

# 光波导短程透镜焦点特性的分析\*

刘支华 石邦任 武继江 孔梅

(长春理工大学, 长春 130022)

**摘要** 利用波导短程透镜的几何光学性质, 给出了短程透镜的等效光线追迹图和相位传递函数, 得到短程透镜焦点的模场分布表达式. 理论得出的焦斑光强分布和实验测得的光强分布一致.

**关键词** 导波光学; 短程透镜; 焦斑; 模场分布

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A

## 0 引言

短程透镜在过去三十年里一直是波导透镜光学研究的热点, 因球面短程透镜的像差较大, 后期研究集中在非球面短程透镜的理论. 以 Sottini 等人为代表的一般解析法给出了非球面面型的最优解, 通过非球面面型消除了透镜球差<sup>[1]</sup>. 但在透镜过渡区两端引入了曲率奇点<sup>[2]</sup>. 文献[3]通过过渡区子午线导数函数的引用得到最优化的短程透镜的理论设计, 使卷边与平面波导连接处的曲率半径达到无限大, 卷边与实际透镜连接处曲率半径为有限值. 成功地解决了短程透镜的曲率奇点问题, 完善了 Sottini 等提出的关于求解短程透镜问题的一般解析解. 虽然非球面短程透镜有着无像差、不受衬底材料的限制及低损耗的优点, 但因加工困难、周期长不能适应大规模生产而使其后续研究几乎为零. 随着加工工艺的改进和加工方法的提高, 短程透镜会重新受到科学家的关注. 本文在最优化短程透镜<sup>[3-9]</sup>基础上建立了短程透镜的焦斑模场分布数学模型, 给出了模场分布图, 通过实验验证了理论模型的正确性.

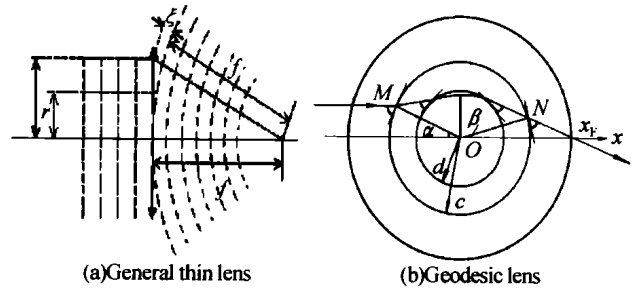


图1 光线追迹图

Fig. 1 Light trail of lens

以看到该透镜主面为平面, 焦距  $f$  为定值, 变化的是波的相位因子.

$$\gamma(r) = -\frac{k}{2f}(\rho^2 - r^2) \quad (1)$$

图1(b)是短程透镜的光线追迹图. 文献[6,7]给出了短程透镜焦距  $f$  的表达式

$$f = \frac{c \sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} \quad (3)$$

式中,  $c$  为短程透镜凹坑口径纬圈半径,  $(\pi - \alpha)$  是入射点极角, 随入射光位置不同而变化,  $\beta$  为该光线经透镜后的出射点极角.  $f$  是  $\alpha, \beta$  的函数. 波导短程透镜的主面表达式为<sup>[6]</sup>

$$(x - f)^2 + y^2 = f^2 \quad (2)$$

由式(2)可画出短程透镜的等效光线追迹图如图2. 图中,  $AD$  是波导短程透镜的等效透镜第二主面, 由式(2)知它是以  $O$  为圆心, 半径为  $f$  所做圆上的一段. 距光轴距离为  $r$  的光线和等效主面的交点为  $A$ , 此时的透镜焦距为  $OE$ , 在该焦距下的相位差为

