

文章编号: 0253-2239(2004)07-869-4

精确控制大数值孔径微透镜列阵面形的 显影阈值方法*

董小春 杜春雷

(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, 成都 610209)

摘要: 提出了一种可对大矢高、非球面微透镜阵列面形进行精确控制的新方法。针对不同面形的微透镜阵列, 该方法首先对光致抗蚀剂表面的曝光分布进行设计, 然后, 利用光致抗蚀剂显影过程中的阈值特性, 对微透镜的面形实行控制。当抗蚀剂显影速率接近 0 时, 即可获得设计的微透镜面形。该方法不仅大大提高了微透镜阵列矢高的加工范围, 而且还减小了光刻材料显影特性对微透镜面形的影响, 提高了微透镜阵列的面形控制精度, 在实验中获得了矢高达 114 μm 的微透镜阵列。最终实现了大浮雕深度、大数值孔径、非球面微列阵光学元件的面形控制。

关键词: 显影阈值; 正性光致抗蚀剂; 光刻模型; 面形控制

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

The Developing Threshold Method for Precise Profile Control of Microlens Array with High Numerical Aperture

Dong Xiaochun Du Chunlei

(State Key Lab of Optical Technologies for Micro-Fabrication, Institute of Optics & Electronics,
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 29 January 2003; revised 3 September 2003)

Abstract: A new method for precisely control of microlens profile is presented. First, the exposure dose distribution on the surface of photoresist is designed. According to the developing threshold characteristics of the photoresist, precise lens profile is obtained when the developing velocity reaches zero. The influence of developing characteristics of graphic materials to microlens is decreased in this procedure. At last, microlens array with rise with of 114 μm is fabricated in the experiment. By using of this method, the manufacturing of micro-optical elements with high numerical aperture, deep relief depth and aspherical profile is possible.

Key words: developing threshold; positive photoresist; lithography model; profile control

1 引 言

微透镜阵列由于具有体积小、集成度高的优点, 已经在光聚能、光通信、光显示等诸多领域取得了很好的效果。并且, 随着应用范围的进一步拓展, 人们不仅对大矢高微透镜的需求越来越迫切, 同时对微透镜面形的精度, 也提出了更为苛刻的要求。目前, 有关连续微光学元件制作技术的文献中, 关于不同

曝光方法的报道层出不穷, 如“灰度掩模法^[1]、激光直写法^[2]、光刻热熔法^[3]等”。而对于显影过程的报道则为数很少。其中以 20 世纪 70 年代提出的“Dill model”和“Mack model”最为著名。但是由于这两种模型仅在小剂量曝光的情况下, 与实验结果有较好的一致性^[4]。所以根本无法满足大剂量曝光前提下, 大矢高微透镜阵列的面形控制。另外, 不同的曝光剂量、不同工艺条件、以及不同的光刻材料显影特性都完全不同^[5]。这些都决定了我们很难采用“建立显影模型”的办法, 实现大矢高微透镜阵列的面形控制。

* 中国科学院知识创新工程及国防预研项目资助课题。

E-mail: dxc468@yahoo.com.cn; dxc468@263.net

收稿日期: 2003-01-29; 收到修改稿日期: 2003-09-03

本文在对不同曝光剂量、不同工艺条件、以及不同光刻材料的显影特性进行了深入分析的基础上,找到了各种不同条件下,抗蚀剂显影特性的共同点(即在抗蚀剂显影特性曲线中都存在显影阈值),并以此为依据,提出了一种利用光刻材料显影阈值对微透镜面形进行控制的方法。该方法不需要对抗蚀剂的显影特性进行准确描述,只要知道材料显影阈值,然后通过设计曝光分布,便可使微透镜面形在显影结束后与设计面形一致。

