

文章编号: 1001-3806(2009)06-0600-04

光纤激光及其相干合成光场的准确分析

亓红群^{1,2}, 段开棕^{2*}, 蒲继雄¹

(1. 华侨大学 电子科学与技术系, 泉州 362021; 2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要: 为了准确地研究光纤激光及其相干合成光束的远场传输特性, 采用将 LP_{01} 模分解为许多不同拉盖尔-高斯模叠加的方法, 分析了 LP_{01} 模以及多个光纤激光相干合成光束的传输光场分布和光束质量, 并与用高斯函数表示的光纤激光的光场进行了比较。分析中发现, 基模高斯光束与 LP_{01} 模的初始场分布基本相同, 但传输后的光场分布会产生较大误差, 在光纤激光相干合成光场的分析中两者间的差别也非常明显。结果表明, 为更准确地分析光纤激光及其相干合成光束的传输特性, 光纤激光的模场表达式应采用拉盖尔-高斯模的叠加式。

关键词: 激光光学; 光纤激光器; 相干合成; 拉盖尔-高斯模; 弱波导光纤

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.012

Accurate analysis of coherent beam combining of fiber laser

QI Hong-qun^{1,2}, DUAN Kai-liang², PU Ji-xiong¹

(1. Department of Electronic Science & Technology, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China; 2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to study the properties of fiber laser and coherent combining beam accurately, the propagation properties and beam quality of LP_{01} mode and the field of coherent combining beam were analyzed in terms of the method that the mode of LP_{01} was decomposed into orthonormal Laguerre-Gaussian modes. Then the beam quality and the propagation field were compared with that of Gaussian beam which is usually used to describe fiber laser. The results show the far field distribution of LP_{01} mode and that of Gaussian beam are much different after transmission though their initial field distribution is the same, and the difference between the field of coherent combination of LP_{01} mode and that of Gaussian beam is obvious. For accurate analysis of the properties of coherent beam combination, the expression of the Laguerre-Gaussian modes of a fiber laser should be used.

Key words: laser optics; fiber lasers; coherent beam combination; Laguerre-Gaussian mode; weakly guiding fiber

引言

GLOGE 于 1971 年提出了弱波导光纤的概念, 即光纤芯层和包层折射率均匀分布且折射率差值很小^[1]。在弱波导条件下, 光纤的模场可用标量形式的 LP_{01} 模描述, 芯层场分布由贝塞尔函数描述, 包层场分布由虚宗量汉克尔函数描述。由于使用该函数描述光纤激光传输特性时计算较为复杂, 现有文献中在描述光纤激光的传输光场时多采用高斯函数形式的模场表达式^[2-6], 这样处理的结果往往与实际光纤激光的传输光场间存在较大的误差。为了准确描述光纤激光的远

场传输行为, 同时避免复杂运算, 作者将 LP_{01} 模分解为许多拉盖尔-高斯模的叠加, 在此基础上研究了光纤 LP_{01} 模以及多个光纤激光相干合成光束的传输光场分布和光束质量, 并与高斯光场的传输行为进行了比较。结果发现, 在初始光场附近, 光纤 LP_{01} 模与基模高斯光束的空间分布差别不大, 但远场传输后, 基模高斯光束的计算结果与实际光场存在较大误差, 多个光纤激光相干合成的实际光场分布与基模高斯光束近似所得的结果也有较大差别。

1 弱波导模的近似理论分析

设光纤为弱波导光纤, 其模场可用标量形式的 LP_{01} 模描述^[7], 表达式为:

$$E(r) = \begin{cases} J_0\left(\frac{u}{a}r\right), & (r \leq a) \\ \frac{J_0(u)}{K_0(w)} K_0\left(\frac{w}{a}r\right), & (r \geq a) \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才培养计划资助项目(2006LH02)

作者简介: 亓红群(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光束传输与非线性光学的研究。

* 通讯联系人。E-mail: kl.duan@163.com

收稿日期: 2008-08-21; 收到修改稿日期: 2008-10-06

式中, a 为光纤内径, $J_0\left(\frac{u}{a}r\right)$ 和 $K_0\left(\frac{w}{a}r\right)$ 分别为零阶贝塞尔函数和零阶修正贝塞尔函数, u 为归一化横向传播常数, w 为归一化横向衰减常数。

