

# 二次离子交换法改进自聚焦透镜折射率分布\*

郎贤礼 刘德森\*\* 吕 涛 蒋小平 朱少丽

(西南师范大学物理学院, 重庆 400715)

**摘 要** 对二次离子交换制作自聚焦透镜的理论和工艺进行了研究. 利用  $KNO_3$  和  $NaNO_3$  混合盐进行二次离子交换. 对二次离子交换前后的自聚焦透镜的折射率分布和畸变进行了测试, 结果表明, 经过二次离子交换后, 折射率分布明显改善, 更接近理想折射率分布曲线, 相对畸变由二次交换前的 13.1% 减小到 7.7%.

**关键词** 自聚焦透镜; 二次离子交换; 折射率分布; 畸变; 薄片干涉法

**中图分类号** O435.1      **文献标识码** A

## 0 引言

自聚焦透镜是一种变折射率光学元件, 已成为光纤通信器件中最重要的基础元件, 如制作光开关、光纤耦合器、光衰减器、光连接器、光分光器<sup>[1]</sup>等各种光纤通信器件. 另外还可用于传真机, 复印机以及光信息存储系统<sup>[2]</sup>. 离子交换技术是目前生产自聚焦透镜最广泛、最成熟的技术. 由于在上述应用中自聚焦透镜的像差、数值孔径会直接影响器件以及仪器的性能, 产生像差的原因主要是由于其折射率分布偏离理想折射率分布, 像差在透镜边缘显得更为突出, 也说明折射率分布在边缘偏离得更加厉害. 实验表明通过一次离子交换很难制成高质量的自聚焦透镜<sup>[3]</sup>. 本文通过混合盐的交换工艺对铯玻璃材料进行二次离子交换, 进一步改善折射率分布, 使它更接近理想分布, 提高了自聚焦透镜的光学性能.

## 1 离子交换的理论基础

自聚焦透镜通常由含铯的玻璃制造. 铯玻璃多采用铅硅酸盐玻璃系统和硼硅酸盐玻璃系统. 在玻璃结构中, 单价阳离子氧化物  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Tl_2O$  等, 一般称为网络修饰体, 它们虽不改变玻璃的结构, 但对玻璃的性能有一定影响. 在离子交换过程中, 要求玻璃中含有高极化率的一价阳离子(如  $Tl^+$ ), 交换的熔盐中含有低极化率的一价正离子(如  $K^+$ ), 通过高温下的离子交换用  $K^+$  去取代玻璃中的  $Tl^+$ , 在玻璃中形成  $Tl^+$  的浓度梯度(中心最大), 从而在玻璃中形成折射率梯度.

离子交换时, 先把玻璃丝放入熔盐当中, 在浓度梯度的作用下产生使尝试趋于均匀的扩散流, 玻璃丝中的  $A^+$  与熔盐中的  $B^+$  进行离子交换. 交换离子

在扩散过程中满足扩散方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial N(r,t)}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 N}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial N}{\partial r} \right) \quad (1)$$

这里  $D$  为扩散常数.

利用初始条件及边界条件

$$N(r_0, t) = 0 \quad t > 0 \quad (2)$$

$$N(r, 0) = f(r) \quad t = 0 \quad (3)$$

其中  $f(r)$  为初始浓度.

求出离子交换后的浓度分布

$$N(r,t) = \frac{2}{r_0^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\alpha_m r)}{J_1^2(\alpha_m r_0)} \exp(-Dt\alpha_m^2) \cdot \int_0^{r_0} f(r) J_0(\alpha_m r) r dr \quad (4)$$

其中  $\alpha_m$  是零阶贝塞尔函数

$$J_0(\alpha_m r) = 0 \quad (5)$$

的第  $m$  个根.

由 Clausius-Mossotti 关系<sup>[5]</sup>

$$n^2 = n^2(0) \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha N \right) / \left( 1 - \frac{1}{3} \alpha N \right) \quad (6)$$

$n(0)$  为中心折射率,  $\alpha$  为极化率, 就可以由浓度分布得到其折射率分布.

