

文章编号：1001-4322(2008)12-1959-06

大气激光通信用直锥形光纤发射天线*

林建文，雷斌，连重炎，庄其仁

(华侨大学 信息科学与工程学院，福建 泉州 362021)

摘要：提出采用直锥形光纤作为大气激光通信的发射天线，将多模光纤输出的部分相干发散光束变换为准平行光束的方案，既能得到发散角很小的部分相干激光光束，又能保证激光器输出能量的完全传输。采用光线追迹法分析了任意光束从锥形光纤小端面输入、大端面输出的发散角。结果表明，当直锥形光纤长度大于某一特定值时，从小端面输入的入射角小于数值孔径角的所有光线理论上都可以变换为出射角度小于光纤半锥角的光线，因此直锥形光纤可以作为部分相干光源的准直透镜，代替传统的凸透镜，用于改善光束的发散角。对远场光斑进行了数值模拟和实验研究，结果显示：直锥形光纤透镜对朗伯光源的准直光束比传统凸透镜的准直光束发散角小，光斑半径小且均匀性好，证明用此方法可以得到低发散、低空间相干性的光斑。

关键词：激光通信；直锥形光纤；光束发散角；照明均匀性；部分相干光；发射天线

中图分类号：O436.1 文献标志码：A

研究发现，采用部分相干激光光源^[1-2]进行大气激光通信，可降低大气湍流的影响，减小光束抖动、扩展和强度起伏的程度^[3-5]。为此文献[6]提出采用多模光纤(MMF)产生用于大气光通信的部分相干光的方案，其中光束的发散角由光纤芯径 r_0 和发射天线焦距 f 决定，其值为 $2r_0/f$ 。为了得到小的光束发散角，需要减小 r_0 或增大 f ，但从能量利用率方面考虑， r_0 不能太小而 f 不能太大，因此这种方法的实际应用受到了限制。直锥形多模光纤(锥型光纤透镜)常用于光斑尺寸的缩小^[7]，其中采用大端面为输入端，小端面为输出端的方式。与此相反，本文研究从小端面入射的光束经过直锥形光纤传输后，在大端面输出的光束发散角和远场特性。在采用多模光纤产生用于大气光通信的部分相干光源^[6]的原理基础上，发射天线用直锥形光纤透镜代替传统的凸透镜，不但能保证激光器输出能量的完全传输，还能很大程度上改善远场光束发散问题。

1 直锥形光纤发射天线的光线发散角

采用多模光纤附加直锥形光纤发射天线作为大气光通信的部分相干光源原理如图1所示。激光器(LD)输出相干光束由一个会聚透镜 L_1 耦合进入多模光纤，利用MMF的模间色散产生一个具有部分相干光特性的合成光源^[6]，然后再经过直锥形光纤发射天线产生用于光通信的准平行光束。

当直锥形小端面光纤直径远大于光波波长时，光纤内光传输可用射线光学(光线)处理。考察从小端面输入的任意方向的光线，除了子午面上的光线是在平面上传输外，其它光线的轨迹都是空间螺旋折线，根据反射定律，光线经 m 次反射后满足 $r_1 \sin \varphi_1 = r_2 \sin \varphi_2 = \dots = r_m \sin \varphi_m$ ，其中 r_i 为光纤半径， φ_i 为反射光线与子午面的夹角， $i=1, 2, \dots, m$ 。由于光线从小端输入， $r_1 < r_2 < \dots < r_m$ ，所以 $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_m$ 。由此可见，经过纤芯-包层界面的反射次数越多，反射光线与子午面的夹角 φ 越小，当 r_m 足够大时，可有 $\varphi_m \approx 0$ ，即经过多次反射后，当锥形光纤的直径增加到足够大时，光纤内的光线都可以近似为子午面的光线情形，也就是说，当直锥形光纤的长度足够长时，锥形光纤内大端面一侧的光线都可以作为子午光线加以分析(图2)。因此下面只讨论直锥形光纤的子午光线传输发散角问题。

