

麦克斯韦鱼眼微球透镜的研究

张璞扬

(合肥经济技术学院基础部, 合肥 230052)

摘 要 自麦克斯韦鱼眼(Maxwell fish-eye)透镜理论模型提出后, 长期以来学术界一直以为它只是一种绝对光学仪器, 在实践中并没有应用的可能。但通过对麦克斯韦鱼眼微球透镜的理论研究表明, 在一定条件下, 它具有良好的成像性能和耦合效率。采用复合结构及多阶段离子交换工艺可制备出优质的麦克斯韦鱼眼球透镜, 在微小光学和集成光学具有诱人的应用前景。

关键词 麦克斯韦鱼眼, 球透镜, 梯度折射率, 像差, 复合结构, 离子交换。

1 引 言

近年来在光学领域中取得崭新成就之一的就是得到迅速发展的梯度折射率光学。梯度折射率光学在材料制备、测试、理论研究等方面, 尤其是在远距离通信、信息传感和以成像为目的的应用方面所显示的广阔前景, 越来越受到世界各国的重视。自 1979 年首次梯度折射率光学国际会议在美国罗彻斯特召开至今已开了 9 次, 梯度折射率光学无论是在理论研究、系统设计, 还是在材料制造测量以及技术应用上均得到迅猛发展。但对作为梯度折射率光学最早的历史标志——麦克斯韦鱼眼透镜的认识和应用价值并没有实质进展。

2 麦克斯韦鱼眼球透镜的光学性质

2.1 麦克斯韦鱼眼介质和鱼眼球透镜

1854 年著名物理学家麦克斯韦首次提出一球对称梯度折射率介质模型^[1], 其折射率分布函数为:

$$n(r) = \frac{n_0}{[1 + (r/a)^2]} \quad (1)$$

此即通常所说的麦克斯韦鱼眼透镜。式中 n_0 为球梯度中心 o 点的折射率, a 为分布常数, r 是介质中某点到中心 o 点的距离。这种透镜可把介质内任意一点无像散地成像到对应点上。它是除平面镜以外能无像差成像的理想光学模型, 是一种绝对光学仪器。但由于它占据整个无限空间, 且当 $r > a\sqrt{n_0 - 1}$ 时, 要求折射率 $n < 1$, 无法在全空间范围内实现, 因此人们考虑的只能是分布函数如(1)式所示, 但半径有限($r_0 \leq a\sqrt{n_0 - 1}$)的球体。对于这种球透镜, 国际学术界多年来一直以为: 从球外任意一点发出的光线, 经透射后将如图 1(a)所示, 沿着

完全不同的无共同焦点的方向射出。因而悲观地认为麦克斯韦鱼眼球只有理论上的奇特性，而在实践上几乎没有应用的可能^[2]。

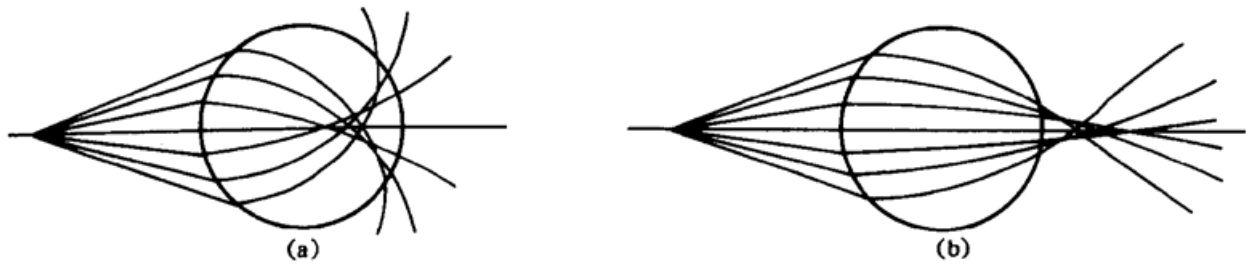
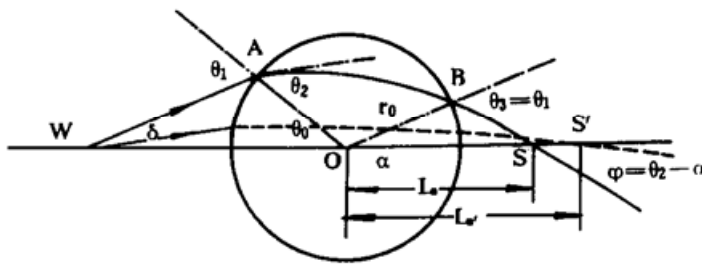


