

六角形孔径平面微透镜阵列的制作及成像*

张 玉

(重庆师范大学 物理学与信息技术学院, 重庆 400047)

摘 要 :由于传统的圆形孔径透镜阵列填充系数较小,而在模拟复眼光学系统中需要高填充系数的透镜阵列。为提高填充系数,采用光刻离子交换法制作了六角形孔径的平面微透镜阵列,利用积分形式的光线方程式讨论了平面微透镜的近轴光学特性,研究了微透镜的光线轨迹方程式和一些重要的近轴成像特性,利用 ABCD 定理得到了六角形孔径平面微透镜像距、焦距的数学表达式。制作的平面微透镜阵列光学性能均匀,成像质量较好,离子交换后的变折射率区域有微小重叠,较大地提高了微透镜阵列的填充系数。

关键词 :平面微透镜;六角形孔径;光刻离子交换;轨迹方程式;填充系数。

中图分类号 :O435.1

文献标识码 :A

文章编号 :1672-669X(2008)03-0055-03

随着光信息技术的发展,微型化、阵列化、集成化成为微小光学发展的重要方向和当今高科技发展的前沿课题^[1-2]。变折射率平面微透镜阵列的研制成功,使变折射率透镜从分立元件发展成阵列元件,促进了微光学器件、导波器件、集成光子器件的阵列化、微型化和轻量化。典型的微透镜阵列其孔径通常为圆形,存在的最大问题是填充系数(定义为有效受光面积与总面积之比)小,正方形排列的理论极限值为 78.8%^[3],六角形排列的理论极限值为 90.7%。

在模拟生物复眼光学系统、多孔径光学系统、可变频复印机等透镜阵列中都要求光信息无损耗、无漏失的传输。1997年, G. Lurong 等人^[3]采用单体聚合工艺,制作了高质量的 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)方形透镜阵列;2005年,韩艳玲等人采用离子交换工艺制作了 3×3 方形自聚焦透镜阵列,其填充系数约为 93%^[4],这比理论上的圆形微元方形排列微透镜阵列有所改善。但由于制作工艺要求高,单元透镜均匀性难以精确控制,阵列排列困难,因而目前尚不能满足实际应用的需要。为了更好地解决这一问题,采用光刻离子交换工艺制作了六角形孔径平面微透镜阵列。

1 制作工艺

自聚焦平面微透镜阵列可采用平面光刻工艺和

离子交换工艺等光学微加工工艺制作^[5]。它的工艺流程如图 1 所示。图 2 是光刻离子交换的窗口示意图,窗口成正六角形排列,中心距为 160 μm。为了获得大的折射率差,选用了一种碱金属含量较高的特种光学玻璃(富含 K⁺),熔盐选取的是富含 Ti⁴⁺ 的混合硫酸盐。离子交换后,形成表面折射率高,向内逐渐减小的近似半球形折射率分布。

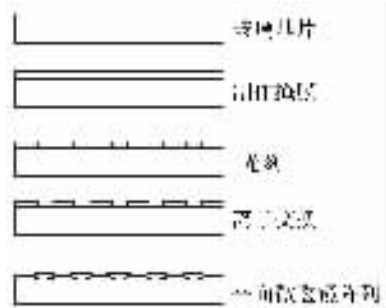


图 1 光刻离子交换流程图

采用离子交换工艺制作的平面微透镜的折射率剖面干涉照片见图 3(a),折射率分布曲线见图 3(b)。图 4 是经过离子交换得到的纵截面照片,从图中可以看出,六角形孔径微透镜阵列变折射率区域出现重叠,基本上不存在孔隙。由于较好地消除了存在于圆形孔径平面微透镜中的空隙,从而使填充系数得到了较大提高。图 5 是六角形孔径平面微透镜阵列成像图。

* 收稿日期 2008-04-15 修回日期 2008-05-15

基金项目:重庆师范大学基金(No.07XS01),重庆市高校光学工程重点实验室开放课题基金(No.0704)

