

文章编号: 0258-7025(2009)02-0276-05

光纤激光相干合成与非相干合成的比较

周 朴 刘泽金 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对多路光纤激光输出光束进行合成是获得高功率、高光束质量的输出的有效方法。为了比较不同合成方案的远场效果,对聚焦发射的相干合成和非相干合成光束远场分布进行数值计算,从控制相位误差、光束抖动和阵列占空比等三方面对这两种方案的远场特性进行比较研究。计算结果表明,与非相干合成相比,相干合成能够在远场获得更高的能量集中度,但会受到光束抖动和阵列占空比的严重影响。和通常考虑的平行发射相比,聚焦发射体制对相干合成时相位误差的要求宽松了很多,相位误差均方根(RMS)为 $\pi/3$ 时,半径为 5.6 cm 的圆桶内汇聚的能量仍大于完全相干合成情形下的 90%。

关键词 光纤光学;相干合成;非相干合成;相位误差;光束抖动

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093602.0276

Comparative of Coherent Combining and Incoherent Combining of Fiber Lasers

Zhou Pu Liu Zejin Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract It is an effective approach to obtain high-power laser beam output while maintaining good beam quality by combining multiple fiber lasers. The far-field intensity distribution for coherent combining and incoherent combining with conformal focusing transmitting is numerically calculated, and the effect of phase error, beam jitter, and fill factor is studied in detail to make a contrastive study of coherent and incoherent combining. It is shown that more energy will be encircled in the main-lobe by coherent combining. However, the far-field intensity distribution by coherent combining will be seriously affected by the beam jitter and fill factor of the laser array. And the tolerance on phase error has been improved by using conformal focusing transmitting scheme. For phase error with root-mean-square (RMS) value of $\pi/3$, more than 90% energy of the totally coherent combining counterpart will be contained in the target area with radius of 5.6 cm.

Key words fiber optics; coherent combining; incoherent combining; phase error; beam jitter

1 引 言

由于掺杂光纤的非线性效应、热损伤等物理机制的限制,单根光纤激光的输出功率有限^[1]。为了获得高功率、高光束质量的激光输出,将多个光纤激光器/放大器排布成光纤激光阵列,对其输出光束进行合成是一种有效的方法。光束合成的主要方法可以分为三类:相干合成^[2]、谱合成^[3]和非相干合成^[4]。在各路光束单线宽且偏振方向、相位一致的理想情形下,对 N 路光纤激光进行相干合成,可以

使远场光斑的峰值强度提高为单路时的 N^2 倍,获得高亮度的相干光束,近年来成为国内外的研究热点。目前各国学者提出了多种行之有效的相干合成方案,如 MOPA 方案^[5]、自组织相干合成等^[6~8]。

相干合成是获得高功率、高光束质量光纤激光的良好途径,但它对单根光纤激光偏振态、线宽、相位起伏等方面的要求较为严格。目前 IPG Photonics, SPI 等公司已经研制出单根功率超过千瓦量级、单模运行的高功率光纤激光器,然而输出光

收稿日期:2008-01-15; 收到修改稿日期:2008-06-16

基金项目:国防科技大学研究生创新基金(B070701)资助项目。

作者简介:周 朴(1984—),男,博士研究生,主要从事激光器及光束合成等方面的研究。E-mail:jnck621@163.com

导师简介:刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术等领域的研究。E-mail:zejinliu@vip.sina.com

束的线宽很宽($\Delta\lambda/\lambda\sim 1\%$),且偏振方向随机,这将不可避免地降低相干合成的效果。美国部分研究人员甚至认为,这样宽线宽的高功率光纤激光器不适合用于相干合成^[4],并提出了利用多路光纤激光非相干合成的方案。非相干合成既不利用主动或被动锁相的方法控制激光器阵元的相位,也不利用光栅等色散元件控制阵元光束的出射方向保持同轴输出,它对激光器阵元光束的相位、波长、偏振态等没有任何要求,只是用光束定向器控制每一个阵元光束的出射方向,使其在目标靶面上汇聚,获得远场高强度分布。本文对相干合成和非相干合成远场光强分布进行数值计算,从控制相位误差、光束抖动和阵列占空比等三方面对这两种方案的远场特性进行比较研究。

