

# 低色差 GRIN 棒透镜的设计原则

郝寅雷, 金龙文, 赵文兴

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 对梯度折射率(GRIN)棒透镜色差的影响因素进行了讨论, 根据 Fantone 模型, 在光学玻璃  $N_d - V$  图中直观地表示了离子交换法制备低色差 GRIN 棒透镜时交换离子对的选择原则和基础玻璃光学性能确定原则。分析表明, 以具有常用光学性质的玻璃作为基础玻璃, 可以通过  $\text{Na}^+ / \text{Li}^+$  交换或  $\text{K}^+ / \text{Cs}^+$  交换获得低色差 GRIN 棒透镜, 而  $\text{K}^+ / \text{Tl}^+$  交换和  $\text{Na}^+ / \text{Ag}^+$  交换所制作的 GRIN 棒透镜具有很大的色差。

上述原则对低色差 GRIN 棒透镜的制作具有指导意义。

关键词: 梯度折射率; 透镜; 色差; 离子交换

中图分类号: TH741 文献标识码: A

## 1 引言

GRIN 棒透镜, 是一种折射率沿径向变化的圆柱状光学元件。这种透镜内部距中心轴  $r$  处的折射率  $N_r$  可用式(1)表示<sup>[1]</sup>:

$$N_r = N_0(1 - \frac{A}{2}r^2), \quad (1)$$

其中  $N_0$  —— 棒透镜中心轴上折射率;

$A$  —— 折射率分布常数(聚焦参数)。

由于这种透镜内部折射率的梯度分布特征, 从透镜端面入射的光线在透镜内部将沿正弦曲线传播。将适当长度的 GRIN 棒用于光学系统, 便可实现一定的功能(聚焦、准直、成像等)。由于这种光学元件内部的折射率变化可以调节, 当它用于复杂的光学系统时, 可以减少系统中光学元件的数量, 在某些场合可以代替非球面光学元件。此外这种光学元件的加工简单, 且使用这种光学元件的系统具有结构紧凑、性能稳定、成本低廉等特性。

GRIN 透镜主要应用在两个方面: 一是光纤通信领域, 它可以用于光纤之间的连接、隔离、定向耦合, 波分复用器件以及光开关等<sup>[1-2]</sup>; 二是作为聚焦和成像元件<sup>[3]</sup>的应用, 它可以用于医用的内窥镜<sup>[4]</sup>, CD 机的读取镜头<sup>[5]</sup>以及传真机和复印机等办公设备<sup>[6]</sup>的成像系统。与光纤通信

用自聚焦透镜(Selfoc lens)不同, 成像用 GRIN 光学元件工作波长范围通常较宽, 为保证使用 GRIN 透镜的系统具有合格的成像质量, 不仅要求透镜内部折射率分布曲线满足一定要求, 而且要求透镜具有足够低的色差。

近几年来, 许多研究者对用于成像系统的 GRIN 棒透镜的色差特性进行了广泛而深入的研究, 并提出了低色差透镜设计原则<sup>[7-10]</sup>, 本文在此基础上, 对 GRIN 棒透镜色差的影响因素进行了讨论, 并从离子交换法的角度提出了低色差 GRIN 棒透镜的设计原则。

## 2 GRIN 色差的影响因素

K. Nishizawa<sup>[7]</sup>推导出了折射率按(1)式分布的 GRIN 棒透镜的轴向色差估计函数:

$$\frac{\Delta P}{P} = - \frac{1}{2} \frac{\frac{1}{V_0}(1 - \frac{1}{N_0}) - \frac{1}{V_{r0}}(1 - \frac{1}{N_{r0}})}{\frac{N_0}{N_{r0}} - 1}, \quad (2)$$

其中,  $P$  是  $d$  光在透镜内部传播轨迹的周期(节距);  $N_0$  和  $N_{r0}$  分别是棒透镜轴上和边缘折射率;  $V_0$  和  $V_{r0}$  分别是棒透镜轴上和边缘阿贝数;  $\Delta P = P_F - P_C$ 。由式(2)可知, GRIN 棒透镜的色差可以用  $N_0, N_{r0}, V_0$  和  $V_{r0}$  表示。

