

文章编号: 0258-7025(2004)02-0173-04

大芯径功率光纤中传输的激光束质量 与偏振度研究

詹亚歌, 雷建求, 梁培辉, 赖芳良

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 研究了在大芯径、多模功率光纤中传输的激光束光束质量和偏振与光纤长度的关系。用芯径为 0.6 mm 的国产石英光纤及芯径为 0.4 mm 和 0.6 mm 的 3M 光纤做样品, 实验结果表明输出光束的光束质量因子 M^2 值是光纤长度的双曲正切复合函数。线偏振光经光纤后其偏振度随光纤长度的变化呈指数衰减的关系。

关键词 光电子学; 光束质量; 偏振度; 光纤

中图分类号 TN 012 文献标识码 A

Study of the Laser Beam Quality and Polarization Degree in Large-Core Optical Power Fiber

ZHAN Ya-ge, LEI Jian-qiu, LIANG Pei-hui, LAI Fang-liang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In this paper, the beam quality and polarization degree of laser beam which propagated in large core multimode power fibers is studied. Domestic fused silica optical fiber with core diameter of 0.6 mm and 3M silica fibers with core diameters of 0.4 mm and 0.6 mm were used for experiment. It is found that, the output beam quality factor M^2 is a compound tanh function of fiber lengths of every kind fiber. Linearly polarized laser beam launched into a multimode fiber suffer depolarization, the output beam's polarization degree is an exponent function of fiber length and this relationship is agreed well with every kind of fiber.

Key words optoelectronics; beam quality; polarization degree; fibers

1 引言

随着激光技术的发展,激光在医疗、航空、材料加工、表面处理等方面的应用越来越多,在这些工业应用中的激光,通常对光束质量、偏振和光束能量密度有一定的要求,例如,医疗中用于切除病变组织的激光,其光束质量因子 M^2 一般应小于 30,激光焊接中要求激光能量密度大于某一数值(称能量阈值),而激光表面处理中要求光束有较高的偏振度^[1]。大芯径(0.2~1.0 mm)多模功率光纤(以下称功率光纤)可在三维复杂空间灵活、安全地传输高功率激光而显示出其优势。功率光纤可在保证光纤不被破坏的情况下传输较高的激光能量,从而达到应用

需求,但会使光束质量下降及偏振度降低。光束质量和偏振度在光纤传输中的变化与入射状态、光纤弯曲程度、光纤传输长度、外场作用(如应力、扭曲等)均有一定关系^[2,3]。有一些文献已经讨论过光束质量因子 M^2 值在功率光纤中传输时的变化与光纤本身参量之间的关系^[4,5],指出 Nd:YAG 激光以 0.9 的填充系数耦合入 6 m 长不同芯径的阶跃型多模光纤,输出光束质量因子 M^2 值随光纤的芯径大小呈指数变化;又指出经芯径和数值孔径一定的阶跃光纤传输后,其光束质量因子 M^2 最大值与光纤芯径和数值孔径角有关,光纤弯曲半径很小、外界施加应力、扭曲、光纤长度接近无穷长或这些传输状态间的

收稿日期 2002-09-28;收到修改稿日期 2002-11-07

作者简介:詹亚歌(1978—),女,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事光电子技术研究。E-mail: zhanygdove@163.com

综合会导致光束质量因子达到最大值;但这些文献没有涉及光束质量因子值随光纤长度的变化。另外,由于光纤制作上的不完善性而出现的畸变(如纤芯的椭圆度和内应力等)和外场的微扰,一束偏振光经多模光纤传输后其偏振度会降低。很多人已经对通信用多模光纤(所用光纤芯径为 50 μm)的偏振光传输性能作了研究^[6~8],但对功率光纤的偏振光束传输性能研究较少。

本文介绍了工业常用的功率光纤中等传输长度(2~10 m)范围内,激光束质量与偏振度在传输时随光纤长度的变化规律,并对实验结果作了理论分析。从理论和实验上证明功率光纤与通信用多模光纤的传输性能明显不同。

