

文章编号: 1001-3806(2009)05-0555-03

光纤激光器高阶模式对相干合成特性影响分析

冯光, 曹祥杰, 尚卫东, 黄伟, 郭占斌

(中国电子科技集团公司第27研究所, 郑州 450015)

摘要: 为了分析光纤激光器中高阶模式对相干合成的影响, 采用将光纤激光器的基模以及高阶模式近似表示为拉盖尔-高斯光束的线性叠加的方法, 利用拉盖尔-高斯光束的传播特性, 得到了当光纤激光器的输出光束包含高阶模式时, 激光器阵列相干合成的远场光强分布模型。同时以光纤激光器中输出混合模式为 LP_{01} 和 LP_{11} 以及输出混合模式为 LP_{01} 和 LP_{02} 两种情况为例, 分析了存在高阶模式的远场相干条纹的峰值功率和条纹对比度。结果表明, 当光纤激光器中高阶模式为 LP_{11} 模时, 远场相干条纹的峰值能量随着 LP_{11} 模的增加线性下降; 当光纤激光器中高阶模式为 LP_{02} 模时, 远场相干条纹的条纹对比度随着 LP_{02} 模的增加线性下降。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 相干合成; 拉盖尔-高斯光束; 高阶模

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.032

Effect of higher order modes of fiber laser on the characteristics of coherent combination

FENG Guang, CAO Xiang-jie, SHANG Wei-dong, HUANG Wei, GUO Zhan-bin

(The 27th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In order to study the effect of higher order modes of a fiber laser on the characteristics of coherent combination, the fundamental mode and higher order modes in a double-clad fiber laser were approximated to a linear combination of Laguerre-Gaussian beams. Based on its propagation law, the far field distribution of fiber laser array was obtained with consideration of higher order modes. The peak intensity and fringe visibility of a fiber laser array mixing with higher modes of LP_{01} and LP_{11} and mixing with higher modes of LP_{01} and LP_{02} were analyzed respectively. The numerical results show that the peak intensity decreases linearly with LP_{11} increasing and that the fringe visibility decreases linearly with LP_{02} increasing.

Key words: lasers; fiber lasers; coherent combination; Laguerre-Gaussian beam; higher order mode

引言

光纤激光器有着能量转换效率高、高稳定性、光束质量好等优点, 已经广泛应用于光纤通讯、激光加工等方面。目前, 光纤激光器的输出功率已经达到 2kW 量级, 但是, 进一步增加光纤激光器的输出功率受到了非线性效应以及热效应的限制, 获得更大功率的光纤激光的一种方法就是相干合成^[1-2]。

对于光纤激光器相干合成, 其光纤阵列之间的相位、谱宽等对相干合成效果的影响已经有很深入的分析^[3], 这些分析通常都是基于光纤输出为基模的条件。但是, 光纤激光器在高功率运转时, 除了基模 LP_0 模, 还存在着高阶模式。例如, 2005 年报道的 2kW 高功率掺镱光纤激光器中混合有 34% 的高阶模式^[4]。

作者简介: 冯光(1977-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为光电对抗与激光技术的研究。

E-mail: f_guang@sohu.com

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2009-01-05

这是因为, 为了减少纤芯中非线性效应如受激布里渊散射和受激喇曼散射^[5], 通常增大纤芯直径, 这必然会激发光纤中的高阶模式。

1 理论分析

1.1 光纤模场的拉盖尔-高斯展开

根据弱导近似^[6], 光纤激光器纤芯中的 LP_{mn} 模的横向场分布可以表示为:

$$E_{mn}(r, \varphi) = \begin{cases} \frac{1}{J_m(U_{mn})} J_m\left(\frac{U_{mn}\rho}{a}\right) \cos(m\theta), & (\rho < a) \\ \frac{1}{K_m(W_{mn})} K_m\left(\frac{W_{mn}\rho}{a}\right) \cos(m\theta), & (\rho \geq a) \end{cases} \quad (1)$$

式中, LP_{mn} 模为光纤中的 (m, n) 阶模式, J_m 和 K_m 分别为第 1 类 m 阶贝塞尔函数和 m 阶第 2 类虚宗量贝塞尔函数, (ρ, θ) 为横向场分布的柱坐标, a 为纤芯半径。纤芯区域归一化横向传播常量 U_{mn} 和包层区域归一化传播常量 W_{mn} 是光纤特征方程的第 n 个解。