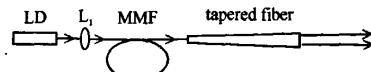


Fig. 1 Schematic of transmitting antenna with multi-mode fiber and tapered fiber

图1 多模光纤附加直锥形光纤发射天线原理图

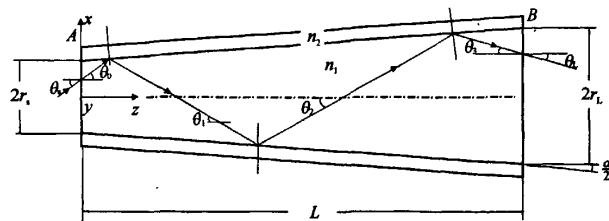


Fig. 2 Meridional transmission ray in tapered fiber

图2 长直锥形光纤子午光线的传输

* 收稿日期：2008-02-27；修订日期：2008-09-08

基金项目：福建省科技计划重点项目(2007H0026)；福建省自然科学基金项目(A0710012)

作者简介：林建文(1984—)，男，硕士，从事光纤通信及光学技术研究；onlyone49@sina.com.cn。

设 α 为锥形光纤的圆锥角, θ_0 表示经光纤端面折射后的光线与光纤中心轴线的夹角(定义为光线发散角), θ_1 表示光纤芯-包界面第 1 次反射光线的发散角, θ_2 表示第 2 次反射光线的发散角, 依此类推, 显然 $\theta_1 = \theta_0 - \alpha$, $\theta_2 = \theta_0 - 2\alpha, \dots$, 于是有

$$\theta_m = \theta_0 - m\alpha \quad (1)$$

式中 m 为入射光线在纤芯-包层界面上的反射次数。当 $\theta_m \leq \alpha/2$ 时, 光线在光纤内部将不再反射, 所以反射次数最大值为

$$m_{\max} \leq \theta_0/\alpha - 1/2 \quad (2)$$

由图 2 可知, 纤芯-包层界面切线 AB 的直线方程以及与之对称的另一切线方程为

$$x = z \tan(\alpha/2) + r_s \quad (x > 0) \quad (3a)$$

$$x = -z \tan(\alpha/2) - r_s \quad (x < 0) \quad (3b)$$

光纤内光线(如图 2 所示方向入射的光线)方程可表示为

$$x = (z - z_m) \tan\theta_m - r_m \quad (m = 0, 2, 4, \dots, m < m_{\max}) \quad (4a)$$

$$x = -(z - z_m) \tan\theta_m + r_m \quad (m = 1, 3, 5, \dots, m < m_{\max}) \quad (4b)$$

式中: r_m 为第 m 次反射位置的光纤半径(这里假设 $r_0 = r_s$); z_m 为第 m 次反射位置的光纤长度。

显然, 光线第 m 次在纤芯-包层界面反射时的光纤半径为

$$r_m = z_m \tan(\alpha/2) + r_s \quad (5)$$

根据式(4)可知第 $m-1$ 次反射的光线在第 m 次反射时的坐标应满足

$$x_m = (z_m - z_{m-1}) \tan\theta_{m-1} - r_{m-1} \text{ 或 } x_m = -(z_m - z_{m-1}) \tan\theta_{m-1} + r_{m-1} \quad (6)$$

同时还应满足式(3), 即

$$x_m = z_m \tan(\alpha/2) + r_s \text{ 或 } x_m = -z_m \tan(\alpha/2) - r_s \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得

$$z_m \tan(\alpha/2) + r_s = (z_m - z_{m-1}) \tan\theta_{m-1} - r_{m-1} \quad (8)$$

于是光线第 m 次在纤芯-包层界面反射时的光纤长度为

$$z_m = \frac{z_{m-1} \tan\theta_{m-1} + r_{m-1} + r_s}{\tan\theta_{m-1} - \tan(\alpha/2)} \quad (9)$$