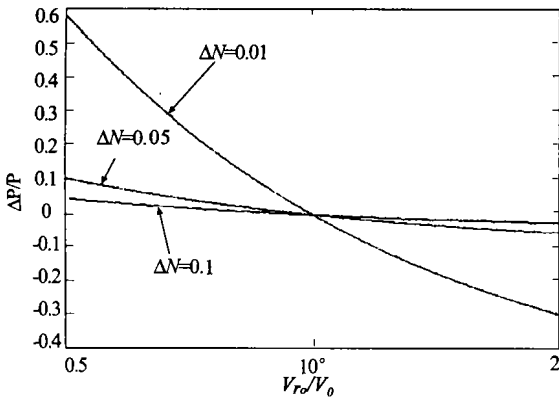


图 1  $\Delta N$  对 GRIN 棒透镜色差的影响 ( $N_o = 1.6, V_o = 50$ )

Fig. 1 Dependence of chromatic aberration on  $\Delta N$  ( $N_o = 1.6, V_o = 50$ ).

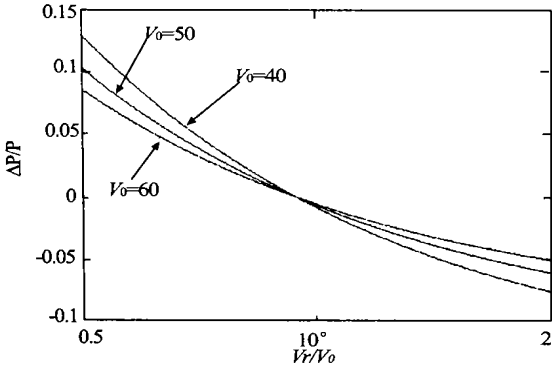


图 2  $V_o$  对 GRIN 棒透镜色差的影响 ( $N_o = 1.6, \Delta N = 0.05$ )

Fig. 2 Dependence of chromatic aberration on  $V_o$  ( $N_o = 1.6, \Delta N = 0.05$ ).

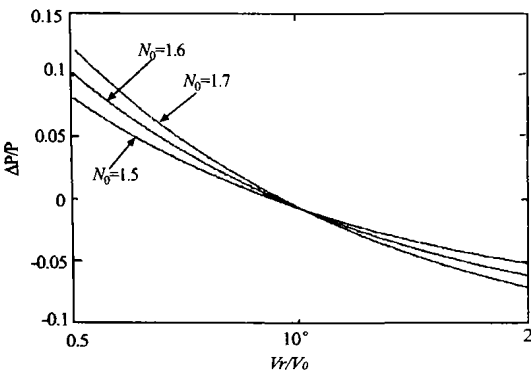


图 3  $N_o$  对 GRIN 棒透镜色差的影响 ( $V_o = 50, \Delta N = 0.05$ )

Fig. 3 Dependence of chromatic aberration on  $N_o$  ( $V_o = 50, \Delta N = 0.05$ ).

图 1、图 2、图 3 分别表示了 GRIN 棒透镜中  $\Delta N$  (折射率差)、 $V_o$  (透镜中心阿贝数) 和  $N_o$  (透镜中心折射率) 与色散分布对透镜色差的影响。图中的横轴为透镜边缘阿贝数和中心阿贝数之比, 纵轴为 GRIN 棒透镜色差估计函数。

从上述图中可以看出:

- GRIN 棒透镜中折射率变化幅度对色差影响显著;
- 基础玻璃光学性能(折射率和色散)对色差影响显著;
- 通过设计玻璃基础配方和离子交换工艺使透镜边缘阿贝数具有合适的数值可以降低 GRIN 棒透镜色差。

### 3 GRIN 棒透镜的设计模型

GRIN 棒透镜的制备方法有: 离子交换法、溶胶凝胶法、化学气相沉积法、离子填充法等。其中离子交换法具有操作简单、成本低廉等优良特性, 是研究者们最感兴趣的方法, 也是目前发展最为成熟的方法。离子交换法中, 基础玻璃配方设计和离子交换对的选择十分关键。