研究光纤激光相干特性的一个问题就是如何分析光纤激光器在自由空间中的传输。由于光纤中场分布具有圆对称性,通常将 LP_{mn} 模用拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束展开,认为 LP_{mn} 模从光纤端面辐射出去以后的传播规律可以通过拉盖尔-高斯光束叠加来表示。拉盖尔-高斯光束可以表示为:

$$\psi_{mp} = \frac{1}{w} L_p^m \left(2 \frac{\rho^2}{w^2} \right)^m \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) \quad (2)$$

式中, $L_p^m \left(2 \frac{\rho^2}{w^2} \right)^m$ 是 (m, p) 阶缔合拉盖尔多项式, w 是光束的腰斑半径。在光纤波导口处, LP_{mn} 按照拉盖尔-高斯光束可以展开为:

$$E_{mn} = \sum_{p=0}^{\infty} A_{mp} \psi_{mp} \quad (3)$$

式中, A_{mp} 为展开系数。

1.2 光纤激光的空间传输

简明起见,考虑图1所示两束光纤激光相干模型,两束参量相同的光纤激光通过焦距为 f 的透镜后在远场合成,两束光纤激光间距为 d ,分析光纤激光中含有高阶模式的情况下的远场合成特性。当多束激光相干时,下面分析方法同样有效。

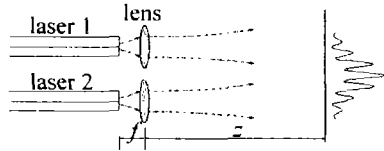


Fig. 1 Sketch map of the far field of coherent combination of two fiber lasers

根据(3)式将光纤中的 LP_{mn} 模式表示为拉盖尔-高斯光束的叠加,拉盖尔-高斯光束在自由空间的传输特性已经有深入的研究,所以,光纤中的模式从光纤端面辐射出后的远场分布,可以用拉盖尔-高斯光束的传输特性来分析。光纤中模式 LP_{mn} 模通过如图1所示的光学系统后在远场 z 处的光场分布为:

$$E_{mn}(r, \varphi, z) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{A_{mp}}{w} L_p^m \left(2 \frac{r^2}{w^2} \right)^m \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \times \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{r^2}{2R}\right) - \phi_p\right]\right\} \cos(m\varphi) \quad (4)$$

式中, (r, φ, z) 表示场点的柱坐标, ϕ_p 为 LG 光束从光纤端面经过光学系统的附加相移, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为光束波数, λ 为激光波长。可以通过 q 参量来分析 LG 光束从光纤端面辐射后在空间中的传输特性:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

在光纤纤芯中, $q_0 = i\beta_0$, $\beta_0 = \pi w_0^2/\lambda$, w_0 为纤芯中光束腰斑半径。设纤芯折射率为 n , 对于图1模型中拉盖尔-高斯光束从光纤端面到远场 z 处的 $ABCD$ 矩阵为:

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

通过 M 可以计算远场的 q 参量:

$$q = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D} \quad (7)$$

则远场的拉盖尔-高斯光束特征参量 R, β, ω 可表示为:

$$R = \frac{1}{\text{Re}[1/q]}, \beta = \frac{-1}{\text{Im}[1/q]}, \omega = \frac{1}{\sqrt{\pi\beta/\lambda}} \quad (8)$$

拉盖尔-高斯光束在光纤端面到远场 z 处的相移^[7]:

$$\phi_p = (2p + m + 1) \left[\tan^{-1}\left(\frac{f}{b_1}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{f}{b_2}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{z-f}{b_2}\right) \right] \quad (9)$$

式中, b_1, b_2 分别为拉盖尔-高斯光束在光纤端面处和经过透镜后的瑞利长度。

1.3 光纤激光的远场合成

在光纤激光器中, LP_{mn} 模式大多以非相干形式叠加^[8], 包含高阶模式的光纤激光器阵列相干合成, 当基模之间相位锁定时, 高阶模式之间是相位无关的, 合成光束光强远场分布包含两部分, 一部分是基模相干叠加时, 另一部分是高阶模式之间是非相干叠加时。

