

文章编号: 1007-6654(2010)01-0074-05

高功率激光器 MOPA 相干合成系统分析

徐利国, 方存忠, 蒋万铎, 洪成华, 崔洪亮, 浦源

(第二炮兵青州士官学校, 山东 青州 262500)

摘要: 输出功率和光束质量一直以来都是高功率激光器的两大技术难点。本文采用并联主振荡-功率放大(MOPA)相干合成方法来提高输出光束的功率和光束质量。建立多级 MOPA 相干合成系统模型,通过计算分析,得到耦合效率、合成效率对合成功率密度及系统输出功率大小的影响;并对模型略加扩充,得到相位偏差对相干合成功率密度的影响,为高功率激光器的设计提供依据。

关键词: MOPA; 相干合成; 高功率; 相位差

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

目前,单根光纤激光器的输出功率已经超过千瓦量级,但是由于受到受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)等非线性效应的影响,单根光纤激光器的最终输出功率还是受到限制。要在保证光束质量的同时进一步提高输出功率就需要采用相干组束技术,但是当参与相干合成的激光器或放大器的数目增大到一定程度时,最佳实践方案当属并联主振荡-功率放大(MOPA)方法^[1]。该方案的特点是高亮度输出光束,输出高稳定性,功率可扩展至数千瓦,输出功率随纤芯数目增加,同时保持优良的光束质量,输出功率随光纤长度线性扩展。国外的锁相光纤激光器阵列采用的方案基本都是利用种子激光器经过分束器分束后,进入多路光纤放大器中进行功率放大,再锁相输出。论文的研究就是以这种相干合成技术为背景展开的。

1 MOPA 相干合成系统方案

根据高斯光束的传输特性,把多个光纤激光

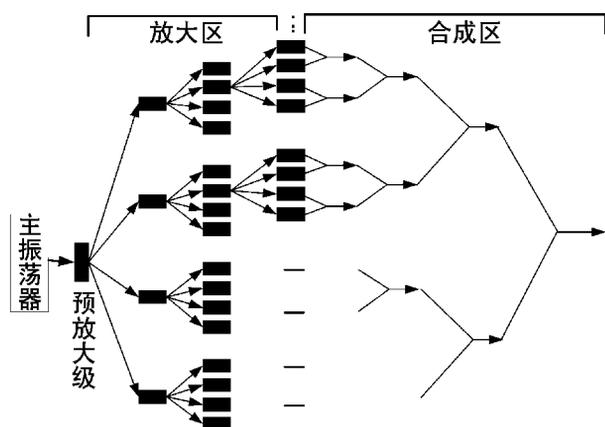
器以阵列的方式排列,用锁相相干的方法使得多个经过调试的激光器产生的激光束耦合成一束相干的高斯光束^[2]。基于这一思想,不但可以把许多台输出功率不大的激光器进行线阵或面阵排列,使若干台激光器相干耦合后的输出功率比单台激光输出功率高 1~2 个数量级,且可使相干合成的输出光束与单台输出具有相同的模式和光束能量分布,这种合成效率可达 75%~90%。2003年,NGST的研究人员提出了 MOPA 相干合成实验方案^[3]。如图 1 所示,选择光束质量接近衍射极限的小功率激光器作为主振荡器,用分束器将主振荡器输出光分成 N 束后注入 N 台并行排列的相同光纤放大器中放大,在放大器的输出端干涉合成。光纤放大器采用单模保偏纤芯双包层光纤放大器,因此放大器不会对光束质量产生严重影响。但是光纤长度的细微差别,以及各种外在因素的影响导致放大器输出光束相位不同。为了解决这个问题,每个放大器都配置了一个受控的相位调节器,并且在 N 个子光束中选择一束作为参考光,用探测器获得每个子束相位相对于

收稿日期: 2009-04-01; 修回日期: 2009-11-10

作者简介: 徐利国(1983-),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事高功率激光器的光束叠加和控制方面的研究。