2 光束质量随光纤长度的变化

2.1 实验装置

图1为实验装置。用偏振度为 0.999,光束质量因子 M^2 为 1.005,功率为 35 mW 的 He-Ne 激光作实验光源,借助焦距为 6 cm 的透镜 L_1 把光耦合进入不同长度(0.5 m, 1.0 m, 2.0 m, 3.0 m, 5.0 m, 10.0 m, 22.0 m, 其中 5.0 m, 10.0 m, 22.0 m 实验中以 1.5 m 的直径环绕,此时弯曲对光束质量及偏振

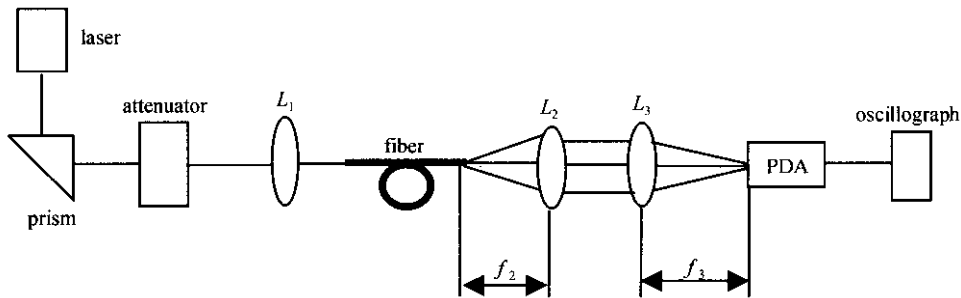


图1 测量光纤出射端光束质量因子的实验装置示意图

Fig.1 Schematic of output beam quality factor M^2 measurement

2.2 实验结果

图2为所测光束质量因子 M^2 值随光纤长度的变化及其拟合曲线。从图上可见,当光纤长度为 15 m 时光束质量已基本达到稳定。光束质量因子 M^2 随光纤长度的变化规律用下式拟合时,其标准误差最小

$$M^2(L) = M_\infty^2 \sqrt{\frac{(M_0^2)^2 + (M_\infty^2)^2 \tanh(\alpha L)}{(M_\infty^2)^2 + (M_0^2)^2 \tanh(\alpha L)}} \quad (1)$$

其中 M_0^2 为进入光纤入射端的光束质量因子初始值, M_∞^2 为稳定时的最大值, α 为与光纤有关的拟合

的影响可忽略)的三个系列的阶跃石英光纤,分别是:两种为进口 3M 光纤,型号为 FP-400-LHT 和 FP-600-LHT,其数值孔径均为 $\text{NA} = 0.40 \pm 0.02$;另一种是芯径为 0.6 mm 的国产阶跃石英光纤,其数值孔径 $\text{NA} = 0.34 \pm 0.01$ 。光纤端面均加工成与轴垂直的正圆面,且做了抛光处理。其中, L_1 为耦合透镜,选焦距 $f_1 = 6$ cm 可保证聚焦光斑比光纤端面小; L_2 为准直透镜 $f_2 = 30$ cm,透镜 L_3 将光束聚焦于有 1024 个单元的光电二极管阵列 PDA 上, $f_3 = 100$ cm。结合使用 L_2 和 L_3 可放大光斑,易于测量。

光束质量因子 M^2 的定义为 $M^2 = D\theta / (4\lambda/\pi)$, D 和 θ 分别为光束的束腰宽度和远场发散角。实验以光纤的芯径大小近似等于出射光束的束腰宽度。因光束的束宽和远场发散角的乘积不变,借助光电二极管阵列和示波器测出光束在远场聚焦点的光斑大小 D_3 ,光束在透镜 L_3 处的发散角为 $\theta_3 = D_3/f_3$,且在透镜 L_2 处的光束发散角 $\theta_2 = \theta_3$ 。可在透镜 L_2 处置一光屏测出这里的光斑大小 D_2 ,设光纤出射端处的光斑大小和光束发散角分别为 D_0, θ_0 ,则有 $D_0\theta_0 = D_2\theta_2$ 。这样即可计算光纤出射端处的光束质量因子 $M^2 = D\theta / (4\lambda/\pi) = D_2\theta_2 / (4\lambda/\pi)$ 。

