

文章编号: 1002-2082(2008)04-0518-04

方形自聚焦透镜 5×5 阵列的成像特性

王 风¹, 刘德森², 蒋小平², 周素梅²

(1. 重庆师范大学 初等教育学院, 重庆 400700; 2. 西南大学 物理学院, 重庆 400715)

摘 要: 采用离子交换工艺和精密加工技术制作了方形自聚焦透镜 5×5 阵列, 并对其成像特性进行研究。结果表明: 方形自聚焦透镜阵列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, 其多重像和综合像的像质均匀, 成像质量好。分析了导致多重像偏离和综合像变形的原因, 并给出解决这一问题的关键技术。

关键词: 方形自聚焦透镜阵列; 成像特性; 多重像; 综合像

中图分类号: TN252

文献标志码: A

Imaging properties of 5×5 array composed of square GRIN lens

WANG Feng¹, LIU De-sen², JIANG Xiao-ping², ZHOU Su-mei²

(1. College of Primary Education, Chongqing Normal University, Chongqing 400700, China;

2. School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The 5×5 square GRIN lens array was manufactured with the ion-exchanging technique and precision processing technology. The imaging properties of the array were studied. The results show that, compared with circular aperture GRIN lens array, the square aperture GRIN lens array can effectively increase the filling coefficient and active optical area, and its multiple image and synthetic image have better imaging quality. The reasons of the multiple image's deflection and synthetic image's deformation are analyzed. The solution for the problem is presented.

Key words: square GRIN lens array; imaging property; replicated image; synthetic image

引言

光学元件的微型化、轻量化、集成化是科技进步和社会发展的必然要求, 也是光学元件本身发展的方向^[1-2]。微透镜阵列是一种二维集成器件, 它体现了集成光学、微小光学和变折射率光学等多学科交叉性的特点^[3-4]。微透镜阵列除了具有普通透镜的准直、聚焦、成像等功能外, 还具有结构简单、共轭成像距离短、成像质量好、动态分辨率高、体积小、质量轻等优点, 因而在传真机、复印机、电子白板、图文扫描系统等设备中具有重要的应用^[5]。目前, 构成阵列的透镜元的端面多为圆形或半球形,

其典型排列方式^[6-7]主要有方形排列和六角形紧密排列, 如图 1 所示。

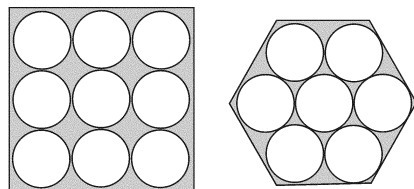


图 1 方形排列和六角形排列示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of square and hexagonal arrangements

由于受到阵列透镜元间空隙的限制, 这 2 种排

收稿日期: 2007-07-11; 修回日期: 2007-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(60578005); 重庆市自然科学基金(99922-413005)

作者简介: 王风(1973—), 男, 重庆人, 硕士, 讲师, 主要从事物理教学及微小光学、变折射率光学的研究。

E-mail: wfcq@sohu.com

列方式的填充系数(有效受光面积与总面积之比)均不理想。前者的理论极限值为78.8%,后者为90.7%。由此可见,无论采用哪种排列方式,圆形孔径的微透镜阵列在增大填充系数,减少光信息泄漏方面始终存在着无法解决的问题。为此,刘德森等人首次通过微加工技术和离子交换工艺成功研制了方形孔径的自聚焦透镜阵列,由于它较好地消除了透镜元间的三角孔空隙,因而其填充系数可达93%以上^[8],极大地提高了阵列的受光面积。图2为方形孔径自聚焦透镜阵列的排列示意图。

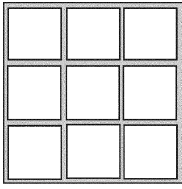


图2 方形自聚焦透镜阵列示意图

Fig.2 Schematic diagram of square GRIN lens array

1 方形自聚焦透镜阵列的成像

方形自聚焦透镜阵列的成像^[9-10]有2种:多重像和综合像。由于方形自聚焦透镜阵列各透镜元的光轴相互平行,因此,要满足透镜阵列成像,必须要求每一个透镜元的性能相同,有一样的传输矩阵,对于同一物面,所有透镜元都有相同的像距,其像面是共面的。一般说来,对于物面上的一个物分布,经过由 N 个透镜元组成的透镜阵列后,可以得到 N 个分立的像,这就是多重像。但是,要得到综合像,各透镜元还必须满足一定的条件。自聚焦透镜成像的光线传输矩阵为

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = M_{56}M_{45}M_{34}M_{23}M_{12} \quad (1)$$

式中 M_{56} , M_{45} , M_{34} , M_{23} , M_{12} 分别为以下5个变换过程的光线矩阵:光线在出射端面到像面间的传播;光线在自聚焦透镜后表面上的折射;光线在透镜中的传播;光线在自聚焦透镜前表面上的折射;光线在物面到入射端面间传播。

