

文章编号: 0253-2239(2003)11-1320-5

优化的波导短程透镜研究

石邦任 孔 梅 宋 哲 刘支华 武继江
(长春理工大学理学院, 长春 130022)

摘要: 对光波导短程透镜进行优化。在无曲率奇点理想波导短程透镜的基础上, 选取一般形式卷边函数, 以无弯曲损耗为目标, 讨论了透镜过渡区不同卷边函数形式的曲率分布, 选取了最优卷边函数并给出透镜母线的特解。经过数值计算得到了优化的理想波导短程透镜的母线函数数值, 完成了非球面面型的精细加工, 研制出优化的理想波导短程透镜。实验测试结果表明, 短程透镜在通光孔径 8 mm 内消球差, 对 4 mm 宽的平面波束, 焦距 20 mm 的短程透镜, 其焦点束斑宽度小于 4 μm 。

关键词: 导波和光纤光学; 短程透镜; 透镜母线; 非球面透镜

中图分类号: TN252 文献标识码: A

1 引 言

无论是作为光学成像器件, 还是作为光信息处理的傅里叶变换元件, 光波导透镜都是光子技术(如声光频谱分析器、光纤陀螺芯片和光盘等集成光路)中的主要元器件。而光波导短程透镜具有无像差、无模式转换和不受衬底折射率影响等优点, 是多种波导透镜中最受关注的一种。

在光波导短程透镜设计中, 以 Sottini 等人的理想短程透镜一般解析法^[1]最具优越性, 该方法通过受限于费马(Fermat)原理的短程线微分方程和阿贝尔(Abel)型积分处理, 直接推出透镜旋转母线的一般解析解, 称之为理想短程透镜解析设计法。同时, 文献[1]又选用一透镜过渡卷边区函数, 求得一特解, 具体设计了非球面面型。然而, 这个特解所表征的短程透镜母线函数, 在透镜卷边两端(卷边与实际透镜连接处和卷边与平板波导连接处)曲率半径为零^[2], 即此点为曲率奇点。这意味着导波光在此点有极大的光损耗。这个所谓过渡区曲率半径为零的问题, 是理想波导短程透镜设计中的突出问题。文献[3~6]逐步实现了理想短程透镜的无曲率奇点设计。本文的目的是选取优化卷边函数并给出特解, 完成优化理想波导短程透镜的研制。本文在无曲率奇点短程透镜设计的基础上, 分析了具有连续二阶导数的过渡区母线函数特性, 选取具有一般函数形式的卷边函数,

分析了过渡区卷边曲率分布, 以无弯曲损耗为目标, 优化选取了卷边函数并给出了透镜面型的显式解。经过数值计算, 给出优化的理想波导短程透镜的母线, 并完成非球面面型的精细加工, 研制出优化的理想波导短程透镜。经实验测试, 短程透镜在通光孔径 8 mm 内消球差, 对 4 mm 宽的平面波束, 焦距 20 mm 的短程透镜, 其焦点束斑宽度小于 4 μm 。同时具有较低的传输损耗(约 1 dB)。器件指标达到国内外同类透镜的先进水平^[7]。

2 理论设计

2.1 理论描述

旋转对称且半径归一化的波导短程透镜如图 1 所示, 凹陷旋转面为 $z = z(r)$, $l(r)$ 为实际透镜区 ($0 \leq r < a$) 母线弧长, $L(R)$ 为过渡区 [又称卷边区 ($a \leq R \leq 1$)] 母线弧长, f_1 和 f_2 分别为两共轭圆的归一化焦距。

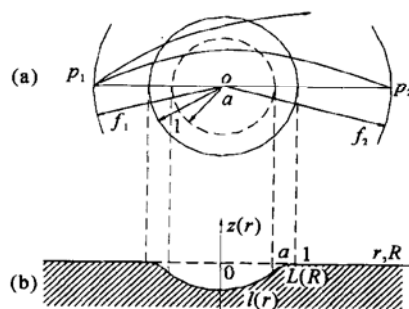


Fig. 1 Scheme of geodesic lens with normalized radius.
(a) Top view; (b) Lateral view

$$\left[\frac{dz}{dr} \right]^2 = \begin{cases} \left[\frac{dl}{dr} \right]^2 - 1 = l'^2(r) - 1, & 0 \leq r < a \\ \left[\frac{dL}{dR} \right]^2 - 1 = L'^2(R) - 1, & a \leq R \leq 1. \end{cases} \quad (1)$$