2 显影阈值法原理

首先实验研究正性光刻材料的显影阈值。由于在任何条件下,正性光致抗蚀剂的显影速率必然随着曝光量 Q 的减小而逐步减小。图 1 为正性光致抗蚀剂板,以曝光量线性增加的方式曝光,显影 3 min 后,所测得的浮雕深度。从图中可以看出,曝光量由 Q_0 增加至 Q_1 ,显影深度逐渐增加。当曝光量等于 Q_1 时,抗蚀剂显影深度为 $12.3 \mu\text{m}$ 。而曝光量小于 Q_0 时,抗蚀剂显影深度为 0。同时抗蚀剂显影速率也为 0。我们即定义 Q_0 为光刻材料显影阈值。

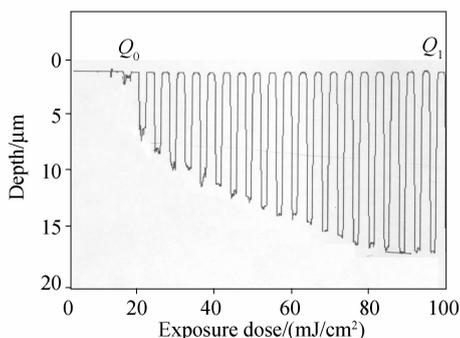


Fig. 1 Exposure-depth relation

下面对显影阈值法的工作原理进行分析:我们知道,曝光光强在胶层中传播规律可近似用(1)式表示

$$I(x, h) = I(x, 0) \exp(-\alpha h), \quad (1)$$

其中 I 为胶层中光强, I_0 为胶层前光强, α 材料吸收系数, h 为胶层厚度。则光致抗蚀剂内部的曝光量可表述为

$$Q(x, y_0) = I(x, y_0) t = I(x, 0) t \exp(-\alpha y_0) = Q(x, 0) \exp(-\alpha y_0), \quad (2)$$

式中 $Q(x, 0)$ 为抗蚀剂表面的曝光分布。根据光刻材料的显影阈值特性,当 $Q(x, y_0) = Q_0$ 时,对应光致抗蚀剂内部 (x, y_0) 处的显影速率 ν 近似为 0。如果通过调节抗蚀剂表面的曝光量分布,可以使抗蚀剂内部某一曲面处的曝光量等效于显影阈值 Q_0 。则显

影过程中,微浮雕面型必趋于这一稳定曲面。

基于以上想法,我们对需要在光致抗蚀剂表面施加的曝光量分布进行推导。

设要刻蚀的目标浮雕面形为 $y(x)$, 所用抗蚀剂显影阈值为 Q_0 , 则由(2)式可推导出抗蚀剂表面所需的曝光量分布为

$$Q(x, 0) = Q_0 \exp[\alpha y(x)], \quad (3)$$

(3)式即显影阈值法中,目标曲面与曝光强度分布之间的函数关系。

3 显影过程分析

采用显影阈值法设计预期目标面形的光能分布函数,在工艺中,显影可用终点时间进行控制,其过程可得到简化,这对优化工艺是非常重要的。

为了验证该方法,我们假设了几种显影模型,对微透镜面形在显影过程中随时间变化趋势进行分析,得到了肯定的结果。

设透镜的目标面形为

$$y(x) = y_0 \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right), \quad -r < x < r \quad (4)$$

其中 y_0 为透镜矢高, r 为透镜口径半宽度。

我们取(4)式中 $r = 250 \mu\text{m}$, 矢高 $y_0 = 115 \mu\text{m}$, 抛物面微透镜面形方程为

$$y(x) = 1.84 \times 10^{-3} (250^2 - x^2), \quad (5)$$

令吸收系数 $\alpha = 0.03$, 显影阈值 $Q_0 = 20 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。由(4)式得到抗蚀剂表面曝光量分布函数为(如图 2 所示)

$$Q(x, 0) = 20 \exp[5.52 \times 10^{-5} (250^2 - x^2)], \quad (6)$$

以(6)式为曝光分布,光致抗蚀剂中 $Q > 20 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 对应的空间点的显影过程按下面三种方式(见图 3):

$$\begin{cases} \nu_1 = (Q - 20) \times 5, \\ \nu_2 = (Q - 20)^2 \div 20, \\ \nu_3 = \sqrt{(Q - 20)} \times 50, \end{cases} \quad (7)$$