将5个变换过程的光线矩阵代入(1)式,并采用近轴近似,有

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n(0)}{n_0} \end{vmatrix} \times$$

$$\begin{vmatrix} \cos(\sqrt{A}z) & \frac{1}{\sqrt{A}}\sin(\sqrt{A}z) \\ -\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}z) & \cos(\sqrt{A}z) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_0}{n(0)} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

式中: l_2 为出射端面到像面间的距离; l_1 为物面到入射端面间的距离; \sqrt{A} 为聚焦常数; z 为自聚焦透镜的长度;空气中的折射率 $n_0 \approx 1$ 。解(2)式可得:

$$A = \cos(\sqrt{A}z) - n(0)\sqrt{A}l_2\sin(\sqrt{A}z) \quad (3)$$

$$B = l_1\cos(\sqrt{A}z) - n(0)\sqrt{A}l_1l_2\sin(\sqrt{A}z) + l_2\cos(\sqrt{A}z) + \frac{1}{n(0)\sqrt{A}}\sin(\sqrt{A}z) \quad (4)$$

$$C = -n(0)\sqrt{A}\sin(\sqrt{A}z) \quad (5)$$

$$D = \cos(\sqrt{A}z) - n(0)\sqrt{A}l_1\sin(\sqrt{A}z) \quad (6)$$

于是,得到光线轨迹方程为

$$\begin{vmatrix} r_2 \\ p_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} r_1 \\ p_1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

成像的必要条件是从物点发出的不同斜率的所有光线均能会聚于同一点(像点),即到达像点的所有光线与入射光的斜率无关,因此有

$$B = 0 \quad (8)$$

联立求解(3)式、(4)式、(7)式和(8)式,可得:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{1}{\cos(\sqrt{A}z) - n(0)\sqrt{A}l_1\sin(\sqrt{A}z)} \quad (9)$$

此式为自聚焦透镜的横向放大率,用 m 表示。为使透镜阵列得到综合像,要求组成阵列的单个透镜元所成之像均为放大倍率为1的正立实像,即 $m=1$,代入(9)式,得

$$l_1 = \frac{1}{n(0)\sqrt{A}}\tan\left(\frac{1}{2}\sqrt{A}z\right) \quad (10)$$

为使成像有意义,满足实际需要,又要求物平面和像平面位于透镜端面之外,即 $\tan\left(\frac{1}{2}\sqrt{A}z\right) < 0$,有

$$\frac{\pi}{\sqrt{A}} < z < \frac{2\pi}{\sqrt{A}} \quad \text{即} \quad \frac{P}{2} < z < P \quad (11)$$

式中 P 为单个自聚焦透镜的周期长度。阵列成综合像时,阵列的物距和像距相等,即 $l_1=l_2$,则共轭距可表示为

$$TC = z + 2l_1 = z + \frac{2}{n(0)\sqrt{A}}\tan\left(\frac{1}{2}\sqrt{A}z\right) \quad (12)$$

在满足(11)式的情况下,可通过改变透镜长度 z 来获得不同的共轭距,以满足实际工作的需要。

2 方形自聚焦透镜5×5阵列的研制

制作自聚焦透镜阵列的方法很多^[11],本文采用离子交换和微加工技术来制作方形自聚焦透镜。

2.1 圆柱形玻璃丝的离子交换

以折射率较高的Tl玻璃丝作为基础玻璃,放在KNO₃熔盐中进行离子交换。由于Tl⁺和K⁺的电极化率相差较大,因而能获得较大的折射率差。在熔盐温度为525℃~535℃的范围内交换大约110h~130h。

2.2 方形玻璃丝的加工

由于要将圆柱形玻璃丝加工成方形玻璃丝,需要磨去圆柱形的4个弧边,因此,首先必须计算出要磨去弧的高度,再将玻璃丝截成长度接近1个周期的小段,然后将待磨的各小段玻璃丝并排粘附于平整玻璃底板上,两端用磨好的玻璃夹板将其固定,夹板厚度与玻璃丝差不多或略小于玻璃丝直径,如图3所示。

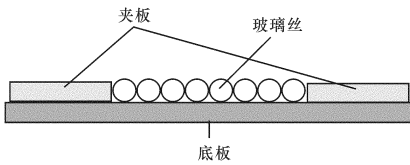


图3 方形玻璃丝的加工

Fig. 3 Processing of square fiber glass

磨去1个弧边后,再重复上述操作,直至将圆柱形玻璃丝磨成方形为止。整个加工过程虽然简单,但具体操作务必严谨精细,如此制成方形玻璃丝40根左右。

2.3 方形自聚焦透镜5×5阵列的制作

选择磨得较好的方形玻璃丝25根,参照2.2节的方法规则排列成5×5方形阵列,再通过粗磨、细磨、研磨及抛光处理,即制得方形自聚焦透镜阵列,样品长度控制在 $\frac{1}{2}P \sim \frac{3}{4}P$ 之间为宜。本实验所制得的方形自聚焦透镜阵列样品如图4所示。

