

一种新颖的激光准直系统的研究*

廖 廷 佛

(福建师范大学激光研究所, 福州 350007)

提 要

本文用等效望远镜系统的方法研究了锥形梯度折射率纤维透镜用作激光准直系统的原理和特性, 指出这种新颖的激光准直元件可望在微型光学和波导光学中获得新应用。

关键词: 梯度折射率, 自聚焦纤维, 高斯光束, 激光准直。

一、引 言

激光准直系统是激光扫描、信息处理、光盘技术和光通讯等激光技术装置中不可缺少的组成部件。迄今多数激光准直系统是属于由短焦距目镜与长焦距物镜组成的常规望远镜系统。文献[1~3]分析了激光经常规望远镜系统的准直特性。然而, 不少现代激光和光学装置需要重量轻、结构紧凑的激光准直系统。于是发展了梯度折射率准直微透镜^[4]。新近的研究表明, 锥形梯度折射率纤维^[5~8]不仅可用作成像物镜和聚焦物镜, 而且还可用作激光准直系统或光波导耦合器, 其结构简单, 可望在微型光学和激光装置及波导光学中获得新应用。本文报道了这种新颖的激光准直元件的原理和特性。

二、锥形纤维的等效望远镜系统

1. 锥形纤维中的光线传播轨迹

锥形梯度折射率纤维中的光线传播轨迹方程为^[6]

$$\left. \begin{aligned} H_1(z) &= -\frac{L}{b} \sqrt{t} \sin(b \ln t), \\ H_2(z) &= \sqrt{t} \left[\cos(b \ln t) - \frac{1}{2b} \sin(b \ln t) \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{H}_1 &= \frac{1}{\sqrt{t}} \left[\cos(b \ln t) + \frac{1}{2b} \sin(b \ln t) \right], \\ \dot{H}_2 &= \frac{g_0^2 L}{b \sqrt{t}} \sin(b \ln t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$b = \left(g_0^2 L^2 - \frac{1}{4} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

收稿日期: 1989 年 12 月 5 日; 收到修改稿日期: 1990 年 7 月 6 日

* 本课题得到福建省自然科学基金资助的项目。

式中 $t = [1 - (z/L)]$, $z \leq L$, L 为锥形纤维大端面到锥顶点间的距离, g_0 为纤维特性参数。从(1)、(2)式知, 光在锥形纤维中的传播具有变周期和变振幅的振荡特性。平行入射光线 [$H_2(0) = 1, \dot{H}_2(0) = 0$] 和端面轴中心线成 θ 角的斜入射光线 [$H_1(0) = 0, \dot{H}_1(0) = 1$] 在锥形纤维中的传播轨迹, 如图 1 所示。

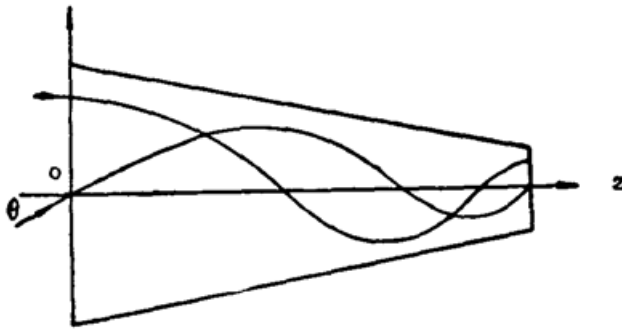


Fig. 1 The ray propagation in a conical GRIN fiber

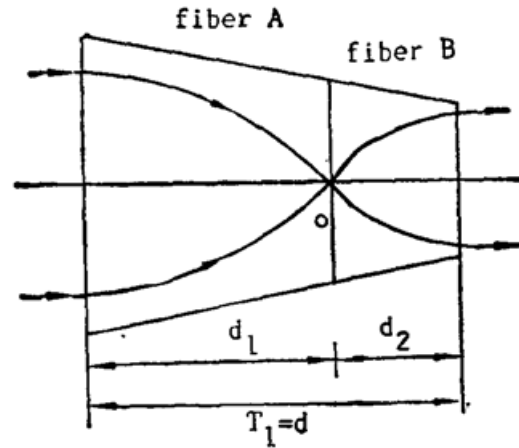


Fig. 2 A conical GRIN fiber of thickness T_1 with both incident and output parallel light