在光纤激光器纤芯中, 包含 LP_{01} 模和 LP_{mn} 模的混合模式光强分布为:

$$I(r, \varphi) = (1 - \alpha)I_{01} + \alpha I_{mn} \quad (10)$$

式中, $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 为光纤激光器中高阶模式所占的比例分量。

分别以两种特殊情况为例来分析光强的远场分布, 一种是光纤中的混合模式为 LP_{01} 模和 LP_{11} 模; 另一种是光纤中的混合模式为 LP_{01} 模和 LP_{02} 模。

在远场 z 处, 当基模之间相位完全锁定时的光纤分布为:

$$I(r, \varphi, z) = \left| E_{01}\left(r - \frac{d}{2}, \varphi, z\right) + E_{01}\left(r + \frac{d}{2}, \varphi, z\right) \right|^2 + \left| E_{mn}\left(r - \frac{d}{2}, \varphi, z\right) \right|^2 + \left| E_{mn}\left(r + \frac{d}{2}, \varphi, z\right) \right|^2 \quad (11)$$

式中, d 为两光纤中心间距。

目前, 相干合成的评价因子很多, 其中条纹可见度表示为^[9]:

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (12)$$

式中, I_{\max}, I_{\min} 分布是远场干涉中心亮条纹的相邻极大值与极小值。

2 数值计算结果和讨论

基本计算参量如下, 光纤归一化频率 $\nu = 5$, 纤芯半径 $a = 12.5 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n = 1.45$, 激光波长 $\lambda =$

1.053nm,微透镜焦距 $f = 4.5\text{mm}$,两光纤中心间距 $d = 2\text{mm}$ 。

当 $\alpha = 0$ 时,即当光纤激光器输出为单模即 LP_{01} 模时,两束光纤激光相干合成后的远场($z = 40\text{m}$)分布见图2。由图中可以看出,当光纤激光器的输出为基模时,两束光纤激光相干图样呈现明显相干特性,光强没有出现本底,其条纹可见度为 $V = 1$ 。

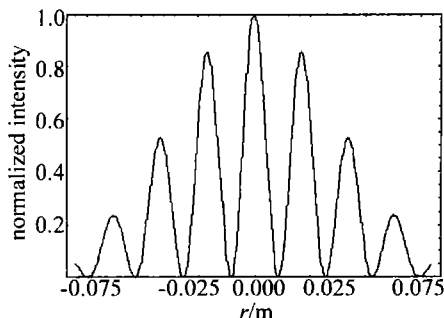


Fig. 2 Far field intensity distribution of two fiber lasers ($\alpha = 0, z = 40\text{m}$)

对混合模式为 LP_{01} 模和 LP_{11} 模时的远场光强分布如图3所示,从图中看出,光强的峰值强度降低,当

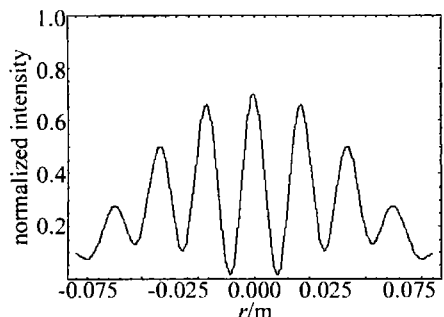


Fig. 3 Far field intensity distribution of two fiber lasers with mixture modes of LP_{01} and LP_{11} ($\alpha = 30\%, z = 40\text{m}$)

$\alpha = 30\%$ 时,峰值能量降到了基模相干叠加时峰值的70%。混合模式为 LP_{01} 模和 LP_{11} 模时,其远场相干合成效果随着 α 的变化见图4,可以看出,远场相干条纹

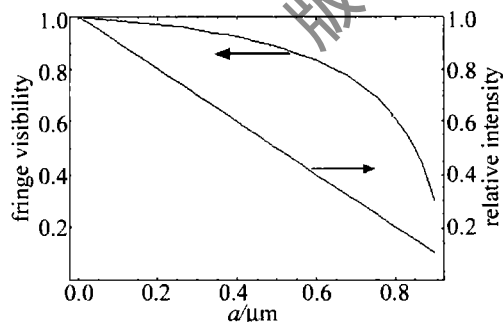


Fig. 4 Far field intensity distribution of two fiber lasers with mixture modes of LP_{01} and LP_{11} , as a function of α ($z = 40\text{m}$)

的峰值能量随着 α 的线性变化,而条纹对比度随着 α 开始变化不明显,当 $\alpha > 0.5$ 时,条纹对比度迅速降低,这是因为 LP_{11} 模中心能量低,能量主要集中在旁瓣。

