶剂损耗引起的, T_p 的范围为 0.7~ 0.8。式中 h^* 是与临界角有关的光刻胶初始厚度阈值。当初始胶厚小于 h^* 时, 光刻胶胶量不够, 微透镜无法形成球面面形; 只有当初始厚度超过此阈值时, 微透镜成形的面形规律才能用(1) 式表示。如果考虑微透镜的孔径可变, 那么 h^* 对应的是一定的 F 数范围。通常光刻热熔法能制作的微透镜相对孔径范围为 $F/1 \sim F/4$, 对其使用范围产生了限制。

临界角效应对微透镜制作的影响不仅仅表现在微透镜孔径和相对口径的范围受限, 而且直接影响微透镜的面形质量。图 1(a) 是 $\Phi 200 \mu\text{m}$ 微透镜的面形实测曲线, 图 1(b) 是微透镜实际面形与拟合后得到的标准球面面形的偏差曲线; 图 1(c) 和 1(d) 分别是直径为 300 μm 微透镜的面形及面形与球面的偏差曲线。实验结果表明, 孔径较小的微透镜面形与球面的偏差一般在 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的范围内; 而孔径增大时, 微透镜的面形误差达 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 以上。这也反映出临界角的影响在孔径增大时十分明显。以上这些限制对于微透镜的制作、设计十分不利, 因此必须对光刻热熔法进行改进, 以减小临界角效应对制作孔径和面形质量的影响。

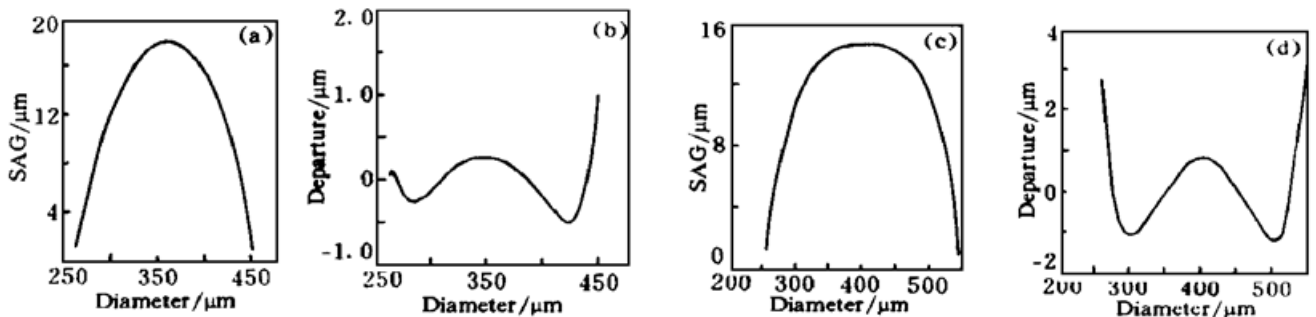


Fig. 1 The effect of critical angle on performance of microlens's profile.

- (a) The profile of microlens with diameter-200 μm ; (b) The departure of ML's profile from sphere;
(c) The profile of microlens with diameter-300 μm ; (d) The departure of ML's profile from sphere

3 阶梯光刻热熔制作法

目前已提出了很多改变微透镜的 F 数、扩大数值孔径范围的制作方法, 这些方法的出发

点都是通过改变三相界面的材料特性物理浸润特性,从而改变微透镜的相对口径。Poporic 引入中间层的方法对解决微透镜数值孔径范围过小这个问题是有意义的,但这些方法都比较繁琐,而且引入了其它材料,对微透镜的后期复制等加工又增加了新的不可控因素。

阶梯光刻热熔法的提出基于以下光刻物理机理^[8]:光刻胶的主要成分是感光树脂,光刻胶曝光后发生的光化学反应和溶解特性的变化等,是与光刻胶组份中感光树脂的性质密切相关的。在 AZ-1375 和 AZ-4620 这类正性光刻胶中,感光树脂的主要成分是邻叠氮醌类树脂。在曝光过程中,邻叠氮醌化合物吸收能量引起光化学分解作用,经过较为复杂的反应过程,转变为可溶于显影液的物质,未经感光的光刻胶则不溶于这种显影液。关于邻叠氮醌化合物的感光分解机理,可以这样理解:邻叠氮醌化合物经 300~460 nm 范围内的光线照射后,发生分解反应,放出氮气,同时在分子结构上经过重排,产生环的收缩作用,从而形成相应的五员环烯酮化合物,水解后生成茛菪基羧酸衍生物。对于光刻胶曝光不足的情况,经显影后在基底上将残留一层未曝光的光刻胶膜(掩膜图形区域外)。这层光刻胶膜在分子结构上已发生了一部分变化,因为在曝光过程中,光线对没有掩膜遮蔽的区域直接照射,曝光不足的本质是因为在曝光时间内,该层胶层没有获得足够的能量使分子结构发生完全的光解反应。值得注意的是,这层光刻胶膜层与未曝光部分光刻胶的分子结构是十分相近的,即两者的物理材料特性基本接近。从浸润的角度来看,近似完全浸润的状况。当然两者之间细微的差别对浸润是有影响的,这也就是促使微透镜成形的边界条件。因此,如果在这种边界条件下进行热熔处理,就能获得很“平坦”的微透镜球面。