从(1)式及 $H_2(d) = 0$ 和 $H_1(d_1 + d_2) = 0$ [或 $H_2(d_1 + d_2) = 0$] 条件, 可分别求得四分之一光线周期 d_1 和束聚焦周期 $T_1 = d = d_1 + d_2$, 则

$$d_1 = L \left\{ 1 - \exp \left[\frac{1}{b} \tan^{-1}(2b) - \frac{\pi}{b} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$d = L \left[1 - \exp \left(-\frac{\pi}{b} \right) \right]. \quad (5)$$

从(4)、(5)式可得

$$d_2 = d - d_1 = L \left\{ \exp \left[\frac{1}{b} \tan^{-1}(2b) \right] - 1 \right\}. \quad (6)$$

利用锥形梯度折射率纤维的上述光线传播特性, 设计选取不同长度的纤维, 可用作不同的激光光束变换物镜。

2. 锥形纤维等效于一个望远镜

取纤维长度 z 等于光线束聚焦周期 T_1 (即 $z = d = d_1 + d_2$), 则从纤维大端面入射的平行光经纤维传播后从纤维小端面出射的光仍为平行光, 但光束的宽度变小了。系统的光焦度为零, 如图 2 所示, 这样的锥形纤维相当于一个逆向放置的望远镜, 它可用作激光准直系统。

为了分析锥形纤维的等效望远系统及其特性, 以平行于光轴入射的光线与纤维轴的第一个交点 (即“零点”, 图 2 中的 O 处) 为分界线, 可将锥形纤维看作由锥形纤维 A ($g_{0A} = g_0$, $L_A = L$, $z = d_1$) 和锥形纤维 B ($g_{0B} = g_0 [1 - (d_1/L)]^{-1}$, $L_B = L - d_1$, $z = d_2$) 组成。显然, 锥形纤维 A 等效于望远镜的物镜, 而锥形纤维 B 等效于望远镜的目镜, 且物镜的像方焦点 F'_1 与目镜的物方焦点 F_2 重合于“零点” O 处。 A 和 B 组合成的锥形纤维即为一标准的开普勒望远镜系统。

利用锥形纤维的高斯光学公式^[7], 及 $H_2(d_1) = 0$, $\dot{H}_1(d_1) > 0$, $\dot{H}_2(d_1) < 0$, 可知锥形纤维等效物镜 A 的物方截距 $l_s < 0$, 像方截距 $l'_s = 0$; 并由此推知 (根据光路可逆原理) 锥形纤维 B 的 $l_s = 0$, $l'_s > 0$ 。于是可得锥形梯度折射率纤维 ($z = T_1$) 的等效望远镜系统如图 3 和

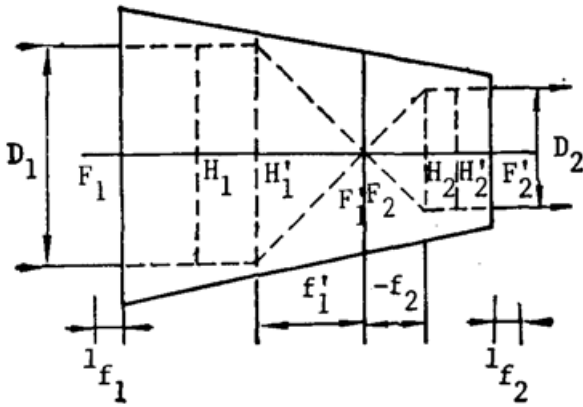


Fig. 3 The equivalent telescope of a conical GRIN fiber: on-axis geometry

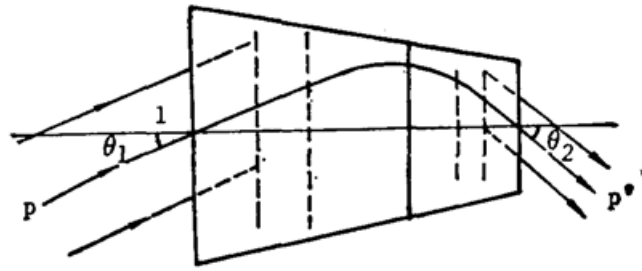


Fig. 4 The equivalent telescope of a conical GRIN fiber: off-axis geometry

图 4 所示*。

3. 等效望远镜特性

根据应用光学理论, 锥形梯度折射率纤维或其等效望远镜系统的放大率 Γ 为

$$\Gamma = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} = \frac{f_1'}{f_2'} \quad (7)$$