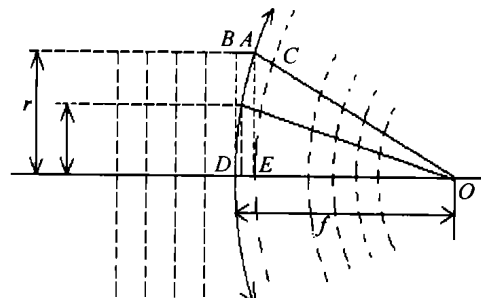


图2 短程透镜的等效光线追迹图

Fig. 2 Equivalent light trail of geodesic lens

$AC = DE$ , 所以相位差实际上是该点焦距和透镜最大焦距之间的差值. 图中的  $D$  点是透镜的主点,

## 1 理论分析

短程透镜的近场分布为一椭圆光斑, 其模场近似高斯分布. 朱京平等<sup>[6]</sup>研究了波导短程透镜的焦点和主面, 得出透镜有两个主面, 并给出了主面的表达式. 可以看出, 短程透镜类似气体透镜, 其主面不是平面而是一变形的旋转曲面, 因两个主面不重合, 所以可以等效为厚透镜, 同时两主面的主点重合<sup>[6]</sup>, 所以该等效厚透镜非常特殊, 在求传输函数时可以按薄透镜的方法处理.

首先看一下普通薄透镜的光线追迹图. 图1(a)中薄透镜是一个相位变换器, 入射平面波经透镜后变成球面波会聚到透镜后距离  $f$  的焦点处. 可

\* 国防科技预研基金项目资助

Tel: 0431-5385931-2573 Email: coupler2003ok@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-03-24

过  $D$  点做光轴的垂直线和平面入射光交于  $B$  点. 此时有  $DE = BA$ . 通过这一系列的变化, 我们把变化的焦距变为固定值, 而该位置的相位差转变为  $BA$ . 相当于把普通薄透镜紧靠透镜后的相位变化挪到透镜前做了. 因此我们认为短程透镜在这里仍然是起一个相位变换器的作用. 由图 2 中的几何关系可知,  $\xi + f_r = f, f^2 = r^2 + f_r^2$ , 式中,  $\xi = BA, f_r = OE$ . 因  $\xi \ll f_r$ , 所以有

$$\delta = \frac{r^2}{2f_r} = \frac{r^2}{2\sqrt{f^2 - r^2}} \quad (4)$$

该透镜的相位传递函数可表示为

$$t(r) = \exp\left(ik \frac{r^2}{2\sqrt{f^2 - r^2}}\right) \quad (5)$$

如图 3, 假设理想射入短程透镜的平面光模场为

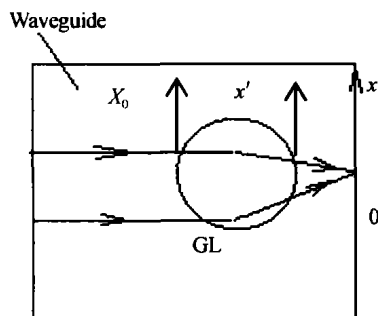


图 3 光经过短程透镜前后的场分布坐标  
Fig. 3 Mode distributing coordinates of geodesic lens

$$p(x_0) = \begin{cases} 1/\sqrt{\rho} & |x_0| < \rho \\ 0 & |x_0| > \rho \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  为短程透镜孔径长. 则根据菲涅耳衍射公式在短程透镜焦点处的模场为

$$U(x) = \frac{\exp(ikf)}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} p(x_0) t(x') \cdot \exp\left[\frac{ik}{2f}(x - x')^2\right] dx' \quad (7)$$

式(7)中,  $f$  是短程透镜焦距,  $k$  为波矢量,  $\lambda$  是光波波长. 把式(5)、(6)代入式(7)即可求得短程透镜焦点处的模场分布.

## 2 实验及讨论

实验用的短程透镜是基于无曲率奇点非球面波导短程透镜优化理论设计的. 透镜参数为焦距 20 mm, 孔径 8 mm, 过渡区 10 mm, 透镜通过的光波波长为 0.6328  $\mu\text{m}$ . 将该透镜的参数代入式(7), 利用 MATLAB 软件做数值解并绘出该透镜的焦斑模场分布如图 4. 焦斑功率分布如图 5, 图中  $D$  是光阑尺寸. 理论估计焦点光斑直径为 2.8  $\mu\text{m}$ .