引入辅助函数 $\lambda(r)$ 和 $\Lambda(R)$,

$$\begin{cases} l'(r) = -[1 + \lambda(r)], & 0 \leq r < a, \\ L'(R) = -[1 + \Lambda(R)], & a \leq R \leq 1, \end{cases} \quad (2)$$

根据文献[1], 结合(2)式知带有光滑过渡卷边区的透镜母线为

$$z(r) = \begin{cases} \int_0^r \{[1 + \lambda(r)]^2 - 1\}^{1/2} dr, & 0 \leq r < a, \\ z(a) + \int_a^R \{[1 + \Lambda(R)]^2 - 1\}^{1/2}, & a \leq R \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

由文献[5, 8], 对于能在归一化焦距分别为 f_1 和 f_2 的两共轭圆上理想成像的波导短程透镜, 有

$$\lambda(r) = -\frac{1}{\pi} \left[\arcsin \left[\frac{a^2 - r^2}{f_1^2 - r^2} \right]^{1/2} + \arcsin \left[\frac{a^2 - r^2}{f_2^2 - r^2} \right]^{1/2} \right] + \frac{2}{\pi} (a^2 - r^2)^{1/2} \int_a^1 \frac{R \Lambda(R) dR}{(R^2 - r^2)(R^2 - a^2)^{1/2}}, \quad (4)$$

由(4)式可见, 只要确定了卷边 $\Lambda(R)$ 的具体函数形式, 就可求得短程透镜的面型 $z(r)$ 。根据文献[5]的讨论, 为实现透镜母线的光滑连接及无曲率奇点, 要求母线函数的一阶和二阶导数连续, 卷边 $\Lambda(R)$ 应满足

$$\left. \begin{aligned} \Lambda(1) &= 0, & \Lambda'(1) &= 0, \\ \Lambda(a) &= \lambda(a), & \Lambda'(a) &= \lambda'(a). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据上述原则, 我们选取卷边函数的一般表达式为

$$\Lambda(R) = [(1 - R^2)^m + \alpha(1 - R^2)^{m+1}] / K, \quad (6)$$

这里 m 为正整数, α, K 为待定常数, 显然(6)式满足(5)式的前两个条件, 而 α 和 K 由后两个条件确定。

为使弯曲损耗降至最小, 我们从对透镜母线曲率的分析开始。透镜母线曲率半径为

$$\rho(r) = \begin{cases} \frac{l^2(r)}{|l''(r)|} \frac{\sqrt{l'^2(r) - 1}}{|l'(r)|}, & 0 \leq r < a, \\ \frac{L^2(R)}{|L''(R)|} \frac{\sqrt{L'^2(R) - 1}}{|L'(R)|}, & a \leq R \leq 1, \end{cases} \quad (7)$$

由(6)式可得卷边区曲率半径为

$$\rho(R) = \frac{|K|}{2R} \left[1 + \frac{1}{K} [(1 - R^2)^m + \alpha(1 - R^2)^{m+1}] \right]^2 \left[\frac{(1 - R^2)^2}{K^2} \left| \frac{1 + \alpha(1 - R^2)}{m + \alpha(m + 1)(1 - R^2)} \right|^2 + \frac{2}{K} \frac{1 + \alpha(1 - R^2)}{m^2(1 - R^2)^{m-2} + 2\alpha m(m + 1)(1 - R^2)^{m-1} + \alpha^2(m + 1)^2(1 - R^2)^m} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

从而有

$$\lim_{R \rightarrow 1} \rho(R) = \begin{cases} 0, & m = 1, \\ \sqrt{2K}/4, & m = 2, \\ \infty, & m \geq 3. \end{cases} \quad (9)$$

可见, 当 $m \geq 3$ 时, $\rho(1)$ 恒为无穷大, 即卷边与平面波导连接处的曲率半径为无穷大, 不依赖于透镜孔径和焦距, 从而使该点的损耗降至最小; 同时, 在卷