从(1)、(2)式并利用 $\sin\{b \ln[1 - (d/L)]\} = 0$, 不难证明入射光束孔径 D_1 与出射光束孔径 D_2 , 大端视场角 θ_1 [$\theta_1 = n_0 \dot{H}_1(0)$] 与小端视场角 θ_2 [$\theta_2 = -n_0 \dot{H}_1(d)$] 之间的关系为

$$\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{1/2}, \quad (8)$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/2}, \quad (9)$$

式中 r_1 和 r_2 分别为锥形纤维大端和小端面半径

$$\frac{r_2}{r_1} = 1 - \frac{d}{L} \quad (10)$$

利用(2)式(令 $z = d_1$)和 $f' = -[n_0 H_2(z)]^{-1}$, 可求得锥形纤维 A 的焦距 f_1' 为

$$f_1' = -\frac{b}{n_0 g_0^2 L} \sqrt{\frac{r_0}{r_1}} \frac{1}{\sin[b \ln(r_0/r_1)]}, \quad (11)$$

式中 $r_0 = r_1[1 - (d_1/L)]$, 在(11)式中作变换 $g_0 \rightarrow (r_1/r_0)g_0$ 和 $L \rightarrow L - d_1 = (r_0/r_1)L$, 可得锥形纤维 B 的焦距 f_2' 为

$$f_2' = -\frac{b}{n_0 g_0^2 L} \frac{\sqrt{r_0 r_2}}{r_1} \frac{1}{\sin[b \ln(r_2/r_0)]}. \quad (12)$$

从(11)、(12)式并计及 $\sin[b \ln(r_2/r_0)] = \sin[b \ln(r_0/r_1)]$, 可得放大率 Γ 为

$$\Gamma = \frac{f_1'}{f_2'} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{1/2}. \quad (13)$$

(13)式也可从图 3 几何关系 $(f_1/f_2) = (D_1/D_2)$ 及(8)式直接得到。显然, 当 $r_1 > r_2$ 时有 $\Gamma > 1$ 。

三、锥形纤维的激光准直特性

1. 束腰位置与光束瑞利距离

如前所述, 锥形梯度折射率纤维具有望远系统的特性。因此, 它与常规的两镜组望远系

* 在图 4 中已设入瞳位于大端面上, 则出瞳正好在小端面上。

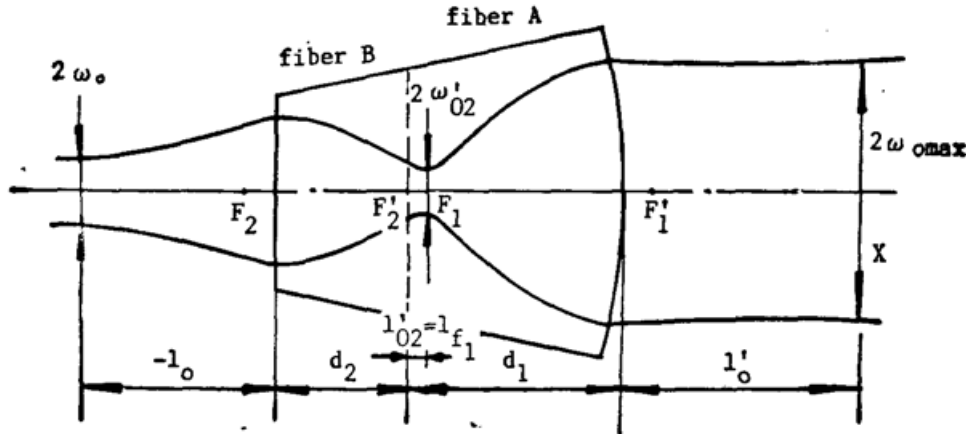


Fig. 5 The Gaussian beam collimating through a reversal conical GRIN fiber

统一样, 逆向放置即可用作激光准直系统, 如图 5 所示, 不同的是这里的望远镜系统为(单块的)锥形梯度纤维(透镜), 因而不具有调焦功能。

根据高斯光束经光学系统变换公式^[9]

$$l'_{oi} = l'_{fi} - \frac{(l_{oi} - l_{fi})f_i'^2}{(l_{oi} - l_{fi})^2 + z_{oi}^2}, \quad (\dot{i} = 1, 2) \quad (14)$$

$$z'_{oi} = \frac{z_{oi}f_i'^2}{(l_{oi} - l_{fi})^2 + z_{oi}^2}, \quad (\dot{i} = 1, 2) \quad (15)$$