系数。芯径为 0.6 mm 的国产石英光纤: $M_\infty^2 = 222, \alpha = 0.131/\text{m}$,芯径为 0.6 mm 的 3M 光纤: $M_\infty^2 = 214, \alpha = 0.125/\text{m}$,芯径为 0.4 mm 的 3M 光纤: $M_\infty^2 = 181, \alpha = 0.119/\text{m}$ 。

实验表明,出射光束质量因子最大值 M_∞^2 主要决定于光纤长度、芯径、数值孔径及光纤材料的光学质量。若 $M_\infty^2 \gg M_0^2 = 1$,则 $L = 1/\alpha$ 时, $M^2 = 0.873M_\infty^2$,此时光束质量随光纤长度的变化已经不明显,基本达到稳定。光束在光纤中传输时,其光束质量因子的最大值符合以下公式^[3]

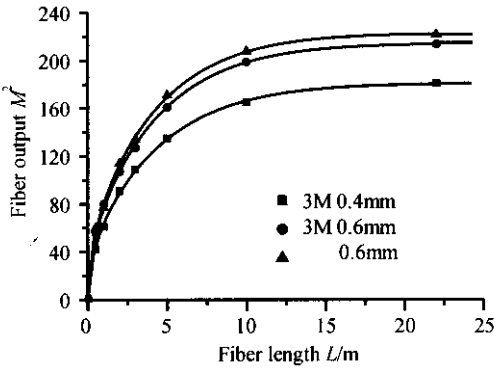


图2 出射光束质量因子 M^2 值随光纤长度的变化
Fig. 2 Relationship between output beam M^2 and fiber length

$$M_\infty^2 = C \times R_{\text{fiber}} \times \arcsin(\text{NA}) \times \pi / \lambda \quad (2)$$

其中 C 是由光纤材料本身(其散射、吸收和数值孔径等)及传输时的状态(弯曲半径和扭曲、应力等)所决定的,即 C 是由多种因素综合决定的, C 的最大值为 $0.86 R_{\text{fiber}}$ 为光纤的芯半径。本实验中 C 值均在 0.5 附近,但芯径同为 0.6 mm 的国产光纤和 3M 光纤,前者的数值孔径比后者的小,而前者的光束质量因子最大值比后者略大,这是因为前者材料的光学质量不如后者,从而使 C 值变大。可见,要提高光纤对光束质量的保持能力,除了减小其芯径和数值孔径外,还要提高光纤材料的光学质量以减小散射等对保持光束质量不利的因素。

根据模式耦合理论分析,一束光经光纤传输后稳态下的角向分布为高斯型,其出射光束发散角为^[9]

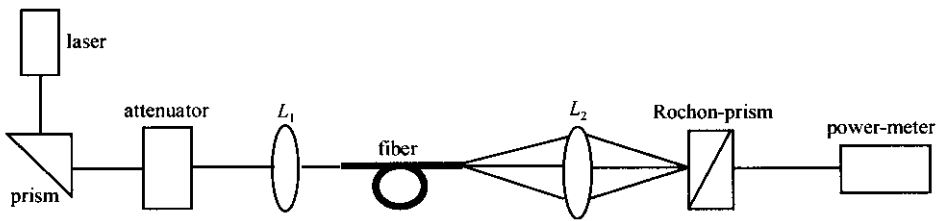


图3 测量光纤出射端光束偏振度的实验装置示意图
Fig. 3 Schematic of output beam polarization measurement

3.2 实验结果

图4 为所测输出光束偏振度随光纤长度的变化及其拟合曲线。由图4 得到偏振度随光纤长度的变化函数为: $P_{C(\text{made in China } 0.6)}(L) = \exp(-0.290L)$; $P_{C(3\text{M } 0.6)}(L) = \exp(-0.211L)$; $P_{C(3\text{M } 0.4)}(L) = \exp(-0.165L)$ 。