Fig. 1 Scattering and convergence of ray through Maxwell's fish eye lens from limited distance object point

但是，对麦克斯韦鱼眼球的深入研究表明，图 1(a) 的情况并不是必然的，在一定条件下，图 1(b) 情况也会发生。它不仅具有良好的成像性能和耦合效率，而且采用复合结构及多阶段离子交换工艺可制造出性能优异的麦克斯韦鱼眼球，显示了它在微小光学和集成光学系统中应用的诱人前景。

2.2 麦克斯韦鱼眼球的成像与像差

根据变折射率介质的光线理论^[3, 4]，研究麦克斯韦鱼眼球对无限远物点或有限远物点的



成像规律，可导出透镜对物点成像的像距及纵、横向球差的精确表达式。利用微机对各种参数进行严格的数值计算表明，麦克斯韦鱼眼球无论对无限远物点或有限远物点都可成像。其焦距很短且球差可以很小。在选取最佳透镜参数时，其球差可比通常的均匀折射率球形透镜小 2~ 3 个数量级。

Fig. 2 Vertical and horizontal aberration of Maxwell fish eye lens

例如对有限远物点成像^[5] (如图 2 所示)。麦克斯韦鱼眼球对于有限远点，球内光线轨迹满足方程：

$$\sin(\theta - \psi) = (r^2 - a^2)/2br \tag{2}$$

其中：

$$\begin{cases} b = - \sqrt{(r_0^2 + a^2)^2 - (2ar_0 \sin \theta_2)^2} / 2r_0 \sin \theta_2 \\ \psi = \arcsin [(r_0^2 - a^2)/2br_0] - \theta_0 \end{cases}$$

球内光线轨迹 AB 为一段圆弧。根据球差定义，该透镜对有限远点 W 的纵、横向球差为：

$$\Delta L = L_s - L'_s, \quad \Delta T = \Delta L \operatorname{tg}(\theta_3 - \alpha) \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} L_s = r_0 \sin \theta_1 / \sin(\theta_1 - \alpha) \\ L'_s = r_0 / [(2 - r_0/D) + 2(r_0^2 - a^2)/a^2 n_0], & D = d_0 + r_0 \\ \theta_1 = \arcsin [(d_0 + r_0) \sin \delta / r_0], & \alpha = \arcsin [(r_0^2 - a^2)/2br_0] + \psi \\ \theta_0 = \theta_1 - \delta, & \theta_2 = \arcsin(\sin \theta_1 / n_p), & n_p = n_0 / [1 + (r_0/a)^2] \end{cases}$$

在 $n_0 = 1.4 \sim 1.9$, Δn 取各种可能数值的条件下，对物距 $d_0 = r_0$ 物点的纵、横向球差进行严格计算，其主要结果表示表 1、表 2。为便于比较，在表中还一并计算出均匀折射率透镜