式中 l_{oi} , l'_{oi} 和 l_{fi} , l'_{fi} 分别为以锥形纤维 A、B 之端面为基准计算的物方, 像方束腰和焦点位置。设入射光束束腰(半径为 ω_0 或瑞利距离 $z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$)位于小端面前 l_0 处, 经锥形纤维 B 变换后的束腰位置和瑞利距离为

$$l'_{02} = l'_{f2} - \frac{(l_0 - l_{f2})f_2'^2}{(l_0 - l_{f2})^2 + z_0^2}, \quad (16)$$

$$z'_{02} = \frac{z_0 f_2'^2}{(l_0 - l_{f2})^2 + z_0^2}, \quad (17)$$

对于多数使用场合有 $l_0 \gg l_{f2}$, 又因 $l'_{f2} = 0$, 则(16)式和(17)式可化为

$$l'_{02} = \frac{|l_0| f_2'^2}{l_0^2 + z_0^2}, \quad (18)$$

$$z'_{02} = \frac{z_0 f_2'^2}{l_0^2 + z_0^2}. \quad (19)$$

将(18)、(19)式代入(15)式, 并计入 $l_{01} = l'_{02}$ 和 $z_{01} = z'_{02}$, 可求得从大端面出射的光束瑞利距离 z'_0 为

$$z'_0 = \frac{z'_{02} f_1'^2}{\delta^2 + z_{02}'^2}, \quad (20)$$

式中 $\delta = l'_{02} + l_{f1}$ 为束腰相对于锥形纤维 A 的焦平面的失调量, 对两端面为平面的锥形纤维 $l_{f1} = 0$, 故 $\delta = l'_{02}$ 。当 f_2' 很小时, δ 值也很小, z'_0 接近于最大值, 即输出光束接近于最大光斑。

2. 最大扩束比

仅当 $\delta = 0$, 即光束经锥形纤维 B 变换后的束腰平面与锥形纤维 A 的物方焦平面 F_1 重合时, z'_0 为最大值^[3]

$$z'_{0 \max} = \frac{f_0'^2}{z_{02}'} = \frac{f_1'^2}{f_2'^2} \left(1 + \frac{l_0^2}{z_0^2} \right) z_{00}. \quad (21)$$

因此,最大扩束比(或发散角缩小倍率)为

$$r_{\max} = \frac{\omega'_{0\max}}{\omega_0} = \left(\frac{z'_{0\max}}{z_0} \right)^{1/2} = \Gamma \left(1 + \frac{l_1^2}{z_0^2} \right)^{1/2}, \quad (22)$$

式中 $\Gamma = (f'_1/f'_2)$ 为望远镜的放大率。

在常规望远系统中,可通过调焦来实现最大扩束比,然而对锥形纤维,这种办法不适用。这里提出一种新的方法:如图 5 所示,将锥形纤维的大端面设计为凸球面 [R_1 为正, $\varphi_1 = (n_0 - 1)/R_1$], 这时球端面的锥形纤维 A 的物方焦点 F_1 位于 $F'_2 (l'_2 = 0)$ 之右(因 $l_{f_1} > 0$), 选取适当的半径 R_1 , 可使 $\delta = 0$ 即

$$\frac{(l_0 - l_{f_1})f_2'^2}{(l_0 - l_{f_1})^2 + z_0^2} + l_{f_1} = 0, \quad (23)$$

式中的 l_{f_1} 为球形大端面的锥形纤维 A 的物方焦点位置,与 φ_1 有关,可用文献[8]的有关公式计算。这样,将大端面设计为球面后,不仅可获得最大扩束比,而且还改善了锥形纤维的像质,是一种可取的设计方案。

