

凹型 Si 微透镜阵列的制作*

何苗 易新建 程祖海

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 湖北, 武汉, 430074)

刘鲁勤 王英瑞

(中国航天总公司二院 25 所, 北京, 100854)

摘要 提出了一种新的曲率倒易法首次成功地在 Si 衬底上制作出 64×256 凹柱面折射微透镜阵列, 扫描电子显微镜 (SEM) 显示微透镜阵列为表面轮廓清晰的凹柱面阵列, 表面探针测试结果显示凹微透镜阵列表面光滑, 单元重复性好, 其平均凹深为 $2.643\mu\text{m}$, 凹深非均匀性为 8.45% , 平均焦距为 $-47.08\mu\text{m}$.

关键词 Si, 凹微透镜阵列, 氩离子束刻蚀

FABRICATION OF Si CONCAVE MICROLENSES ARRAY*

HE Miao YI Xin-Jian CHENG Zu-Hai

(The State Key Laboratory for Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

LIU Lu-Qin WANG Ying-Rui

(The 25th Institute, The 2nd Academy, The Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100854, China)

Abstract 64×256 elements Si concave microlenses array was fabricated by a new method, i. e. the curvature inversion method. Scanning electron microscope (SEM) shows that microlenses have distinct concave cylinder contour. Surface stylus measurement shows that the concave microlenses array has smooth surface and uniform dimensions. For the concave microlenses array, the average depth of concave spherical surface is $2.643\mu\text{m}$, the nonuniformity of the depth is 8.45% and the average focal length is $-47.08\mu\text{m}$.

Key words Si, concave microlenses array, Ar ion beam etching.

引言

近年来,微小光学器件广泛应用于光通信、自动控制、图像处理、数据储存、光计算及光互联等方面,因此它的制作工艺和方法得到了日益深入的研究^[1-7]。其中凹微透镜阵列除了可用来调整微光学光路的像差和色差,还可以作为制作树脂材料凸微透镜阵列的模具以及 DMA 芯片模板。在各种微制作工艺和方法中,光刻热熔法具有工艺简单、成本低廉、工艺参数易于控制及环境污染小等优点,本文在光刻热熔法的基础上提出了曲率倒易法,首次制作出 64×256 元凹柱面微透镜阵列,鉴于 Si 是工艺最成熟、在 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 大气窗口最普遍使用的红外材料,我们用它来制作微透镜阵列器件。

1 曲率倒易法

图 1 为用曲率倒易法在 Si 基片上制作凹微透镜阵列的工艺流程,可分为两个阶段。

1.1 用常规光刻/氩离子束刻蚀法制作准柱面凸微透镜阵列

在经清洗的 Si 基片上用旋转离心法涂敷光刻胶薄膜,实验中采用国产 BP212 紫外正型光刻胶,烘干后再将光刻胶膜通过铬板在紫外线下接触曝光,掩模版为 64×256 元的二维长方形阵列,结构如图 2 所示,经显影和冲洗后得到光致抗蚀剂长方体阵列,后置于加热炉中在氮气氛下加热至光刻胶的玻璃态转变温度 (180°C 左右),长方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

* 国家自然科学基金(编号 600086003)资助项目
稿件收到日期 2001-04-09,修改稿收到日期 2001-06-21

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 600086003)
Received 2001-04-09, revised 2001-06-21

