

# 球面波导短程透镜的球差

许承杰 范俊清 鲁平  
(中国科学院长春物理研究所)

## 提 要

本文是对球面波导短程透镜球差的初步研究,报道一种测量球差的方法,对玻璃波导球面短程透镜的球差实验测量表明,测量结果与理论预计基本相符。

波导短程透镜有球面和非球面两种,在光耦合和光信息处理中有广泛应用,它们是集成光学的重要器件。本文报道球面波导短程透镜球差的研究,包括波导透镜的制备及其球差的测量。实验表明,我们采用的制备和测量方法基本可行,实验与理论符合。

## 一、透镜的光线追迹描述

设波导透镜及坐标系如图1所示。波导平面  $M_1$  和与之相联结的轴对称旋转曲面  $M_2$  组成一复合曲面  $M$ , 透镜由  $M_2$  规定。用柱坐标  $\rho, \varphi, z=f(\rho)$  示踪曲面  $M$  上的点。假定光线的传播被限制在曲面  $M$  内。如果入射到透镜上点  $P$  的光线的出射点为  $Q$ , 则在曲面  $M_2$  中  $P, Q$  两点间的光线路径由费马原理决定

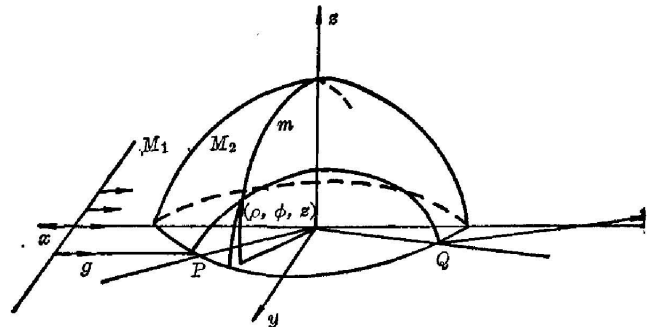


图1 短程透镜的坐标表示

Fig. 1 Coordinate system for a geodesic lens

$$\delta \int_P^Q n dl = 0, \quad (1)$$

式中,  $n$  为常数, 表示波导有效折射率,  $dl$  是曲面上光线路程的弧元。由于

$$dl = \left[ 1 + \left( \frac{dz}{d\rho} \right)^2 + \rho^2 \left( \frac{d\varphi}{d\rho} \right)^2 \right]^{1/2} d\rho, \quad (2)$$

据尤拉(Euler)方程得

$$\frac{d}{d\varphi'} [1 + z'^2 + \rho^2 \varphi'^2]^{1/2} = h, \quad (3)$$

$$h = \rho_0 \sin \alpha, \quad (4)$$

式中,  $h$  是常数,  $\rho_0$  是  $M_2$  在  $M_1$  平面上投影的半径,  $\alpha$  是起始短程线  $g$  与子午线  $m$  的交角,  $\varphi'$  表示  $\varphi$  对  $\rho$  的微商。利用(3)式得

$$d\varphi = \frac{h(1+z'^2)^{1/2}}{\rho(\rho^2-h^2)^{1/2}} d\rho, \quad (5)$$

将短程线  $g$  投影到波导平面上(见图 2), 可见  $\varphi$  由  $\varphi_{in}$  增大到  $\varphi_{in} + \varphi_h$  时, 相应的  $\rho$  由  $\rho_0$  减小到  $h$ , 所以

$$\varphi_h = -h \int_{\rho_0}^h \left( \frac{1+z'^2}{\rho^2-h^2} \right)^{1/2} \frac{d\rho}{\rho}, \quad (6)$$

而在  $Q$  点的出射方位角  $\varphi_{out}$  为

$$\varphi_{out} = \varphi_{in} + 2|\varphi_h|. \quad (7)$$

又, 短程线  $g$  在  $Q$  点附近的单位切线矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{t}(\rho, \varphi) = & \left[ \frac{\cos \varphi}{\rho} \left( \frac{\rho^2-h^2}{1+z'^2} \right)^{1/2} - \frac{h \sin \varphi}{\rho} \right] \mathbf{e}_1 + \left[ \frac{\sin \varphi}{\rho} \left( \frac{\rho^2-h^2}{1+z'^2} \right)^{1/2} \right. \\ & \left. + \frac{h \cos \varphi}{\rho} \right] \mathbf{e}_2 + \left[ -\frac{z'}{\rho} \left( \frac{\rho^2-h^2}{1+z'^2} \right)^{1/2} \right] \mathbf{e}_3, \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{e}_j$  是沿第  $j$  轴的单位矢量。由此可得

$$\frac{f}{\rho_0} = \left| \frac{\sin \varphi_{in}}{\sin(\varphi_{in} + \varphi_{out})} \right|, \quad (9)$$

其中  $f$  为出射光线与光轴交点距透镜中心的距离。

对  $M_2$  为球形凹面的情形, 由(6)式和(7)式得

$$\varphi_{out} = \varphi_{in} + \left| \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[ \frac{\rho_0^2 \sin^3 \varphi_{in} + (1-2 \sin^3 \varphi_{in}) R^3}{\rho_0^2 \sin^3 \varphi_{in} - R^2} \right] \right|, \quad (10)$$

式中,  $R$  为球的半径, 对近轴光线, (9)式可近似为

$$\lim_{\varphi_{in} \rightarrow 0} \frac{f}{\rho_0} = \frac{1}{2(1-\cos \theta)} = \frac{R}{2(R - \sqrt{R^2 - \rho_0^2})}, \quad (11)$$