另一种获得最大扩束比的方案是将小端面设计为凸球面 [$R_2 < 0$, $\varphi_2 = -(n_0 - 1)/R_2$], 这时,球端面的锥形纤维 B 的像方焦点 F'_2 位于 $F_1 (l_{f_1} = 0)$ 之左(因 $l'_2 < 0$), 选取适当的半径 R_2 , 也可使 $\delta = 0$ 即

$$l'_2 - \frac{(l_0 - l_{f_1})f_2'^2}{(l_0 - l_{f_1})^2 + z_0^2} = 0, \quad (24)$$

式中的 l_{f_1} 、 l'_2 及 f_2' 为球形小端面的锥形纤维 B 的高斯参数,与半径 R_2 有关^[8]。这种方案的 r_{\max} 有所增大(系 f_2' 减小之故),但系统的像质不如前一方案的好,具在小端面加工球面也较困难。

在工艺条件允许下,可同时把两端面设计加工为球形端面,这样既可以获得最大扩束比 r_{\max} ,还可进一步提高准直系统的像质,并减小端面的光焦度以利于其加工,这时, R_1 、 R_2 应满足

$$l'_2 - \frac{(l_0 - l_{f_1})f_2'^2}{(l_0 - l_{f_1})^2 + z_0^2} = l_{f_1}, \quad (25)$$

式中的 l_{f_1} 、 l_{f_1} 、 l'_2 及 f_2' 仍由文献[8]的高斯参数公式计算。

四、结 论

综上所述得出,长度等于光线束聚焦周期的锥形梯度折射率纤维的成像或对光束的变换作用相当于一个放大率为 $\Gamma = (r_1/r_2)^{1/2}$ 的开普勒望远镜系统。文中提出了锥形纤维的等效望远镜系统,并分析了它的光学特性。据此,作者提出锥形梯度折射率纤维可用作激光准直系统,并给出了改变锥形纤维端面曲率半径以获得最大扩束比的设计方案,从而克服了锥形纤维准直系统不可调焦的缺点。这种物镜和目镜一体化的新颖激光准直系统不仅可望在微型光学和激光装置中获得应用,而且还可作为波导光学中的连接耦合器^[10],既可独立制作使用,也可直接拉制在一个导波光纤的末端。显然,其结构之简单是常规望远系统所不能比拟的。因此,它在上述领域将具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 魏光辉等;《激光》, 1982, **9**, No. 2 (Feb), 589~592.
 [2] 王立新;《中国激光》, 1986, **13**, No. 2 (Feb), 104~107.
 [3] 邱绵辉;《福建师大学报》, 1986, **2**, No. 2 (Jun), 41~52.
 [4] D. T. Moore; *J. O. S. A.*, 1977, **67**, No. 9 (Sep), 1143.
 [5] 殷宗敏等;《物理学报》, 1981, **30**, No. 12 (Dec), 1603~1608.
 [6] C. Gomez-Reino *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 7 (Apr), 1107~1109.
 [7] C. Gemez-Reino *et al.*; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 19 (Oct), 3418~3424.
 [8] 廖廷俤等;《光学学报》, 1989, **9**, No. 9 (Sep), 836~842.
 [9] S. A. Self; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 5 (Mar), 658~661.
 [10] H. M. Presby *et al.*; *Electron. Lett.*, 1988, **24**, No. 1 (Jan), 34.

Study of a novel laser collimating system

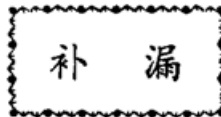
LIAO TINGDI

*(Institute of laser, Fujian Normal University Fuzhou 350007)**(Received 5 December 1989; revised 6 July 1990)*

Abstract

The principle and collimating characteristics of a single conical gradient index fiber used in laser collimating system is studied by the method of equivalent telescope system. It is expected that this novel laser collimating element has promising applications in microoptics and waveguide optics.

Key words: gradient index, selfoc fiber, Gaussian beam, laser collimating.



《光学学报》, 1990, **10**, No. 9 (Sep), 803~808. 作者鄂国铨; 题为“薄光栅振幅传输理论的开拓”的参考文献漏了, 现补上。并对作者表示歉意。

参 考 文 献

- [1] T. K. Gaylord, M. G. Moharam; *Proc. IEEE*, 1985, **73**, No. 5 (May), 894~937.
 [2] H. Kogelnik; *Bell. Syst. Tech. J.*, 1969, **48**, No. 9 (Nov), 2909~2947.