为计算简便, 可将 LP_{01} 模分解为无数个不同归一化拉盖尔-高斯模的叠加^[8-9], 叠加近似模与 LP_{01} 模的传输特性是一致的, 则(1)式可改写为:

$$E(r) = \sum_{p=0}^{\infty} A_p \psi_p(r) \quad (2)$$

式中, A_p 是展开式的系数:

$$A_p = 2\pi \int_0^a J_0\left(\frac{u}{a}r\right) \psi_p(r) r dr + 2\pi \frac{J_0(u)}{K_0(w)} \int_a^{\infty} K_0\left(\frac{w}{a}r\right) \psi_p(r) r dr \quad (3)$$

$\psi_p(r)$ 为拉盖尔-高斯模, 其表达式为:

$$\psi_p(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} L_p\left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \quad (4)$$

$L_p\left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right)$ 为拉盖尔多项式, w_0 为光纤激光束腰半径。由柯林斯公式得 $\psi_p(r)$ 经过光学矩阵 $ABCD$ 后的光场表达式为:

$$\begin{aligned} \psi_p(r, z) &= \frac{ik}{2\pi B} \exp(-ikz) \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \psi_p(r, 0) \times \\ &\exp\left[-\frac{ik}{2B}[Ar_0^2 - 2rr_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + Dr^2]\right] r_0 dr_0 d\varphi_0 = \\ &\frac{ik}{2B} \exp(-ikz) \int_0^{\infty} \psi_p(r_0) \exp\left[-\frac{ik}{2B}(Ar_0^2 + Dr^2)\right] \times \\ &J_0\left(\frac{k}{B}rr_0\right) r_0 dr_0 \quad (5) \end{aligned}$$

k 为波数, $k = 2\pi/\lambda$, 光学矩阵 $ABCD$ 为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - z/f & z \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将(4)式代入(5)式, 化简可得:

$$\begin{aligned} \psi_p(r, z) &= \frac{ik}{2B} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \exp(-ikz) \exp\left(-\frac{ikD}{2B}r^2\right) \times \\ &\sum_{s=0}^p \sum_{t=0}^{\infty} (-1)^{s+t} \frac{1}{2^{2t+1-s} s! (t!)^2} \times \\ &\begin{bmatrix} p \\ p-s \end{bmatrix} \left(\frac{1}{w_0^2}\right)^s \left(\frac{kr}{B}\right)^{2t} \Phi^{-(s+t+1)} \Gamma(s+t+1) \quad (7) \end{aligned}$$

式中, Γ 为伽马函数, $\Phi = \frac{1}{w_0^2} + \frac{ikA}{2B}$ 。

将(7)式代入(2)式, 可得叠加近似模传输后的光场表达式为:

$$E(r, z) = \sum_{p=0}^{\infty} A_p \psi_p(r, z) \quad (8)$$

对于单模光纤, 其归一化频率 $\nu < 2.405$, 为计算 A_p , 取 $\nu = 2.4$ 。根据本征方程:

$$\frac{wK_1(w)}{K_0(w)} = \frac{uJ_1(u)}{J_0(u)} \quad (9)$$

及归一化频率 ν 与 u, w 间的关系式:

$$\nu^2 = u^2 + w^2 \quad (10)$$

得 $u = 1.06453, w = 1.7473$, 将结果代入下式:

$$\frac{dA_0}{dw_0} = -\frac{1}{w_0} A_1 = 0 \quad (11)$$

得 $w_0 = 1.092a$, 将此结果和 u, w 代入(3)式, 可得 A_p 的前5项分别为 $A_0 = 1.39504a, A_1 = 1.04574 \times 10^{-5}a, A_2 = 0.05514a, A_3 = -0.05027a, A_4 = -0.01556a$ 。

通过上述结果可以得出叠加近似模远场的光场分布, 为与用高斯函数表征的光纤激光的光场分布进行比较, 下面给出了基模高斯光束的光场表达式:

$$E'(r, z) = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \exp[-i\Phi'(r, z)] \quad (12)$$