式中,  $\theta$  是极角(见图 3)。公式(9)~(11)可用于估计球面凹波导透镜的焦距大小及球差。

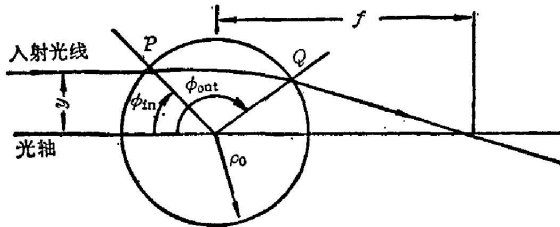


图 2 短程线在波导平面上的投影图

Fig. 2 Projective view of geodesic line on the waveguide plane

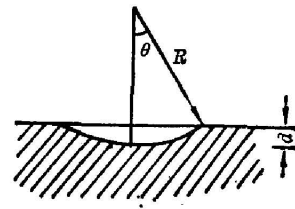


图 3 球凹面图

Fig. 3 Spherical depression

## 二、透镜的制备

用  $30 \times 60 \times 3$  mm 的  $K_7$  或  $K_9$  玻璃作样品衬底, 先用常规光学研磨方法在其上制出球凹面, 然后再将球面与波导平面的交棱抛圆, 使成为具有一定曲率的圆环面。把这样形成的样品浸入熔融的硝酸银中, 在  $310^\circ\text{C}$  温度下进行离子交换<sup>[4]</sup>  $2 \sim 8$  hr, 冷却后清洗干净即制成球面波导短程透镜。这里报道的选用样品是用  $K_7$  玻璃衬底制备的,  $\rho_0$  为  $10.07$  mm, 深度为  $1.30$  mm, 由(11)式计算的近似焦距为  $20.14$  mm, 波导可维持 10 个模式。

### 三、球差的测量

由(9)和(10)式知,球面波导短程透镜存在球差,即以不同  $\varphi_{in}$  角入射的光线,其出射光线与光轴交于不同位置。实验对我们制备的球面波导短程透镜的球差进行了测量。测量方法是:先在波导背面固定一张带尺寸刻度的坐标纸,然后把它放到夹具上,利用棱镜耦合器将 He-Ne 激光束耦合入波导,移动样品架让光束在距光轴不同位置通过凹面透镜,用平行光管直接观测单条出射光线与刻度纸上标志光轴的刻度线的交点位置。由于我们测量的样品是多模的,测试中观察到光线经过透镜后往往分成多条光束。对此测量时以焦距最短的零阶模光束为准。测量结果表示在图 4 中。图中,曲线表示由(9)和(10)式得到的理论曲线 ( $\rho_0=5.04\text{ mm}$ ,  $R=10.4\text{ mm}$ ),  $\Delta$  表示实际测量值。由此图可以看到,实验测量结果与理论曲线基本相符,表明球面波导短程透镜的球差是较大的。当改变入射光线与光轴的距离  $y$  时,焦距随  $y$  的增加而增大,这与常规透镜相反,如图 5 所示。由图 4 还可看出,仅在  $|y/\rho_0| < 0.2$  的情形球差较小。

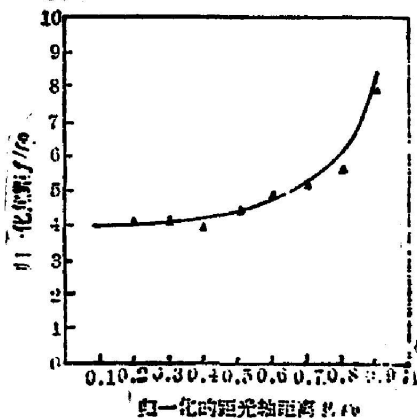


图 4  $f/\rho_0 \sim y/\rho_0$  的曲线和测量结果  
Fig. 4 Curve and measured results of  $f/\rho_0$  vs.  $y/\rho_0$

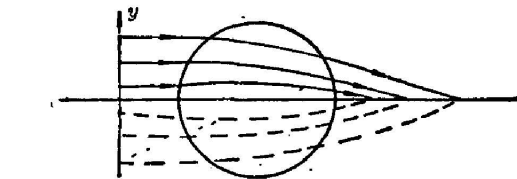


图 5 球面短程透镜球差示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of spherical aberration of a spherical geodesic lens

最后,应当说明,本文在理论计算中没有考虑光滑过渡边缘的效应,这个光滑边缘的曲率半径近似为  $0.1\rho_0$ 。不过,在实验中发现,对近轴入射光线,它的影响不大。可以预料,如果对实验加以改进,采用单模波导,并考虑光滑过渡区的效应,可能会得到更好的实验结果。这里报道的测量球差方法,也适用于其它有像差波导透镜的测量。

### 参 考 文 献

- [1] J. C. Bradley, E. C. Marlarkey et al.; «SPIE Vol. 176, Guided Wave Optical Systems and Devices», 1979, 75~81.
- [2] B. Chen, O. G. Ramer; A D-A069711, 1979.
- [3] E. Spiller, J. S. Harper; Appl. Opt., 1974, 13, No. 9, 2105.
- [4] G. Stewart et al.; IEEE J. Quantum Electron., 1977, QE-13, No. 4, 192.

## Spherical aberrations of spherical waveguide geodesic lenses

XU CHENGJIE FAN JUNQING AND LU PING

*(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)*

(Received 5 November 1984; revised 10 June 1985)

### Abstract

A method for measuring spherical aberrations of spherical waveguide geodesic lenses is reported. Results of experiments for measuring spherical aberrations of geodesic lenses fabricated on glass waveguides are in general agreement with theoretical calculations.