作者简介:张玉(1975-),女,助理实验师,硕士,研究方向为微小光学与变折射率光学。

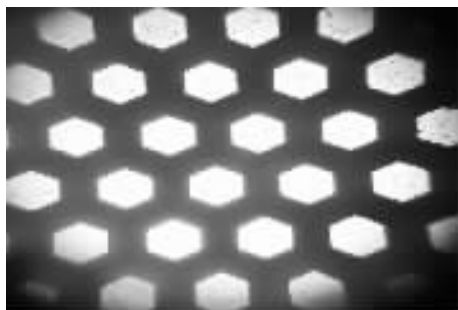


图2 六角形离子交换窗口

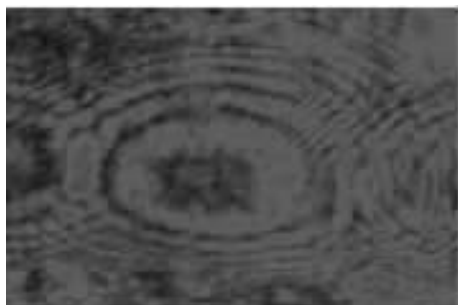


图3(a) 平面微透镜薄片干涉图样

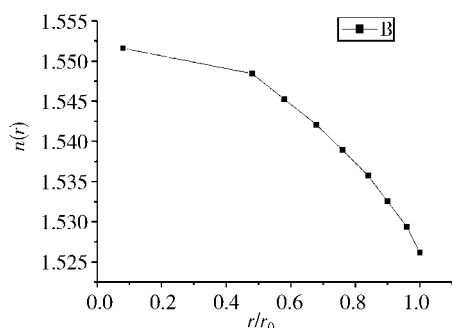


图3(b) 六角形孔径平面微透镜折射率分布图

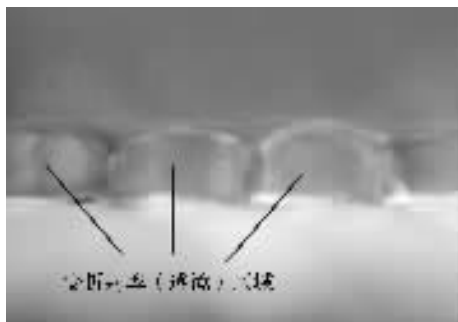


图4 微透镜元照片(侧面)

2 近轴光学特性

从图4可知,制作的平面微透镜具有掩埋式、变折射率的特点,这些均匀分布的突起区域构成了变折射率平面微透镜阵列。由于透镜直径小(边长0.15 mm),离子交换后形成一个近似于鲁尼伯格^[6]的旋转对称性分布,折射率剖面区域外形接近于半

球形^[6]。在旋转对称模型下,折射率分布满足^[7]

$$n^2(r, z) = n^2(0, \rho) [1 - (\sqrt{A}r)^2 - v_{20}(\sqrt{A}z)^2]$$

通过求解积分形式的光线方程^[8]

$$\int_{r_0}^r = \frac{dr}{\sqrt{R(r) - c_z^2 R(r_0) + Z(0)(1 - c_z^2)}} = \pm \int_0^z = \frac{dz}{\sqrt{Z(z) + c_z^2 R(r_0) + Z(0)(c_z^2 - 1)}} \quad (1)$$

来研究光线在平面微透镜中的传输特性。式中 c_z 为坐标系 z 方向的方向余弦,右端“+”号对应 $\frac{dr}{dz} > 0$, “-”号对应 $\frac{dr}{dz} < 0$, $\frac{dr}{dz}$ 是光线对光轴的斜率。

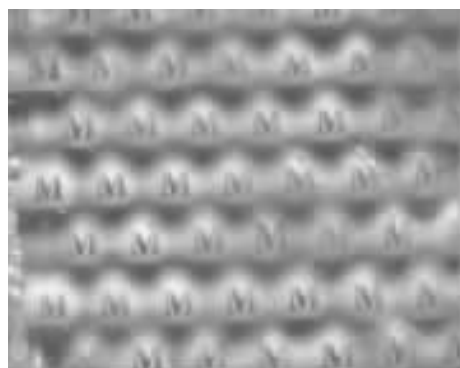


图5 六角形孔径平面微透镜阵列成像图

平面微透镜的折射率可用(2)式来表示,于是将光线方程简化为

$$\int_{r_0}^r = \frac{dr}{\sqrt{R(r) - c_z^2 R(r_0)}} = \pm \int_0^z = \frac{dz}{\sqrt{Z(z) + c_z^2 R(r_0)}} \quad (2)$$

