

方形自聚焦透镜的研制

韩艳玲 刘德森 李景艳 蒋小平

(西南师范大学物理学院, 重庆 400715)

摘 要 经过方形玻璃丝的加工、离子交换及成品的精密加工等过程, 成功制出了方形自聚焦透镜. 并采用聚焦成像和雅明干涉等方法对其光学特性进行测试, 得出了方形自聚焦透镜本身所具有的一些特性: 中心部分畸变较小, 成像性能好; 四个棱角内的球差较大, 像质较差; 折射率分布不具有旋转对称性, 而是与方向和半径有关.

关键词 自聚焦透镜; 方形自聚焦透镜; 方形玻璃丝; 聚焦法测试

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

0 引言

随着科技的发展, 光学元件的微型化势必使分立元件向阵列元件发展. 为发挥光子作为信息载体所具有的高速度、并行性、大容量和巨大的互联能力, 就要发展密集、规则排列、光性均匀的微透镜阵列. 因此, 微型化、阵列化、集成化就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^[1~4]. 目前制作的阵列其透镜元多是圆柱形或半球形, 具有径向对称或旋转对称的折射率剖面, 因而像差较小, 在图像传输中有广泛应用. 圆柱形或者半圆球形透镜构成微透镜阵列的典型排列方式有两种: 一是采用正方形排列^[5]. 采用这种排列方式制作的微透镜阵列, 像差较小, 但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, 理论极限值为 78.8%, 有 21% 的光信息不能到达接收器, 而是被透镜元间的空隙损耗掉, 从而使传像分辨率下降, 传输的光信息失真. 二是采用六角紧密排列. 采用这种排列方式制作的微透镜阵列, 填充系数有所提高, 理论极限值为 90.7%, 光信息传输损失有所减少, 对传输图像和信息的失真情况有一定改善, 但仍存在 9.3% 的光信息损耗. 总之, 这两种排列方式, 虽制作工艺简单, 像差较低, 但均不能很好消除透镜元间的空隙对光信息的损耗, 从而不可能从根本上解决提高受光面积、减少光信息损失问题. 为了进一步提高透镜阵列的受光面积, 本文首先研制方形自聚焦透镜, 并对它的光学特性进行了研究, 为进一步研制方形微透镜阵列奠定了基础.

1 方形自聚焦透镜的研制

方形自聚焦透镜的研制大致经过三个步骤: 方形玻璃丝的加工、离子交换、透镜样品的加工. 方形

玻璃丝的加工是以圆柱形玻璃丝为材料的, 其理论设计如图 1, 其中 D 为圆柱形玻璃丝截面圆的直径, L 为要加工的方形玻璃丝的边长, h 为要磨去的四个弧高.

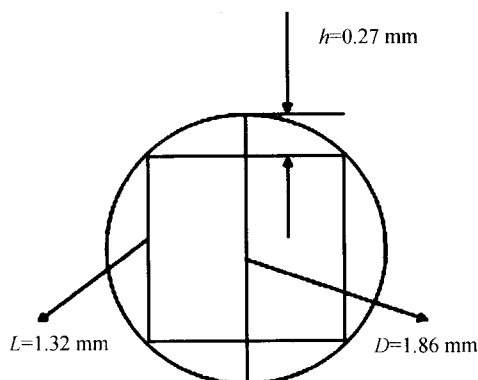


图 1 制作方形玻璃丝的理论设计
Fig. 1 Theory design of making square glass

根据上述计算结果, 进行如下加工流程,

玻璃棒切取 → 粘合 → 细磨 → 研磨 → 抛光

就可以得到表面光洁度很好的方形玻璃丝. 为了得到方形自聚焦透镜, 这里采用热离子交换工艺将均匀折射率的光介质变成非均匀折射率介质. 影响介质非均匀折射率分布的主要因素是: 交换离子对, 交换温度和交换时间. 离子对的选择是制作变折射率透镜材料的关键步骤, 为了得到尽可能大的折射率差, 通常选择电极化率相差较大的离子对, 以获得大的折射率差. 另外考虑到离子交换迁移时要克服离子间束缚能, 因为一价离子的键能一般比二价离子的键能小, 所以通常采用一价离子. 由于自聚焦透镜通常由含铈的玻璃制造, 因而本文在实验时选择的交换离子对为 Tl^+ 和 K^+ , 交换熔盐是硝酸钾. 由于交换温度应略低于玻璃的软化温度, 制作方形透镜时的离子交换温度控制在 $520 \sim 540^\circ C$, 交换时间为 $100 \sim 110h$. 制成的方形透镜及其成像如图 2 和图 3.