边与实际透镜连接处, 由于 $\Lambda(a) = \lambda(a)$, $\Lambda'(a) = \lambda'(a)$, 的连续性, 也能保证曲率为有限值。从而讨论过渡区曲率分布, 优选 $\Lambda(R)$ 的具体形式, 可求出优化的透镜母线函数的特解。

2.2 卷边函数与特解

由透镜过渡区曲率半径公式(8)式, 可以得出卷边曲率函数 $P(R) = 1/\rho(R)$ 。对于归一化半径为

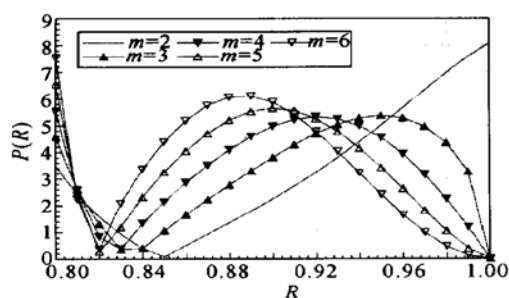


Fig.2 The relationship between the curvature function $P(R)$ and R in the transition area

1, 有效半径 $a = 0.8, f_1 = 4, f_2 = \infty$ 的短程透镜, 选定不同的 m 值, 可推得卷边曲率函数 $P(R)$ 相对过渡区半径 R 的关系如图 2 所示。

由图 2 可见, 卷边函数 $P(R)$ 在整个过渡区 ($0.8 \leq R \leq 1$) 都有较小的弯曲损耗。综合考虑, $m = 3$ 的最简卷边辅助函数

$$\Lambda(R) = [(1 - R^2)^3 + \alpha(1 - R^2)^4]/K \quad (10)$$

是可接受的最优化的卷边函数。由(4)式、(10)式和(3)式可推出相应的短程透镜旋转母线的显式解为^[9]

$$z(r) = \int_0^r \left[\left| 1 - \frac{1}{\pi} \left[\arcsin \left[\frac{a^2 - r^2}{f_1^2 - r^2} \right]^{1/2} + \arcsin \left[\frac{1 - r^2}{f_2^2 - r^2} \right]^{1/2} \right] + \frac{2}{\pi K} [(1 - r^2)^3 + \alpha(1 - r^2)^4] \arctan \left[\frac{1 - a^2}{a^2 - r^2} \right]^{1/2} + \frac{2}{105\pi K} (a^2 - r^2)^{1/2} (1 - a^2)^{1/2} [105\alpha r^6 + (70\alpha a^2 - 385\alpha - 105)r^4 + (56\alpha a^4 - 252\alpha a^2 - 70a^2 + 511\alpha + 280)r^2 + 48\alpha a^6 - (200\alpha + 56)a^4 + (326\alpha + 182)a^2 - (279\alpha + 231)] \right|^2 - 1 \right]^{1/2} dr, (0 \leq r < a) \quad (11)$$

$$z(R) = z(a) + \int_a^R \left[\left| 1 + \frac{(1 - R^2)^3 + \alpha(1 - R^2)^4}{K} \right|^2 - 1 \right]^{1/2} dR, (a \leq R \leq 1). \quad (12)$$

其中常数 α 和 K 分别为

$$\alpha = - \frac{672\cos^5 \gamma_{12} + A \left[\pi - 2\gamma_{12} + \frac{\sin 2\gamma_{12}}{15} (-8\sin^4 \gamma_{12} + 26\sin^2 \gamma_{12} - 33) \right]}{768\cos^7 \gamma_{12} + A \left[\pi - 2\gamma_{12} + \frac{\sin 2\gamma_{12}}{105} (48\sin^6 \gamma_{12} - 200\sin^4 \gamma_{12} + 326\sin^2 \gamma_{12} - 279) \right]}$$

$$K = - \frac{672\cos^5 \gamma_{12} + 768\alpha\cos^7 \gamma_{12}}{105(1/f_1\cos \gamma_{13} + 1/f_2\cos \gamma_{14})}$$