和具有双曲正割折射率分布的理想自聚焦棒对有限远物点的球差。

Table 1. Varying horizontal aberration of Maxwell fish-eye lens with the increase of n .
($n_0 = 1.60$, $d_0/r_0 = 1.0$)

angle δ	horizontal aberration ($\Delta T/r_0$)					
deg.	homogeneous ball	$\Delta n = 0.2$	$\Delta n = 0.3$	$\Delta n = 0.4$	$\Delta n = 0.45$	$\Delta n = 0.5$
1.5	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
3.0	-0.0011	-0.0003	0.0002	0.0000	0.0000	0.0006
4.5	-0.0036	-0.0012	-0.0006	-0.0001	0.0000	0.0013
6.0	-0.0086	-0.0028	-0.0013	-0.0003	0.0001	0.0023
7.5	-0.0169	-0.0056	-0.0027	-0.0007	0.0001	0.0036
9.0	-0.0297	-0.0100	-0.0048	-0.0012	0.0002	0.0052
10.5	-0.0480	-0.0162	-0.0078	-0.0020	0.0003	0.0071
12.0	-0.0733	-0.0250	-0.0121	-0.0031	0.0004	0.0094
13.5	-0.1070	-0.0369	-0.0181	-0.0048	0.0005	0.0121
15.0	-0.1512	-0.0529	-0.0262	-0.0071	0.0005	0.0152
16.5	-0.2085	-0.0739	-0.0370	-0.0103	0.0003	0.0187
18.0	-0.2821	-0.1016	-0.0516	-0.0150	-0.0002	0.0226
19.5	-0.3766	-0.1381	-0.0712	-0.0216	-0.0012	0.0270

Table 2. Comparison vertical, horizontal aberration of three lens.
($n_0 = 1.60$, $\Delta n = 0.448$, $d_0/r_0 = 1.0$)

angle δ	horizontal aberration ($\Delta T/r_0$)			vertical aberration ($\Delta L/r_0$)		
	homogeneous ball	GRIN ball	selfore	homogeneous ball	GRIN ball	selfore
1.5	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0100	0.0000	0.0000
3.0	-0.0011	0.0000	0.0000	-0.0399	0.0001	0.0001
4.5	-0.0036	0.0000	0.0000	-0.0892	0.0002	0.0002
6.0	-0.0086	0.0001	0.0001	-0.1574	0.0003	0.0004
7.5	-0.0169	0.0001	0.0001	-0.2432	0.0005	0.0006
9.0	-0.0207	0.0002	0.0002	-0.3457	0.0007	0.0010
10.5	-0.0480	0.0002	0.0004	-0.4636	0.0008	0.0014
12.0	-0.0733	0.0003	0.0006	-0.5954	0.0008	0.0020
13.5	-0.1070	0.0003	0.0009	-0.7396	0.0008	0.0028
15.0	-0.1512	0.0002	0.0014	-0.8947	0.0005	0.0037
16.5	-0.2085	-0.0001	0.0021	-1.0592	-0.0002	0.0050
18.0	-0.2821	-0.0007	0.0031	-1.2317	-0.0014	0.0067

表 1 给出了 $n_0 = 1.6$, $d_0 = r_0$ 时, 麦克斯韦鱼眼球横向球差随折射率差 Δn ($\Delta n = n_0 - n_p$, n_p : 球表面折射率) 增加的变化情况。显然, 麦克斯韦鱼眼球透镜间的横向球差[指绝对值, 作了归一化(除以 r_0) 处理, 下同], 随着 Δn 的增加而逐渐减少, 在 Δn 达到 0.45 左右时相应的横向球差 ΔT 最小; 当 Δn 超过此值后, ΔT 反而会变大。表中给出的均匀介质球透镜的横向球差比麦克斯韦鱼眼球在 Δn 取最佳值时, 要大 2~3 个数量级。表 2 列出的是麦克斯韦鱼眼球在 $n_0 = 1.6$, $\Delta n = 0.448$ 时, 对 $d_0 = r_0$ 的物点所具有的最小纵、横向球差。显然, 其值不仅比均匀介质球透镜小 2~3 个数量级, 且在短物距时也明显小于自聚焦棒。

在其它参数下所进行的计算也都一致地表明：当物距 $d_0 = r_0 \sim 1000r_0$ 和中心折射率 n_0 固定时，纵横向球差同步随折射率差 Δn 增加而逐渐减小。存在一个 Δn 的最佳值，此时纵横向球差 ΔL 和 ΔT 最小，当 Δn 超过最佳值后，纵横向球差反而会变坏。