一般来说, 玻璃折射率近似为各氧化物折射率分布的和<sup>[4]</sup>

$$n = \sum n_i r_i \quad (7)$$

由式(4)、(6)、(7)就可以从理论上求出经过离子交换后的折射率分布.

利用薄片干涉法<sup>[6]</sup>, 可以对自聚焦透镜的折射率分布进行测试. 多次测试表明经过一次离子交换铯玻璃自聚焦透镜的折射率分布与理想折射率分布  $n(0) \text{Sech}(gr)$  偏差较大, 特别是边缘部分折射率偏差很大. 通过二次离子交换可很好地解决这一问题. 因为根据 Maxwell 的电磁理论, 介质在电磁场中的折射率可表示为

$$n^2 = 1 + 4\pi\alpha \quad (8)$$

式中  $n$  为折射率;  $\alpha$  为极化率. 这样可以选取另一

\* 重庆市科委(413223)、重庆市计委(413227)资助项目

\*\* Tel: 023-68254607 Email: liuds@swnu.edu.cn

收稿日期: 2004-06-23

种极化率的离子  $C^+$  进行二次离子交换. 如果选取一种极化率较低的一价阳离子与玻璃中极化率较高的一价阳离子交换, 就可降低玻璃折射率; 反之, 可以增加折射率. 本文所用的一次离子交换的铯玻璃自聚焦透镜由于边缘部分比理想折射率分布要低, 所以选取极化率较小的  $Na^+$  与玻璃中的极化率较大的  $K^+$ 、进行交换, 这样可以降低边缘的折射率分布.

## 2 二次离子交换制作自聚焦透镜工艺

实验中, 选用铯玻璃作为基础玻璃. 首先把铯玻璃根据需求拉成不同直径的玻璃丝, 本文选取丝的直径为 1.80 mm, 把丝截成一定长度的小段, 然后用乙醇乙醚的混合溶液对玻璃丝进行清洗, 凉干后在  $KNO_3$  熔盐中进行一次离子交换, 交换温度  $T_1$ , 交换时间为  $t_1$ . 交换完成后, 取出丝, 清洗干净准备进行二次离子交换. 本文选取  $Na^+$  作为交换离子与玻璃丝中的  $Tl^+$ 、 $K^+$  进行交换. 用的是  $NaNO_3$  和  $KNO_3$  混合盐, 交换温度  $T_2$ , 交换时间  $t_2$ .

需要指出的是, 并不是  $Na^+$  的浓度越高越好,  $Na^+$  离子扩散速率较快, 如果浓度过高会产生很大的应力, 结果会使自聚焦透镜棒表面产生裂纹. 经多次实验后发现可以采用混合盐的方法来解决这个问题. 另外因为  $Na^+$  离子扩散速率较快, 二次离子交换时间也不宜过长, 应该控制在 5 h 以内.

## 3 自聚焦透镜折射率分布及畸变测试结果与分析

### 3.1 自聚焦透镜折射率分布测试结果

本文分别对一次离子交换后的折射率分布与二次离子交换后的折射率分布进行了测试, 并与理想折射率分布曲线作了对比. 子午面内自聚焦透镜理想折射率分布曲线为双曲正割曲线<sup>[7]</sup>, 即

$$n(r) = n(0) \operatorname{sech}(gr) \quad (9)$$

其中  $n(0)$  是透镜棒中心的折射率,  $g$  为聚焦常数. 实验制得自聚焦透镜的直径为 1.80 mm,  $g = 0.31 \text{ mm}^{-1}$ ,  $n(0) = 1.617$ .

图 1 为离子交换干涉图, 由图 1 可以计算出一次和二次离子交换后的折射率分布曲线, 与理想折射率分布曲线的比较, 如图 2.

