

高功率光纤激光部分相干合成的可行性及效果分析

周 朴 刘泽金 许晓军 陈子伦

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出部分相干合成的概念, 论证了谱线宽度和偏振特性并不是影响高功率光纤激光部分相干合成的瓶颈。与完全相干合成的理想情形相比, 随着光束线宽的增大, 部分相干合成光束的远场光斑图样基本保持不变, 但峰值强度和斯特列(Strehl)比随之减小, 光斑能量越来越分散。利用数值计算的方法对部分相干合成与非相干合成光束的远场效果进行了比较分析。计算结果表明, 尽管线宽的存在降低了部分相干合成的效果, 但与非相干合成相比, 部分相干合成的光束仍具有较大优势。

关键词 激光器; 光纤激光器; 部分相干光; 相干合成; 部分相干合成

中图分类号 TN248 文献标识码 A

Feasibility Analysis and Effect Evaluation of Partially Coherent Combining of High Power Fiber Lasers

Zhou Pu Liu Zejin Xu Xiaojun Chen Zilun

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

Abstract We propose the concept of partially coherent combining and demonstrate that the linewidth and polarization do not confine partially coherent combination of high power fiber lasers. Numerical calculations show when the linewidths of single fiber laser beam get larger, the far-field pattern almost does not change, but the peak power and Strehl value of far-field spot get smaller, which means the degradation of the partially combined beam. Also we compare the far-field effect of partially coherent and incoherent combination, and the numerical results show that partially coherent combined beam has much higher peak intensity and narrower intensity spot than incoherent combined beam. Partially coherent combined beam still overpasses incoherent counterpart although the combined beam is degraded by a relatively large linewidth.

Key words lasers; fiber laser; partially coherent beam; coherent combining; partially coherent combining

1 引 言

将多个光纤激光器的输出光束进行相干合成是获得高功率、高光束质量激光的有效途径^[1,2]。相干合成要求每个单元光束的波长、偏振方向保持一致^[1]。目前单根高功率光纤激光器虽然能够保持近单模输出, 但输出光束实际上是一种部分相干光。输出光束的谱线很宽, 达到了几十纳米^[3], 而且偏振

方向随机变化, 这似乎不满足相干合成的基本条件^[1]。基于此, 美国有关研究人员专门撰文^[4], 对高功率光纤激光相干合成的可行性及应用前景进行了探讨, 认为最近研发的高功率连续波光纤激光器尽管输出功率已经达到了单根 2.5 kW, 并且保持基模(TEM₀₀)、高光束质量($M^2 < 1.2$)输出, 但是输出光束谱线较宽($\delta\lambda/\lambda \approx 1\%$)且随机偏振, 不能用于相干

收稿日期: 2007-09-03; 收到修改稿日期: 2007-10-08

基金项目: 国防科学技术大学基金(JC05-07-04)资助课题。

作者简介: 周 朴(1984—), 男, 安徽枞阳人, 博士研究生, 主要从事光纤激光及其相干合成技术等方面的研究。

E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

合成,从而基本否定了高功率光纤激光相干合成的可行性。本文拟从实现相干合成的基本条件出发,提出部分相干合成的概念,论证谱线和偏振特性并不是影响高功率光纤激光相干合成的瓶颈。对线宽较大的光纤激光进行部分相干合成远场效果进行数值计算,并与非相干合成的情形进行比较。

2 实现相干合成的基本条件

将多个光纤激光器的输出光束进行相干合成的目的在于通过光波的干涉引起光强的重新分布,从而在目标处获得高亮度的激光,而非相干合成的效果只是光强的简单叠加。从本质上说,相干合成与非相干合成的区别就在于各激光器出射的光束在传输过程中能否发生干涉。干涉发生的条件为:1)光波中存在相同频率的分量;2)光波相位差恒定;3)光波中存在相互平行的振动方向。相干实际上包含了完全相干和部分相干两种情况,保持多束单线宽、单偏振激光的波长、偏振方向、相位完全一致将获得完全相干的效果。输出光束谱线较宽、随机偏振的光束显然不可能实现完全相干,但不能简单认为高功率光纤激光因此不能实现相干合成。尽管它的输出光束谱线较宽,但是在技术上(如采用光纤光栅)还是可以做到保证多个光纤激光器输出光束中心波长保持一致且谱线尽可能地重合,这样就可以保证光波中存在相同频率的分量,这样谱线较宽的光波之间仍能够发生干涉,且已经被许多实验证实;而输出光束的偏振方向也不是没有任何规律的随机变化,IPG公司的实验表明^[5],只要种子光是单频线偏振,掺杂光纤即使是非保偏,高功率光纤放大器输出光束仍可以保持良好的线偏振性(消光比大于15 dB),这样,通过适当的技术措施就可以保证各路光束偏振方向的一致性。因此,只要通过主动或被动锁相的方法保持各激光器单元输出光束相位一致,就可以实现高功率光纤激光的部分相干合成,而并不要求单元激光的完全相干性。谱线和偏振特性并不是影响高功率光纤激光相干合成的瓶颈。文献^[6]有两束同相位部分相干光干涉图样的例子。