式中, $\Phi'(r, z) = k\left[z + \frac{r^2}{2R(z)}\right] - \tan^{-1} \frac{z}{z_0}$ 。 $w(z)$ 和 $R(z)$ 分别为光束束腰半径及曲率半径, 其表达式为:

$$\begin{cases} w(z) = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \left[\frac{B^2 + A^2 z_0^2}{(AD - BC) z_0} \right]} \\ R(z) = \frac{B^2 + A^2 z_0^2}{BD + AC z_0^2} \\ z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \end{cases} \quad (13)$$

根据(8)式和(12)式, 得出了叠加近似模和基模高斯光束的初始场及远场分布, 如图1所示。图1a为初始场分布, 图1b为远场分布。

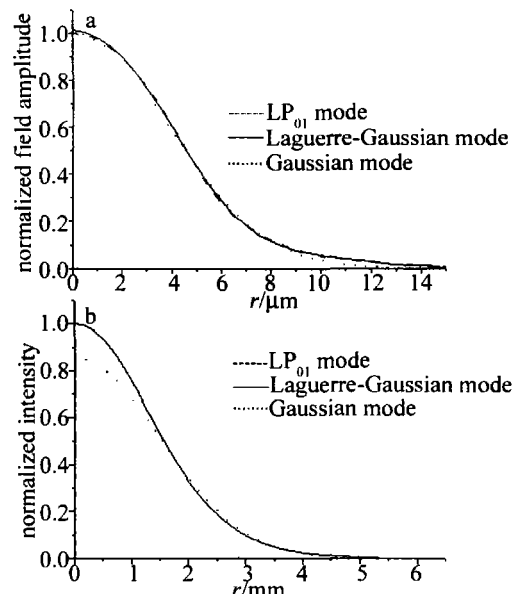


Fig. 1 a—normalized amplitudes of initial field b—normalized intensity of far field

由图 1a 可以看出,在光纤芯层及包层中,叠加近似模与 LP₀₁ 模所对应的曲线几乎完全重合,说明叠加近似模可以准确描述光纤激光弱波导近似模的传输行为;另外,基模高斯光束与弱波导近似模有很好的—致性,说明 LP₀₁ 模中的主要模式为高斯模。图 1b 为计算的远场光场归一化振幅空间分布情况,由图可知,光束传输后,高斯光束与叠加近似模的光强分布有着明显的不同,因此,使用高斯模描述光纤激光弱波导近似模的传输行为会产生较大的误差。

2 光纤激光相干合成光场的分析

为分析方便,设阵列单元直线排列,只研究 1 维情况,见图 2。

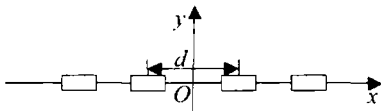


Fig. 2 Schematic illustration of one dimension fiber array

对应叠加近似模和高斯模,其相干合成光束的光场表达式分别为:

$$\begin{cases} E_1''(r, z) = \sum_m \sum_{p=0}^{\infty} A_{mp} \psi_{mp}(r, z) \\ E_2''(r, z) = \sum_m E_m'(r, z) \end{cases} \quad (14)$$

由(14)式得合成光束的光强表达式分别为:

$$\begin{cases} I_1(r, z) = \left[\left| \sum_m \sum_{p=0}^{\infty} A_{mp} \psi_{mp}(r, z) \right|^2 \right] \\ I_2(r, z) = \left[\left| \sum_m E_m'(r, z) \right|^2 \right] \end{cases} \quad (15)$$