由图 2 可以看出, 经过一次离子交换后自聚焦透镜的折射率分布并不理想, 位于理想折射率分布曲线图的下方, 且越靠近边缘偏离越大. 主要原因是交换一段时间后透镜棒边缘部分的  $Tl^+$  离子已全部被  $K^+$  离子取代, 即使交换继续其边缘总的折射率也不会继续下降, 而且, 如果交换到中心后仍继续

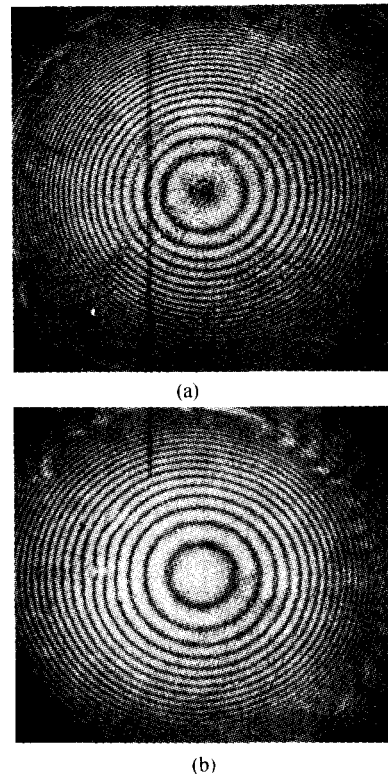


图 1 一次离子交换(a)与二次离子交换(b)干涉图样比较  
Fig. 1 Interference loops comparing two-step ion-exchange(b) with one step(a)

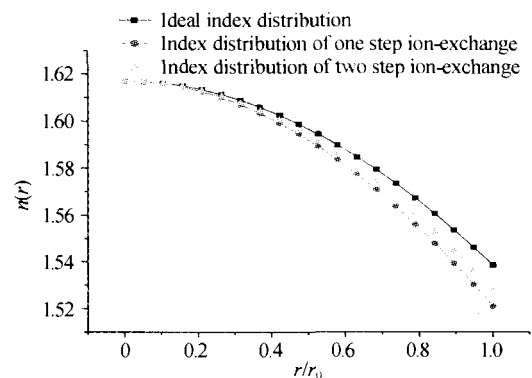


图 2 折射率分布曲线对比  
Fig. 2 The index distributions of ideal, one-step and two-step ion-exchanging

交换, 会使中心的折射率下降, 反而会使  $\Delta n$  减小.

经过二次离子交换后, 自聚焦透镜的折射率分布得到了明显的改善, 与理想折射率分布已非常接近. 主要原因是  $Na^+$  比  $K^+$  离子的极化率要小, 而且  $Na^+$  离子的扩散速率比较快, 能在很短的时间内使透镜棒表面附近的  $K^+$  有了很大的减小, 这样就引起了边缘部分折射率的降低.

### 3.2 像差的测试

在引言已提到, 折射率分布不理想是产生像差的主要原因. 为此本文对二次离子交换前后的像差进行了测试. 利用网格成像法<sup>[5]</sup>, 对自聚焦透镜的畸变进行测试, 测试图像如图 3.

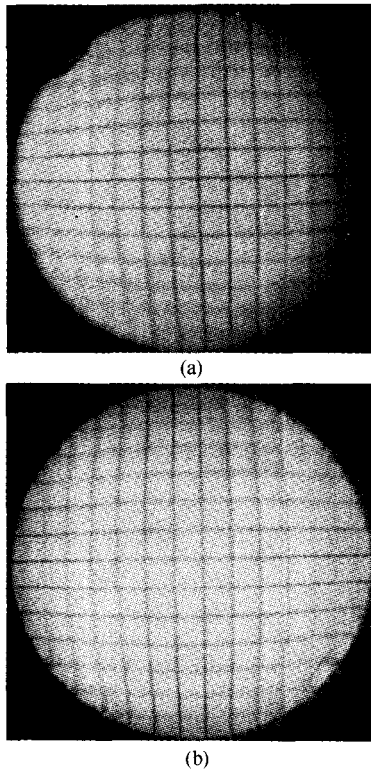


图3 一次离子交换(a)和二次离子交换(b)自聚焦透镜成像畸变

Fig. 3 Aberrations of GRIN lens by one-step ion-exchanging (a) and two step-ion-exchanging (b)

通过比较图3,可以看出经过二次离子交换后自聚焦透镜的畸变得到了明显的改善,仔细观察图3(b)的边缘部分,会发现比(a)的边缘部分要清晰,说明自聚焦透镜的球差在经过二次离子交换后也变小了.

