

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0048-05

两种方形自聚焦透镜研制方案的比较

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 西南大学光电技术研究所, 重庆 400715)

摘要 采用离子交换法对圆柱形 T1 玻璃丝进行离子交换,在此基础上将其加工成方形自聚焦透镜样品。再用雅明干涉法和正方形网格图分别对样品的折射率分布和畸变进行测试,并就测试结果与有关文献进行比较。结果表明,按本方案研制而成的方形自聚焦透镜样品,像差相对较小,像质较好,成像较清晰,但存在折射率最大值偏离几何中心轴的情况,而有关文献所采用的方案却不存在这样的现象。研究结果对方形自聚焦透镜的研制有一定的参考价值和指导意义。

关键词 光学制造;方形自聚焦透镜;研制方案;折射率分布;成像质量

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0048

Comparative Study of Two Development Programs of Square GRIN Lens

Wang Feng¹ Liu Desen² Jiang Xiaoping² Zhou Shumei²

(¹ *Elementary Education College, Chongqing Normal University, Chongqing 400700, China*)
(² *Research Institute of Electro-Optics, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

Abstract In the process of manufacturing square GRIN lens, ion-exchanging to cylindrical glass stick T1 was made by ion-exchange method at first, then square GRIN lens sample was machined. The refractive index distribution was measured by Ya-Ming interferometer method, and the aberration was measured by foursquare grid chart. The measurement results were compared with that of related reference. The results show that square GRIN lens sample manufactured by this work has smaller aberration and better imaging quality. But the maximal value of refractive index distribution is deviated from the geometric central axis of the square GRIN lens, while that is not existed in related reference. The results of this research have certain reference value and guiding significance for the development of square GRIN lens.

Key words optical fabrication; square GRIN lens; development program; refractive index distribution; imaging quality

1 引 言

作为光电子和光通信设备的重要基础元件,自聚焦透镜在光纤通信及成像等诸多方面都有着广泛的应用^[1~4]。随着科技的进步和应用的要求,光学元件势必向微型化、轻量化、集成化的方向发展^[5,6]。自聚焦透镜阵列作为一种特殊的光学器件,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、重量轻等特点,在传真机、复印

机、电子白板、图文扫描系统等设备中有着重要的应用^[7]。目前,构成阵列的透镜元的端面多为圆形或半球形,其典型排列方式主要有方形排列^[8]和六角形排列。由于受到阵列透镜元间空隙的限制,这两种排列方式的填充系数均不理想。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

基金项目: 国家自然科学基金(60578005)资助课题。

作者简介: 王 风(1973—),男,副教授,硕士,主要从事变折射率光学和微小光学等方面的研究。

E-mail: wfcq@sohu.com

导师简介: 刘德森(1937—),男,教授,博士生导师,主要从事纤维光学、变折射率光学和微小光学等方面的研究。

E-mail: liuds@swu.edu.cn

问题。为此,刘德森等^[9]通过微加工技术和离子交换工艺成功研制了方形自聚焦透镜阵列,极大地提高了阵列的受光面积和填充系数。本研究参考了文献^[9]的方法,对方形自聚焦透镜的研制方案作了调整,并对两种不同方案所制得的方形自聚焦透镜的折射率分布和成像质量作了比较。

2 方形自聚焦透镜的研制方案和实施

2.1 方形自聚焦透镜的研制方案

在方形自聚焦透镜的研制过程中,参考文献^[9]所采用的方案(以下简称方案 1)如下:第 1 步,将圆柱形玻璃丝加工成方形玻璃丝;第 2 步,对方形玻璃丝进行离子交换;第 3 步,将交换好的方形玻璃丝加工成方形自聚焦透镜样品。本研究对参考文献^[9]所采用的研制方案进行了调整,具体方案(以下简称方案 2)^[10]如下:第 1 步,对圆柱形玻璃丝进行离子交换;第 2 步,将交换好的圆柱形玻璃丝加工成方形玻璃丝;第 3 步,制成方形自聚焦透镜样品。