同时对短程透镜的焦斑大小进行了实验测试. 首先将透镜样品端面经过细致地抛光, 透镜焦点光斑测试方法见文献[8]. 扩束准直激光束经过一方

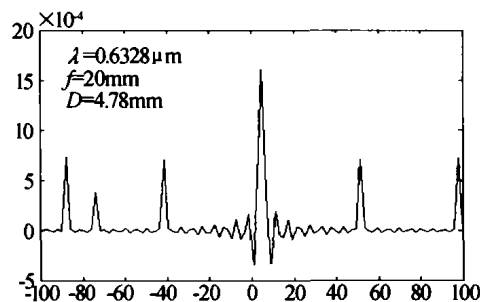


图 4 短程透镜焦斑模场分布图  
Fig. 4 The focal spot distribution of geodesic lens

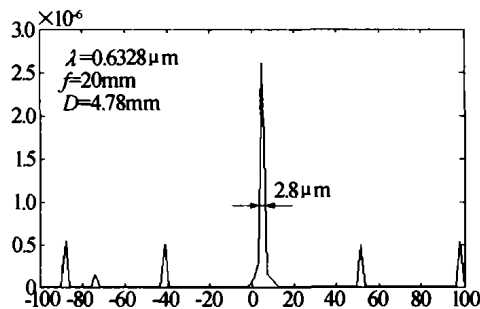


图 5 短程透镜焦斑功率分布图  
Fig. 5 Focal spot intensity distribution of geodesic lens

孔后, 由柱面镜聚焦, 经金红石棱镜耦合器进入波导透镜, 导波光束通过短程透镜后, 聚焦于出射端面上, 该端面恰好是焦面位置. 焦点光斑经显微镜放大成像在 CCD 探测器阵列. 图 6 是 F/2.5 短程透镜样品衍射光斑的光强分布, 图中横坐标每小格表示两个 CCD 单元, 线度为 28  $\mu\text{m}$ . 实际测得焦点光斑半功率点宽度为 3.3  $\mu\text{m}$ , 估算得光斑直径 ( $1/e$  光强分布处宽度) 为 4.5  $\mu\text{m}$ . 从图 5 和图 6 可以看出, 实验测得的短程透镜焦斑光强分布和理论计算得出的光强分布完全一致. 实测的焦点光斑直径大于理论值, 是由于加工面型误差和测量光学系统带来的测量误差引起的.

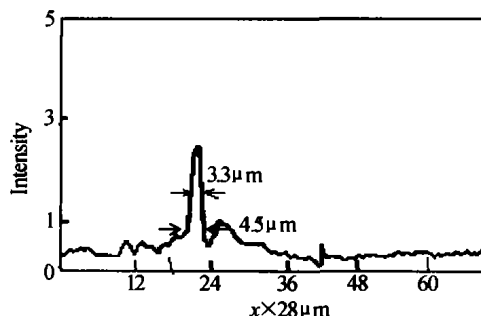


图 6 实验测得的短程透镜焦斑光强分布  
Fig. 6 Intensity distribution of focal spot in experiments

图 7, 图 8, 图 9 是分别改变入射光波长及短程透镜的焦距, 利用前面推出的短程透镜焦斑模场分布函数  $U(x)$  得到的焦斑光强分布图. 比较图 5, 7, 8, 9, 我们发现: 1) 短程透镜的参数不变时, 入射光波长越长, 焦斑直径越大. 2) 入射光波长不变时, 短程透镜的焦距越长, 焦斑直径越大.

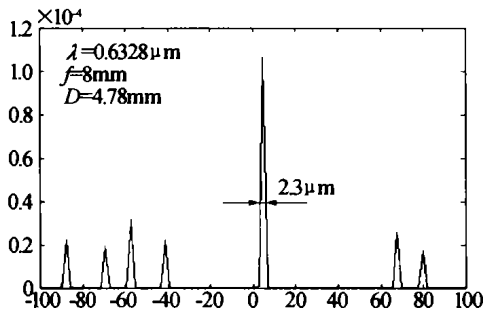


图7  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}, f = 8 \text{ mm}, D = 4.78 \text{ mm}$  焦斑功率分布图  
Fig. 7  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}, f = 8 \text{ mm}, D = 4.78 \text{ mm}$  focal spot intensity distribution

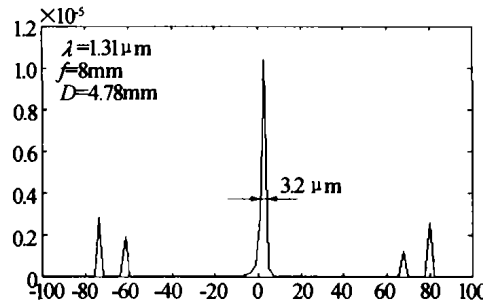


图8  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}, f = 8 \text{ mm}, D = 4.78 \text{ mm}$  焦斑功率分布图  
Fig. 8  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}, f = 8 \text{ mm}, D = 4.78 \text{ mm}$  focal spot intensity distribution