式中

$$A = \frac{105}{\gamma_{13} + \gamma_{14}} \left[\frac{1}{f_1\cos \gamma_{13}} + \frac{1}{f_2\cos \gamma_{14}} \right]$$

$$\sin \gamma_{12} = a,$$

$$\sin \gamma_{13} = a/f_1,$$

$$\sin \gamma_{14} = a/f_2,$$

这样, 由(11)式和(12)式采用切比雪夫多项式展开计算变上限积分, 可获得透镜母线的具体形式。

2.3 透镜设计

选取短程透镜参量为孔径 8 mm, 过渡区孔径 10 mm, 焦距 20 mm。用归一化参量表示为透镜半径为 1, 有效区半径为 $a = 0.8, f_2 = \infty, f_1 = 4$ 。用优化的理想短程透镜母线公式(11)式和(12)式, 经过数值计算可以给出透镜母线数值, 再将其转化为实际加工尺寸如图 3 所示。

3 实验与结果

用图 3 所示的设计母线进行短程透镜凹面面型加工。选用 LiNbO_3 基片的尺寸为 $38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 用美国 MGS-325 双轴数控金刚石车床完成面型加工, 面型精度为 0.5 μm , 光洁度为 10 nm。尽管金刚石表面加工精度很高, 但在加工后还要进行透镜表面的精细手工抛光, 用粒度为 0.5 μm 的刚玉粉抛光, 使工件表面没有划痕和麻点。这在透镜加工中是不可忽视的工序。之后, 通过溅射成膜工艺, 在基片表面成 100 nm 厚的 Ti 膜, 并在常规高温热扩散工艺 (1050 $^\circ\text{C}$, 10 h) 下, 完成 $F/2.5$ 光波导短程透镜研制。

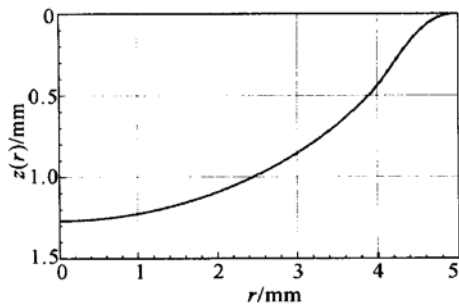


Fig. 3 The generating curve of the optimal geodesic lens

将 633 nm 激光束用金红石棱镜耦合进波导, 测量出透镜损耗为 1 dB。

利用波导耦合实验装置和简单的测量方法, 对光波导短程透镜进行了球差测试。将 633 nm 激光束引入波导透镜, 保持光束与光轴线平行, 逐渐改变光束与光轴的距离, 用平行光管直接观测每条经透镜出射光线与光轴线的交点位置, 测量精度为 0.25 mm, 结果显示透镜在通光孔径 8 mm 内消除了球差。

最后, 对短程透镜的焦斑进行了测试, 测试方法如文献[7]。图 4 所示是 $F/2.5$ 短程透镜样品衍射光斑的光强分布, 图中纵坐标为光强, 横坐标每小格表示一个 CCD 单元, 即 14 μm 。图中半功率点宽度为 1.8 小格, 测量物镜决定的放大倍数为 6.3 倍, 所以焦面衍射光斑半功率点宽度为 4.0 μm , 这个结果达到国内外同类透镜的先进水平^[7]。

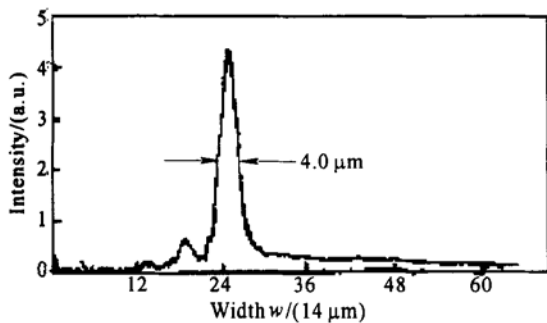


Fig. 4 Intensity distribution of the focus of the geodesic lens

讨论 本文基于理想波导短程透镜特解在过渡区卷边两端的曲率特性, 进行了卷边函数曲率形态特性分析, 追求卷边曲率为最小的理想短程透镜的最优设计。从本文图 2 卷边函数曲率形态可见, 当 $m=3$ 时, 卷边与平板波导连接处 ($R=1$) 曲率皆为 0, 弯曲损耗降为 0; 卷边与实际透镜连接处 ($R=0.8$) 的曲率随 m 的增大而增大, 弯曲损耗也随之增加。从