2.2 方形自聚焦透镜的研制

采用离子交换技术改变玻璃丝的折射率分布。影响离子交换后玻璃丝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。根据自聚焦透镜离子交换工艺的要求^[11],选用折射率较高的 Tl 玻璃丝作为基础玻璃,选取离子交换性能好且电极化率相差较大的一价阳离子 Tl⁺ 和 K⁺ 作为离子交换的交换离子对,以便获得较大的折射率差值。在交换过程中,保持熔盐温度为 525~535 °C,交换时间约为 110~130 h。

将交换好的圆柱形玻璃丝加工成方形玻璃丝,即需截去圆柱形玻璃丝的 4 个弧。如图 1 所示, D 为圆柱形玻璃丝横截面的直径, h 为要磨去的 4 个弧高, a 为圆内接正方形的边长,即要加工的方形玻璃丝的边长。

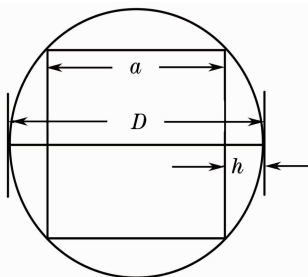


图 1 方形玻璃丝的加工原理图

Fig. 1 Schematic diagram of square glass stick processing

由图可知

$$\frac{a}{2} = \frac{D}{2} - h, \quad (1)$$

$$\frac{\sqrt{2}a}{2} = \frac{D}{2}, \quad (2)$$

可得

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2}D, \quad (3)$$

$$h = \frac{2 - \sqrt{2}}{4}D = 0.1465D, \quad (4)$$

实验中, $D = 1.840 \text{ mm}$,则 $a \approx 1.3012 \text{ mm}$, $h \approx 0.2696 \text{ mm}$,它们分别代表实际加工而成的方形玻璃丝的最大边长和加工过程中要磨去的最小弧高。

最后,将已加工成方形的玻璃丝截成所需要的长度后固定在两块相互平行的玻璃板之间,通过粗磨、细磨、研磨及抛光处理,即制得方形自聚焦透镜样品。

3 测试结果与比较

3.1 折射率分布的比较

采用雅明干涉法对方形自聚焦透镜样品的折射率分布进行了测试,测试原理如图 2 所示,测试光源为氦氖激光器,工作波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,中心折射率 $n(0) = 1.617$ 。在所得的干涉图样中,任意两点 r_1 , r_2 之间的折射率差为

$$\Delta n_{21} = (k_2 - k_1) \frac{\lambda}{t}, \quad (5)$$

式中 t 为干涉薄片的厚度, k_1, k_2 分别为相应 r_1, r_2 处的干涉级次,取 k_0 为 $r = 0$ (样品中轴线) 处的干涉级次, $n(0)$ 为该处的折射率,则样品任意点的折射率为

$$n(r) = n(0) - (k_r - k_0) \frac{\lambda}{t}. \quad (6)$$

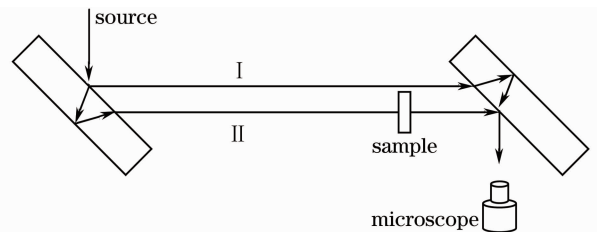


图 2 雅明干涉仪原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Ya-Ming interferometer

其干涉图样如图 3 所示(方案 1 所得干涉图样引自参考文献^[9])。

由图 3 所示的干涉图样可知,按方案 1 研制而成的样品,其干涉图样不是旋转对称的,而是与方向

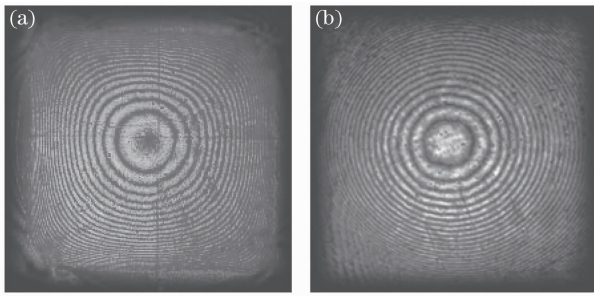


图3 方形自聚焦透镜的干涉图样。(a)方案1所得实验结果;(b)方案2所得实验结果

Fig. 3 Interference patterns of square GRIN lenses. (a) Result of the first program; (b) result of the second program

