

抛物型发散梯度折射率激光束变换元件的设计

廖廷俤 黄衍堂

(福建师范大学激光研究所, 福州, 350007)

摘要: 本文根据 $ABCD$ 矩阵和高斯光束传播理论, 导出高斯激光束经抛物型发散梯度折射率纤维透镜的变换公式。探讨这种发散纤维透镜用作激光束变换元件的设计原理以及在望远镜式扩束型光学耦合系统中的应用。

Design of a parabolic defocusing GRIN fiber lens for laser beam transformation

Liao Tingdi, Huang Yantang

(Institute of Lasers, Fujian Normal University)

Abstract: Based on the $ABCD$ matrix and Gaussian beam propagation theory, the Gaussian beam transforming formulas through a parabolic defocusing GRIN fiber lens are derived. The design principle of this defocusing fiber lens used as laser beam transforming device and application in an expanded beam coupling system are discussed.

一、引言

梯度折射率纤维透镜在激光光电子系统及光纤通信系统中的应用发展十分迅速, 在微型梯度折射率光学系统设计中还需要一种相当于负透镜作用的发散梯度折射率纤维透镜, 采用这种发散纤维透镜, 可使系统达到消色差, 并使系统结构更为紧凑。因此, 它在光电子系统中具有广阔的应用前景。文献〔1~5〕对柱形、锥形发散梯度折射率纤维透镜的光线传播、成象特性及元件设计作了若干探讨, 而对这种发散纤维元件的激光束传播与变换特性的研究不多^[6,7]。本文进一步研究抛物型发散梯度折射率纤维透镜用作激光束变换元件的设计和原理。

二、抛物型发散GRIN透镜的传递矩阵

设抛物型发散梯度折射率纤维透镜的厚度为 d , 两端面为平行平面, 分别位于坐标 z 轴的 $z=0$ 和 $z=d$ 处。取直角坐标系 (x, y, z) , z 轴与纤维光轴重合, 则抛物型发散梯度折射率纤维的折射率分布为

$$n^2(x, y, z) = n_0^2 [1 + g^2(z)(x^2 + y^2)] \quad (1)$$

*福建省自然科学基金资助项目。

式中, n_0 为纤维轴中心折射率, $g(z)$ 为纤维沿 z 轴的梯度参数

$$g(z) = g_0 / (1 - z^2/L^2) \quad (2)$$

式中, $g_0 = g(0)$ 为纤维发散特性参数, L 为描述折射率轴向变化的参数。

在近轴条件下, 计及(1)式, 抛物型发散梯度折射率纤维的光线方程为

$$\ddot{H}(z) - g^2(z)H(z) = 0 \quad (3)$$

式中, $H(z) = x(z)$ 或 $y(z)$, $\ddot{H}(z) = \frac{d^2 H(z)}{dz^2}$, 利用变量替换法可解得近轴光线轨迹方程^[8]

$$H(z) = H_0 \cos t(z) \operatorname{ch} \zeta(z) + P_0 \frac{L}{b} \cos t(z) \operatorname{sh} \zeta(z) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}(z) = & \frac{1}{L \cos t(z)} \left[b \operatorname{sh} \zeta(z) - \frac{z}{L} \operatorname{ch} \zeta(z) \right] H_0 + \\ & + \frac{1}{b \cos t(z)} \left[b \operatorname{ch} \zeta(z) - \frac{z}{L} \operatorname{sh} \zeta(z) \right] P_0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $t(z)$, $\zeta(z)$ 分别为

$$t(z) = \sin^{-1} \left(\frac{z}{L} \right) \quad (6)$$

$$\zeta(z) = b \ln \left[\sec t(z) + \operatorname{tg} t(z) \right] = \frac{1}{2} b \ln \frac{L+z}{L-z} \quad (7)$$

H_0 , P_0 为光线初始条件

$$H(0) = H_0 \quad P_0 = \dot{H}(0) \quad (8)$$

方程(4)式、(5)式可表示为如下矩阵方程

$$\begin{pmatrix} H(z) \\ n_0 \dot{H}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_2(z) & \frac{1}{n_0} H_1(z) & H_0 \\ n_0 \dot{H}_2(z) & \dot{H}_1(z) & n_0 P_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中, H_1 , H_2 及 \dot{H}_1 , \dot{H}_2 为

$$H_1(z) = \frac{L}{b} \cos t(z) \operatorname{sh} \zeta(z) \quad (10)$$

$$H_2(z) = \cos t(z) \operatorname{ch} \zeta(z) \quad (11)$$

$$\dot{H}_1(z) = \frac{1}{b \cos t(z)} [b \operatorname{ch} \zeta(z) - (z/L) \operatorname{sh} \zeta(z)] \quad (12)$$