经过复杂的计算,可得出其光线轨迹方程如下

$$r = r_0 \cos F(z) + \frac{p_x(0)}{\sqrt{A}n(0)} \sin F(z)$$

$$p = -n(0)r_0 \sqrt{A} \sin F(z) + p_x(0) \cos F(z)$$

其中,第一方向余弦

$$p_x(0) = n(r_0)c_r$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{|v_{20}|}} \arcsin \frac{n(0) \sqrt{|v_{20}|} \sqrt{Az}}{p_x(0)}$$

$$p_z(0) = n(r_0, z)c_z$$

3 近轴成像特性

采用光束复参量方法^[9-10]来讨论平面微透镜的近轴成像特性。如图6所示,平面微透镜成像过程可以分解为5个不同的变换:1)光束在长为 l_1 的空气中传播,光线矩阵为 M_{12} ;2)光束在平面微透镜前表面上的折射,其光线矩阵为 M_{23} ;3)光线在平面

微透镜中的传播,其光线矩阵为 M_{34} ; 4) 光线在平面微透镜后端面上的传输,其光线矩阵为 M_{45} ; 5) 光线在长为 l_2 、折射率为 n_2 的基片(认为基片足够厚)中的传播,其光线矩阵为 M_{56} 。于是,光束经平面微透镜成像过程的 $ABCD$ 光线矩阵可以写成

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = M_{56}M_{45}M_{34}M_{23}M_{12}$$

其中

$$M_{12} = \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_0}{n(z)} \end{bmatrix}$$

$$M_{45} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n(z)}{n_2} \end{bmatrix}, M_{56} = \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_{34} = \begin{bmatrix} \cos F(z) & \frac{1}{n(z)\sqrt{A}}\sin F(z) \\ -n(z)\sqrt{A}\sin F(z) & \cos F(z) \end{bmatrix}$$

这里 $F(z) = \frac{1}{\sqrt{|v_{20}|}} \arcsin \frac{n(z)\sqrt{|v_{20}|}\sqrt{Az}}{p_z(0)}$ 。引入

近轴近似 $n(r) \approx n(0)$, 经过计算可知

$$A = \cos F(z) - l_2 \frac{n_2(z)\sqrt{A}}{n_0} \sin F(z)$$

$$B = l_1 \cos F(z) + \frac{n_2}{\sqrt{A}n^2(0)} \sin F(z) +$$

$$l_2 \left[\frac{n_2 \cos F(z)}{n_0} - \frac{n^2(0)\sqrt{A}l_1}{n_0} \sin F(z) \right]$$

$$C = - \frac{n^2(0)\sqrt{A}}{n_0} \sin F(z)$$

$$D = \frac{n_2}{n_0} \cos F(z) - l_1 \frac{n^2(0)\sqrt{A}}{n_0} \sin F(z)$$

这样,可以得到平面微透镜的近轴光学特性。

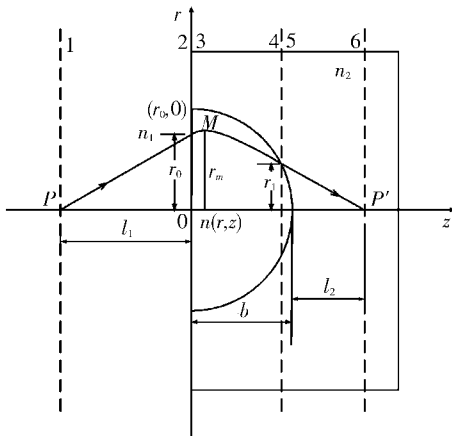


图 6 光线斜入射情况下平面微透镜的近轴成像

3.1 像距

由于成像的必要条件是从物点出发的不同斜率的光线都能会聚到一点,即 $B = 0$ 。从方程(2)可得

$$l_2 = \frac{l_1 \cos F(z) + \frac{n^2}{n^2(0)\sqrt{A}} \sin F(z)}{l_1 \frac{n^2(0)\sqrt{A}}{n_0} \sin F(z) - \frac{n_2}{n_0} \cos F(z)} = \frac{l_1 n^2(0)\sqrt{A} \cos F(z) + n_2 \sin F(z)}{n^2(0)\sqrt{A} \left[l_1 \frac{n^2(0)\sqrt{A}}{n_0} \sin F(z) - \frac{n_2}{n_0} \cos F(z) \right]}$$