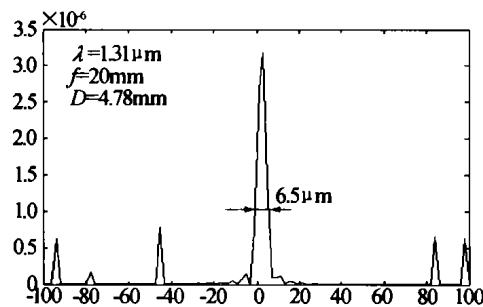


图9  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}, f = 20 \text{ mm}, D = 4.78 \text{ mm}$  焦斑功率分布图  
Fig. 9  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}, f = 20 \text{ mm}, D = 4.78 \text{ mm}$  focal spot intensity distribution

传递函数  $t(r)$  的表达式,建立了短程透镜的焦斑模场分布数学模型  $U(x)$ . 并通过实验验证了该理论的正确性,理论算出的焦斑直径和实际测得的基本一致. 对短程透镜的参数选取有一定的理论指导意义.

### 参考文献

- 1 Sottini S, Russo V, Righini G. General solution of the problem of perfect geodesic lenses for integrated optics. *J Opt Soc Am*, 1979, **69**(9):1248 ~ 1254
- 2 Sottini S, Giorgetti E. Theoretical analysis of a new family of geodesic lenses. *J Opt Soc Am A*, 1987, **4**(2):346 ~ 351
- 3 Liu Ji, Shi Bangren, Hu Xierong. Particular solution for geodesic lenses. *Applied Optics*, 1996, **33**(27):6412 ~ 6414
- 4 崔崧, 高应俊, 阮驰, 等. 一种新型微透镜阵列成象式投影光刻系统的研究. *光子学报*, 2002, **31**(6):769 ~ 773  
Cui S, Gao Y J, Ruan C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6):769 ~ 773
- 5 刘德森, 胡建明, 刘晓东, 等. 平面交叉玻璃波导型微透镜阵列光学性能研究. *光子学报*, 2003, **32**(7):782 ~ 785  
Liu D S, Hu J M, Liu X D, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7):782 ~ 785
- 6 朱京平, 程敏, 唐天同, 等. 光波导短程透镜基点与主面研究. *西安交通大学学报*, 1998, **32**(11):24 ~ 26  
Zhu J P, Cheng M, Tang T T, et al. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 1998, **32**(11):24 ~ 26
- 7 朱京平, 吴洪才, 张元馨, 等. 光波导短程透镜物像关系求取的作图方法. *西安交通大学学报*, 2000, **34**(2):41 ~ 43  
Zhu J P, Wu H C, Zhang Y X, et al. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2000, **34**(2):41 ~ 43
- 8 范俊清, 许承杰, 鲁平, 等. 无球差非球面短程透镜的研究. *发光学报*, 1992, **13**(4):304 ~ 308  
Fan J Q, Xu C J, Lu P, et al. *J Luminescence*, 1992, **13**(4):304 ~ 308
- 9 赵发英, 张全, 唐海青. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合. *光子学报*, 2003, **32**(2):218 ~ 221  
Zhao F Y, Zhang Q, Tang H Q. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):218 ~ 221

## 3 结论

本文给出了短程透镜的等效光线追迹图和相位

## The Analysis of Focal Spot of Geodesic Lenses

Liu Zhihua, Shi Bangren, Wu Jijiang, Kong Mei

Changchun University of science and technology, Changchun 130022

Received date:2004-03-24

**Abstract** Utilization of geometric optical characters of geodesic lenses, the equivalent light trail and phase transfer function are given. Simultaneously the distributing model is obtained. The focal spot intensity distribution of theory corresponds with the experiments.

**Keywords** Guided optics; Geodesic lenses; Focal spot; Mode distribution



**Liu Zhihua** was born in 1972. she received the B. E. degree and M. E. degree from Changchun Univ. of Sci. and Tech. in 1993 and 1998 respectively. And now she is a doctor candidate in this University. Her current research is on optical waveguide lens.