2.3 麦克斯韦鱼眼球的耦合效率

由于麦克斯韦鱼眼球焦距短，像差比相应均匀介质球透镜小 2 个数量级，可将这种透镜应用于光纤-透镜(组)-光纤耦合系统中。计算表明，无论是单透镜耦合系统(图 3(a))，或是双透镜耦合系统(图 3(b))，其耦合效率都高于由均匀介质球所构成的相应系统^[6]。

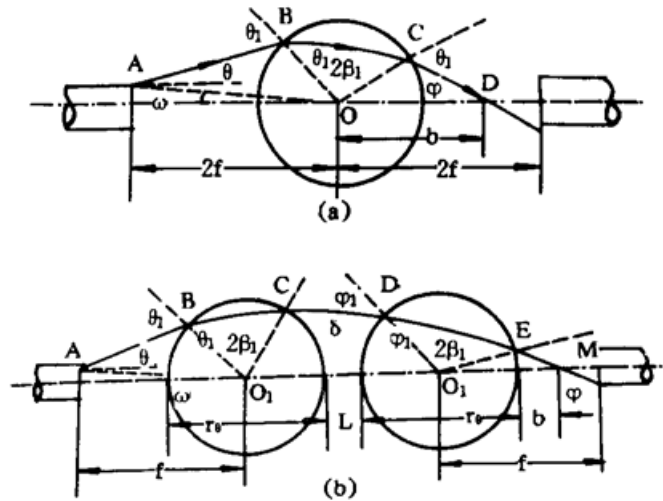


Fig. 3 (a) Single fish eye lens couple, (b) Double fish eye lens couple

麦克斯韦鱼眼球透镜的焦距 $f = n_0 r_0 / 2 [n_0 - 1 + (r_0/a)^2]$ ，为毫米(或更小)量级，数值非常小，与之耦合的常用多模光纤不能再视为点光源，应看作是半径为 a_0 的发光面。如图 3(a)所示，首先考查左侧光纤端面出射光束，经透镜耦合到另一侧光纤端面处的光斑半径为 C ，

$$C = (2f - b) \tan \varphi \tag{4}$$

其中：

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi &= 2(\theta_1 + \beta_1) - \theta - \pi \\ \beta_1 &= \arccos \left[\frac{(a^2 - r_0^2) \sin \theta_2}{\sqrt{(r_0^2 + a^2)^2 - (2ar_0 \sin \theta_2)^2}} \right] \\ b &= (\sin \theta_1 / \sin \varphi) r_0 \\ \theta_1 &= \arcsin \{ [\sqrt{a_0^2 + (2f)^2} / r_0] \sin(\theta + \omega) \} \\ \theta_2 &= \arcsin(\sin \theta_1 / n_0), \quad \omega = \arctan(a_0 / 2f) \end{aligned} \right.$$

只要已知 a_0 (内芯半径)、 n_0 、 a (或 n_p)、 θ (为光纤端面最外缘发出的光线与光轴夹角)及 r_0 即可求得 C 值。

根据微球透镜耦合效率公式^[7]，对右侧阶跃型或渐变型光纤计算，不考虑轴偏、倾斜、间距等失配因素的耦合效率极限 η_s 和 η_q ：

$$\eta_s = 1 - 0.19 C / (2a_0), \quad \eta_q = 1 - 0.21 C / (2a_0)$$

对于单、双透镜光纤耦合系统，在给定 $n_0 = 1.46$ 、 $n_p = 1.248$ 、 $\sin \theta = 0.21$ 时，计算结果如表 3、表 4 所示(所有长度量均归一化表示)。

由表 3、表 4 看出，麦克斯韦鱼眼球比普通的均匀介质球透镜的耦合效率明显提高。若选择最佳参数，单个麦克斯韦鱼眼球透镜比单个匀质微球透镜的耦合效率提高了 2~ 10 倍。而双麦克斯韦鱼眼球比双匀质微球透镜耦合的效率还要高出 5~ 10% 左右。