Fantone 在 HSD 模型的基础之上对 GRIN 棒透镜的光学性能(包括折射率及色散)的计算方法进行了研究<sup>[11]</sup>。推导出取决于参与交换离子性质的三个重要参数:

(1)  $N_{I,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$ 。其物理意义是: 当折射率为  $N_{I,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  的基础玻璃发生  $M_{in}^+/M_{out}^+$  离子交换时, 玻璃折射率不变;

(2)  $N_{I,F-C}(M_{in}^+, M_{out}^+)$ 。其物理意义是: 当色散  $N_{F-C}$  ( $F$  线折射率与  $C$  线折射率之差) 为  $N_{I,F-C}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  的基础玻璃发生  $M_{in}^+/M_{out}^+$  离子交换时, 玻璃色散不变。

(3)  $S_{T,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$ 。其物理意义是:  $N_d/(N_F - N_C)$  为  $S_{T,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  的基础玻璃发生  $M_{in}^+/M_{out}^+$  离子交换时, GRIN 棒透镜的色差为零。该参数针对折射率按 (1) 式分布的 GRIN 棒透镜, 在一级近似的条件下得到。

表 1 列出了几种常见的交换离子对的  $N_{I,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$ 、 $N_{I,F-C}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  和  $S_{T,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  值。

上述三个参数中, 用  $N_{I,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  可以很

方便地估计离子交换前后玻璃折射率变化,  $S_{T,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  是针对梯度折射率透镜的具体情况导出, 因而这两个参数会给低色差 GRIN 棒透镜的设计带来方便。

表 1 离子交换常数

Table 1 Ion-exchange constant

$M_{in}^+$	$M_{out}^+$	$N_{I,d}$ ( $M_{in}^+, M_{out}^+$ )	$N_{I,F-C}$ ( $M_{in}^+, M_{out}^+$ )	$S_{T,d}$ ( $M_{in}^+, M_{out}^+$ )
Na <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	1.295	0.0106	122.3
Na <sup>+</sup>	Ag <sup>+</sup>	3.476	0.11806	28.8
K <sup>+</sup>	Tl <sup>+</sup>	3.922	0.31287	12.5
K <sup>+</sup>	Cs <sup>+</sup>	1.534	0.00743	212.4

### 4 离子交换对的选择和基础玻璃性能的确

在常用的光学玻璃  $N_d-V$  的图中,  $N_{I,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  为常数的情况可以表示为一条平行于  $V$  的直线,  $S_{T,d}(M_{in}^+, M_{out}^+)$  为常数的情况可以表示为一条曲线。这两条曲线对低色差 GRIN 棒透镜的设计有指导意义。

根据 Fantone 模型, 折射率为  $N_d$  的玻璃发生  $M_{in}^+ / M_{out}^+$  离子交换时, 折射率变化值为:

$$\Delta N_d = \frac{N_{I,d} - N_d}{15} (c_{M_{in}^+} - c_{M_{out}^+}) J_{M_{out}^+}^0 x, \quad (3)$$

其中  $c_{M_{in}^+}$  和  $c_{M_{out}^+}$  分别是与  $M_{in}^+$  和  $M_{out}^+$  相应的体积参数;  $J_{M_{out}^+}^0$  是基础玻璃中  $M_{out}^+$  的含量;  $x$  是离子交换程度,  $x = J_{M_{in}^+} / (J_{M_{out}^+} + J_{M_{in}^+})$ 。

公式(3)对 GRIN 棒透镜设计过程中离子交换对的选择和基础玻璃性能的设计有重要的指导意义: 如果需要较大的  $\Delta N_d$ , 需要  $N_{I,d} - N_d$  和  $c_{M_{in}^+} - c_{M_{out}^+}$  均具有较大值, 同时应尽量增大基础玻璃中  $M_{out}^+$  的含量, 并尽量使离子交换进行完全; 如果需要较小的  $\Delta N_d$ ,  $N_{I,d} - N_d$  或  $c_{M_{in}^+} - c_{M_{out}^+}$  应具有较小值。