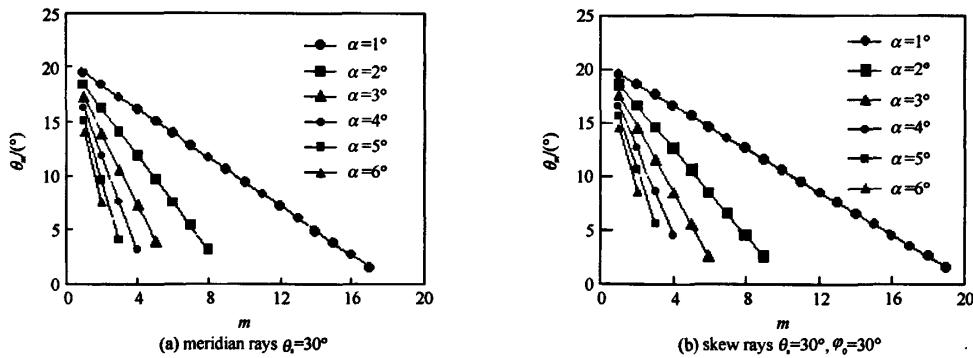
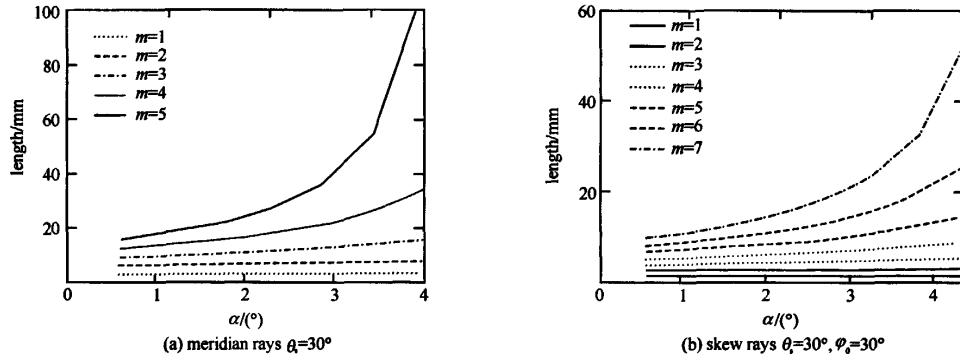
将 $\theta_{m-1} = \theta_0 - (m-1)\alpha$ 和 $r_{m-1} = z_{m-1} \tan(\alpha/2) + r_s$ 代入上式, 最后得

$$z_m = \frac{z_{m-1} \{\tan[\theta_0 - (m-1)\alpha] + \tan(\alpha/2)\} + 2r_s}{\tan[2\theta_0 - (m-1)\alpha] - \tan(\alpha/2)} \quad (m = 1, 2, 3, \dots, m < m_{\max}) \quad (10)$$

式中: $\theta_0 = \arcsin\left(\frac{\sin\theta_i}{n_1}\right)$; $z_0 = 0$; $z_1 = \frac{2r_s}{\tan\theta_0 - \tan(\alpha/2)}$ 。而从大端面出射到空气中的光线发散角为 $\theta_L = \arcsin(n_1 \sin\theta_m)$ 。当 $\sin\theta_m \ll 1$ 时, $\theta_L \approx n_1 \theta_m$, 其中 n_1 为纤芯折射率。

从以上分析可知, 锥形光纤中光线的反射次数可由式(2)计算得到, 根据光束中光线的最大入射角(数值孔径角)确定的最大反射次数 $m_{\max} = \frac{1}{\alpha} \arcsin\left(\frac{D_{NA}}{n_1}\right) - \frac{1}{2}$, 欲使所有从大端面出射的光线发散角都小于 $n_1 \alpha/2$, 所需锥形光纤长度 L_M 可由式(10)求得。当锥形光纤长度小于 L_M 时, 从大端面出射的光线发散角将大于 $n_1 \alpha/2$, 纤芯内光线发散角 θ_m 可由式(1)求得(由于出射光线发散角一般很小, 因此 $\theta_L \approx n_1 \theta_m$)。

为了研究直锥形光纤圆锥角度 α 和反射次数 m 对大端面处光线发散角 θ_m 的影响, 理论计算了光线分别经过锥角 α 为 $1^\circ \sim 6^\circ$ 时的 θ_m 变化曲线, 如图 3 所示。其中纤芯折射率 $n_1 = 1.491$ (我们的实验材料为 POF), 光纤小端半径 $r_s = 0.5 \text{ mm}$ 。图 3(a)为子午光线的情形, 光线入射角 $\theta_i = 30^\circ$; 图 3(b)为任意光线的情形, 光线入射角 $\theta_i = 30^\circ, \phi_0 = 30^\circ$ 。可以看到, θ_m 随着反射次数 m 的增加而线性减小, 光纤锥角 α 越大, 曲线斜率越大, θ_m 减小越快, 对于相同反射次数 m , 斜光线的 θ_m 值比子午光线的大一些, 说明对于设定的出射发散角, 斜光线的反射次数要比子午光线的多, 所需锥形光纤长度更长。图 4 是不同反射次数 m 所需光纤长度与光纤圆锥角 α 的关系曲线, 可见对于相同的反射次数 m , 随着光纤锥角增大, 所需光纤长度呈指数增长。而且, 对于锥角越大的光纤, 随反射次数 m 增加, 所需光纤长度增长速度越快。这就是说, 大锥角光纤虽然可以使纤芯内光线发散角快速变小, 但并不能缩短所需光纤长度, 且出射光线最小发散角较大。因此, 为了得到小的出射光线发散角, 应采用小锥角光纤。