当光纤中混合模式为 LP_{01} 模和 LP_{02} 模时,其远场

光强分布如图5所示,当 $\alpha = 30\%$ 时,峰值能量没有明

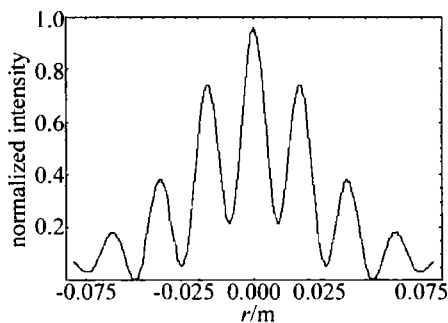


Fig. 5 Far field intensity distribution of two fiber lasers with mixture modes of LP_{01} and LP_{02} ($\alpha = 30\%, z = 40\text{m}$)

显降低,达到基模相干时峰值功率的95%,其条纹可见度降低到0.6。混合模式为 LP_{01} 模和 LP_{02} 模时,其远场相干合成效果随着 α 的变化如图6所示,可以看

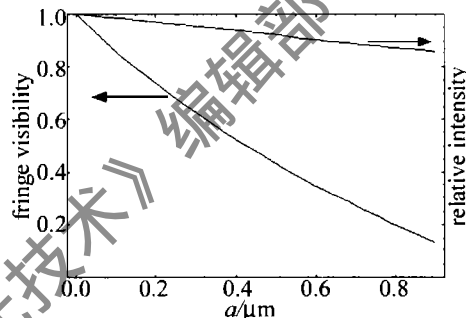


Fig. 6 Far field intensity distribution of two fiber lasers with mixture modes of LP_{01} and LP_{02} , as a function of α ($z = 40\text{m}$)

出,远场相干条纹的峰值能量随着 α 的变化不明显,而条纹对比度随着 α 变大近似线性减小,这是因为 LP_{02} 模能量主要集中在中心。

从上面分析可以看出,光纤激光器中不同阶的高阶模式对光纤激光器相干合成效果的影响是不同的,随着 LP_{02} 模式在混合模式中比例的增加,其合成对比度的降低更加明显,而随着 LP_{11} 模式在混合模式中比例的增加,其合成峰值功率的降低更为迅速。而在实际的高功率激光器中,输出混合模式中可能含有不同比例的多个高阶模式,其远场合成效果可以通过上面的方法进行具体分析。

3 结论

通过将光纤激光器中的模式表示为拉盖尔高斯光束的叠加,分析了光纤激光器中存在高阶模式的情况下,光纤激光器阵列的远场相干合成分布模型。数值分析表明,随着 LP_{02} 模式在混合模式中比例的增加,其合成条纹对比度的降低更加明显,而随着 LP_{11} 模式在混合模式中比例的增加,其合成峰值功率的降低更为迅速,非单模光纤激光器合成的远场干涉条纹对比度和远场峰值强度和阶模式的类型及其比例相关。

(下转第560页)

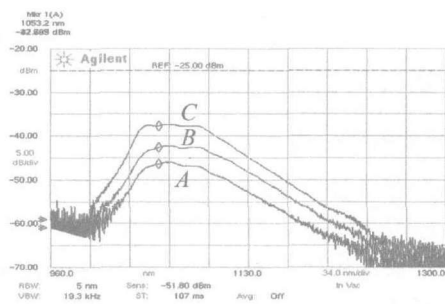


Fig. 4 The fluorescent spectrum of 6m fiber

可见,光纤的特殊折射率设计以及高浓度掺杂,使光纤在1.5W,980nm抽运功率下的最佳使用长度小于6m。图4中曲线C更接近光纤的理论荧光输出谱线。

3.3 模场特性分析

采用CCD分析光纤输出1053nm光的光强,和常规的阶跃型光纤(相同纤芯直径)进行比较,以研究这种新型折射率分布结构设计光纤的模场特性。图5a为新型折射率分布结构设计光纤经过弯曲直径3cm圈后输出光通过CCD测试出的光强分布;图5b为常