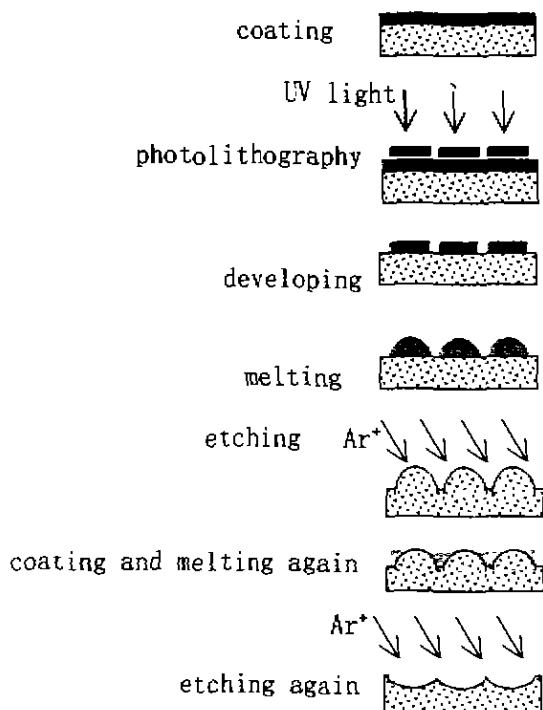


图1 64×256 Si凹折微透镜阵列的制备工艺流程

Fig.1 The schematic diagram for the fabrication of 64×256 Si concave refractive microlens array

转变为准柱面图形(与柱面图形在四角附近有偏差),冷却后通过离子束刻蚀将准柱面光致抗蚀剂图形转移到 Si 衬底上.氩离子束刻蚀在国产的 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^{-4} Pa,工作物质为 Ar,工作气压为 4.0×10^{-2} Pa,氩离子能量为 600eV,氩离子束流为 60mA,氩离子入射角度选为 70° .图 3 为氩离子束刻蚀的刻蚀速率与氩离子束的

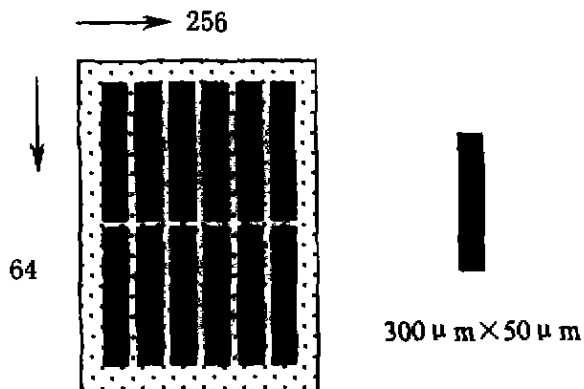


图2 光刻掩膜版结构图(局部)

Fig.2 Structural diagram of photolithography mask pattern (in part)

入射角度的关系,从图中可以看出,在这样的刻蚀条件下,光致抗蚀剂与 Si 衬底材料能具有相同的刻蚀速率.

1.2 用曲率倒易法制作凹微透镜阵列

以上述常规方法制成的微透镜阵列为基底,在其上再涂敷足够厚度的光刻胶,完全淹没凹起的微透镜图形,然后加热固化成形,最后再次进行氩离子束刻蚀,氩离子入射角度选择为 30° ,其余参数保持不变.从图 3 可以看出,在这样的刻蚀条件下,硅的刻蚀速率约为光致抗蚀剂的两倍.这样,原柱面图形交界处的位置因为主要由光致抗蚀剂构成而刻蚀慢,原柱面图形处的位置主要由硅材料构成而刻蚀快,因此原图形凸起处反而成为新图形表面的凹陷处,原图形凹陷处则成为新图形表面的凸起处,于是准柱面图形表面轮廓以曲率倒易的方式转移至 Si 衬底上形成凹柱面图形.

2 测量结果

图 4 为使用日本 JSM 扫描电子显微镜(SEM)拍摄的 64×256 Si 凹微透镜阵列 SEM 照片,显示出微透镜阵列为轮廓清晰的凹柱面阵列.图 5 为用英国 Detak-II 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,曲线显示 Si 微透镜阵列表面光滑,重复性好,且凹微透镜阵列的平均凹深 $h = 2.643 \mu\text{m}$,单元微透镜的口径尺寸为 $300 \mu\text{m} \times 49 \mu\text{m}$.