即线偏振光经大芯径多模光纤传输后,出射光

$$\Theta^2(z) = \frac{\Theta_\infty^2}{\sigma} \left[\frac{\sigma \Theta_0^2 + \Theta_\infty^2 \tanh(\sigma \alpha L)}{\Theta_\infty^2 + \sigma \Theta_0^2 \tanh(\sigma \alpha L)} \right] \quad (3)$$

其中 Θ_0 为入射端光束发散角, Θ_∞ 为光纤出射端光束发散角的最大值, L 为光纤长度, α 为与光纤本身参量有关的系数, $\sigma = \sqrt{1 + ns/2cA}$, n 为光纤芯折射率, A 为光纤横截面积, s 取决于入射激光脉冲,对连续光 $s = 0$, 即 $\sigma = 1$, 故连续光输入时存在下式

$$\Theta^2(z) = \Theta_\infty^2 \left[\frac{\Theta_0^2 + \Theta_\infty^2 \tanh(\alpha L)}{\Theta_\infty^2 + \Theta_0^2 \tanh(\alpha L)} \right] \quad (4)$$

本实验以光纤的芯径大小近似等于出射光束束腰大小,结合光束质量的定义 $M^2 = D\Theta / (4\lambda/\pi)$ 经光纤传输后,出射光束质量因子 M^2 变化规律应与光束发散角变化规律相同,即公式(1)。实验结果证实了这一点。因此,光纤芯径、长度、材料可同时影响其对光束质量的保持能力。对于工业常用的中等光束质量因子 $M^2(30 \sim 100)^{41}$,在光纤不被破坏的情况下,用芯径或数值孔径较小的光纤将输出较好的光束质量。

3 线偏振光的偏振度随光纤长度的变化

3.1 实验装置

图3 为测量偏振度的实验装置。透镜 L_2 将光纤出射光束聚焦到作为检偏器用的洛匈棱镜上,旋转洛匈棱镜后改变 x 和 y 两个正交方向的功率 P_x 和 P_y ,用激光功率计进行读数测量,图中其他所用元件、激光源、光纤均为图1中所用的。

束偏振度随光纤长度的变化规律符合以下函数关系

$$P = \exp(-\beta L) \quad (5)$$

其中 β 为与光纤有关的拟合系数。芯径为 0.6 mm 的国产石英光纤: $\beta = 0.290/\text{m}$; 芯径为 0.6 mm 的 3M 光纤: $\beta = 0.211/\text{m}$; 芯径为 0.4 mm 的 3M 光纤: $\beta = 0.165/\text{m}$ 。

线偏振光经三种光纤传输后,出射光偏振度均

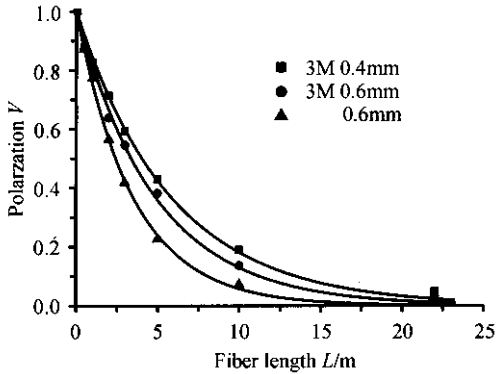


图4 出射光束偏振度随光纤长度的变化

Fig.4 Relationship between output polarization and fiber length

随光纤长度呈指数规律下降,经国产石英光纤传输的光束偏振度下降最快,而3M 0.4 mm 光纤有最好的偏振保持性能。以传输长度3 m 为例,三种光纤出射光的偏振度分别为:65%、55%、45%,当 $L = 1/\beta$ 时, $V = 13.5\%$,此时光束的偏振性已不明显。可见,高功率激光在医疗及材料加工的某些应用中,对光束偏振度通常有一定的要求,在不选用保偏光纤的情况下,最好选用芯径小、光学质量好的光纤。