3 谱线宽度对部分相干合成的影响

高功率光纤激光是一种部分相干光,它的线宽将影响部分相干合成的效果。利用 PPCB(Pseudo-partially coherent beam)模型^[7~9]计算高功率光纤激光器阵列发出的部分相干光在远场的能量分布,

分析激光的线宽对部分相干合成的影响。

如图1所示^[9],PPCB模型利用将一束完全相干光通过相位屏的方法产生部分相干光的光场,利用菲涅耳衍射或傅里叶变换计算部分相干光的光场在远场的振幅和强度分布,并将此过程重复多次,对所得结果求平均得到部分相干光传至远场的振幅和强度分布。

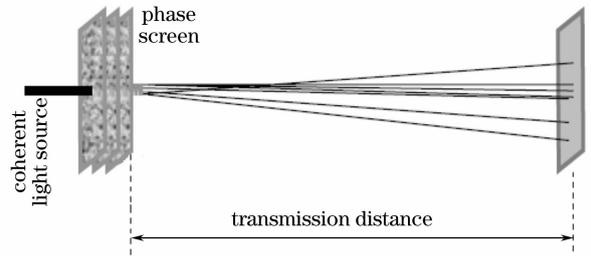


图1 PPCB模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of modeling partially-coherent beam using PPCB method

与高斯-谢尔模型不同,PPCB模型对光束的振幅和空间相干性分布没有任何要求。用PPCB模型描述部分相干光关键在于调制相干光复振幅分布的相位屏。

文献^[7~9]给出了相位屏的建模方法:设相位屏的透射率函数为 $\xi(x, y)$,且

$$\xi(x, y) = r(x, y) \otimes f(x, y), \quad (1)$$

(1)式中 x, y 为空间坐标, \otimes 表示数学卷积运算, $f(x, y)$ 满足

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (2)$$

$r(x, y)$ 是一个满足均值为0,方差为 σ_r 的随机分布函数。要获得相干长度为 l_c 的部分相干光光场分布,相位屏透射率函数的参量要满足

$$l_c^2 = \frac{16\pi\sigma_i^4}{\sigma_r^2}, \quad (3)$$

设单根光纤激光器输出光束的平均波长为 $\bar{\lambda}$,线宽为 $\Delta\lambda$,则此光束的相干长度 l_c 为

$$l_c = \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}, \quad (4)$$

因此对于具有一定线宽 $\Delta\lambda$ 的部分相干光,可以根据(1)式~(4)式制作相位屏即可得到该部分相干光的光场分布,进而可以分析其传输过程和远场特性。

如图2所示,将 $M \times N$ 个激光器排布成二维阵列。假设单根光纤激光器输出腰斑半径为 w_0 的基模高斯光束,在 x, y 轴方向上激光器间距分别为 x_d 和 y_d 。

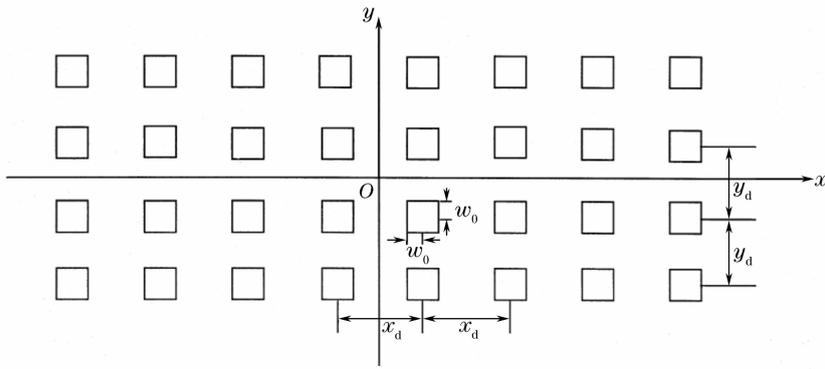


图 2 光纤激光器阵列的排布方式

Fig. 2 Configuration of fiber laser array

在理想情况下,激光器输出光束为完全相干光,单元激光器出射面光场复振幅分布为

$$E_{mn}(x, y) = \exp\left[-\frac{(x - mx_d)^2 + (y - ny_d)^2}{w_0^2}\right],$$

$$m \in \left[-\frac{M}{2}, \frac{M}{2}\right], \quad n \in \left[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}\right], \quad (5)$$