曲率形态分布来看, $m=3, 4$ 是可接受的优化卷边函数。但我们认为(10)式, 即 $m=3$ 的卷边函数为最优形式, 一是函数形式最简单, 二是卷边与透镜连接处 ($R=0.8$) 有最小的损耗。

下面首先估算一下优化波导透镜过渡区卷边所引起损耗。导波光在弯曲波导中传输时, 由于波导弯曲引起的辐射损耗可表示为 $\alpha' = C_1 \exp(-C_2 \rho)$, 式中 C_1 和 C_2 是由波导类型和光模式所决定的常数, ρ 为曲率半径。对于 Ti 扩散 LiNbO_3 波导基模, 如图 2, $m=3$ 时, 取卷边曲率的最大值 $P=5$, 曲率半径 $\rho=1$ mm, 估算得弯曲损耗为 0.04 dB/cm。而 $m=2$ 时的非优化设计卷边曲线, 曲率最大值为 8, 曲率半径为 0.625 mm, 对应的弯曲损耗达 1.6 dB/cm。可见, 选用优化卷边函数后, 弯曲损耗减小到可以忽略。

再分析一下透镜的成像质量。Sottini 等人给出的理想波导短程透镜的解析解, 非球面型受限于费马原理, 该透镜的设计是理想的准直聚光元件, 透镜成像质量应该是理想的。按衍射光斑理论计算公式, 衍射光斑半功率点宽度

$$w = 0.433 \times 2 \lambda f / nD,$$

理想光斑尺寸应为 1.25 μm , 式中 λ 为光波长, f 为透镜焦距, n 为铌酸锂光波导的折射率, D 为光阑的尺寸。而实际透镜光斑的测量值为 4 μm , 大于衍射极限值, 而且随着光阑尺寸加大, 偏离衍射极限的程度也加大。其原因在于透镜面型加工和手工抛光后, 透镜面型与设计的理想面型有偏差, 超过要达到衍射性能所要求的 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的加工误差。但也可以看出, 只要改善面型精细加工的粗糙度, 具有衍射性能的限制透镜在工艺上是可以实现的。

感谢长春光机与物理研究所李也凡、鲁平教授在透镜焦斑测试中给予的帮助。

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, Zhu Jingping. Theoretic consideration on geodesic lenses. CCIO '91(第六届全国集成光学学术讨论会论文集). Yantai: 1991. 28~ 39 (in Chinese)
- 4 Fan J Q, Li G Y, Xu C J *et al.*. An optimal solution of the problem of geodesic lenses. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1993, **13**(3): 254~ 257 (in Chinese)
- 5 Liu J, Xu X, Shi B. Design of the optical waveguide lens

- without curvature singularity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(4): 398~ 402 (in Chinese)
- 6 Liu J, Shi B, Hu X. Particular solution for geodesic lenses. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(27): 6412~ 6414
- 7 Shi B, Liu J, Kong M *et al.*. Study of perfect waveguide geodesic lenses. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(3): 357~ 361 (in Chinese)
- 8 Sockacki J. New simplified method for designing the smooth transition gradient index and geodesic waveguide lenses of radial symmetry. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(5): 667 ~ 672
- 9 Xing L, Shi B, Song Z *et al.*. An optimal design of waveguide geodesic lenses. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(11): 1021~ 1024 (in Chinese)

Research on Optimal Geodesic Waveguide Lenses

Shi Bangren Kong Mei Song Zhe Liu Zhihua Wu Jijiang

(Science College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

(Received 21 October 2002)

Abstract: The purpose is to optimize geodesic waveguide lenses. A general expression is chosen for the round edge of geodesic lens based on the design of perfect geodesic waveguide lenses free of singularity of curvature. The curvature in the round area is discussed for different round area functions to depress loss due to bend. An optimal round area function and a particular solution for the lens are given. Through numerical computation, the generating curve is achieved. The machining of the aspheric surface is finished, and an optimized perfect geodesic waveguide lens is developed. Measurements show that the lens has no spherical aberration across the total effective aperture of 8 mm, and for a 4 mm-width beam and a lens with 20 mm focal length, the width of the focus is about 4 μm .

Key words: guided wave and fiber optics; geodesic lenses; generating curve of a lens; aspheric surface lenses