图 6 显示了第二次刻蚀的前后衬底材料表面轮廓的变化情况,由于第一次刻蚀选择的参数使得光致抗蚀与 Si 衬底材料的刻蚀速率相等,于是准柱面

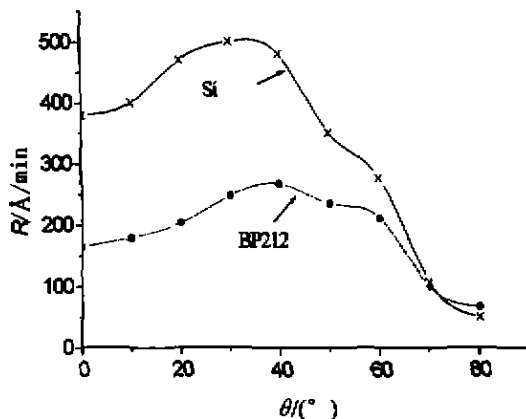


图3 硅衬底和 BP212 光致刻蚀剂氩离子束刻蚀速率

Fig.3 The rate of Ar ion beam milling for Si substrate and BP212 photoresist

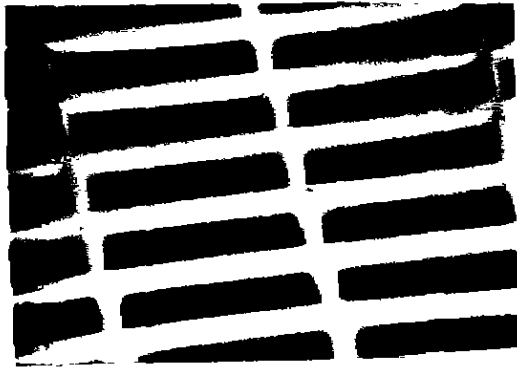


图4 64×256元Si凹柱面微透镜阵列的SEM照片(100×)

Fig. 4 The SEM photograph (100×) of 64×256 Si concave cylinder microlens array

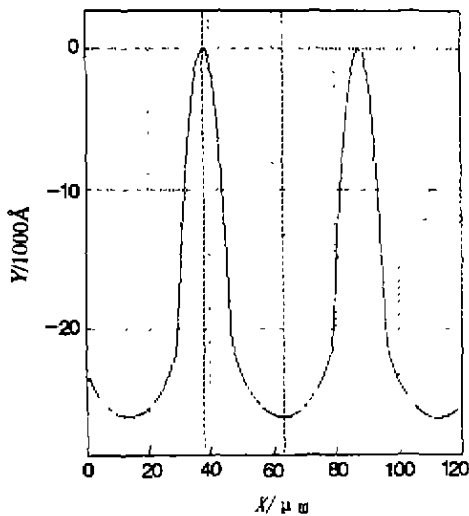


图5 用表面探针测量的64×256元Si凹柱面微透镜表面轮廓(单位为μm)

Fig. 5 The surface profile of 64×256 concave cylinder Si microlens arrays measured by the surface stylus (unit: μm)

的光致抗蚀图形不失真地转移于衬底.式(1)中, (x_0, y_0, z_0) 为第一次刻蚀后凸起的凹柱面上的任意点, (x, y, z) 则是点 (x_0, y_0, z_0) 经第二次刻蚀后的位置, v_1 和 v_2 分别为 Si 衬底材料和光致抗蚀剂的刻蚀速率, R 代表第一次刻蚀完成后凸柱面微透镜的曲率半径.从几何上可推导出

$$\begin{cases} R = \frac{r^2 + H^2}{2H}, \\ \begin{cases} x_0^2 + y_0^2 = R^2, \\ x = x_0, \\ y = (1 - v_1/v_2)y_0 + (R - H)v_1/v_2. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

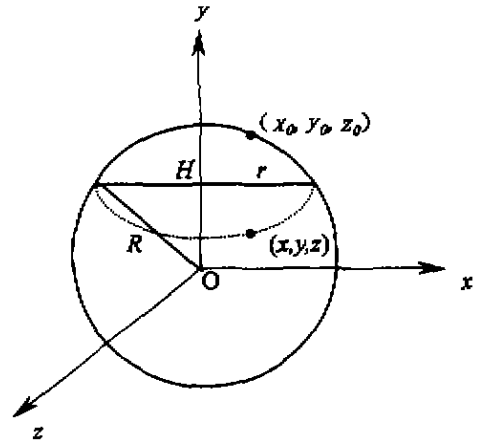


图6 第二次刻蚀前后衬底材料的表面轮廓(截面)