此时远场复振幅和光强分布分别为

$$E_{\text{con}} = \mathcal{J}\left[\sum_m \sum_n E_{mn}(x, y)\right],$$

$$I_{\text{con}} = |E_{\text{con}}|^2, \quad (6)$$

而实际高功率光纤激光器的输出光束为部分相干光,远场复振幅和光强分布分别为

$$E_{\text{par}} = \mathcal{J}\left[\sum_m \sum_n [E_{mn}(x, y)\xi(x, y)]\right],$$

$$I_{\text{par}} = |E_{\text{par}}|^2, \quad (7)$$

其中 $\xi(x, y)$ 为相位屏的透射率函数,其参量 σ_r, σ_t 可以根据输出光束的平均波长 $\bar{\lambda}$ 、线宽 $\Delta\lambda$ 以及(3)式确定。

而对于非相干合成的情形,远场光强分布为单根光纤激光器在远场光强分布的简单叠加,即

$$I_{\text{non}} = \sum_m \sum_n |\mathcal{J}\{E_{mn}(x, y)\}|^2. \quad (8)$$

设共有 10×10 根光纤激光器等距排列成一个二维激光器阵列,单根光纤激光器输出光束腰斑半径为 1 cm,激光器单元之间的距离为 2.2 cm,光束的平均波长 $\bar{\lambda} = 1000$ nm。针对线宽 $\Delta\lambda$ 取不同值的情形编写计算机程序,分别制作了 100 个大小为 256×256 的相位屏,并根据(3)式~(5)式和(7)式计算激光器阵列输出光束在远场的光强分布。每一个 $\Delta\lambda$ 都对应了 100 个光强分布,对这些计算结果分别求平均并进行能量归一化,与单个激光器输出光束为完全相干光时的计算结果一并列入图 3、图 4。图 4 中斯特尔比定义为对应于不同线宽的部分相干合成光束远场峰值强度与完全相干合成光束远场峰值强度的比值。

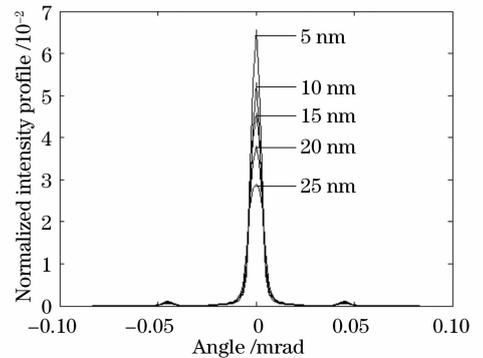


图 3 不同线宽对远场光斑能量分布的影响

Fig. 3 Effects of linewidth on far-field spot energy distribution

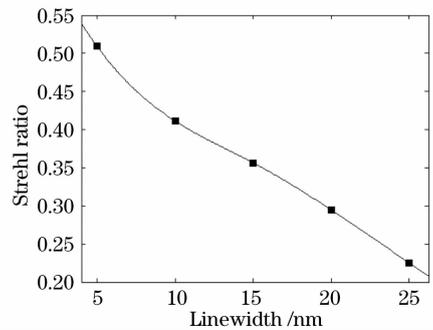


图 4 不同线宽对远场光斑斯特尔比的影响

Fig. 4 Effects of linewidth on Strehl ratio of far-field spot

由图 3、图 4 可以看出,与单根激光器输出光束为完全相干光的理想情况相比,激光器输出光束部分相干性并未对远场光斑的图样造成很大的变化,但是光斑的能量分布有所扩散,峰值强度降低。随着线宽的增加,光束的相干性退化,远场光斑的峰值强度和斯特尔比随之减小,合成光束的质量也随之下降。

计算结果表明,尽管在高功率的情形下单个激光器输出激光的线宽较大,但由于各光束之间存在着相同的频率成分,部分相干合成还是可以实现的。另外,通过适当的技术手段可以保证光纤激光的偏