2 参数设置

光纤激光器/放大器阵列呈现如图 1(a)所示的环形结构,阵列中心有一个光纤激光器/放大器,周围光纤激光以周期性结构向外排布。由 N 圈的激光器/放大器组成的阵列共含有 $L=1+3N(N+1)$ 个阵列单元。目前对于相干合成远场的计算大多针对各路输出光束平行的情形,由于激光的衍射作用在光束传播的过程中彼此干涉叠加,从而获得高亮度的相干光束^[9,10]。实际上为了在远场获得更高的峰值强度,往往采用如图 1(b)所示的发射方式,阵列光束同时聚焦到远场(如 10 km 处)某一点。对于能量传输等应用领域,关心的是远场特定面积内的

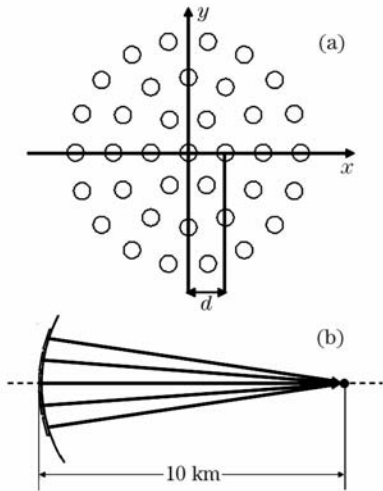


图 1 激光器阵列二维分布图(a)和光纤激光阵列聚焦发射示意图(b)

Fig.1 Schematic diagram of the two-dimensional (2D) fiber laser array (a) and sketch for conformal focusing transmitting the fiber laser (b)

(如 100 cm^2 , 半径为 5.6 cm)桶中功率(PIB)。

高功率光纤激光器和放大器近几年内得到了飞速发展,适用于相干合成的单模、单频、保偏光纤放大器目前达到了 500 W,通过合理地设计掺杂光纤有可能达到千瓦级以上^[11],而适用于非相干合成的单根单模光纤激光器(宽谱线、随机偏振)的功率已经达到 2.5 kW^[12],并且下一步可能突破 5 kW 甚至更高^[13]。因此,为了更好地比较相干合成与非相干合成在远场的光强分布特性,对于相干合成方案,假设光纤激光排布 7 圈(共 169 个),单个功率为 1.5 kW;而对于非相干合成方案,假设光纤激光排布 4 圈(共 91 个),单个功率为 2.75 kW;两种方案输出光束的总功率均为 250 kW。假设相干合成时单根光纤放大器出射光束为基模高斯光束,束腰宽度为 1 cm。根据普通光学知识可知,使用透镜对高斯光束进行变换时,透镜的半径 a 与光束的束腰宽度 w 之比 $a/w > 1.5$ 时,至少包含 99% 的能量^[14],因此取相邻光束中心点之间的距离 $d=3w$ 。同时假设非相干情形下出射光束的束腰为相干合成时的 1.4 倍,这样能够保证两种激光阵列的几何尺寸大小相等,直径均为 44 cm。

3 数值计算

由于阵列光束同时以一定的倾角(θ_{nx}, θ_{ny})传输,激光光学中的基模高斯光束传播方程不再适用,需要进行坐标变换。如图 2 所示,激光束沿 z 轴传输用坐标系 (x, y, z) 表示,而以一定倾角(θ_{nx}, θ_{ny})沿 γ 轴传输用坐标系 (α, β, γ) 表示。

由线性代数的知识可知,这两个坐标系之间存在对应关系

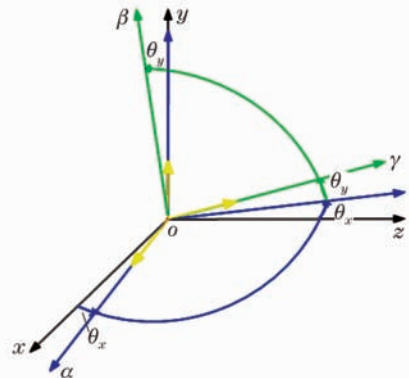


图 2 (x, y, z) 坐标系与 (α, β, γ) 坐标系之间的关系

Fig.2 Coordinate systems transform for (x, y, z) and (α, β, γ)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_x & \sin \theta_y \sin \theta_x & -\sin \theta_x \cos \theta_y \\ 0 & \cos \theta_y & \sin \theta_y \\ \sin \theta_x & -\sin \theta_y \cos \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}, \quad (1)$$