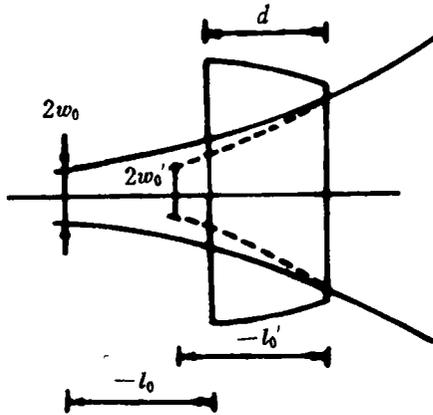
$$\dot{H}_2(z) = \frac{1}{L \cos t(z)} [b \operatorname{sh} \zeta(z) - (z/L) \operatorname{ch} \zeta(z)] \quad (13)$$

且满足 $\dot{H}_1(z)H_2(z) - H_1(z)\dot{H}_2(z) = 1$ 及

$$\left. \begin{aligned} H_1(0) &= 0, & \dot{H}_1(0) &= 1 \\ H_2(0) &= 1, & \dot{H}_2(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

三、抛物型发散GRIN激光束变换元件的设计

现讨论抛物型发散梯度折射率纤维透镜用作激光束变换元件的设计原理，如附图所示。



设入射高斯光束束腰位于抛物型发散梯度折射率纤维大端面前 l_0 处，束腰半径为 w_0 ，出射高斯光束束腰距纤维小端面 l_0' 处，束腰半径为 w_0' ，则根据高斯光束传播理论

$$q' = (Aq + B)/(Cq + D) \quad (15)$$

式中， q, q' 为

$$q = i \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = iZ_0$$

$$q' = i \frac{\pi w_0'^2}{\lambda} = iZ_0' \quad (16)$$

Fig. Transform of Gaussian beam through a parabolic defocusing GRIN fiber

A, B, C, D 为高斯光束变换系统的矩阵。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & l_0' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_2 & (1/n_0)H_1 \\ n_0\dot{H}_2 & \dot{H}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -l_0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} H_2 + n_0 l_0' \dot{H}_2 & (1/n_0)H_1 + l_0' \dot{H}_1 - l_0 H_2 - n_0 l_0 l_0' \dot{H}_2 \\ n_0 \dot{H}_2 & \dot{H}_1 - n_0 l_0 \dot{H}_2 \end{pmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

从 (15) 式~ (17) 式可解得

$$w_0' = w_0 f' \left[\left(l_0 + \frac{b \operatorname{ch} \zeta(z) - (z/L) \operatorname{sh} \zeta(z)}{b \operatorname{cost}(z)} \cdot f' \right)^2 + Z_0^2 \right]^{-1/2} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} l_0' &= f' \operatorname{cost}(z) \operatorname{ch} \zeta(z) - \left(l_0 + \frac{b \operatorname{ch} \zeta(z) - (z/L) \operatorname{sh} \zeta(z)}{b \operatorname{cost}(z)} f' \right) \cdot f_0'^2 \cdot \\ &\cdot \left[\left(l_0 + \frac{b \operatorname{ch} \zeta(z) - (z/L) \operatorname{sh} \zeta(z)}{b \operatorname{cost}(z)} \cdot f' \right)^2 + Z_0^2 \right]^{-1} \quad (19) \end{aligned}$$

引入束腰光斑放大率 $\beta = (w_0'/w_0)$ ，则 (18) 式， (19) 式可表示为

$$\beta = f' / [(l_0 - l_f)^2 + Z_0^2]^{1/2} \quad (20)$$

$$l_0' = l_f' - (l_0 - l_f)\beta^2 \quad (21)$$

式中, f' , l_f , l_f' 为抛物型发散梯度折射率纤维的高斯参数

$$f' = - \frac{L \cos t(z)}{n_0 [b \operatorname{sh} \xi(z) - (z/L) \operatorname{ch} \xi(z)]} \quad (22)$$

$$l_f = - \frac{f'}{b \cos t(z)} [b \operatorname{ch} \xi(z) - (z/L) \operatorname{sh} \xi(z)] \quad (23)$$

$$l_f' = f' \cos t(z) \operatorname{ch} \xi(z) \quad (24)$$

对给定长度为 d 的纤维, 上述各式中 $z = d$, $\cos t(d) = \left(1 - \frac{d^2}{L^2}\right)^{1/2}$, $\xi(d) = b \frac{1}{2} \ln \frac{L+d}{L-d}$ 。

利用上述公式即可进行抛物型发散梯度折射率激光束变换元件的设计。例如, 已知激光二极管输出的激光波长为 λ , 光斑半径为 w_0 , 工作距为 l_0 , 给定设计要求 w_0' , 则由 (18) 式~ (24) 式可求出纤维的长度 d 及 l_0' 。