其中模型 1 为线性显影模型,模型 2、3 为非线性显影

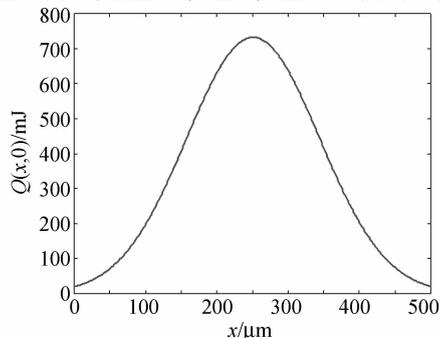


Fig. 2 Distribution of exposure

模型。采用计算机模拟,分析显影过程中不同时刻,显影模型对微透镜面形的影响。图 4 给出模型 2、3 非线性显影过程中,瞬间留膜量与线性显影同时刻留膜量的差异曲线。由图 4 可看出,随着显影时间的增加,不同模型对透镜面形的影响逐渐减小。达到一定的时间后,留膜量差异接近 0,面形趋于一致。

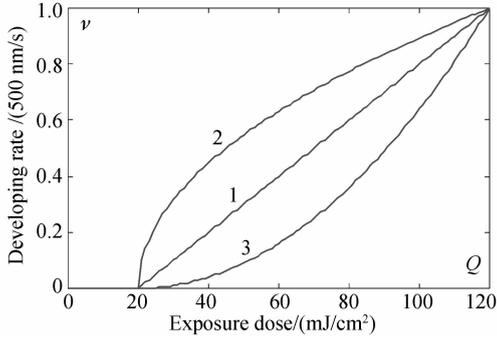


Fig. 3 Model of developing

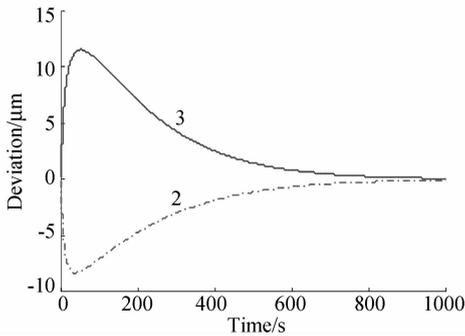


Fig. 4 Left film deviation curves

从上述分析可看出,显影模型对最终的透镜面形影响不大。在显影阈值法中,透镜面形完全决定于抗蚀剂表面的曝光分布,与分析结果一致。

4 实 验

在设计与模拟的基础上,我们以(5)式给出的抛物面微透镜为目标函数开展实验。采用 AZ4620 作为光致抗蚀材料。经测试材料吸收系数为 0.03、显影阈值为 20 mJ/cm²。涂敷厚度 140 μm,采用 120 °C 高温前烘 150 min。实验中,我们采用移动掩模法^[6]进行曝光。为了获得透镜阵列,我们将图 2 进行拼接。便得到了透镜阵列的曝光分布函数。图 5 是根据曝光分布要求,以掩模移动法形式,设计出的二元移动掩模图形(其中黑色区域为透光区)。通过移动掩模曝光,在抗蚀剂表面即可形成所需要的曝光分布。