Table 3. Single fish-eye lens couple

a_0/r_0		0.1	0.2	0.3
fish-eye lens	η_s	0.8603	0.8597	0.8435
	η_q	0.8456	0.8450	0.8270
homogeneous lens	η_s	0.4277	0.4575	0.1683
	η_g	0.3674	0.4004	0.0807

Table 4. Double fish-eye lens couple

a_0/r_0		0.2		0.3	
L/r_0		0.5	1.0	0.1	0.5
fish-eye lens	η_s	0.9032	0.9570	0.9085	0.9550
	η_q	0.8930	0.9525	0.8989	0.9502
homogeneous lens	η_s	0.8760	0.8768	0.8675	0.8687
	η_g	0.8630	0.8639	0.8536	0.8549

3 麦克斯韦鱼眼球的复合结构

从上面提供的数据表明, 置于真空或空气中的麦克斯韦鱼眼球若要以最小的像差成像, 往往要求有较大的折射率值 Δn , 特别是对近距物点以最小的像差成像时, 要求 Δn 高达 0.4 以上。而用目前的离子交换工艺所制成的梯度折射率器件, Δn 一般在 0.3 以下。若将此类球透镜置于低折射率均匀介质组成的复合结构中, 则可在保持最小像差的前提下, 大幅度减小其对 Δn 的要求^[8]。

复合结构的最一般形式如图 4(a) 所示, 中部是一半径 r_0 的麦克斯韦鱼眼球, 其中心折射率为 n_0 , 表面折射率为 n_p ; 周围的均匀介质分为两部分, 物方一侧的折射率为 n_1 , 像方一侧的折射率为 n_2 (其中: $2 > n_0 > n_p \geq 1$, n_1 或 $n_2 \geq 1$)。图 4(b) 是这种复合结构折射率沿径向分布的示意图。若 $n_1 = n_2$, 此结构简化为将麦克斯韦鱼眼球透镜置于一种低折射率均匀介质中的情况。当 $n_1 = n_2 = 1$, 其结构即退化为单个麦克斯韦鱼眼球置于空气或真空中情况。

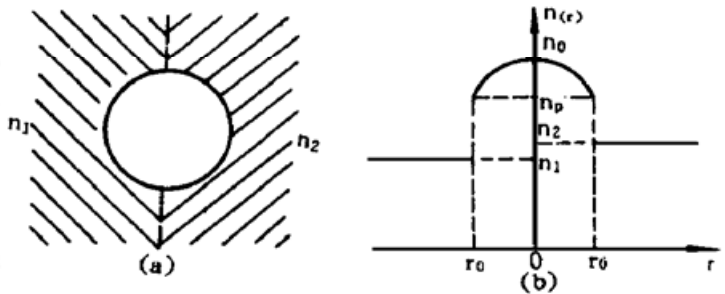


Fig. 4 Compound structure of Maxwell fish eye lens

与(2)、(3)式相类似, 通过对实际光线的严格计算, 就可得到这种麦克斯韦鱼眼球透镜复合结构在极坐标系下光线轨迹的计算公式, 以及对有限远物点成像的轴向、垂轴球差。在 $n_1 = n_2 = 1.0 \sim 1.8$, $n_0 = 1.4 \sim 1.9$, $\Delta n = 0.05 \sim 0.3$ 范围内, 对各种距离物点的成像进行广泛计算表明, 可在保持最小像差的前提下, 大幅度缩小其对 Δn 的要求。