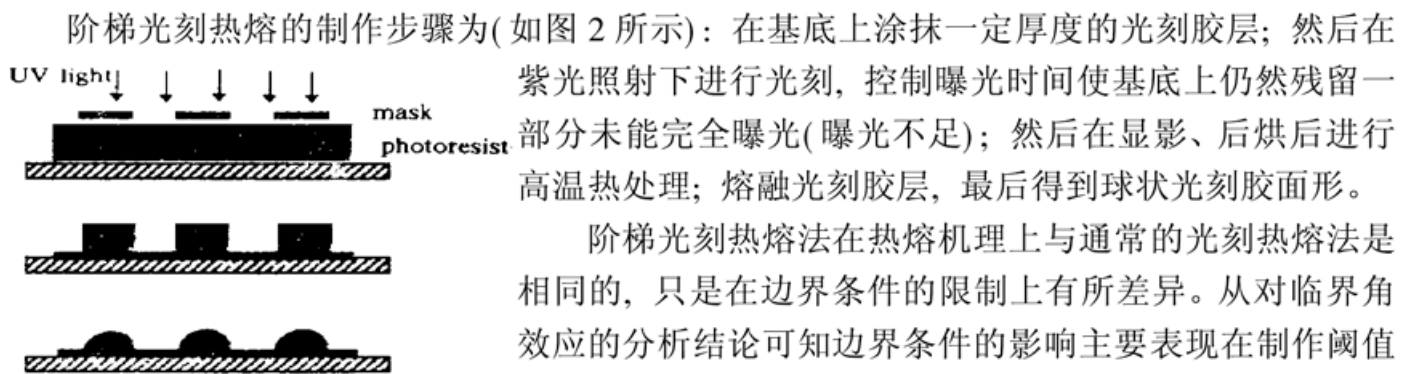


Fig. 2 The schematic diagram of step heat-forming photoresist method

阶梯光刻热熔的制作步骤为(如图 2 所示):在基底上涂抹一定厚度的光刻胶层;然后在紫光照射下进行光刻,控制曝光时间使基底上仍然残留一部分未能完全曝光(曝光不足);然后在显影、后烘后进行高温热处理;熔融光刻胶层,最后得到球状光刻胶面形。

阶梯光刻热熔法在热熔机理上与通常的光刻热熔法是相同的,只是在边界条件的限制上有所差异。从对临界角效应的分析结论可知边界条件的影响主要表现在制作阈值上,因此可以预计用此法制作的微透镜也应该满足(1)式。实验结果验证了这一点。表 1 为用阶梯光刻热熔法制作的不同口径、不同 F 数微透镜的测试数据。

Table 1. The fabricating parameters of microlens with various $F^{\#}$ (unit: μm)

diameter of microlens (D)	curvature radius of microlens (R)	original height of photoresist (h)	sag of microlens (H)	effective original height (h')
150	163.18	11.35	17.91	8.97
200	574.53	5.74	8.81	4.44
200	462.34	7.28	10.91	5.46
300	975.69	7.75	11.45	5.66
500	1680.75	12.99	18.81	9.48
500	2358.61	8.92	13.33	6.69
900	5657.48	12.61	17.91	8.95

表中 H 是成形微透镜的矢高测试数据, D 为微透镜的单元口径; h' 是根据实验测试数据反推得到的光刻胶有效初始涂沫厚度, R 为对微透镜曲面用最小二乘法进行球面拟合后得到的标

准球面曲率半径。对表中的数据统计得到溶剂损耗关系: $h' \approx T_p h$, T_p 的范围为 0.7~0.8, 这与通常的光刻热熔法规律是相同的。

实验结果表明, 微透镜的球面面形与曝光不足残余的光刻胶层的厚度无关, 而只与未曝光部分光刻胶胶体的高度有关。在相对孔径 $F/1 \sim F/10$ 的范围内进行的实验证实, 对阶梯光刻热熔法制作微透镜, 其制作参数设计与(1)式是一致的; 不同之处在于阶梯光刻法的 h^* 可以取得很小, 即能在一个很大的范围内满足设计公式, 而阈值 h^* 的降低就意味着微透镜相对孔径范围的扩大。对微透镜的相对孔径在 $F/10$ 以外的情形, 由于工艺参数精确控制难度增大、测量准确度下降等原因, 已无法验证设计公式的准确性了。综合以上分析, 得到阶梯光刻热熔法制作参数设计公式为:

$$\begin{cases} h' = \frac{H^2(R - H/3)}{D^2} \\ h = h'/T_p \end{cases} \quad 1 \leq F^\# \leq 10, T_p \approx 0.7 \sim 0.8 \quad (2)$$