显影过程采用与光致抗蚀剂 AZ9260 配套显影液 A303 的 1:5 稀释液进行显影,显影 10 min 后,形

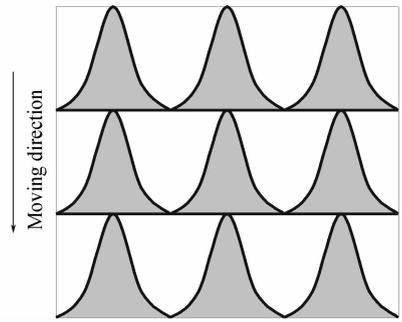


Fig. 5 Mask figure

成稳定的微透镜面形。图 6 给出 Alpha step-500 型台阶轮廓仪扫描微透镜阵列得到的剖面图,微透镜矢高达到 114 μm。图 7 为目标图形与实验结果比较图,“—”所示的曲线为目标曲线,“☆”所示的曲线为实验结果。图 8 为采用 VEECO 公司的三维轮廓仪测试得到的实验结果三维面形。经计算,微透镜面形均方根误差小于 ±1.76 μm。

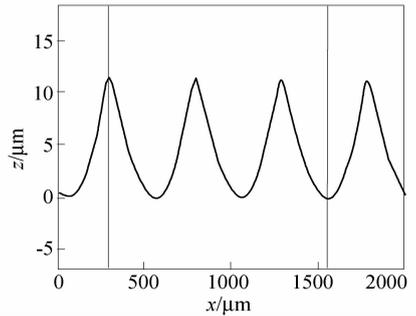


Fig. 6 Profile of microlens array

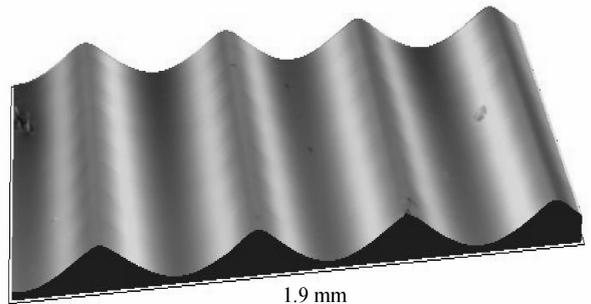
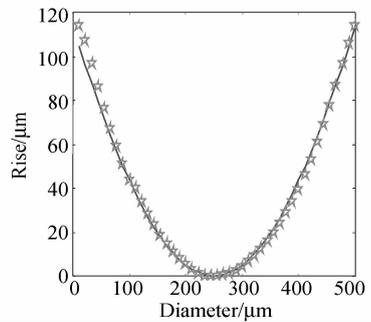


Fig. 8 3-D resist image for microlens array

结论 由实验结果可知,采用显影阈值法对微光学浮雕面形进行控制获得了很好的效果,该方法不仅极大的拓展了微透镜矢高和数值孔径的范围,而且弥补了刻蚀过程中浮雕矢高、浮雕面形难于同时控制、工艺条件要求苛刻等缺点。避免了由于显影特性不同对浮雕面形造成的影响。另外,由于该方法不受曝光剂量、工艺条件、以及正性光刻材料种类的限制,所以可获得不同矢高、不同面形的微透镜阵列。

参 考 文 献

- 1 Su Jinqing, Yao Jun, Du Jinlei *et al.*. Coding Gray-Tone mask for fabrication of microoptical elements. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1):97~100 (in Chinese)
- 2 Herzig H P. *Microoptics Element System and Application* (微型光学元件系统及其应用). Zhou Haixian, Wang Yongnian, Chen Yunfang Transl. Beijing: Defense Industry Press, 2002. 110~114 (in Chinese)
- 3 He Miao, Yi Xinjian, Cheng Zuhai *et al.*. Research on fabrication and optical performance testing of silicon microlenses array with large F/number. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(12):1097~1102 (in Chinese)
- 4 Dill F H, Hornberger W P, Hauge P S *et al.*. Characterization of positive photoresist. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1975, **ED-22**(7):445~452
- 5 Zeng Hongjun, Du Chunlei, Wang Yongru. Profile control of continuous relief MOE in photoresist. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(5):691~696 (in Chinese)
- 6 Zeng Hunjun, Chen Bo, Guo Lvrong *et al.*. Edge effect and its application in mask moving technique. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(5):19~22