表 5、表 6 示出在 $n_1 = n_2$, $n_0 = 1.60$, Δn 为不同数值时, 麦克斯韦鱼眼球的复合结构对约化物距 d_0/r_0 为 1.0 和 5.0 的物点成像, 所具有的最小垂轴约化球差 $\Delta T/r_0$ 分布及所要求的 n_1 、 n_2 最佳值数值。为便于比较, 表中还给出了相应的均匀球和具有最佳参数的单个麦克斯韦鱼眼球置于真空时对同样距离的物点所具有的垂轴约化球差。显然, 置于真空中的麦克斯韦鱼眼球, 只有当 Δn 高达 0.449 和 0.325 时, 方可分别对约化物距为 1.0 和 5.0 的物点以最小像差成像。而对于复合结构, 只要将 $n_0 = 1.60$, Δn 等于 0.25、0.20、0.15 或 0.10 的麦克斯韦鱼眼球分别置于相应均匀介质中, 均可实现最小像差成像。在其它参数条件下计算结果也都如此, 而且在最佳参数条件下复合结构具有的约化球差仍比均匀介质球小约 2 个数量级。

Table 5. Smallest vertical aberration of Maxwell fish eye compound structure in different homogeneous medium. ($n_0 = 1.60$, distance: $d_0/\tau_0 = 1.0$)

angle δ	vertical aberration ($\Delta T/r_0$)				
deg.	homogeneous ball	$n_1 = 1.228$ $n_2 = 1.228$ $\Delta n = 0.20$	$n_1 = 1.177$ $n_2 = 1.177$ $\Delta n = 0.25$	$n_1 = 1.133$ $n_2 = 1.133$ $\Delta n = 0.30$	$n_1 = 1.00$ $n_2 = 1.00$ $\Delta n = 0.449$
1.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0	-0.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.0	-0.0025	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
5.0	-0.0049	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000
6.0	-0.0086	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
7.0	-0.0137	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001
8.0	-0.0207	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001
9.0	-0.0297	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
10.0	-0.0412	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002
11.0	-0.0556	0.0001	0.0001	0.0003	0.0003
12.0	-0.0733	-0.0003	0.0000	0.0003	0.0003
13.0	-0.0947	-0.0009	-0.0004	-0.0002	0.0004
14.0	-0.1205	-0.0021	-0.0009	0.0000	0.0004
15.0	-0.1512	-0.0038	-0.0019	-0.0004	0.0003
16.0	-0.1878	-0.0064	-0.0033	-0.0011	0.0002
17.0	-0.2310	-0.0103	-0.0053	-0.0021	0.0000
18.0	-0.2821	-0.0157	-0.0082	-0.0036	-0.0004
distance	4.000	5.426	3.320	2.436	1.356

Table 6. Smallest vertical aberration of Maxwell fish eye compound structure in different homogeneous medium. ($n_0 = 1.60$, distance: $d_0/\tau_0 = 5.0$)

angle δ	vertical aberration ($\Delta T/r_0$)					
deg.	homogeneous ball	$n_1 = 1.383$ $n_2 = 1.383$ $\Delta n = 0.10$	$n_1 = 1.303$ $n_2 = 1.303$ $\Delta n = 0.15$	$n_1 = 1.229$ $n_2 = 1.229$ $\Delta n = 0.20$	$n_1 = 1.062$ $n_2 = 1.062$ $\Delta n = 0.30$	$n_1 = 1.00$ $n_2 = 1.00$ $\Delta n = 0.325$
0.5	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.0	-0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.5	-0.0015	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
2.0	-0.0035	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
2.5	-0.0070	0.0003	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002
3.0	-0.0123	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002
3.5	-0.0200	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
4.0	-0.0307	0.0000	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003
4.5	-0.0452	-0.0008	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0002
5.0	-0.0646	-0.0025	-0.0013	-0.0007	-0.0005	-0.0001
distance	1.714	4.549	2.680	1.935	1.231	1.107

对于 $n_1 \neq n_2$ 的更一般情况, 由于增加了一独立变量, 总共有 n_0 、 n_p (或 Δn)、 n_1 、 n_2 和约化物距 d_0/r_0 5 个参数可供自由选择, 应用的范围更加广泛了。其计算结果仍是一致的。这种