当激光光源的束腰光斑尺寸 w_0 较小时, 满足球面波近似条件 $Z_0^2 \ll (l_0 - l_f)^2$, 则 (20) 式, (21) 式化为几何光学成像公式^[8]

$$\beta = f' / (l_0 - l_f) \quad (25)$$

$$l_0' = l_f' - f'^2 / (l_0 - l_f) \quad (26)$$

在光通信装置中的激光光源, w_0 为几微米时, Z_0 约为几十微米, 而 $l_0 - l_f$ 为毫米量级, Z_0^2 与 $(l_0 - l_f)^2$ 相比小 10^{-4} 量级, (25) 式, (26) 式可适用。

四、抛物型发散GRIN纤维的应用

文献[9]指出, 在望远镜式扩束型光学耦合系统中, 若望远镜目镜采用相当于负透镜的发散梯度折射率纤维透镜 (构成伽利略望远镜), 则系统的结构长度将比目镜采用正光焦度梯度折射率透镜 (构成开普勒望远镜) 的短 $\Delta d = (f_1' + |f_2'|) - (f_1' - |f_2'|) = 2|f_2'|$ 。整个光学耦合系统的长度缩短了 $4|f_2'|$ 。 f_1' , f_2' 分别为物镜、目镜的焦距。即采用柱形发散梯度折射率纤维透镜后, 望远镜式光学耦合系统的结构变得紧凑了。然若目镜采用抛物型发散梯度折射率纤维透镜, 则这种光学耦合系统结构可望更加小型化。表1为抛物型发散梯度折射率纤维 ($n_0 = 1.66$, $g_0 = 0.30$, $L = 10$) 不同厚度时的光焦度值 Φ , 其中 Φ_c 为同样 n_0 , g_0 的柱形发散纤维的光焦度

$$\Phi_c = -n_0 g_0 \operatorname{sh}(g_0 d) \quad (27)$$

显然, $|\Phi| > |\Phi_c|$, 且 d 越大时, $\Delta\Phi = |\Phi| - |\Phi_c|$ 也越大。表2为给定光焦度要求 $\Phi = \Phi_c$, 抛物型及柱形发散梯度折射率纤维的厚度 d 及 d_c 的计算结果。可见, 当 $|\Phi|$ 增大时, $\Delta d = d - d_c$ 即厚度缩小量越大。进一步的计算还表明, 当抛物型发散纤维的 L 越小时, 上述厚度缩小量将更明显。

Table 1 Comparison of optical powers between parabolic and radial defocusing GRIN fiber lens

d	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
Φ	-0.1527	-0.3264	-0.5239	-0.8706	-1.3876	-2.3363
Φ_c	-0.1517	-0.3171	-0.5112	-0.7517	-1.0604	-1.4652

Table 2 The calculating results of the thickness decrement Δd

Φ	-0.4295	-0.5762	-0.8319	-1.0453	-1.2022	-1.4571
d	2.500	3.100	3.900	4.400	4.700	5.100
d_c	2.602	3.294	4.286	4.957	5.383	5.983
Δd	0.102	0.194	0.386	0.557	0.683	0.883

综上所述, 我们研究了抛物型发散梯度折射率纤维透镜用作激光束变换元件的设计原理, 指出这种抛物型发散梯度折射率纤维透镜在光通信系统中作为望远镜式扩束型光学耦合系统的目镜, 可使系统的结构更为紧凑。

参 考 文 献

- [1] Ohtsuka Y, Maeda K. Appl Opt, 1981; 20 (20): 3562~3565
- [2] Rohra A. Appl Opt, 1983; 22 (19): 3058~3063
- [3] 殷宗敏. 激光, 1982; 9 (2): 65~68
- [4] 廖廷伟. 中国激光, 1989; 16 (5): 267~271
- [5] 廖廷伟. 应用激光, 1988; 8 (2): 80~84
- [6] 廖廷伟. 激光技术, 1992; 16 (6): 332~337
- [7] 陈智浩. 激光杂志, 1992; 13 (2): 67~69
- [8] 廖廷伟. 中国激光, 1990; 17 (5): 273~277
- [9] 廖廷伟. 应用激光, 抛物型发散梯度折射率纤维透镜的设计与应用 (待发表)

* * *

作者简介: 廖廷伟, 男, 1962年7月出生。讲师。现从事梯度折射率光学、光学设计研究工作。

黄衍堂, 男, 1966年出生。研究生。现从事梯度折射率光学、应用光学研究工作。

收稿日期: 1992年8月13日。

• 产品简讯 •

Bragg盒驱动器

可用于掺钛蓝宝石、Nd:YAG或Nd:YLF激光器的锁模脉冲序列中的一种20-W型的CD5000Bragg盒驱动器供高速腔倒空或外大腔单脉冲选择。这种高功率的Bragg盒驱动器使用好的消光比在长波长上增加效率。这种装置能和其它石英或二氧化碲Bragg盒一起使用。

译自 L F World, 1992; 28 (11): 175 张贤义 译 巩马理 校