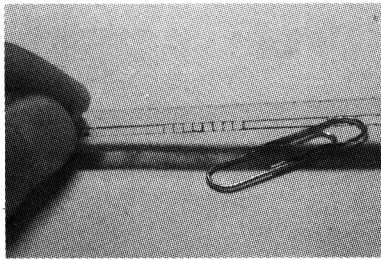


图 2 方形自聚焦透镜外形
Fig. 2 The appearance picture of Square GRIN lens



图 3 成像照片
Fig. 3 Image formation photograph

2 方形自聚焦透镜的光学特性研究

2.1 聚焦常量

聚焦常量就是方形透镜的折射率分布特性常量 \sqrt{A} , 与周期长度 p 的关系为

$$P = \frac{2\pi}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

只要测量出方形自聚焦透镜的周期 P , 通过式(1)就可以得到方形自聚焦透镜的聚焦常量 \sqrt{A} .

本文采用聚焦法测量^[6]出 5 个样品的周期 P 数值, 同时算出了聚焦常量. 表 1 给出了具体数值.

表 1 方形自聚焦透镜周期 P 的测量值和相应的 \sqrt{A} 值

序号	周期 P/mm	\sqrt{A}/mm^{-1}
1	16.908	0.391
2	16.852	0.373
3	16.612	0.375
4	16.968	0.370
5	16.900	0.372
平均值	16.738	0.376

2.2 数值孔径

数值孔径是描述方形自聚焦透镜聚光本领的物理量, 是方形自聚焦透镜的一个重要参量. 其大小等于方形自聚焦透镜端面所处的媒质折射率 n_1 和最大接受角正弦 $\sin \theta_{\max}$ 的乘积, 即

$$NA = n_1 \sin \theta_{\max} \quad (2)$$

如图 4, 方形透镜前放置一刻度的观察物, 测量出方形透镜的前表面到观察物的距离 D , 在显微镜

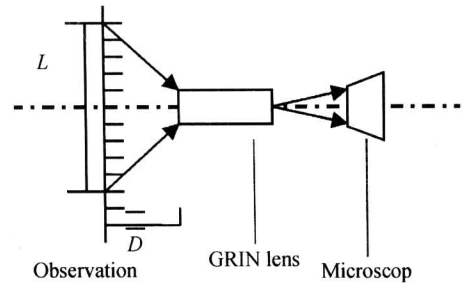


图 4 数值孔径测试原理图

Fig. 4 The schematic diagram of numerical aperture test 下观察所能看到的观察物的最大刻度范围 L . 根据式(2)可得到

$$NA = \frac{n_1 L}{[2\sqrt{(L/2)^2 + D^2}]} \quad (3)$$

由于本实验是在空气中进行的, 则 $n_1 = 1$, 从而式(3)可以变为

$$NA = \frac{L}{[2\sqrt{(L/2)^2 + D^2}]} \quad (4)$$

分别对 5 个样品的 NA 进行测试, 结果见表 2.

表 2 5 个样品的 NA 测量值(单位: cm)

组数	L	D	NA
1	15.70	17.50	0.409
2	13.17	14.38	0.416
3	13.03	14.30	0.414
4	10.55	12.13	0.398
5	8.09	9.28	0.400
平均值			0.407

2.3 畸变

像差是衡量自聚焦透镜质量的一个重要指标, 对畸变特性进行测试^[7].

在透镜前置一有等间距的方格图的观察物, 用显微镜观察方格经自聚焦透镜所成的像. 通过显微镜的刻度测量中心方格的宽度 d_0 和边缘方格宽度 d , 则畸变量 M 为

$$M = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\% \quad (5)$$

当 $M > 0$ 时, 为枕形畸变; 当 $M < 0$ 时, 为桶形畸变. 测量的数据结果见表 3.

表 3 对 5 个自聚焦透镜样品的畸变测量数据

序号	d_0/mm	d/mm	M
1		0.182	9.0%
2		0.189	13.2%
3	0.167	0.190	13.8%
4		0.186	11.4%
5		0.182	9.0%
平均值	0.167	0.186	11.28%

由于 $M = 11.28\%$, 即 $M > 0$, 为枕形畸变. 畸变图见图 5.

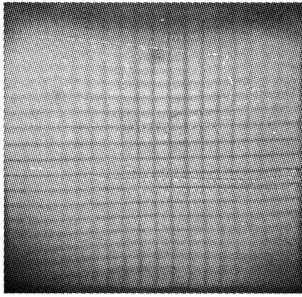


图 5 方形自聚焦透镜畸变图
Fig. 5 Square GRIN lens distortion picture

2.4 方形自聚焦透镜的折射率分布

以前研究的微透镜阵列是由圆柱形透镜元组成的, 折射率分布是一维的情况, 关于径向对称. 其折射率分布满足

$$n(r) = n_0 - (k - k_0)\lambda / T_0 \tag{5}$$

式中 k 为干涉图中对应 r 处的干涉级次, k_0 为 $r=0$ 对应的级次, λ 为光波长, T_0 为干涉片的厚度.