E-mail: xlg198377@163.com

参考光束的差别作为控制信号,控制信号经相位控制系统处理后送到受控的相位调节器,形成闭环控制,达到锁相的目的。



(图中未标出级间耦合系统及光束分束和合束器件)

图 1 级联 MOPA 光束相干合成系统模型示意图

Fig 1 The model of cascading MOPA coherent beam combining system

通过这个模型就可以构建出两路激光光束相干合成方案,实现两路同源光束稳定的相干合成。主振荡器是一个带有被调制的驱动电流的分布反馈激光器,发射出一束光谱极宽的激光用来抑制那些影响输出功率的受激布里渊散射和四波混频寄生的非线性效应。主振荡器发出的激光被分成 8 路,1 路为参考臂,另外 7 路为放大信号臂。参考臂在一个声光布拉格晶格里产生了频移,然后每个信号臂的采样与参考光束进行干涉,产生一个外差拍状跳动波形用来测量相对于参考臂的信号臂的相位。每个臂的相位均通过一个控制电压调节成独立的铌酸锂波导相位调节器。在功率放大器之前,两套前置放大器输出 3 W 以上的功率,然后通过光纤输出端,抽运光被注射到功率放大器中,最后每束信号输出光被引导到一个输出列阵和修正相位的棱镜上。该方法采用多级放大,以获得更高的输出功率。如果主振荡器的输出功率太小,可以在主振荡器和第一级光纤放大器之间加一个预放大器,提高激光放大器的转换效率。

2 MOPA 相干合成系统分析

如图 1 所示,主振荡器出射光束经预放大级放大后,等分为 N 束,每一束经光学耦合系统注入下一级并行放大器中,如此一级一级的分束、放大,并且每一级中放大器个数是上一级的整数倍。在级联 MOPA 系统末级的输出端,以两两成对方式进行光束相干合成,直至成为一个大功率密度光束输出。显然第 J 级中,一个激光放大器的输出功率密度可以表示为:

$$P_j^{out} = G_j \left[\frac{N_{j-1}}{N_j} \epsilon_{cpl} P_{j-1}^{out} \right] \quad (1)$$

其中: N_j 是第 J 级中激光放大器的个数, G_j 是单个放大器增益, ϵ_{cpl} 是级间光学耦合效率,假设各级间的耦合效率均相等,且定义为:

$$\epsilon_{cpl} = \frac{\text{注入放大器的激光功率}}{\text{入射到该激光器耦合系统的激光功率}} \quad (2)$$

对于单个放大器而言,在该模型尺度下,根据 A. E. Siegman 在《激光器》一书中给出的理论^[4],式 (1) 也可以表示为:

$$P_j^{out} = \frac{0 - 0}{0} P_{sat} \frac{1 - (G_0/G_j)^{0' 0}}{(1/G_j) - (G_0/G_j)^{0' 0}} \quad (3)$$

其中: ϵ 是限制因子, ϵ_0 是增益系数, ϵ_0 是损耗系数, P_{sat} 是饱和功率, G_0 是系统小信号增益。如果用主振荡器的输出表示第 J 级放大器的输出功率则有:

$$P_j^{out} = \frac{\epsilon_{cpl} G_m}{N_j} P_0 \quad (4)$$

其中, P_0 是主振荡器的输出功率。在该模型中假设所有放大器均工作在饱和状态下,并且各级之间的耦合效率相等。放大器的基本参数 ($\epsilon, \epsilon_0, \epsilon_0, P_{sat}, G_0$) 为固定常数。第 J 级中放大器的个数可以由公式 (2) 和 (4) 导出:

$$N_j = \frac{\left[\frac{1}{\epsilon_{cpl} G_m} \right] P_0 \epsilon_0 [1/G_j - (G_0/G_j)^{0' 0}]}{(\epsilon_0 - \epsilon) P_{sat} [1 - (G_0/G_j)^{0' 0}]} \quad (5)$$