有关的,不同的 θ 值,对应着不同的折射率分布。若以中心沿水平向右的方向为基准,则 $\theta=0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 方向上的折射率分布相同; $\theta=\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$ 和 $7\pi/4$ 方向上的折射率分布相同; $\theta=\pi/6, \pi/3, 2\pi/3, 5\pi/6, 7\pi/6, 4\pi/3, 5\pi/3$ 和 $11\pi/6$ 方向上的折射率分布相同。也就是说,此种方形自聚焦透镜虽然不是旋转对称,但却仍然具有对称性,其对称面有4个:透镜中心轴与对角线所在的平面(2个),透镜中心轴与水平中线所在的平面,透镜中心轴与垂直中线所在的平面。透镜的等折射率线为一系列同心圆柱面,越靠近中心轴,柱面越趋于圆形,越远离中心轴,柱面越趋于方形。

按方案2研制而成的方形自聚焦透镜样品,其干涉图样是相对于中心轴旋转对称的,即在任意方向上的折射率分布相同。透镜的等折射率线为一系列同心圆柱面。

两种方案所得的折射率分布曲线如图4和5所示(方案1所得折射率分布曲线引自参考文献[12])。

对图4所示的折射率分布曲线进行计算机拟

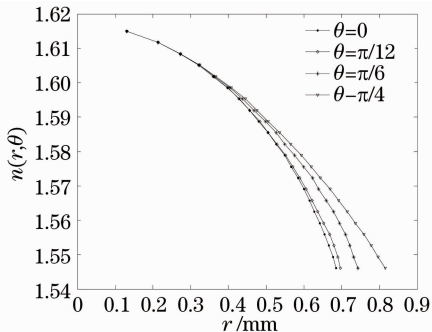


图4 方案1所得折射率分布曲线

Fig. 4 Refractive index distribution curve of the first program

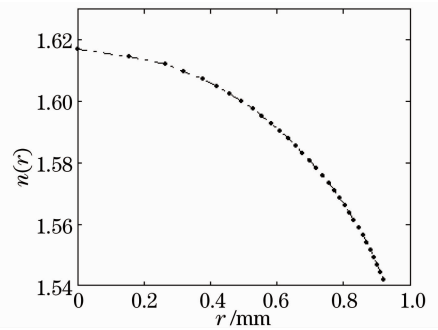


图5 方案2所得折射率分布曲线

Fig. 5 Refractive index distribution curve of the second program

合,其折射率分布不像方案2所得样品是相对于中心轴旋转对称的,即不再满足通常的折射率分布表达式^[13]

$$n(r) = n(0) \left(1 - \frac{1}{2} A r^2\right), \quad (7)$$

(式中 $n(0)$ 为中心轴上的折射率, \sqrt{A} 为聚焦常数),而是近似地由下式决定^[12]

$$n(r, \theta) = 1.617 - 0.010 \cos \frac{1}{2} \theta_r^{1/2} - 0.031 (\cos \theta_r + \cos \frac{3}{2} \theta_r^{3/2}) + 0.021 r^{3/2}, \quad (8)$$

式中 r 为透镜内部某点距中心轴的距离, θ_r 为 r 与水平中心线之间的夹角。(8)式仅为根据实验数据拟合而成的半经验公式,大致描述了按方案1所制得的方形自聚焦透镜的折射率随半径和角度的分布情况。

3.2 成像质量的比较

像差是评价自聚焦透镜质量的一个重要指标,它直接影响着透镜成像质量的优劣。图6为方形自聚焦透镜的网格成像图(方案1所得网格成像图引自参考文献[9])。

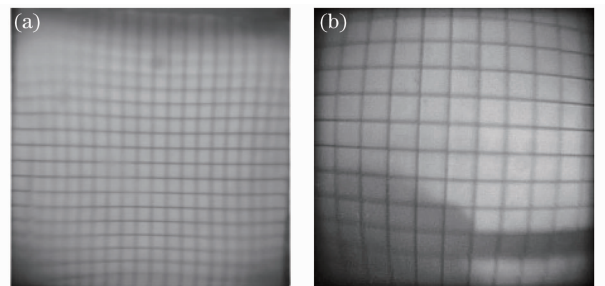


图6 方形自聚焦透镜网格成像图。(a)方案1所得实验结果;(b)方案2所得实验结果

Fig. 6 Grid images of square GRIN lenses. (a) Result of the first program; (b) result of the second program