但是, 本文所研究的方形自聚焦透镜的折射率已非旋转对称, 只是与方向和半径有关. 其干涉环照片如图 6.

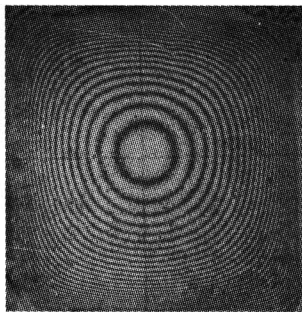


图 6 方形自聚焦透镜的干涉环照片
Fig. 6 Square GRIN lens interference link photograph

从图 6 可以看出, 方形自聚焦透镜的折射率在

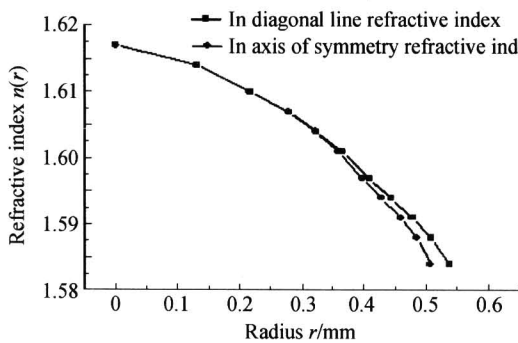


图 7 单一方向上的折射率分布曲线
Fig. 7 In sole direction refractive index distribution curve

对称轴和对角线所夹的 45° 角内是周期变化的, 在很小的角度内, 也近似为径向对称, 即折射率分布满足式(5). 图 7 给出了对角线与对称轴(水平向)上的折射率分布曲线.

3 结论

通过对方形玻璃丝采用离子交换工艺, 成功地研制出了方形自聚焦透镜. 通过对方形自聚焦透镜光学特性的测量, 得到了它的一些重要特性: 在方形自聚焦透镜中心部分, 畸变较小, 成像性能好, 但在四个棱角内的球差较大, 像质较差; 折射率分布不具有径向对称, 而是与方向和半径有关. 这些结果为进一步研制方形自聚焦透镜元阵列奠定了基础.

参考文献

- 1 Hamanaka K, Nemoto H. Design of a wav multiplexer-demultiplexere by the use of planar micro lenses. *Appl Opt*, 1994, **33**(16): 3415~3419
- 2 Hashizume H, Hamanaka K, Graham A C, et al. The future of gradient index optics. *Proc SPIE*, 2001, **4437**: 26~39
- 3 Raguin D H, Chakmakjian S, Farniga N, et al. Collimator arrays for telecommunication length applications. *Proc of SPIE*, **4437**: 116~124
- 4 刘德森. 光电子器件新技术讨论. 到 2020 年中国通信科技发展方向及相关政策研讨会讨论集, 2003. 116~123
Liu D S. Photoelectron component new technology discussion, To 2020 Chinese correspondence science and technology development direction and correlation policy seminar symposium, 2003. 116~123
- 5 Bar J, Brenner K H. Realization of refractive continuous phase elements with high design freedom mask structured ion exchange. *Proc of SPIE*, 2001, **4437**: 50~59
- 6 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. *中国激光*, 2005, **32**(6): 743~748
Liu D S, Hu J M, Liu W, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(6): 743~748
- 7 马韬, 沈亦兵. 大视场投影光刻物镜的畸变特性检测. *光子学报*, 2005, **34**(1): 46~49
Ma T, Shen Y B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 46~49

Research on Manufacture of Square Gradient-index Lens

Han Yanling, Liu Desen, Li Jingyan, Jiang Xiaoping

School of Physics, Southwest China Normal University, Chongqing 400715

Received date:2005-05-24

Abstract Through manufacturing the square glass silk, ion exchange, and precision machining of the sample, the square GRIN lens was made successfully. Some of its characteristics were obtained by the test. For example, distortion of the center part is quite small, and the image formation performs well etc. The success of the research indicates an direction for making square GRIN lens array and gaining its high fill-factor.

Keywords GRIN lens; Square GRIN lens; Square glass stick; Focusing method to test



Han Yanling was born in 1979 in Shandong Province, China. She graduated from physics department of Yantai Normal University in 2003. Now she is working towards the M. S degree in Southwest Normal University. Her research interests include square GRIN lens and its array.