根据普通基模高斯光束的传输规律和(1)式所示的坐标变换关系可得第 n 束激光在远场的复振幅分布

$$E_n(x, y, z) = \exp\left[-\frac{\eta_n^2 + \xi_n^2}{w^2(\chi_n)}\right] \exp\left[-i \times k \left(\frac{\eta_n^2 + \xi_n^2}{2\Delta R_n} + \chi_n\right) - \Delta\phi_n\right], \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \eta_n = \cos \theta_{x,n} x + \sin \theta_{y,n} \sin \theta_{x,n} y - \sin \theta_{x,n} \cos \theta_{y,n} z \\ \xi_n = \cos \theta_{y,n} y + \sin \theta_{y,n} z \\ \chi_n = \sin \theta_{x,n} x - \sin \theta_{y,n} \cos \theta_{x,n} y + \cos \theta_{x,n} \cos \theta_{y,n} z \\ \Delta R_n = Z_0 (\chi_n / Z_0 + Z_0 / \chi_n) \\ \Delta\phi_n = \arctan(\chi_n / Z_0) \\ w(\chi_n) = w_0 \sqrt{1 + (\chi_n / Z_0)^2} \end{cases}, \quad (3)$$

相干合成光束在远场的光强分布为

$$I_{\text{con}}(x, y, z) = \left[\sum_n E_n(x, y, z) \right] \left[\sum_n E_n(x, y, z) \right]^*, \quad (4)$$

而非相干合成在远场的光强分布为

$$I_{\text{non}}(x, y, z) = \left[\sum_n E_n(x, y, z) E_n^*(x, y, z) \right]. \quad (5)$$

不考虑大气传输时的消光、湍流等效应,图1所示的光纤激光阵列聚焦传输,相干合成和非相干合成在10 km处的光强分布如图3所示。图3中曲线为光强沿 y 方向的分布,曲线两侧分别为光强的二维分布。

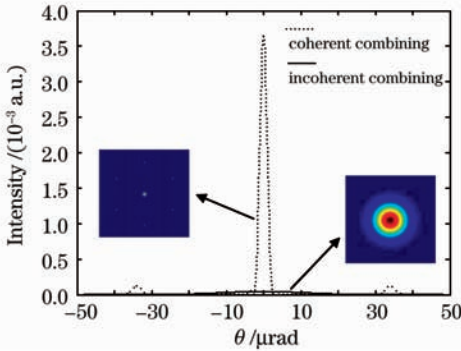


图3 10 km处光强分布

Fig.3 Intensity distribution profile for coherent combining and incoherent combining at the distance of 10 km

图3所示的相干合成与非相干合成远场光强分布的桶中功率曲线如图4所示。图3,图4表明,相干合成远场光束能量呈现典型的非高斯分布特征,中央有一个主峰,周围有很多旁瓣,大部分能量高度集中在发散角为2 μrad 的圆桶内。相干合成远场光斑的峰值强度远大于非相干合成的情形。在远场半径为5.6 cm的圆桶内,相干合成可以汇聚150.2 kW

的能量,而对于非相干合成仅有32.6 kW。由于光束之间的相干相消作用,主峰以外相当大的面积内没有光强分布,导致发散角为15~35 μrad 的桶中能量甚至不及非相干合成的情形。

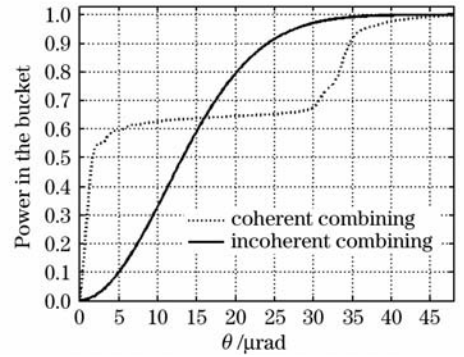


图4 相干合成与非相干合成远场光强分布的 PIB 曲线

Fig.4 Power in the bucket (PIB) curve of far-field optical intensity distribution for coherent combining and incoherent combining

3.1 相位误差的影响

一般而言,相干合成要求严格控制各路光束的相位,对于各路光束彼此相互平行的发射情形,为了保证远场的效果,一般需要保证各路光束之间的相位误差均方根(RMS)小于 $\pi/10$ ^[15,16]。假设各路光束的相位为 φ_n ,并服从 $\varphi_n \sim N(0, \sigma^2)$ 正态分布,此时相干合成远场光强分布可计算为

$$I_{\text{con}}(x, y, z) = \left[\sum_n E_n(x, y, z) \times \exp(i \times \varphi_n) \right] \times \left[\sum_n E_n(x, y, z) \times \exp(i \times \varphi_n) \right]^* \tag{6}$$