3.2 焦距

把平面微透镜近似认为是一个焦距为 f 的薄透镜,则有后焦距

$$f_1 = - \frac{1}{C} = \frac{n_0}{n^2(0)\sqrt{A} \sin F(z)}$$

前焦距

$$f_2 = \frac{1}{C} - \frac{n_0}{n^2(0)\sqrt{A} \sin F(z)}$$

4 结论

采用光刻离子交换工艺制作了六角形孔径平面微透镜阵列,对制作的六角形孔径平面微透镜的近轴光学特性和成像特性进行了研究。结果表明,六角形孔径的平面微透镜元之间有微小重叠,能较好地改善透镜元间的空隙对光信息的漏失,进而减小光信息传输的失真。相对于圆形孔径阵列而言,能有效增大填充系数,提高受光面积。该透镜阵列的研制成功为制作高填充系数的透镜阵列提供有益的参考。

参考文献：

[1] HAMANAKA K, NEMOTO H. Design of a Wave Multiplexer-demultiplexer by the Use of Planar Microlenses[J]. Appl Opt, 1994, 33(16): 3415-3419.

[2] 熊玲玲, 罗亚梅, 梁一平. 双曲柱面-平面透镜准直的误差分析[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2006, 23(4): 58-60.

[3] 韩艳玲, 刘德森, 李景艳, 等. 方形自聚焦透镜的研制[J]. 光子学报, 2006, 28(9): 185-187.

[4] 韩艳玲, 刘德森, 蒋小平. 方形自聚焦透镜元阵列及其成像[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 221-223.

[5] 刘德森, 胡建明, 刘晓东. 掩埋式变折射率玻璃光波导的横向光学特性[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2003, 32(4): 88-90.

- [6] 刘德森 ,高应俊 ,覃亚丽 ,等. 大数值孔径自聚焦平面微透镜阵列研究[J]. 高速摄影与光子学 ,1991 ,19(3) : 209-215.
- [7] 梅锁海 ,刘德森. 自聚焦平面微透镜阵列的成像矩阵[J]. 高速摄影与光子学 ,1991 ,20(3) 233-241.
- [8] 刘德森 ,胡建明 ,刘晓东 ,等. 平面交叉玻璃波导型微透镜阵列光学性能研究[J]. 光子学报 ,2003 ,32(7) : 782-785.
- [9] 刘德森. 变折射率介质理论及其技术实践[M]. 重庆 : 西南师范大学出版社 ,2005.
- [10] 彭仁明 ,贺春林 ,朱福成. 基于平行光束的后向散射光电感烟探测器的研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版) ,2006 ,27(4) : 373-376.

The Manufacture of Hexagon Aperture Plane Micro-lens Array and Its Image

ZHANG Yu

(College of Physics and Information Technology , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China)

Abstract : At present the cell array lens is usually cylinder or hemispheroid whose fill-factor (the ratio of light area and total area) can achieve about 90.7 % , so we need higher fill-factor arrays sometimes such as in the compound eye simulation optical system. In order to enhance the fill-factor , we apply the method of the photo etching ionic exchange to manufacture hexagon aperture planar microlens array with the center distance as $160\mu\text{m}$. We present a real photograph and an imaging photograph of the array and we apply Jamin Interference method to manufacture hexagon aperture planar micor-lens array's interference slice and draw the refractive index distribution curve. In the use of ray equations in integral form , paraxial optical properties of microlens arrays are studied here. The ray trajectory equation and imaging of microlens arrays are presented. Mathematics expressions of images distance , focal length by ABCD law are obtained. This array is arranged in order with a uniform optical feature , after the exchange of ions. It has a high fill-factor and a good quality of image along with slight overlaps in the area of Gradient-Index.

Key words : planar microlens array ; hexagon aperture ; photolithographic-ion exchanging ; ray trajectory equation ; fill-factor

(责任编辑 欧红叶)