复合结构, 由于大幅度减小其对 Δn 的要求, 在集成光学和微小光学系统中尤其应用价值。

4 多阶段离子交换工艺

对于球对称梯度折射率光学器件, 包括麦克斯韦鱼眼球透镜, 由于光线必须从球表面入射, 贯穿球体后从另一面射出, 因而要求梯度折射率分布在自球心至球表面的全程范围内与所需分布严格符合, 技术要求远远高于径向梯度折射率器件, 用目前的离子交换技术无法获得所需要的球对称梯度折射率剖面分布。这就需要探索能够精确控制球对称梯度折射率透镜折射率分布曲线的新工艺。下面介绍的“多阶段离子交换工艺”, 就是一种卓有成效的方法^[9]。

多阶段离子交换工艺是使用不同的浓度混合熔盐进行多阶段离子交换, 来制备球对称梯度折射率球形器件。该方法的主要思想是: 根据扩散方程, 除通过控制离子交换进行的时间 t 外, 还可以通过选择各种边界条件来影响梯度折射率剖面分布的形成。其主要过程是将含有 Tl^+ 或 Cs^+ 离子的基质玻璃微球置于混合熔盐中, 并分阶段调整熔盐中有关离子(Tl^+ 等) 的浓度, 即: 先用掺有 Tl^+ 或 Cs^+ 离子浓度为 K_1C_0 的熔盐交换一些时间 t_1 , 再用浓度为 K_2C_0 的熔盐交换一些时间 t_2 , ……

扩散过程相应的第一阶段微分方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \frac{\partial C}{\partial r}) \quad (5)$$

$$C = C_0, \quad (0 \leq r < r_0, t = 0)$$

$$C = K_1C_0, \quad (r = r_0, t > 0)$$

边界条件是非齐次的, 经第一时间 t_1 的离子交换后球内浓度分布为:

$$C_1(r, t) = K_1C_0 + 2C_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} (1 - K_1) \exp[-(n\pi)^2 T_1] \frac{\sin(n\pi r/r_0)}{n\pi r/r_0}$$

用浓度分布 $C_1(r, t)$ 作为初始条件, 再进行第二阶段离子交换。

$$C_2(r, t) = K_2C_0 + 2C_0 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} [(K_1 - K_2) + (1 - K_1) \exp[-(n\pi)^2 T_1]] \times \exp[-(n\pi)^2 T_2] \frac{\sin(n\pi r/r_0)}{n\pi r/r_0}$$

依此类推, 将最后的透镜内 Tl^+ 或 Cs^+ 离子浓度分布 $C(r, t)$ 代入下式, 即可得透镜中的折射率梯度分布:

$$n(r) = N_e + (N_s - N_e) C(r, t)/C_0$$

$$N_e = N_s + (N_{in} - N_{out}) C_0/m$$

其中: N_s 是基质玻璃的初始折射率, N_{in} 和 N_{out} 分别是在离子交换过程中取代和被取代的两种离子的折射率, m 是单位体积中各组分分子总数。只要适当选择工艺参数, 就可获得所需的梯度折射率剖面分布。图 5 所表示的就是用离子交换新技术所得梯度折射率与麦克斯韦鱼眼球分布的相对偏差。图中曲线 2、3、4 分别表示在最佳

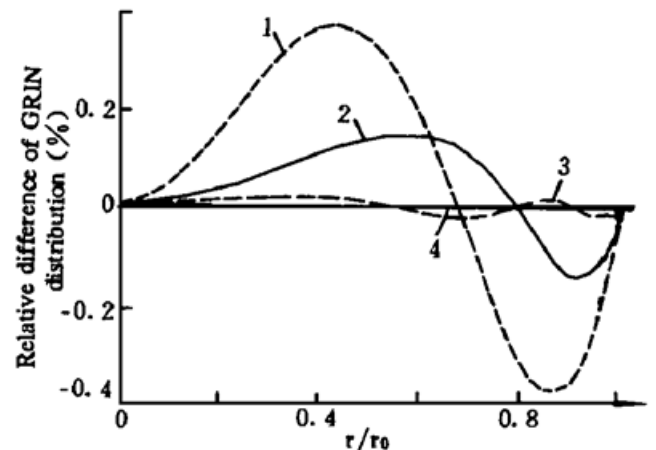


Fig. 5 Relative differences of GRIN distributions obtained with new ion-exchange method to Maxwell's fish-eye distribution