一旦 N_j 已知, 就可以由 N_j/N_{n-1} 获得每一级中放大器分束的数量, 将其代入方程 (4) 可求出各级中一个放大器的输出功率。将末级单台放大器输出功率乘以 N_j 倍, 就得到了主振荡器经过多级放大后的光功率。总功率的大小随着级间耦合效率 cpl 的变化而改变。

再将经放大后的多个光束两两相干合成。这里为了简洁起见, 假设所有光束都以相同的合成效率 cmb 进行合成。系统中很小的偏差都将对合成效率产生影响, 因为每一级偏差都将累积到下一级, 导致了整体合成效率大幅度的下降, 整体合成效率 $total$ 表示为:

$$total = (cmb)^{\log(N_j)/\log(2)} \quad (6)$$

其中:

$$cmb = \frac{\text{实际干涉合成光功率密度}}{\text{理论上干涉合成功率的最大值}} \quad (7)$$

$$N_j = 2^n \quad (n \text{ 为两两合成的级数})$$

知道了合成效率, 就可推导出相干合成最终的输出功率密度:

$$P_{cmb} = 2^{2n} \frac{\prod_{m=1}^n cpl G_m}{N_j} P_0 (cmb)^{\log(N_j)/\log(2)} \quad (8)$$

将 $N_j = 2^n$ 代入上式得:

$$P_{cmb} = N \left[\prod_{m=1}^n cpl G_m \right] P_0 (cmb)^{\log(N_j)/\log(2)} \quad (9)$$

由单色平面波的干涉理论可以得到^[5,6]: 两个偏振方向相同、光强相等的光束同轴干涉的干涉光强表达式为:

$$I = 2I_0(1 + \cos \phi) = 4I_0 \cos^2(\phi/2) \quad (10)$$

其中, I 为两束光合成后的干涉光强, I_0 为单束光的光强, ϕ 为两束光的相位差。当 $\phi = 2n$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$) 时上式有最大值, 即 $I = 4I_0$, 将其和 (10) 式代入 (7) 式得:

$$cmb = \frac{4I_0 \cos^2(\phi/2)}{4I_0} = \cos^2(\phi/2) \quad (11)$$

根据上式得出了光束两两合成效率随两光束之间相位差在 $-\pi \sim \pi$ 的一个周期内变化的曲线, 如图所示。

将上式代入式 (9) 得到当所有合成光束的偏

振方向、光强都相同时, 系统合成功率密度表达:

$$P_{cmb} = N \left[\prod_{m=1}^j cpl G_m \right] P_0 (\cos^2(\phi/2))^{\log(N_j)/\log(2)} \quad (12)$$

图 (2) 和 (3) 分别给出了一级放大系统和三级放大系统中合成功率密度随光束之间相位差在 $-\pi \sim \pi$ 的一个周期内变化的变化曲线。为了清楚的表达出光束之间相位差的变化对合成功率密度的影响, 设 $G_1 = G_2 = G_3 = 20 \text{ dB}$, $P_0 = 1$ 且每次分束的个数都为 8。

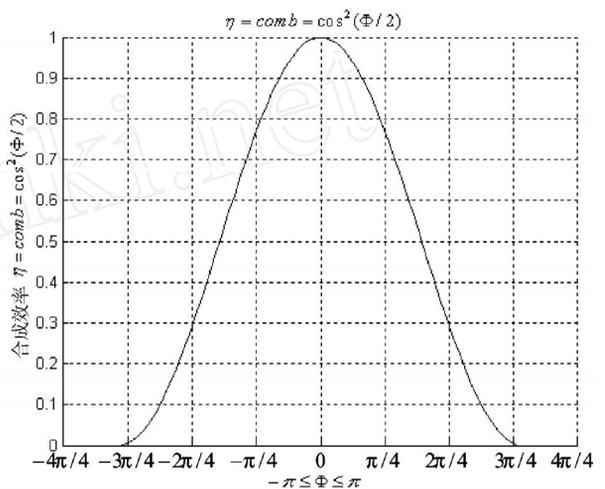


图 2 光束两两合成效率随两光束之间相位差在 $-\pi \sim \pi$ 的一个周期内的变化曲线

Fig 2 the curve of two beams combining efficiency along with the phase warp in $-\pi \sim \pi$