Fig. 6 Surface contour (section) of substrate before and after the second Ar ion beam etching

由式(1)得

$$x^2 + \frac{[y - (R - H)v_1/v_2]^2}{(1 - v_1/v_2)^2} = \left(\frac{r^2 + H^2}{2H}\right)^2 \quad (2)$$

式(2)为一椭圆柱方程,即第二次刻蚀后圆柱面图形变为凹椭圆柱面图形,当 $v_1 = 2v_2$ 时,式(2)可简化为

$$x^2 + [y - (R - H)]^2 = \left(\frac{r^2 + H^2}{2H}\right)^2 \quad (3)$$

式(3)为一半径仍为 R 的圆柱面方程.从图6可看出新图形轮廓为一凹圆柱面,它与凸微透镜阵列关于平面反演对称,凹柱面图形的开口顶面为其反演面,因此凹柱面图形的凹深 h 与微透镜阵列的冠高 H 相等,则凹微透镜阵列的焦距为

$$f = -\frac{R}{n - 1} \quad (4)$$

式(4)中 Si 微透镜材料的折射率 $n = 3.44$ ($3 \sim 5\mu\text{m}$ 大气窗口).用式(4)可计算出凹微透镜阵列的平均曲率半径 R 为 $114.88\mu\text{m}$,凹深非均匀性为 8.45% ,平均焦距为 $-47.08\mu\text{m}$.

3 讨论

我们在凸微透镜阵列器件的背面用曲率倒易法进行套刻蚀制作一个凹微透镜阵列,使其焦距大幅度增加为原焦距的 13.7 倍,为研制长焦距微透镜阵列提供了一个新的途径.

曲率倒易法是制作凹微透镜阵列的有效方法,适用于多种红外材料,通过离子束刻蚀参数的选择,可制作出形状各异、凹深可调的凹微透镜阵列。如果凹微透镜阵列的表面溅射一层折射率与 Si 不同的红外材料,其表面凹槽将被填满而形成一个微小集成光学系统,它具有会聚、色散、色差调整及像差调整等多种功能。凹微透镜阵列除了具有调整色差及像差等功能外,还可作为模具制作树脂材料凸微透镜阵列,并可作为 DNA 芯片模板。

REFERENCES

- [1] Severi M, Motter P. Etching selectivity control during resist pattern transfer to silicon for the fabrication of microlens with reduced spherical aberration. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(1): 146—150
- [2] Stern M B, Jay T R. Dry etching for coherent refractive microlens array and technique for monolithic fabrication. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(11): 3547—3551
- [3] Jay T R, Stern M B, Knowlden R E. Refractive microlens array fabrication parameters and their effect on optical performance. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**: 236—245
- [4] Keyworth B P, Corazza D J, Mcmallyn J N, et al. Single-step fabrication of refractive microlens arrays. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2198—2201
- [5] ZHANG Xin-Yu, YI Xin-Jian, HE Miao, et al. Large-area quartz glass microlens array fabricated by ion beam etching for focal plane detectors. *J. Infrared Millim. Waves* (张新宇, 易新建, 何苗等. 离子束刻蚀制作红外焦平面探测器的面阵石英微透镜. *红外与毫米波学报*), 1999, **18**(2): 97—102
- [6] ZHANG Xin-Yu, YI Xin-Jian, ZHAO Xin-Rong, et al. IR detector array with quartz microlens. *J. Infrared Millim. Waves* (张新宇, 易新建, 赵兴荣, 等. 微透镜阵列用于线列红外探测器的研究. *红外与毫米波学报*), 1998, **17**(2): 147—152
- [7] CHEN Si-Xiang, YI Xin-Jian, ZENG Yan-An, et al. Binary subwavelength relief structures for infrared antireflection. *J. Infrared Millim. Waves* (陈思乡, 易新建, 曾延安, 等. 亚波长浮雕结构的红外抗反射研究. *红外与毫米波学报*), 2000, **19**(6): 471—474