Fig. 3 Divergence angle θ_m as a function of reflection times m 图 3 光线发散角 θ_m 与反射次数 m 的关系Fig. 4 Fiber length as a function of taper angle α after m times reflection图 4 m 次反射时光纤长度与光纤圆锥角 α 的关系

2 直锥形光纤发射天线的远场光斑特性

采用光线追迹软件模拟仿真了小锥角直锥形光纤的远场光斑特性和远场光束发散角。将多模光纤输出光束近似为朗伯光,光源参数为:半径 $r_0=0.25$ mm(设光源位于锥形光纤小端处),半角 $\theta_0=20^\circ$ 。当锥形光纤的小端面半径为 0.26 mm,锥体长度为 100 mm,锥角 α 分别为 $0.01^\circ, 0.05^\circ, 0.1^\circ$ 和 0.5° 时从大端面输出的远场光斑与光强分布如图 5 所示。从图中可以看到,当锥体长度为 100 mm 时,经过不同圆锥角度的直锥形光纤传输后在远场的光强度分布差别较大,并且光斑均匀性较差。通过对远场不同距离的模拟光斑图计算得到的光束发散角分别为 $18.26^\circ, 17.22^\circ, 13.77^\circ, 4.57^\circ$,说明多模光纤输出光束经过直锥形光纤后其光束发散角减小了,但没有随着光纤圆锥角的减小而减小。这是由于光纤锥体长度较短,光线在光纤内部反射次数较少,从图 3 中可以看到,光纤圆锥角越大,输出光线发散角减小越快,所以出现图 5 所示的 α 增大时直锥形光纤输出光束发散角反而减小的现象。因此要使输出光束发散角随着光纤圆锥角的减小而减小,需要有足够长度的直锥形光纤。

图 6 展示了直锥形光纤长度为 500 mm, α 分别为 0.05° 和 0.5° 时的 100 m 远场光强分布。对比图 5 中 $\alpha=0.05^\circ$ 和 0.5° 时的远场光强分布图,可以看出,锥形光纤锥度 α 不变,而长度从 100 mm 增加为 500 mm,远场光斑半径分别从 31 m 和 8 m 减小为 15 m 和 2 m,相应光束发散角分别减小为 8.53° 和 1.15° ,而且光斑均匀(中心幅度较平坦)。所以同一锥度条件下,锥体长度越长,直锥形光纤对光束的准直性能越好,因为光线在锥体内反射次数越多(m 值越大),模式耦合越明显^[8-9],使得远场光强分布更为均匀。若进一步增加锥形光纤长度^[10],则光斑半径和光束发散角还可以减小,并趋于理论极限值($\theta_m \leq \alpha/2$)。

为了比较直锥形光纤与传统透镜准直器的准直效果,模拟计算了焦距 $f=15$ mm 的平凸透镜准直器在相同朗伯光源条件下(半径 $r_0=0.25$ mm,半角 $\theta_0=20^\circ$,光源位于透镜焦平面)的 100 m 远场光强分布,如图 7 所示。图中显示了光斑强度分布为中心强周边弱的不均匀分布,光斑半径约为 2.5 m,相应光束发散角 1.43° 。与长度为 500 mm, α 为 0.5° 的直锥形光纤准直器模拟结果相比可见,经传统透镜准直器变换的朗伯光束远场