振方向一致性,因此,谱线和偏振特性并不是影响高功率光纤激光相干合成的瓶颈。高功率光纤激光的相干合成,关键还在于各单元激光之间的相位能否被锁定^[10~12],实现同相输出。

4 部分相干合成与非相干合成的远场效果比较

众所周知,对 N 束功率相同的完全相干光进行非相干合成,则远场峰值强度增加至 N 倍;而如果进行完全相干合成,则远场光场的振幅增至 N 倍,峰值强度增至 N^2 倍。分析计算表明,部分相干合成的效果随着线宽的增大而降低,线宽的存在使得部分相干合成与非相干合成的效果之间不再是简单 N^2 与 N 的关系。假定单根光纤激光输出光束线宽 10 nm,其余参量采用与第二部分相同设置,计算此时 100 根光纤激光部分相干合成与非相干合成的远场效果,如图 4 所示。在单根输出光束为完全相干光的理想情形下,完全相干合成光束远场峰值强度是非相干合成情形下的 100 倍,而计算结果表明,当单根光纤激光输出光束的线宽达到 10 nm 时,部分相干合成光束远场峰值强度约为非相干合成情形下的 32 倍。但是由图 5 可以看出,部分相干合成的光束仍具有峰值强度高、能量集中的特点,与非相干合成相比具有较大优势。

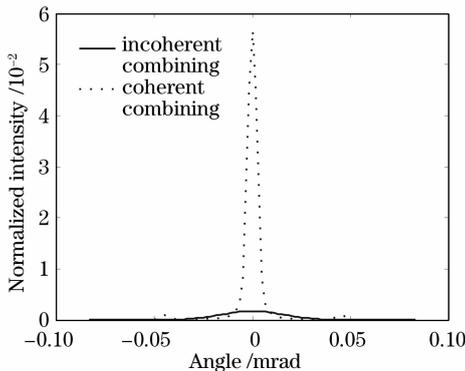


图 5 宽谱线光纤激光部分相干合成与非相干合成远场光强分布

Fig. 5 Far-field intensity distribution of partially coherent combining and incoherent combining of fiber lasers with large linewidth

5 结 论

当单根光纤激光器输出功率达到千瓦量级时,

输出光束的谱线较宽且偏振方向随机,但这并不是制约高功率光纤激光相干合成的关键因素。只要能够控制这些光束的相位使其保持一致,还是可以实现部分相干合成的,只是与完全相干合成的理想情形相比,随着激光器输出光束线宽的增大,光斑的峰值强度和斯特尔比随之减小,光斑能量越来越分散。尽管线宽的存在降低了部分相干合成的效果,但与非相干合成相比,部分相干合成的光束仍具有较大优势。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280
何 兵,楼祺洪,周 军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 3 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 4 Phillip Sprangle, Joseph Penano, Bahman Hafizi *et al.*. Incoherent combining of high-power fiber lasers for long-range directed energy weapons applications [C]. *SSDLTR Technical Digest*, 2006. BC-10
- 5 O. Shkurikhin, D. V. Gapontsev, R. Yagodkin *et al.*. 400W+ and 100W+ Er:Yb single-frequency, single mode, linearly polarized all-fiber format amplifiers [C]. *SSDLTR*, 2006. FiberZ-1
- 6 Eugene Hecht *Optics* [M]. Fourth Edition, Zhang Cunlin transl., Beijing: Higher Education Press, 2005. 672~679
Eugene Hecht. *光学* [M]. 第 4 版,张存林译,北京:高等教育出版社,2005. 672~679
- 7 Xifeng Xiao, David Voelz. Wave optics simulation approach for partial spatially coherent beams [J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(16): 6986~6992
- 8 Xifeng Xiao, David Voelz. Wave optics simulation of pseudo-partially coherent beam propagation through turbulence: application to laser communications [C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6304**: 63040L-1~63040L-7
- 9 Xifeng Xiao, David Voelz. Wave optics simulation of partially coherent beams [C]. *Proc. SPIE*, 2005, 5892: 58920Q-1~58920Q-7
- 10 Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 18.3 W from two phase locked double-cladding fiber laser array [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 229
楼祺洪,何 兵,周 军. 相位锁定双包层光纤激光器阵列获得 18.3 W 的相干输出 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 229
- 11 Zilun Chen, Jing Hou, Zongfu Jiang. Theoretical analysis of thermal effects in fiber laser from the moment when pump is turned on to steady-state [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 178~180
- 12 Steven J. Augst, Jinendra K. Ranka, T. Y. Fan *et al.*. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1707~1715