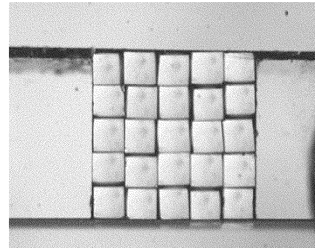


图4 方形自聚焦透镜阵列样品

Fig. 4 Sample of square GRIN lens array

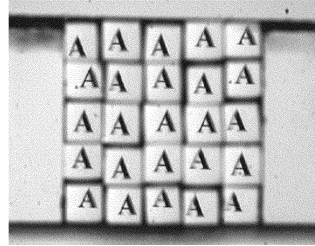


图5 多重像

Fig. 5 Multiple image

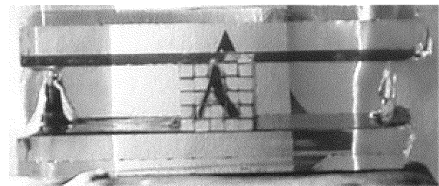


图6 综合像

Fig. 6 Synthetic image

从以上实验结果可以看出与理论分析是一致的。从成像照片看,无论是多重像还是综合像,成像质量都比较理想。特别是透镜阵列产生的综合像,克服了传统透镜因成像分辨率中心高、边缘低而带来的像质不均的问题。

但是,我们也注意到,实验得到的多重像中,各分立像对于对应透镜元的相对位置并不一样。这是由于在将交换好的圆柱形玻璃丝加工成方形时,磨去的4个弧高并不严格得完全相等,因而制成的方形自聚焦透镜样品的最大折射率可能并不位于透镜的中心轴上。若每一个透镜元的最大折射率偏离中心轴的方位和程度不同,则将导致实物经过各透镜元后在不同方向和不同偏离程度形成分立像。这一现象同样影响到方形自聚焦透镜阵列的综合成像,即使综合像产生不同程度的变形,这一点非常明显地体现在图6所示的综合成像照片中。解决这一问题的关键在于:精确控制加工过程,使磨去的4

3 结果与讨论

利用本实验研制而成的方形自聚焦透镜5×5阵列样品得到的多重像和综合像如图5和图6所示。

个弧高严格相等。

4 结论

采用离子交换和微加工技术制作了方形自聚焦透镜 5×5 阵列,并对其成像特性进行了研究。结果表明:方形孔径的自聚焦透镜阵列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,其多重像和综合像的像质均匀,成像质量好。但由于透镜元的最大折射率偏心会导致多重像的偏离和综合像的变形,因此可通过提高打磨精度来解决这一问题。

参考文献:

- [1] SANKUR H O, MOTAMEDI M E. Micro-optics development in the past decade[J]. SPIE, 2000, 4179: 30-55.
- [2] VELDKAMP W B. Overview of microoptics: past, present and future [J]. SPIE, 1991, 1554: 2187-2191.
- [3] 刘德森. 微小光学研究现状[J]. 物理, 1994, 23(6): 321-328.
LIU De-sen. Research status of micro-optics [J]. Physics, 1994, 23(6): 321-328. (in Chinese)
- [4] 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.
LIU De-sen, HU Jian-ming, LIU Xiao-dong, et al. Studies on the optical properties of microlens array for planar intersect glasses waveguide [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(7): 782-785. (in Chinese)
- [5] 龚智炳. 自聚焦透镜阵列及其应用[J]. 应用光学, 2000, 21(1): 28-31.
GONG Zhi-bing. Selffocusing lens array and its application [J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(1): 28-31. (in Chinese)
- [6] BAEHR J, BRENNER K H. Realization of refractive continuous-phase elements with high design freedom by mask-structured ion exchange [J]. SPIE, 2001, 4437: 50-60.
- [7] 王耀祥, 田维坚, 章兴龙, 等. 纤维光锥有效透射率的理论分析[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 221-223.
WANG Yao-xiang, TIAN Wei-jian, ZHANG Xing-long, et al. Theoretical analysis of the effective transmission about fiber taper [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 221-223. (in Chinese)
- [8] 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, 2005, 34(4): 529-533.
HAN Yan-ling, LIU De-sen, JIANG Xiao-ping. Square self-focusing lens array and its image [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(4): 529-533. (in Chinese)
- [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.
LIU De-sen. Fundamentals and technical practices of gradient-index medium [M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 刘德森, 胡建明, 刘炜, 等. 平面交叉型微透镜阵列的制作及成像特性研究[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 743-748.
LIU De-sen, HU Jian-ming, LIU Wei, et al. Studies on the optical properties of planar intersect microlens arrays [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6): 743-748. (in Chinese)
- [11] 高应俊, 刘德森, 阎国安, 等. 高质量光刻胶微小透镜阵列的制作[J]. 光子学报, 1996, 25(10): 909-913.
GAO Ying-jun, LIU De-sen, YAN Guo-an, et al. Fabrication of high quality photoresist microlens array [J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(10): 909-913. (in Chinese)