光斑均匀性差,光斑半径较大,光束发散角也较大。

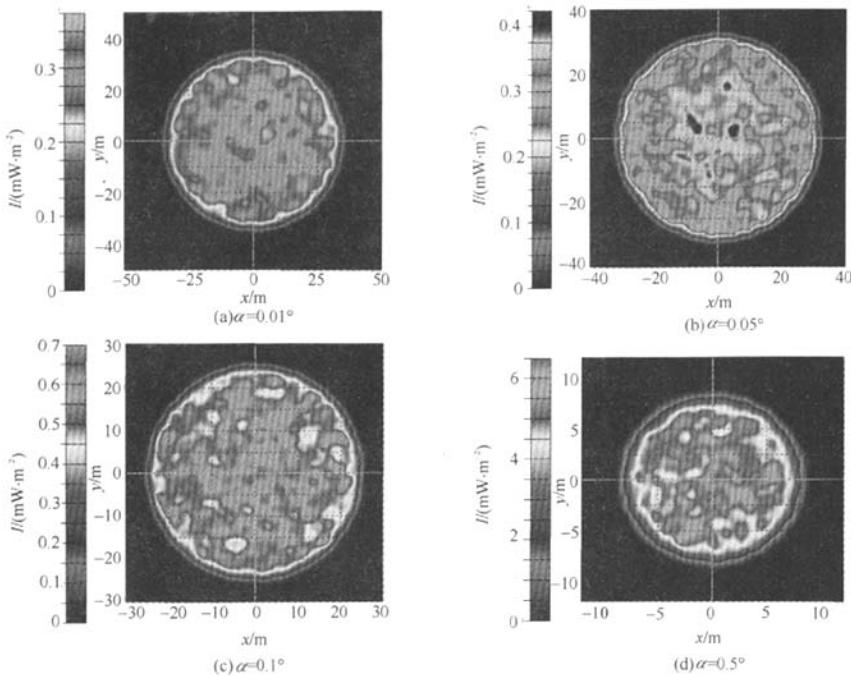


Fig. 5 Far field intensity distribution of Lambertian source transmitting through 100 mm tapered fiber at 100 m
图 5 朗伯光源经 100 mm 长直锥型光纤透镜传输 100 m 后的远场光强分布

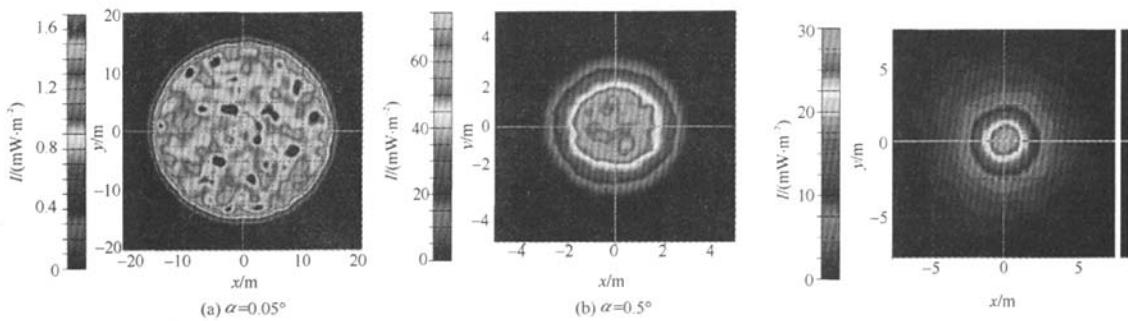


Fig. 6 Far field intensity distribution at 100 m, tapered fiber $z=500\text{mm}$
图 6 光纤锥体长度 $z=500\text{ mm}$ 的 100 m 远场光强分布

transmitting through a lens with an
 f of 15mm at 100 m
图 7 朗伯光经一焦距 $f=15\text{ mm}$ 的透镜
传输 100 m 后的远场光强分布

图 8 所示为 650 nm 多模 LD 光源输出激光光束经望远镜系统后的光强分布图。由于 LD 光源的缺陷使输出光斑左侧出现明显的暗区,另外由于衍射在远场光斑中出现几个暗环,因此直接采用望远镜系统对激光光源进行准直其远场照明均匀性很差。

图 9(a)为 LD 光束经过 POF 多模光纤(芯径 1 mm, 长度 5 m)和一个凸透镜(光纤输出端面在透镜焦点处)的光强分布图,可以看到光斑的光强度分布比较均匀;而用锥形塑料光纤透镜(锥体长度 500 mm, 锥角约 0.3°)代替凸透镜的远场光斑光强分布如图 9(b)所示,可见光斑更均匀,光强更集中。当然这里也包含了光纤端面质量的影响^[11]。