4 实验结果

采用阶梯光刻热熔法可以有效地减轻临界角效应对微透镜制作质量的影响, 这主要表现在两方面: 1) 大大扩展微透镜的制作范围, 包括单元微透镜的孔径范围、微透镜的相对口径范围等; 2) 改善微透镜的面形质量, 尤其对于大口径微透镜。

应用阶梯光刻热熔法, 在折射型微透镜的制作中获得了预期的实验效果。用一般的光刻热熔法单元微透镜的孔径范围一般在 50~300 μm , 相对口径范围为 $F/1 \sim F/4$; 采用阶梯光刻热熔法, 单元微透镜的制作孔径范围扩展到 50~900 μm , 相对口径范围扩大到为 $F/1 \sim F/10$ 。图 3(a) 为采用阶梯光刻法获得的大口径(直径为 900 μm)微透镜面形(用 Dektak III 型表面轮廓仪进行表面接触测试得到的数据), 图 3(b) 为根据测量数据拟合得到的标准球面的面形曲线, 图 3(c) 是此微透镜面形与标准球面面形之间的偏差曲线。图 4 是直径 500 μm 微透镜的面形曲线, 其中图 4(b) 是此微透镜面形与标准球面面形之间的偏差曲线。消除测试系统的系统误差后, 面形误差在 0.5 μm 以内, 此微透镜阵列具有很好的面形质量。

图 5(a) 显示的是用阶梯光刻热熔法制作的 $F/4$ 、单元微透镜孔径 $\Phi 245 \mu\text{m}$ 、单元之间中心距为 250 μm 的微透镜阵列。阵列分布形式为六边形分布, 阵列面积为 20 mm \times 20 mm。采用阶梯光刻热熔法还可以制作非圆口径的大口径微透镜阵列, 如图 5(b) 是一柱面微透镜阵列的扫描电镜图像。单元微透镜的口径为 $\Phi 245 \mu\text{m}$, 单元之间中心距为 250 μm , 制作方法是阶梯光刻热熔法。对这一口径的柱面微透镜阵列, 用通常的光刻热熔法是无法得到柱面面形的。

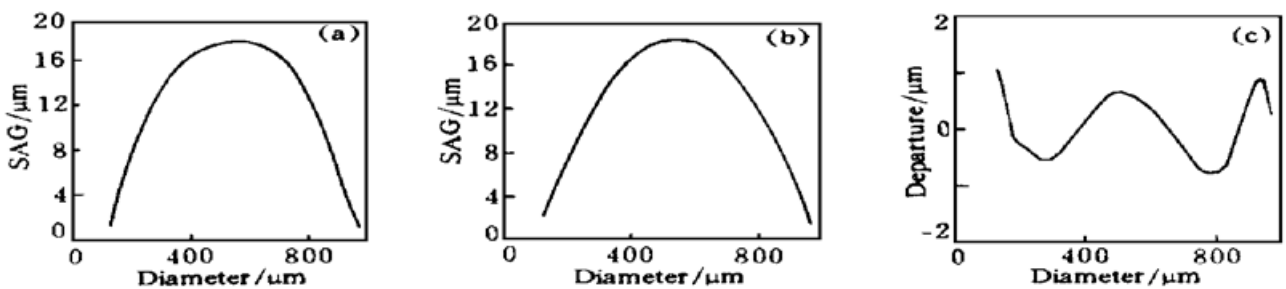


Fig. 3 The profile of microlens with diameter-900 μm . (a) the profile of microlens; (b) the profile of standard sphere; (c) the departure of ML's profile from sphere



Fig. 4 The quality of the microlens' profile. (a) the profile of microlens with diameter-500 μm ; (b) the departure of ML's profile from sphere