从图 (2) 中可以看出三级级联相干合成系统, 理论上输出功率密度可以达到 G 瓦级, 即使激光放大器在非小信号放大时的放大倍数达不到 100 倍即 20 dB, 系统输出也能够达到兆瓦级^[7]。但是合成功率随着相位偏差的加大而迅速下降, 当相位偏差达到 $\pi/4$ 时, 系统合成功率密度降低到理论极大值的 20% 左右, 这时就失去了相干合成的意义。

图 (4) 所示, 如果在一级系统中, 分束的个数仍然是 8, 合成功率随着相位偏差的加大而下降, 但是相对于三级系统而言, 相位偏差对系统的合成功率的影响明显减小。但是, 当相位偏差达到 $\pi/4$ 时, 系统合成功率密度也仅为理论极大值的 65% 左右。合成功率密度的下降仍然很显著, 可

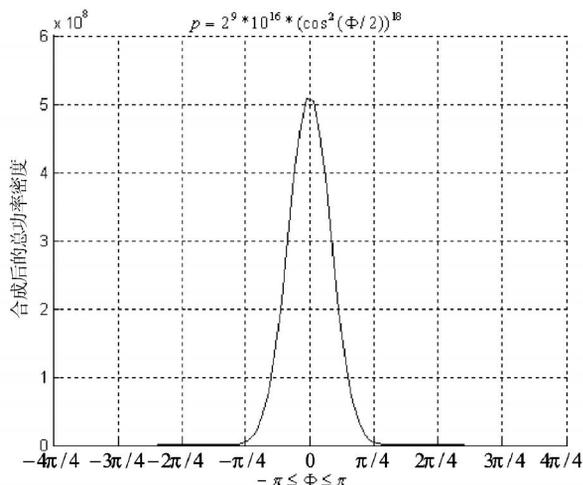


图 3 当 $m = 3, G_1 = G_2 = G_3 = 20\text{dB}, P_0 = 1, N_j = 512$ 时,系统合成的总功率密度随两光束之间相位差 Φ 的一个周期内变化的曲线

Fig 3 $m = 3, G_1 = G_2 = G_3 = 20\text{dB}, P_0 = 1, N_j = 512$ the curve of system coupling efficiency along with the two beams phase warp in Φ

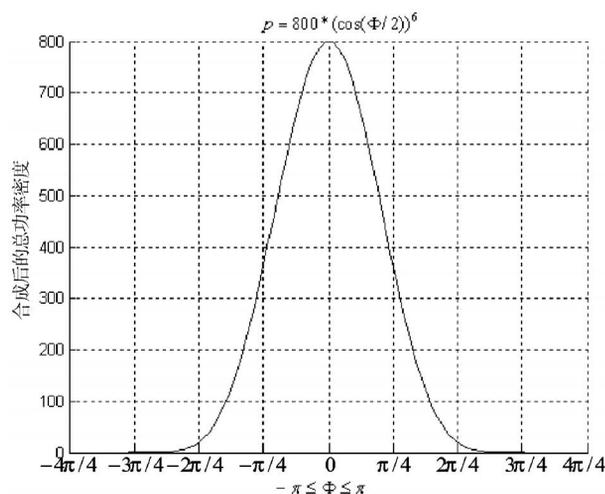


图 4 当 $m = 1, G_1 = G_2 = G_3 = 20\text{dB}, P_0 = 1, N_j = 8$ 时,系统合成的总功率密度随两光束之间相位差 Φ 的一个周期内变化的曲线

Fig 4 $m = 1, G_1 = G_2 = G_3 = 20\text{dB}, P_0 = 1, N_j = 8$ the curve of system coupling efficiency along with the two beams phase warp in Φ