下面根据(15)式给出的光纤激光弱波导叠加近似模研究光纤激光的合成光场分布,同时为了比较方便,也给出了使用基模高斯光束的计算结果。计算中

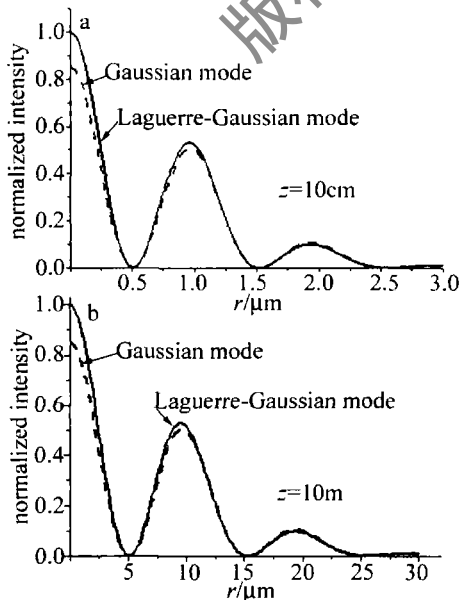


Fig. 3 Normalized intensity of coherent beam combination

选择的计算参量为: $a = 15 \mu\text{m}$, $f = 10\text{cm}$, $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 。光纤间距 d 用填充因子 $t = (d - 2w_0)/w_0$ 描述。图 3 为 $t = 1$ 时不同距离 z 处相干合成光束归一化光强分布图,实线为叠加近似模的合成光强曲线,虚线为基模高斯光束的合成光强曲线。图 3a 中 $z = 10\text{cm}$,图 3b 中 $z = 10\text{m}$ 。从图 3 可以看出,叠加近似模合成光束的截面光斑出现明暗相间的干涉条纹,随着传输距离的增加,干涉条纹间距也随之增大,这与高斯模合成光束的结果基本一致。但从图 3a、图 3b 两图可以发现,不论在近场还是远场,使用叠加近似模计算的合成光束光强与使用高斯模计算合成光束光强都存在明显的差别,说明使用高斯模在描述光纤激光相干合成时会产生一定的误差,为更准确地描述光纤激光合成光束的光场分布应采用叠加近似模。

图 4 是不同填充因子下光纤激光的合成光场在 $z = 10\text{cm}$ 处的归一化光强分布,图 4a 中 $t = 2$,图 4b 中

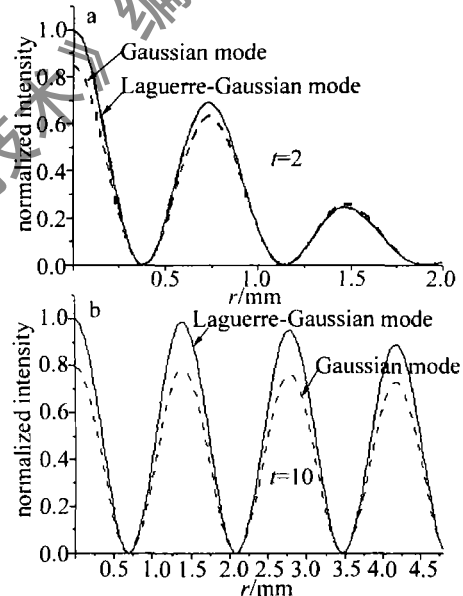


Fig. 4 Normalized intensity of coherent beam combination versus different filled factors

$t = 10$,实线为叠加近似模的合成光强曲线,虚线为基模高斯光束的合成光强曲线。从图 4 可以看出,合成光束的相干条纹数目及条纹间距都随填充因子的增大而增大。另一方面,使用基模高斯光束的计算结果会产生较大误差,这种误差随着填充因子的增大而增大。

为了更好地评价相干合成光束的光束质量,采用光束传输因子 (beam propagation factor, BPF) 作为评价标准,这里采用 β_{BPF} 表示光束传输因子。 β_{BPF} 的定义为: $\beta_{\text{BPF}} = P/P_{\text{DL}}$,即激光阵列的几何尺寸为 D ,出光波长为 λ ,光束传输距离为 z ,则式中 P 定义为远场半径为 $1.22\lambda z/D$ 的桶中能量; P_{DL} 为激光器阵列输出光束的总能量。图 5 为叠加近似模与高斯模对应的合成光束的 β_{BPF} 与填充因子的关系曲线。从图 5 也可看出,