图 4 给出了  $Na^+ / Li^+$  交换和  $K^+ / Cs^+$  交换的情况。成像用 GRIN 透镜要求较大的折射率梯度和较小的色差。对于  $Na^+ / Li^+$  交换, 为减小 GRIN 棒透镜的色差, 基础玻璃的光学性能应在图中所示的  $S_T(Na^+, Li^+)$  线(实线)上; 因为  $c_{Na^+} > c_{Li^+}$ , 根据式(3), 欲使  $\Delta N_d < 0$ , 应保证基础玻璃折射率  $N_d > N_{I,d}(Na^+, Li^+)$ ; 为增大折

射率梯度, 应尽量增大  $N_d$  值。  $K^+ / Cs^+$  交换的情况与  $Na^+ / Li^+$  类似。

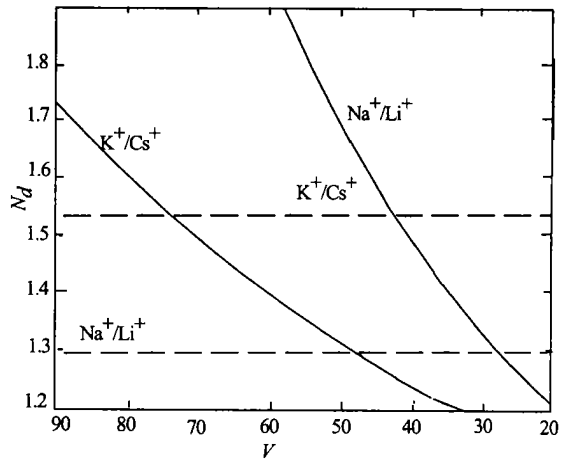


图 4  $K^+ / Cs^+$  和  $Na^+ / Li^+$  的  $N_{I,d}$  (虚线) 和  $S_{T,d}$  (实线)

Fig. 4  $N_{I,d}$  (dashed line) and  $S_{T,d}$  (solid line) of  $K^+ / Cs^+$  and  $Na^+ / Li^+$ .

图 5 给出了  $K^+ / Tl^+$  交换和  $Na^+ / Ag^+$  交换的情况。由图可见, 实用的光学玻璃不可能通过  $K^+ / Tl^+$  交换和  $Na^+ / Ag^+$  交换获得低色差 GRIN 棒透镜。

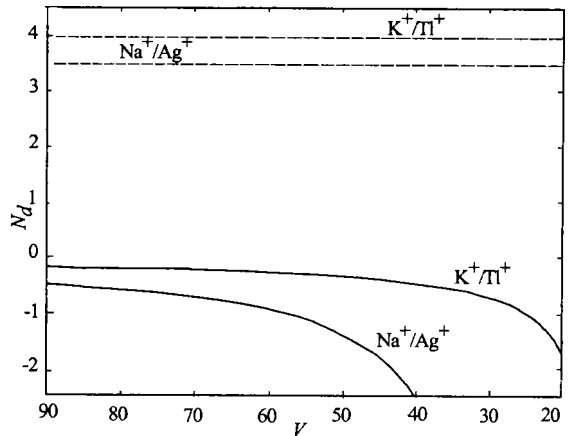


图 5  $K^+ / Tl^+$  和  $Na^+ / Ag^+$  的  $N_{I,d}$  (虚线) 和  $S_{T,d}$  (实线)

Fig. 5  $N_{I,d}$  (dashed line) and  $S_{T,d}$  (solid line) of  $K^+ / Tl^+$  and  $Na^+ / Ag^+$ .