实际应用的多模光纤中,由于存在双折射、外场的微扰及光纤本身的结构不完善性,光束在其间传输时,模式间的耦合是随机的,所有的模式都可能参与耦合及能量转换。一束线偏振光经多模光纤传输后,出射光的偏振态与光纤芯径、材料本身、传输长度、外场微扰等有关。设光纤的芯径方向 z 轴为光线的传播方向, x 和 y 方向为与 z 轴垂直的横截面上两个垂直的方向,一束沿 x 方向线偏振的光,经多模光纤传输后其输出光在 x 和 y 两个正交方向的功率 P_x 和 P_y 分别为^[10]

$$P_x = \exp(-hL)\cosh(hL) \quad (6)$$

$$P_y = \exp(-hL)\sinh(hL) \quad (7)$$

其中 h 为与光纤有关的耦合参量,容易得到

$$P = (P_x - P_y) / (P_x + P_y) = \exp(-4hL) \quad (8)$$

式(5)中的 β 与这里的 $4h$ 相当,这表明上述实验结果与理论分析一致。

以上实验说明 α 、 β 是相关的,减小芯径和提高光纤材料的光学质量可减小 α 、 β 值,即可同时更好地保持光束质量和光束偏振度,从而改善多模功率光纤的激光束传输性能。

4 讨论和结论

实验结果与模式耦合理论分析一致。在常用的2~10 m 功率光纤长度范围内,出射光的光束质量因子 M^2 及偏振度 P 均没有达到稳定,而是随光纤长度变化,其规律如下:

1) 入射光为基模高斯光时,出射光束质量因子 M^2 随光纤长度呈双曲正切复合的函数,逐渐达到一稳定的最大值,变化规律符合式(1),其中的 α 随光纤种类不同而不同,即不同种类光纤的光束质量下降快慢不同。

2) 入射光为线偏振光时,出射光束偏振度随光纤传输长度呈指数下降关系,其变化规律符合式(5), β 随光纤种类不同而不同,即不同种类光纤的偏振度下降快慢不同。

3) 减小芯径和提高光纤材料的光学质量可减小 α 、 β 值,从而可更好地保持光束质量和光束偏振度,改善多模光纤的激光传输性能。

参 考 文 献

- 1 K. Andreas, B. J. Lan, H. P. Duncan *et al.*. Beam quality after propagation of Nd: YAG laser light through large-core optical fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(36) 6754 ~ 6760
- 2 P. P. Adrian, R. D. Jeffrey, F. J. Jeremiah *et al.*. Advancements in sapphire optical fibers for the delivery of erbium laser energy and IR sensor applications [C]. *SPIE*, 1996, **2677** 35 ~ 42
- 3 H. V. Boyd, L. H. Keng, M. B. Carl *et al.*. Selecting a high-power fiber-optic laser beam delivery system [C]. *Proc. ICALEO*, 1996, **81E** 173 ~ 182
- 4 K. Andreas, F. Paul, H. P. Duncan *et al.*. Preparation of fiber optics for the delivery of high-energy high-beam-quality Nd: YAG laser pulses [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(33) 6136 ~ 6143
- 5 A. Kuhn, I. J. Blewett, D. P. Hand *et al.*. Optical fiber beam delivery of high-energy laser pulses: beam quality preservation and fiber end-preparation [J]. *Optical and Lasers in Engineering*, 2000, **34** 273 ~ 288
- 6 J. G. Gary, J. S. Anthony, J. C. Richard. Propagation effects in long step-index fibers for high power beam delivery [C]. *SPIE*, 1999, **3609** 24 ~ 35
- 7 Lukang Yu, S. R. Banmail. Mode-coupling analysis of depolarization effects in a multimode optical fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(5) 556 ~ 562
- 8 P. F. Steeger, T. Asakura, A. F. Fercher. Polarization preservation in circular multimode optical fibers and its measurement by a speckle method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **LT-2**(4) #35 ~ 441
- 9 J. E. Midwinter. *Optical Fibers for Transmission* [M]. USA: John Wiley & Sons, 1979. 106 ~ 117
- 10 P. K. Ivan. Polarization in optical fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(1) 15 ~ 22