而非相干合成由于对相位一致性没有要求,远场光强分布不受相位误差的影响。

根据(6)式计算得到相干合成远场光强分布的 PIB 曲线与相位误差的关系如图 5 所示。相位误差均方根为 $\pi/3$ 时,半径为 5.6 cm 的圆桶内汇聚的能量仍大于完全相干合成情形下的 90%。图 5 表明,聚焦发射体制与平行发射相比,对相位误差的要求宽松了很多。

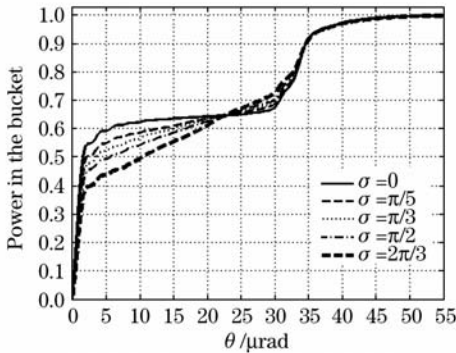


图 5 相干合成远场光强分布的 PIB 曲线与相位误差的关系

Fig. 5 PIB dependence on phase error for coherent combining

3.2 光束抖动的影响

在实际发射系统中,光束的抖动是不可避免的,特别是在光学跟踪瞄准系统中,由于跟踪残余误差带来的跟踪抖动将会使传输光束发生漂移及扩展,这对众多激光工程应用产生严重的影响^[17~19]。对于相干合成和非相干合成的情形,光束抖动也毫无例外地将影响远场的能量分布。此时各路光束的倾角变为 $(\theta_{nx} + \delta\theta_{nx}, \theta_{ny} + \delta\theta_{ny})$,其中 $\delta\theta_{nx}$ 和 $\delta\theta_{ny}$ 为抖动误差,服从 $\delta\theta_{nx} \sim N(0, \sigma^2), \delta\theta_{ny} \sim N(0, \sigma^2)$ 的正态分布。利用(4),(5)式计算相干合成与非相干合成的光强分布 PIB 曲线与抖动误差均方根 σ^2 的关系如图 6 所示。为了便于对比分析,在图 6(a)中同时绘制了相干合成与非相干合成时的 PIB 曲线。由图 6(a)可以看出,相干合成远场能量分布受到了光束抖动的严重影响。均方根为 $2 \mu\text{rad}$ 的光束抖动使得 5.6 cm 的圆桶内汇聚的能量降低了一半。随着抖动误差的增大,相干合成的远场光强分布逐渐演化至非相干合成时的情形;而由图 6(b)可以看出,非相干合成所受的光束抖动的影响就要小得多,均

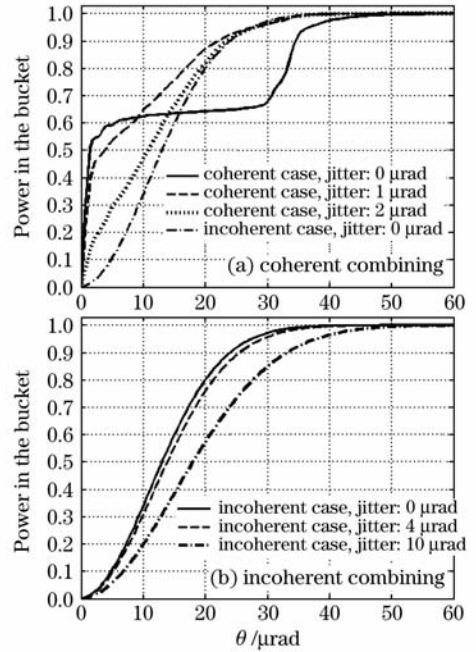


图 6 远场光强分布的 PIB 曲线与抖动误差的关系

Fig. 6 PIB dependence on beam jitter

方根为 $2 \mu\text{rad}$ 的光束抖动基本不会造成远场光强分布的改变。

3.3 占空比的影响

在计算中,取相邻光束中心点之间的距离 $d = 3\omega$,即激光阵列紧密排列,各路发射望远镜之间没有间隙。这在工程实际中几乎不可能做到。对于各路光束彼此相互平行的发射情形,研究表明当相邻光束间距加大时,相干合成的效果将急剧变差^[9,16]。为了研究描述的聚焦发射情形光束间距对远场光强分布的影响,定义占空比 $t = (d - 2\omega)/\omega, t$ 越大,相邻光束间距也就越大。数值计算得到的远场光强分布的 PIB 曲线与不同占空比的关系如图 7 所示。