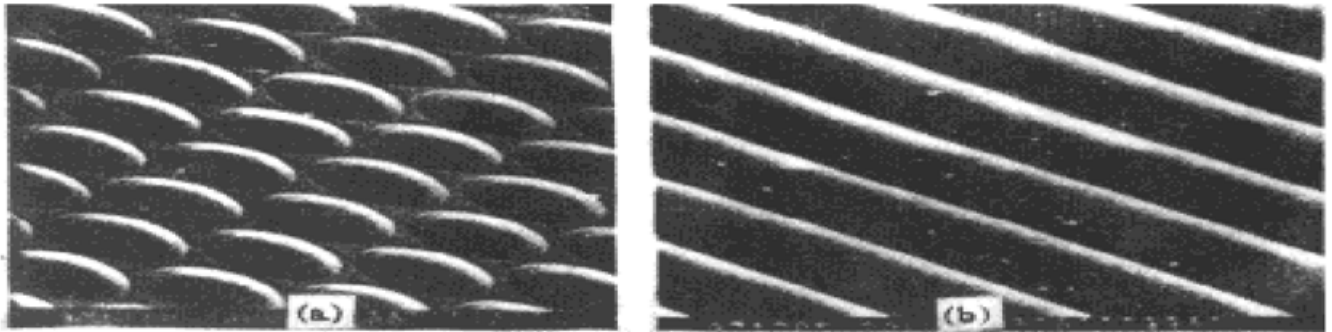


Fig. 5 The SEM photograph of large aperture microlens array: (a) $\Phi 245 \mu\text{m}$ microlens array in 20 mm \times 20 mm area; (b) $\Phi 245 \mu\text{m}$ cylinder microlens array

微透镜的后期蚀刻传递对材料有比较严格的要求, 考虑反应离子束蚀刻(Reactive Ion Beam Etching)过程, 在 AZ-4620 的最佳蚀刻条件下(离子束束流密度 $1 \text{ A}/\text{cm}^2$, 离子能量 500 eV , 总气体流量为 $3.5 \text{ cm}^3/\text{min}$, 氧气流量为 $0.42 \text{ cm}^3/\text{min}$), 未曝光 AZ-4620 的蚀刻速率为 $70 \text{ nm}/\text{min}$, 而残余胶层的蚀刻速率与未曝光胶层的没有明显差异, 从实际蚀刻效果看, 也没有损坏微透镜的面形质量。因此, 阶梯光刻热熔法对后期的蚀刻传递没有影响。

结 论 采用通常的光刻热熔法来制作微透镜阵列, 微透镜可供制作的相对孔径范围是很有限的。热熔成形过程中, 由于微透镜口径边缘存在临界角, 不仅使微透镜数值孔径受限, 而且也是降低大口径微透镜面形质量的主要因素。因此, 必须进行制作方法上的改进, 才能适用于不同的应用背景。阶梯光刻热熔法可以很方便地解决这个问题, 对工艺过程没有提出新的要求, 实现方便。实验结果表明: 采用阶梯光刻热熔法可以有效地扩大微透镜的制作范围, 而且能保证微透镜制作面形的高质量。这一方法弥补了通常光刻热熔法制作法的不足, 为获得高质量的折射微透镜阵列提供了一套完善的制作方法。

参 考 文 献

- [1] J. S. Toepfen, E. S. Bliss, T. W. Long *et al.*, A video Hartmann wavefront diagnostic that incorporates a monolithic microlens array. *Proc. SPIE*, 1991, **1544**: 218~ 255
- [2] 周仁忠主编, 自适应光学, 北京: 国防工业出版社, 1996
- [3] S. Haselbeck, H. Schrelber, J. Schwider *et al.*, Microlenses fabricated by melting a photoresist on a base layer. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(6): 1322~ 1327
- [4] T. R. Jay, M. B. Stern, Preshaping photoresist for refractive microlens fabrication. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(11): 3553~ 3555

- [5] Z. D. Popovic, R. A. Sprague, G. A. Neville, Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(7) : 1281~ 1284
- [6] 许 乔, 叶 钧, 周光亚等, 折射型微透镜列阵的光刻热熔法研究. *光学学报*, 1996, **16**(9) : 1326~ 1331
- [7] 黄祖洽, 丁鄂江著, 表面浸润和浸润相变. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.
- [8] 中国科学院化学研究所 《光致抗蚀剂组》组著, 光致抗蚀剂: 光刻胶. 北京: 科学出版社, 1977.

Step Heat-Forming Photoresist Method for Expanding the N. A. Range of Refractive Microlens

Xu Qiao

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610036)

Yang Liming Shu Xiaowu Yang Guoguang

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

(Received 18 September 1997; revised 6 November 1997)

Abstract The existence of critical angle seriously limits the range of microlens array's numerical aperture and the improvement of the quality of the microlens in the fabrication of microlens array by using heat-forming photoresist method. Based on the study of the critical angle effect, a new method named step heat-forming photoresist method to expand the N. A. range of microlens array is presents. The results show that this method can effectively improve the conventional heat-forming fabrication. The available diameter range of microlens is from 50 μm up to 900 μm . A series of MLA with $F/1$ to $F/10$ relative apertures have been fabricated, with the improved quality of the profile.

Key words micro-optics, microlens array, photoresist, fabrication and measurement.