测试畸变时,用读数显微镜观察网格通过方形自聚焦透镜所成的像,读出像中心位置处的单元网格间距 d_0 和像边缘位置处的单元网格间距 d ,则方形自聚焦透镜的畸变为

$$\delta = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\%, \quad (9)$$

$\delta > 0$ 为枕形畸变(负畸变), $\delta < 0$ 为桶形畸变(正畸变)。

畸变测试结果见表 1。

表 1 方形自聚焦透镜畸变测试结果

Table 1 Aberration test results of square GRIN lenses

Program	d_0	d	$\delta / \%$	Distortion type
First program	0.167	0.186	11.37	Pincushion distortion
Second program	0.210	0.187	-10.95	Barrel distortion

根据自聚焦透镜的像差特性与成像质量之间的关系^[14]可知,像差、光斑尺寸与成像质量之间存在着正相关的关系,像差越小,光斑尺寸越小,成像质量越好。观察方形自聚焦透镜的网格成像图也可以看出,两种方案所得结果均存在如下特点:越靠近中心部分,像差越小,成像质量越好;越靠近透镜边缘,像差越大,成像质量越差。两者的不同之处在于:前者产生的是枕形畸变,后者产生的是桶形畸变。并且从整体上看,后者的成像质量优于前者,特别是在靠近方形自聚焦透镜的 4 个直角区域内,相比之下,后者的球差较小,像质较好,成像较清晰。成像照片如图 7 所示(方案 1 成像照片引自参考文献[9])。

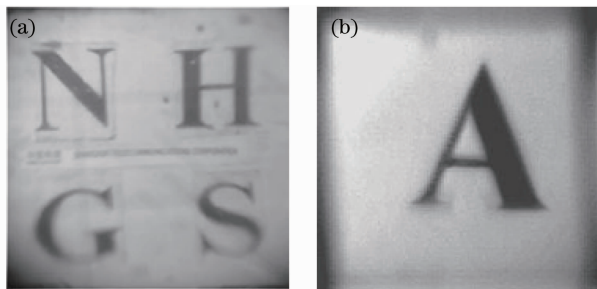


图 7 方形自聚焦透镜的成像照片。(a)方案 1 所得实验结果;(b)方案 2 所得实验结果

Fig. 7 Imaging photos of square GRIN lenses. (a) Result of the first program; (b) result of the second program

4 结果与讨论

采用离子交换法使圆柱形玻璃丝沿径向产生折射率梯度,进而将其加工成方形玻璃丝,制成了方形

自聚焦透镜样品。对样品的折射率分布和像差进行了测试,拍摄了成像照片,并与参考文献[9]的结果进行了对比实验研究。结果表明,按文献[9]所述方案研制而成的方形自聚焦透镜样品,其折射率分布与 θ 值有关,越远离中心轴区域,这一差别表现得越突出,因而从根本上导致了边缘部分的成像模糊,像差较大,质量较差。按本文所述方案研制而成的方形自聚焦透镜样品,其折射率呈旋转对称分布,与 θ 无关,只要半径相同,其折射率大小就相等。虽然边缘部分的像差也较中心轴附近大,但与前者比较而言,这一差别又相对较小,因而其像质较好,成像较清晰。而边缘部分的成像质量则可通过二次离子交换^[15~17]使其进一步地改善和提高。

但有一点不能忽视,按方案 2 的方法,由于交换后的圆柱形玻璃丝,其折射率的最大值位于几何中心轴上,而在加工成方形时,磨去的 4 个弧高并不严格地完全相等,因而制成的方形自聚焦透镜样品的最大折射率并不位于透镜的几何中心轴上。而加工成方形后再进行离子交换的方案(方案 1)却不存在这样的问题。