事实上, 研究者们已经通过  $Na^+ / Li^+$  交换和  $K^+ / Cs^+$  交换制备出了成像用 GRIN 棒透镜<sup>[8, 12]</sup> 而  $K^+ / Tl^+$  交换和  $Na^+ / Ag^+$  交换所制备的 GRIN

光学元件多用于工作波长为单色光的场合,比如光纤通信中的自聚焦透镜。

值得注意的是:上述模型在对玻璃光学性能的计算都是建立在玻璃处于无应力状态这一基本假设之上,但在离子交换工艺制备 GRIN 棒透镜的过程中,由于  $M_{in}^+$  和  $M_{out}^+$  离子半径的失配引起的应力很难在离子交换温度完全消除,直接使用上述模型得到计算值与实验值可能会有一定的偏差。此外,色差估计函数是建立在折射率的抛物线规律分布的基础之上,而实际的 GRIN 棒透镜内部的折射率分布并非严格遵守抛物线规律,这也会使上述模型

的结果产生一定的偏差。但该模型作为低色差 GRIN 棒透镜的设计原则,仍不失其指导意义。

## 5 结论

在 Fantone 建立的 GRIN 棒透镜光学性质计算模型的基础之上,在光学玻璃常用的  $N_d - V$  图中直观地表示了低色差 GRIN 棒透镜的设计原则。分析表明,常用的光学玻璃性质范围内,可以通过  $Na^+ / Li^+$  交换或  $K^+ / Cs^+$  交换获得低色差 GRIN 棒透镜。

## 参考文献:

- [1] 李育林,傅晓理. 微光学[J]. 光学 精密工程, 1994, 2(1): 1- 8.
- [2] Mitsuhashi Y. Selfoc lenses: applications in DWDM and optical data links[J]. *SPIE*, 1999, 3666: 246- 251.
- [3] Atkinson L G, Moore D T, Sullo N J. Imaging capabilities of a long gradient\_index rod[J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(6): 1004- 1008.
- [4] Bally G V, Schmidhaus W, Sakowski H, *et al.* Gradient\_index optical system in holographic endoscopy[J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(11):1725- 1729.
- [5] Nishi H, Ichikawa H, Toyama M, *et al.* Gradient\_index objective for the compact disk system[J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(19):3340- 3344.
- [6] Koizumi K. Gradient\_index micro\_optic glasses based on ion\_exchange techniques[J]. *SPIE*, 1989, 1128: 74- 79.
- [7] Nishizawa K. Chromatic aberration of the Selfoc lens as an imaging system[J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19(7):1052- 1055.
- [8] Fujii K, Ogi S, Akazawa N. Gradient\_index rod lens with a high acceptance angle for color use by  $Na^+$  for  $Li^+$  exchange [J]. *Appl. Opt.*, 1994 33(34): 8087- 8093.
- [9] Krishna K S R, Sharma A. Chromatic aberrations of radial gradient\_index lenses. I. Theory[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(7): 1032- 1036.
- [10] Krishna K S R, Sharma A. Chromatic aberrations of radial gradient\_index lenses. II. Selfoc lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(7):1037- 1040.
- [11] Fantone S D. Refractive index and spectral model for gradient\_index materials[J]. *Appl. Opt.*, 1983, 22(3): 432- 440.
- [12] Stepien R, Kociszewski L, Pysz D. Technological problems in manufacturing glass for GRIN rod lens[J]. *SPIE*, 1996, 2943: 60- 68.

## Designing principles for a low chromatic aberration GRIN rod lens

HAO Yin\_lei, JIN Long\_wen, ZHAO Wen\_xing

( *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China* )

**Abstract:** In this article, the contributing factors to gradient index (GRIN) rod lens chromatic aberration are discussed, and according to Fantone model, the principles of selecting ion\_exchanging pairs and of determining base glass properties for a low chromatic aberration GRIN rod lens prepared by ion exchanging process are presented visually in the optical glass  $N_d-V$  map. The analysis shows, using the glass with typical optical properties as the base glass, both  $\text{Na}^+/\text{Li}^+$  exchanging and  $\text{K}^+/\text{Cs}^+$  exchanging are suitable for preparing a low chromatic aberration GRIN rod lens, while  $\text{K}^+/\text{Tl}^+$  exchanging and  $\text{Na}^+/\text{Ag}^+$  exchanging might produce a GRIN rod lens with much higher chromatic aberration. These principles are instructive in the fabrication of a low chromatic aberration GRIN rod lens.

**Key words:** GRIN; lens; chromatic aberration; ion exchanging

作者简介: 郝寅雷(1974-), 男, 河南省汤阴县人, 2001 年获中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位, 主要从事光学材料方面的研究工作。