自聚焦常数  $g$ , 以及折射率分布表达式系数可以通过对折射率分布进行非线性拟合得出. 表1是一次离子交换和二次离子交换折射率分布以及像差等参数的测试数据.

表1 一次离子交换和二次离子交换折射率分布像差测试数据

自聚焦透镜	聚焦常数 $g$	$h_4$	$h_6$	相对畸变	球差 /mm
理想透镜	0.31	2/3	-17/45	0	0
一次离子交换 样品2个	0.34	0.5262	-7.8271	12.5%	0.31
二次离子交换 样品2个	0.32	0.5880	-8.8912	8.1%	0.20
二次离子交换 样品2个	0.32	0.5930	-9.3824	7.3%	0.21

比较表1可以看出,自聚焦透镜的聚焦常数  $g$

和折射率分布四阶项系数得了明显的优化,更接近理想值. 自聚焦透镜的相对畸变和球差在经过二次离子交换后也得到了明显的改善,几乎比二次离子交换前减小了一半,这也说明自聚焦透镜的折射率已经得到修正,更加接近理想折射率分布.

## 4 结论

对二次离子交换的理论进行了论述和探讨,在二次离子交换中选取极化率较小的  $\text{Na}^+$  与  $\text{Tl}^+$ 、 $\text{K}^+$  进行交换,降低了自聚焦透镜边缘的折射率分布,从而更接近理想折射率分布曲线,改进了铯玻璃自聚焦透镜的光学性能. 通过对二次离子交换前后自聚焦透镜折射率分布和畸变进行测试,折射率分布和畸变都得到了很好的改善,从而验证了实验和理论的正确性和合理性. 采用  $\text{KNO}_3$  和  $\text{NaNO}_3$  混合盐工艺进行二次离子交换制作自聚焦透镜,取得了较大的折射率差值,得到较大的数值孔径,又获得了较理想的折射率分布,这样减小了像差,提高了自聚焦透镜的光学性能.

## 参考文献

- 1 刘德森. 微小光学和微小光子器件. 光子学报, 1997, **26** (Z1):21~23  
Liu D S. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26** (Z1):21~23
- 2 Tomlinson W J. Applications of GRIN rod lens in optical fiber communication systems. *Appl Opt*, 1980, **19** (7): 1127~1138
- 3 Iga K, Yokomori K. Trans. IECE Jpn, 1975, **58**-C(5): 283~285
- 4 刘德森. 纤维光学. 北京:科学出版社, 1987. 192~204  
Liu D S. *Fibre Optics*. Beijing: Science Press, 1987. 192~204
- 5 Iga K, et al. Fundamentals of microoptics. Academic press, inc. 1984. 109~110, 181~182
- 6 高应俊. 自聚焦材料折射率分布的干涉法测量研究(硕士论文). 中科院西安光机所, 1982. 8~25  
Gao Y J. The Study of Index distributions of GRIN Materials by Interference Method, [MS dissertation], Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1982. 8~25
- 7 刘德森. 变折射率光学理论与实践. 重庆:西南师范大学出版社, 2004. 40~41  
Liu D S. Fundamentals and Practices of Gradient Index Optics. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2004. 40~41

## Improvement of Index Distributions for GRIN Lens by Two-step Ion-exchanging Method

Lang Xianli, Liu Desen, Lü Tao, Jiang Xiaoping, Zhu Shaoli

*School of Physics, Southwest China Normal University, Chongqing 400715*

Received date: 2004-06-23

**Abstract** The two-step ion-exchanging method for fabrication of GRIN lens is proposed. The mixed salts of  $\text{KNO}_3$  and  $\text{NaNO}_3$  are used in the process of two-step ion-exchanging, and the result is satisfactory. The index distributions and aberrations are also measured. As a result, the index distributions are amended greatly and they are much more close to the ideal index distributions and the aberrations are decreased from 13.1% to 7.7%.

**Keywords** GRIN-rod lens; Two-step ion-exchanging; Index distribution; Aberration; Thin slice interference method

**Lang Xianli** was born on Feb. 16, 1979, in Weifang, Shandong Province, China. He graduated from Weifang University in 2000. He is currently pursuing M. S. degree in optics at Southwest China Normal University. His research presently focuses on microoptics and integrated optics.