工艺条件下按二、三、四阶段所获得的梯度折射率分布的相对偏差,最大相对偏差分别减小到 0.15%、0.023% 和 0.0064%。为便于比较,曲线 1 所表示的是用传统离子交换法所获得的最佳分布与麦克斯韦鱼眼球分布的相对偏差,其最大相对偏差不小于 0.38%。不难想象,如果继续增加离子交换的阶段数,所得梯度折射率分布会充分地逼近理想曲线。在批量生产加工时,若能自动记录扩散过程中熔盐温度的变化曲线,即可根据预先测得的温度-扩散系数关系用微机随时算得扩散系数变化曲线和扩散时间,以实现工艺过程精确自动控制,确保成品的高质量。

结束语 通过对麦克斯韦鱼眼球透镜的系统论述可见,麦克斯韦鱼眼球不仅因其几何形状高度对称,易加工,易调整,且因其不存在斜光线,成像性能好,直径小(可小于 0.1 mm),重量轻(可小于 50 μg)、焦距短(或位于端面上)、耦合效率高,加之其折射率分布和光线轨迹都能用较简单的解析式表示,从而在微小光学和集成光学中具有重要的应用前景。因此,在传统光学及其技术发生巨大变革的今天,应对麦克斯韦鱼眼球有个重新认识,拂去覆盖在其身上尘封多年的尘土,使之焕发更加璀璨的光采。

感谢安徽大学易佑民教授的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] M. Born, E. Wolf, *The Principles of Optics*. Pergamon Press, 1959: 237~ 239
- [2] E. W. Marchand, *Gradient Index Optics*. New York, Academic Press, 1978: 19~ 45
- [3] 乔亚天, 梯度折射率光学. 北京: 科学出版社, 1991: 134~ 135
- [4] 刘德森, 高应俊, 变折射率介质的物理基础. 北京: 国防工业出版社, 1991: 388~ 391
- [5] 易佑民, 章国顺, Maxwell 鱼眼微球透镜对有限远物点的成像及其像差. 量子电子学, 1995, 12(2): 154~ 159
- [6] 章国顺, Maxwell 鱼眼微球透镜在光纤系统中的耦合效率极限. 量子电子学, 1996, 13(4): 346~ 349
- [7] 邹自立, 唐明光, 超微球透镜的耦合效率极限. 光学学报, 1991, 11(8): 733~ 737
- [8] 易佑民, 张璞扬, 麦克斯韦鱼眼球透镜的一种复合结构. 光学技术, 1995, 4: 38~ 42
- [9] 易佑民, 章国顺, 制作球对称梯度折射率微球透镜精确控制折射率剖面形成的方法. 硅酸盐学报, 1995, 23(5): 559~ 564

Study of Maxwell Fish-Eye Microspheric Lens

Zhang Puyan

(Basic Course Department, Hefei Institute of Economics and Technology, Hefei 230052)

(Received 4 December 1996; revised 31 March 1997)

Abstract The theoretical model of the Maxwell fish-eye sphere lens has long been regarded as an absolute optical instrument without practical application since it was proposed. But the study on the theory of Maxwell fish-eye microspheric lens shows that on certain condition it has fine image formation ability and coupling efficiency. Through multiple-stage ion-exchange technology, Maxwell fish-eye microspheric lens of high quality could be produced, which has a promising practical application in micro-optics and integrated optics.

Key words Maxwell' "fish-eye", sphere lens, gradient index, aberration, compound structure, ion-exchange.