由于多模光纤的模间色散特性,使 LD 光束经过多模光纤后产生一个具有部分相干光特性的合成光源。这种合成光源的空间相干性在一定范围内可根据需要而进行控制,可用作在远场产生均匀性较好的照明光源。但只采用多模光纤和凸透镜的系统其远场光束发散角大,因此限制了传输距离。锥形光纤透镜可将发散角很大的光束准直,同时进一步降低了光束的空间相干性,使出射光强分布更加均匀,可以实现激光的远距离空间

传输和保证远场照明均匀性。

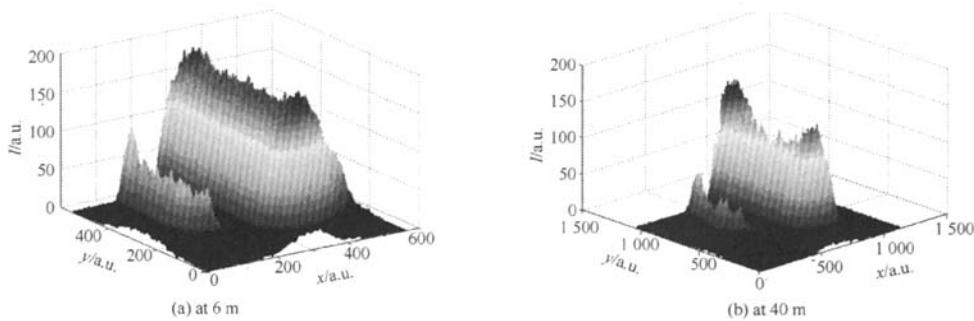


Fig. 8 Intensity distribution of LD transmitting through telescope system

图8 LD经望远镜系统后不同位置的光强分布图

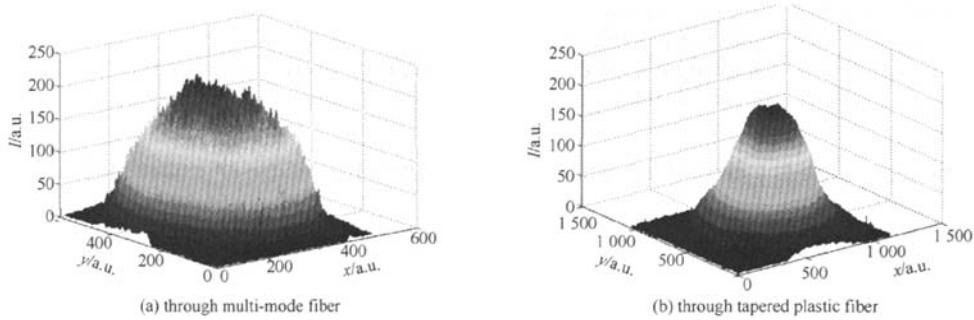


Fig. 9 Intensity distribution of LD transmitting through multi-mode fiber and tapered plastic fiber

图9 LD经过多模光纤和锥型塑料光纤透镜后的远场光强度分布

采用直锥形光纤发射天线准直光束的优点是无论光线入射角度如何, 经过多次反射后理论上总可以使出射光线发散角小于设定值, 因此可以将多模光纤输出的多模式发散光束转换为准平行光束。而传统的透镜(或反射镜)准直系统都要求光源为点光源, 对多模光纤输出的多模式发散光束很难得到发散角小的平行光束。直锥形光纤发射天线的缺点是需要较长的锥形光纤长度(发射天线), 才能达到空间光通信的要求。例如当入射角 $\theta_i=30^\circ$, 用锥角为 1° 的锥形光纤使输出光线发散角变为 0.5° , 需要光纤长度为709 mm。若采用较短的锥形光纤长度, 则光纤圆锥角大一点更有利于减小光束发散角, 因此在实际应用中应对直锥形光纤长度和圆锥角进行优化设计。

3 结 论

当直锥形光纤长度大于某一特定值时, 从小端面输入的入射角小于数值孔径角的所有光线理论上都可以变换为出射角度小于半锥角的光线, 因此直锥形光纤可以作为面光源的准直透镜, 代替传统的凸透镜, 用于改善光束的发散角。多模光纤具有模间色散, 使得激光束经过多模光纤传输后空间相干度降低, 因而改善了输出光束的光强度分布均匀性, 但因为多模光纤输出端面类似一个面光源(可近似为朗伯光源), 使远场光束发散角变大。理论模拟和实验结果证明, 将锥形光纤用作多模光纤输出光束的准直透镜, 在减小光束发散角的同时, 也使光束的相干度进一步降低, 光束的均匀性更加良好, 因此可应用于大气激光通信。