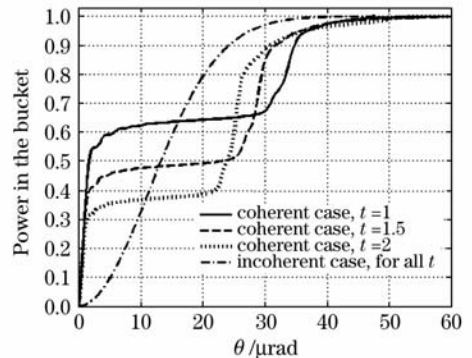


图 7 相干合成与非相干合成远场光强分布的 PIB 曲线与占空比的关系

Fig. 7 PIB dependence on fill factor for coherent combining and incoherent combining

随着占空比的增大,相干合成远场光强分布发生了显著的变化,5.6 cm的圆桶内汇聚的能量急剧减少。而对于非相干合成的情形,远场光强分布不受占空比的影响。

4 结 论

从控制相位误差、光束抖动和阵列占空比等三方面对相干合成和非相干合成光束的远场特性进行比较研究。计算结果表明,与非相干合成相比,相干合成能够在远场获得更高的能量集中度。但相干合成的效果会受到光束抖动和阵列占空比的严重影响。随着光束抖动误差角的增大,相干合成光束的远场光强分布逐渐演化至非相干合成时的情形。随着占空比的增大,相干合成远场光强分布发生了显著的变化,5.6 cm的圆桶内汇聚的能量急剧减少;相比之下,非相干合成所受的光束抖动的影响就要小得多,并且不受占空比的影响。还通过数值计算得出,和通常考虑的平行发射相比,聚焦发射体制对相干合成时相位误差的要求宽松了很多,相位误差均方根为 $\pi/3$ 时,半径为5.6 cm的圆桶内汇聚的能量仍大于完全相干合成情形下的 90%。

参 考 文 献

- 1 Almantas Galvanauskas. High power fiber lasers [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, **15**(7):42~47
- 2 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3):567~577
- 3 Anping Liu, Roy Mead, Tracy Vatter *et al.*. Spectral beam combining of high power fiber lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5335**:81~88
- 4 <http://www.strommedia.us/25/2542/A254254.html> [OL]
- 5 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**:61020U
- 6 H. Bruesselbach, D. C. Jones, M. S. Mangir *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005,

- 30**(11):1339~1341
- 7 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):412~414
- 8 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1153~1158
- 何 兵,楼祺洪,周 军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1153~1158
- 9 Sun Ling, Zhao Hong, Yang Wenshi *et al.*. Study on coherent combination theory of multi-beam laser [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(2):111~113
- 孙 玲,赵 鸿,杨文是等. 多光束激光相干合成技术研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(2):111~113
- 10 D. C. Jones, A. M. Scott, S. Clark *et al.*. Beam steering of a fiber bundle laser output using phased array techniques [C]. *SPIE*, 2004, **5335**:125~131
- 11 Stuart Gray, Anping Liu, Donnell T. Walton *et al.*. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25):17044~17050
- 12 Fiber lasers: the next generation [OL], <http://www.cleoconference.org/materials/payne.pdf>.
- 13 <http://www.ipgphotonics.com> [OL]
- 14 Pan Duwu, Jia Yurun, Chen Shanhua. Optics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1997. 326
- 潘笃武,贾玉润,陈善华. 光学[M]. 上海:复旦大学出版社, 1997. 326
- 15 C. D. Nabors. Effects of phased errors on coherent emitter arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2):2284~2289
- 16 Yongzhong Li, Liejia Qian, Daquan Lu *et al.*. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**:957~963
- 17 Huang Yinbo, Wang Yingjian. The effect of tracking jitter on the beam spreading induced by atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):152~156
- 黄印博,王英俭. 跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):152~156
- 18 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Influence of turbulent atmosphere on the far-field coherent combined beam quality [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9):625~627
- 19 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10):1812~1816
- 周 朴,侯 静,陈子伦等. 多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1812~1816