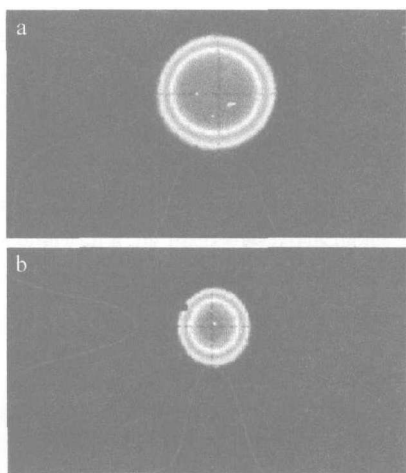


Fig. 5 The mode field of a fiber

规阶跃型光纤的光强分布。比较得出,这种新型折射率光纤模场输出较常规光纤平坦,且模场面积大。

3.4 光纤放大特性

把光纤应用于光纤放大器,把5m光纤绕成直径

8cm的圈,试验中30dB飞秒信号光通过4W的980nm抽运光进行功率放大,实现了增益40dB的飞秒信号光输出,输出功率达30kW。受实验条件限制,未能进行更高抽运光功率的光信号放大实验。

4 结论

通过对这种新型折射率设计的掺镱双包层光纤的初步研究,得出5点结论:(1)基本实现了光纤的结构设计;(2)光纤荧光光谱平坦;(3)光纤的新型折射率设计有利于对抽运光的吸收;(4)弯曲光纤可实现平坦光强输出;(5)具有良好的光放大性能,实现40dB飞秒信号光放大,输出功率30kW。

光纤的这种新型折射率设计能有效减少非线性效应对光纤的影响,可提高光纤的输出功率,实现平坦光强输出。采用改良的高温气相掺杂工艺进行高浓度掺杂后,该光纤预计可应用于高功率光纤放大器及高功率光纤激光器。

参考文献

- [1] FERMAN M E. Single mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulse [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(1): 52-56.
- [2] GHATAK A K, GOYAL I C, JINDAL R. Design of waveguide refractive index profile to obtain flat modal field [J]. *SPIE*, 1998, 3666: 40-44.
- [3] DAWSON J W, BEACH R J, JOVANOVIĆ I, *et al.* Large flattened mode optical fiber for reduction of nonlinear effects in optical fiber lasers [J]. *SPIE*, 2004, 5335: 132-135.
- [4] ZHAO Ch J, PENG R W, TANG Zh X, *et al.* Design and analysis of a kind of large flattened mode optical fiber [J]. *Chinese Physics*, 2006, 15(7): 1838-1842.
- [5] ZHAO Ch J, PENG R W, TANG Zh X, *et al.* Modal fields and bending loss analyses of three-layer large flattened mode fibers [J]. *Opt Commun*, 2006, 266(1): 175-180.
- [6] HOTOLEANU M, SÖDERLUND M, HOFFMAN H J, *et al.* Coiling effects on high order mode suppression of a radially doped LMA fiber [J]. *SPIE*, 2007, 5485: 1247-1256.
- [7] POOLE S B, PAYNE D N, FERMAN M E. Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions [J]. *Electron Lett*, 1985, 21(17): 737-738.
- [8] ZENTENO L. High-power double-clad fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(9): 1435-1446.

(上接第557页)

参考文献

- [1] WANG Sh Y, LIN D Y, WANG Ch. Recent progress of fiber [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 657-661 (in Chinese).
- [2] XIAO R, HOU J, JIANG Ch F. Coherent combining of fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 516-518 (in Chinese).
- [3] LI Y Zh, QIAN L J, LU D Q, *et al.* Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(5): 957-963.
- [4] GAPONTSEV V, GAPONTSEV D, PLATONOV N, *et al.* 2kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*. Munich: IEEE, 2005: 508-510.
- [5] CHENG Zh L, HOU J, JIANG Ch F. Theoretical study on thermal effect in Yb-doped double-clad high power fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 544-547 (in Chinese).
- [6] LIAO Y B. *Fiber optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 153-158 (in Chinese).
- [7] HILL C A, HALL D R. Coupling loss theory of single-mode waveguide resonators [J]. *Appl Opt*, 1985, 24(9): 1283-1290.
- [8] FU Y Q, FENG G Y, ZHANG D Y, *et al.* M^2 factor of linear polarization modes in a step-index fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(7): 1342-1345 (in Chinese).
- [9] XIAO R, ZHOU P, HOU J, *et al.* Effect of partial coherence of laser has on the irradiance distribution of coherent combining of fiber laser arrays in far field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(2): 819-823 (in Chinese).