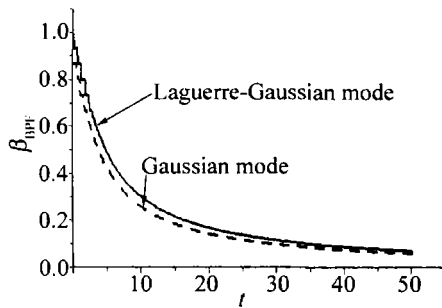


Fig. 5 The BPF of coherent beam combination versus filled factor

随着填充因子的增大,合成光束的光束质量逐渐变差,为了获得高光束质量的合成光束,在实验中应尽量保持较小的光纤间距。另外,从图5可以看出,用叠加近似模表征光纤激光时,其相干合成光束的 β_{BPF} 要大于用基模高斯光束表征的光纤激光的合成光束的 β_{BPF} ,说明光纤激光实际相干合成光束的光束质量要好于用高斯模计算的结果。

3 结论

通过将光纤激光弱波导近似模 LP_{01} 分解为无数个拉盖尔-高斯模的叠加,研究了光纤激光及其相干合成光场的传输行为,并与高斯近似模计算结果进行了比较。结果表明,虽然基模高斯光束能近似描述光纤弱波导近似模,但传输后,使用高斯近似模的计算结果会

与实际光场有较大误差。因此,为了更为精确地描述光纤激光及其相干合成光束的传输特性,应采用叠加近似模或其它更为精确的近似模式。

参考文献

- [1] GLOGE D. Weakly guiding fibers [J]. *Appl Opt*, 1971, 10(10): 2252-2258.
- [2] LIU G H, LIU D M. Theoretical study on spectral beam combining of fiber lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(5): 723-727 (in Chinese).
- [3] ZHANG Y, ZHANG B, ZHU S J. Analysis of property of the beam after spectral beam combining [J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, 56(8): 4590-4595 (in Chinese).
- [4] LÜ B D, MA H. Coherent and incoherent combinations of off-axis Gaussian beams with rectangular symmetry [J]. *Opt Commun*, 1999, 171(4/6): 185-194.
- [5] LI Y Zh, QIAN L J. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. *Opt & Laser Technol*, 2007, 39(5): 957-963.
- [6] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(3): 161-165 (in Chinese).
- [7] WU Ch Q. Optical waveguide theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 40-46 (in Chinese).
- [8] HILL C A, HALL D R. Coupling loss theory of single-mode waveguide resonators [J]. *Appl Opt*, 1985, 24(9): 1283-1290.
- [9] de ANGELIS G, PANARIELLO G, SCAGLIONE A. A variational method to approximate the field of weakly guiding optical fibers by Laguerre-Gaussian/Bessel expansion [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(12): 2665-2674.
- [10] SIMON M K, VILNROTTER V A. Performance analysis and tradeoffs for dual-pulse PPM on optical communication channels with direct detection [J]. *IEEE Transaction of Communication*, 2004, 52(11): 1969-1979.
- [11] WANG H X, ZHU Y B, ZHANG T Y, et al. Performance study of optical wireless DH-PIM and DPIM [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 92-94 (in Chinese).
- [12] ZHANG K, GONG M L, ZHANG H T, et al. Performance of dual head-pulse interval modulation for wireless infrared multipath channels [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(1): 4-7 (in Chinese).
- [13] GAGLIARDI R M, KARP S. Optical communications [M]. New York: Wiley, 1976: 286-287.
- [14] SATO K, DHITSUKI T, SASASE I. Performance of coded multi-pulse PPM with imperfect slot synchronization in optical direct-detection channel [C]//*Communication 1994*. New Orleans; IEEE, 1994: 121-125.

(上接第599页)

链路的性能。

参考文献

- [1] PIERCE J R. Optical channels: practical limits with photon counting [J]. *IEEE Transaction of Communication*, 1978, 26(12): 1819-1821.
- [2] SATO K. Performance analysis of $(m, 2)$ MPPM with imperfect slot synchronization [J]. *IEEE Communications, Computers and Signal Processing*, 1993, 2(19/21): 765-768.
- [3] SUGIYAMA H, NOSU K. MPPM: a method for improving the bandwidth efficiency in optical PPM [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1989, LT-7(3): 465-472.
- [4] HE X Sh, ZHU X, TAN X S. Research on the transmission delay of laser pulse caused by the sea water scattering effects [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(1): 19-21 (in Chinese).
- [5] WANG M, LIU W H. Study on optical characteristics of seawater in blue-green laser uplink propagation model [J]. *Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition)*, 2005(1): 59-62 (in Chinese).