参考文献:

- [1] 万敏, 张卫, 向汝建, 等. 激光空间相干性对照明均匀性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 41-44. (Wan M, Zhang W, Xiang R J, et al. Influence of laser spatial coherence on illumination uniformity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1): 41-44)
- [2] Ricklin J C, Davidson F M. Bit error rate in a free-space laser communication system with a partially coherent signal beam[C]//Proc of SPIE. 2003, 4884: 95-103.
- [3] Dogariu A, Amarande S. Propagation of partially coherent beams: Turbulence-induced degradation[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(1): 10-12.
- [4] Eyyuboglu H T, Baykal Y. Transmittance of partially coherent cosh-Gaussian, cos-Gaussian and annular beams in turbulence[J]. *Opt Commun*, 2007, 278(1): 17-22.

- [5] 蒋金波,程兆谷,李现勤,等.激光模式的远场特性和空间相干度的影响[J].中国激光,2001,28(3):220-224.(Jiang J B, Cheng Z G, Li X Q, et al. Far field characteristics of some laser beam modes and the influence of spatial partially coherence. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(3), 220-224)
- [6] 彭仁军,吴健.多模光纤产生用于大气光通信的部分相干光源[J].强激光与粒子束,2005,17(6):813-816.(Peng R J, Wu J. Employing multi-mode fiber to form partially coherent light source for atmospheric optical communication. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(6), 813-816)
- [7] Miyazaki T, Karasawa Y, Yoshida M. Tapered multi-mode fiber for low loss optical spot size demagnification[J]. *Optical Review*, 1997, 4 (6):634-63.
- [8] 薛春荣,祝生祥,肖志刚,等.直锥形光纤传输性质的研究[J].应用光学,2004,25(3):45-49.(Xue C R, Zhu S X, Xiao Z G, et al. The study for transforming property of right cone fiber. *Applied Optics*, 2004, 25(3), 45-49)
- [9] 詹亚歌,雷建求,梁培辉,等.大芯径功率光纤中传输的激光束质量与偏振度研究[J].中国激光,2004,31(2):173-176.(Zhan Y G, Lei J Q, Liang P H, et al. Study of the laser beam quality and polarization degree in large-core optical power fiber. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(2), 173-176)
- [10] 王云明,孙小菡,张明德,等.塑料光纤锥形过渡器光波传输特性研究[J].东南大学学报(自然科学版),2002,32(3):351-354.(Wang Y M, Sun X H, Zhang M D, et al. Study on performance of light wave propagation in tapered polymer optical fiber connector. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2002, 32(3), 351-354)
- [11] 周艳艳,于凤霞,刘淑梅,等.光纤端面的质量与光纤光学性能的关系[J].光学技术,2005,31(6):806-808.(Zhou Y Y, Yu F X, Liu S M, et al. Discussion between the quality of optical fiber end face and optical property. *Optical Technique*, 2005, 31(6), 806-808)

Tapered fiber transmitting antenna for atmosphere laser communication

LIN Jian-wen, LEI Bin, LIAN Chong-yan, ZHUANG Qi-ren

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: A transmitting antenna with tapered fiber is proposed to transform the divergence partially coherent light formed by multi-mode fiber to collimate light. This structure can produce a partially coherent light of low divergence and guarantee the output power of laser transfers completely. It is applicable to laser communication in atmosphere. Based on the ray tracing method, the divergence angle of random rays which incidents on the small section of tapered fiber in tapered fiber is analyzed. The propagation property of all the rays incidents on the small section and the angle of incidence less than numerical aperture angle are investigated. The result shows that the emission angle of these rays could be improved to less than the half of the taper angle in theory, if the length of the tapered fiber is larger than some value. For collimation of surface light source, a straight tapered fiber can be used for improving beam angle of divergence instead of traditional lens. According to numerical simulation of far field facula, experimental study is performed. Facula with lower divergence and more uniform distribution of light is obtained by using this method. It is proved that this method is superior to the method of traditional lens.

Key words: laser communication; straight tapered fiber; divergence angle of beam; illumination uniformity; partially coherent light; transmitting antenna

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>