见在相干合成中相位的高度匹配是必须的。

当然,除了相位的影响以外还有其它因素影响相干合成的合成功率密度,其中主要的是系统

中光学耦合效率的影响。如图(5)所示为在不同的合成效率下,三级 MOPA 系统的合成功率密度随级间耦合效率 η_{cpl} 从 0~1 变化时的变化曲线。显然在三级系统中,级间耦合效率的好坏对系统的合成功率密度影响很大。而且由式(1)可知这种影响将随着系统的级数的增加而呈指数关系加大,所以在一级 MOPA 结构中级间耦合的影响最小。

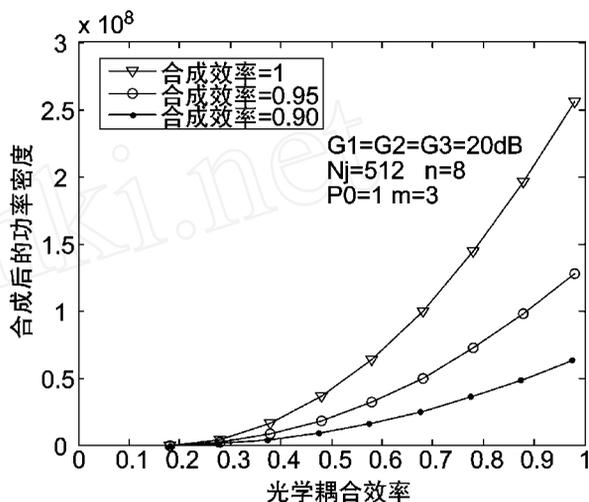


图 5 当 $m = 3, G_1 = G_2 = G_3 = 20\text{dB}, P_0 = 1, N_j = 512$ 时,系统合成的总功率密度在不同合成效率 η_{cmb} 下随级间光学耦合效率 η_{cpl} 的变化

Fig 5 $m = 3, G_1 = G_2 = G_3 = 20\text{dB}, P_0 = 1, N_j = 512$ the changing of system coupling efficiency with different η_{cmb} along with η_{cpl}

3 总结

由于系统受到多种环境以及自身因素的影响,光束的相位不仅不能很好地匹配,光束之间的相位差值还会随着外界影响因素的变化而处于不断的变化过程中,所以在提高系统合成功率密度的过程中,必须采取相应的办法控制光束的相位变化,以使各光束之间的相位差保持在 $2n\lambda$ 。

参考文献:

- [1] JOHANM JAYANTA K S, YOONCHAN J, *et al* High Power Fiber Laser New Development [J]. *SPIE*, 2003, **4947**: 50-59.
- [2] 李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 28-30.
- [3] GREGORY L. Shuster and John R, Andrews [J]. *APPLIED OPTICS*, 1995, **34**(30): 30 - 32.
- [4] SIEGMAN A E New Development Sinlaser [C]. *Proc SPIE*, 1990, **1224**: 2-14.
- [5] BRECK H ITZ, *et al* Setup Combines Ytterbium Fiber Lasers [J]. *Photonics Research May*, 2003, **5**: 94-95.
- [6] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [7] AUGST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L, *et al* Wavelength Beam Combining of Ytterbium Fiber Lasers [J]. *Opt Lett*, 2003, **28**: 331-333.
- [8] 楼祺洪, 朱建强, 周军, 等. 双包层光纤激光器及其在军事中的应用 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2003, **14**(5): 28 -32.

The Analysis of MOPA Coherent Combining System of High-power Laser

XU Li-guo, FANG Cun-zhong, JIANG Wan-duo, HONG Cheng-hua, CUI Hong-liang, PU Yuan

(The Second Artillery Sergeant School, Shandong, Qingzhou 262500, China)

Abstract: The output-power and beam-quality are the two critical technics of high-power laser. The paper adopts the MOPA coherent combining method to improve the output-power and beam-quality. Multilevel physics model of the system is established and the influence of coupling efficiency and combining efficiency to the combining power density and the output power is discussed. By doing some expansion, the influence of phase warr to the combining power density is got, which provides a basis for designing of high-power laser.

Key words: MOPA; coherent combining; high-power; phase difference