5 结 论

综合考虑上述两种方案的优劣,认为只要采用更精密的加工技术,克服因打磨精度不高而导致的折射率最大值偏离透镜几何中心轴的情况,采用方案 2 研制方形自聚焦透镜无疑是一个较好的选择。

参 考 文 献

- 1 P. J. Murphy, T. P. Coursolle. Fiber optic displacement sensor employing a graded index lens [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(4): 544~547
- 2 P. Sandoz, R. Giust, G. Tribillon. Multi-aperture optical head for parallel scanning near field optical microscopy [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **161**(4): 197~202
- 3 Ding Qin, Wang Huinan. An imaging technique of microcapsule endoscope using a GRIN lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 889~892
丁 琴,王惠南. 采用 GRIN 透镜的微胶囊内窥成像技术[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 889~892
- 4 Zhu Shaoli, Xu Qiushuang, Liu Desen. The analysis of GRIN in optical fiber collimator [J]. *J. Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, **29**(3): 379~382
朱少丽,徐秋霜,刘德森. 自聚焦透镜在光纤准直器中的应用分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2004, **29**(3): 379~382
- 5 H. O. Sankur, M. E. Motamedi. Micro-optics development in the past decade [C]. *SPIE*, 2000, **4179**: 30~55
- 6 W. B. Veldkamp. Overview of microoptics; past, present, and future [C]. *SPIE*, 1991, **1544**: 287~299
- 7 Gong Zhibing. Self focusing lens array and its application[J]. *J. Applied Optics*, 2000, **21**(1): 28~31

- 龚智炳. 自聚焦透镜列阵及其应用[J]. 应用光学, 2000, **21**(1): 28~31
- 8 J. Baehr, K. H. Brenner. Realization of refractive continuous-phase elements with high design freedom by mask-structured ion exchange [C]. *SPIE*, 2001, **4437**: 50~60
- 9 Han Yanling, Liu Desen, Li Jingyan *et al.*. Research on manufacture of square gradient-index lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1301~1304
- 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, **35**(9): 1301~1304
- 10 Wang Feng, Liu Desen, Jiang Xiaoping *et al.*. Research on imaging properties of square GRIN lens array with 5×5 [J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(4): 518~521
- 王 风, 刘德森, 蒋小平 等. 方形自聚焦透镜 5×5 阵列的成像特性[J]. 应用光学, 2008, **29**(4): 518~521
- 11 R. Stepien, L. Kociszewski, D. Pysz. Technological problems in manufacturing glasses for GRIN rod lenses [C]. *SPIE*, 1996, **2943**: 60~68
- 12 Han Yanling. Theoretical Analysis and Manufacture Craft of Square Self-Focusing Lenses and It's Array [D]. Chongqing: Southwest University, 2006. 29~31
- 韩艳玲. 方形自聚焦透镜及阵列的理论分析和制作工艺[D]. 重庆: 西南大学, 2006. 29~31
- 13 Liu Desen. Chromatic aberration analysis of the selfoc-rod lenses [J]. *Acta Physica Sinica*, 1982, **31**(2): 226~233
- 刘德森. 聚焦透镜棒的色差分析[J]. 物理学报, 1982, **31**(2): 226~233
- 14 Wang Feng, Liu Desen. The analysis of optical spot size and aberration properties of selfoc lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 830~833
- 王 风, 刘德森. 自聚焦透镜的光斑尺寸与像差特性分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 830~833
- 15 X. L. Lang, D. S. Liu, T. Lü *et al.*. Aberration improvement of gradient index rod lens [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 152~153
- 16 Wang Feng, Liu Desen, Jiang Xiaoping *et al.*. Analysis of large refractive index difference of GRIN-rod lenses caused by ion-exchanging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5890~5894
- 王 风, 刘德森, 蒋小平 等. 离子交换引起的 GRIN 棒透镜大折射率差值分析[J]. 物理学报, 2007, **56**(10): 5890~5894
- 17 Wang Feng, Qin Xianming, Liu Desen *et al.*. Study on influence of two-step ion-exchanging upon optical properties of GRIN lens [J]. *J. Southwest University (Natural Science Edition)*, 2007, **29**(9): 37~41
- 王 风, 秦先明, 刘德森 等. 二次离子交换对 GRIN 透镜光学特性的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, **29**(9): 37~41