

文章编号:1001-5078(2007)08-0709-03

对非相干光纤激光组束系统最大阵列宽度的研究

胥杰,赵尚弘,周万银,李勇军
(空军工程大学电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘要:光纤激光组束系统的最大阵列宽度决定着可参与组束的光纤激光器个数,从而制约着组束激光的输出功率。通过对组束系统耦合效率的分析,光斑半径应不超过 $100\mu\text{m}$,透镜焦距不超过20cm。在此条件下,组束系统的最大阵列宽度约为0.6cm。

关键词:非相干组束;最大阵列宽度;耦合效率;光斑半径

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A

Research on the Maximum Array Width of Incoherent Fiber Laser Beam Combination

XU Jie, ZHAO Shang-hong, ZHOU Wan-yin, LI Yong-jun

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The number of fiber lasers that could be utilized to beam combination is up to the maximum fiber array width, which restricts the output power of combined laser. Through the analysis of system coupling efficiency, the spot radius should be less than $100\mu\text{m}$, lens focus should be less than 20cm. Under such condition, the maximum array width would be around 0.6cm.

Key words: incoherent beam combination; maximum array width; coupling efficiency; spot radius

1 引言

非相干光纤激光组束方法可以获得高亮度、高光束质量的合成光束,在工业、科研及军事领域具有广泛的应用前景。目前,利用光纤激光组束方法可得到千瓦量级的输出功率,满足了一定的工业和科研需要^[1],但是离更高一级的军事需求尚有一定距离。提高组束激光功率,简单来讲主要有两种方法,一是提高单根光纤激光器的输出功率,然而由于受到工艺水平的制约,单根光纤激光器的输出功率很难再有较大的提高;二是增加参与组束的光纤激光器个数,该方法看来似乎是可行的,但也受到最大阵列宽度的制约。下面对非相干光纤激光组束系统的最大阵列宽度做初步的研究。

2 组束方法及条件

一般的非相干组束方法是利用衍射光栅的耦合

效应,将多个组束光束合成一束光,得到高功率的激光输出,其基本结构如图1所示。

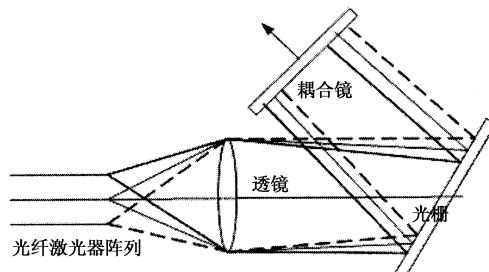


图1 非相干光纤激光组束基本结构

基金项目:国家自然科学基金(No. 60678018)资助。

作者简介:胥杰(1980-),男,博士研究生,研究方向为光电对抗与激光组束技术。E-mail:xujie1225@163.com

收稿日期:2006-11-25

根据光栅方程^[2]：

$$\sin\beta - \sin\alpha = \frac{m\lambda}{d} \quad |m| = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

其中， d 为光栅周期； α 为相对光栅表面法线的入射角； β 为 m 阶衍射波的衍射角。显然，只有特定波长、特定入射角的光束才能以相同衍射角输出，从而得到一束合成激光。增加参与组束的光纤激光器的个数能够增大组束激光的输出功率，但是一个重要的前提是组束系统的耦合效率不能有太大的变化，也就是说光纤激光组束系统的最大阵列宽度应以组束系统的耦合效率为前提，否则将会适得其反。

3 组束系统耦合效率分析

对于模场中心在 $x=0, y=Y$ 的高斯光束，光斑半径 w_0 ，并具有小的偏移角 θ_x, θ_y ，该高斯场可表示为：

$$E_0(x, y) = E_0 e^{-[x^2 + (y-Y)^2]/w_0^2 + ik(x\theta_x + y\theta_y)} \quad (2)$$

其中， Y 是光纤激光器高斯模场的纵向偏移。

组束系统的耦合效率^[3] $|J|^2$ 可表示为：

$$|J(\lambda)|^2 = \frac{e^{-4(\theta_x^2 + \theta_y^2)/\theta_0^2 - 4Y^2/w_0^2} e^{-4(\lambda - \lambda_0)^2/\Delta\lambda_B^2}}{\sqrt{(1 + \omega_x^2)(1 + \omega_y^2)}} \quad (3)$$

其中，波长带宽参数 $\Delta\lambda_B$ 可表示为：

$$\Delta\lambda_B = w_0 \frac{d\cos\alpha_0}{mf} \sqrt{1 + \omega_i^2} \quad (4)$$

式中， f 是传输透镜焦距； $\theta_0 = 2/kw_0$ 是高斯光束的远场发散角， $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢； ω_i 定义为：

$$\omega_i = \varepsilon/2Z_R \quad i = x, y \quad (5)$$

其中， ε 是光纤激光器相对高斯焦平面的离焦度； $Z_R = \pi w_0^2/\lambda$ 是模式瑞利长度。

综合式(3)~(5)，显然组束系统的耦合效率 $|J|^2$ 同激光波长 λ 、光纤激光器高斯模场的纵向偏移 Y 、光斑半径 w_0 、离焦度 ε 、光栅周期 d 以及传输透镜焦距 f 均有关系。对光斑半径 w_0 及传输透镜焦距 f 做仿真研究，仿真结果如图 2 所示。

从图 2(a) 可以看出组束系统的耦合效率随着传输透镜焦距 f 的变化不是很明显，但是却随着光斑半径 w_0 的增加而呈现先增大后减小的趋势，最佳的光斑半径 w_0 出现在 $40 \sim 80 \mu\text{m}$ 。图 2(b) 是图 2(a) 在光斑半径 w_0 方向的投影，由图可见随着透镜焦距 f 的增大，组束系统的耦合效率明显下降，并且最佳的光斑半径 w_0 值略有增大。

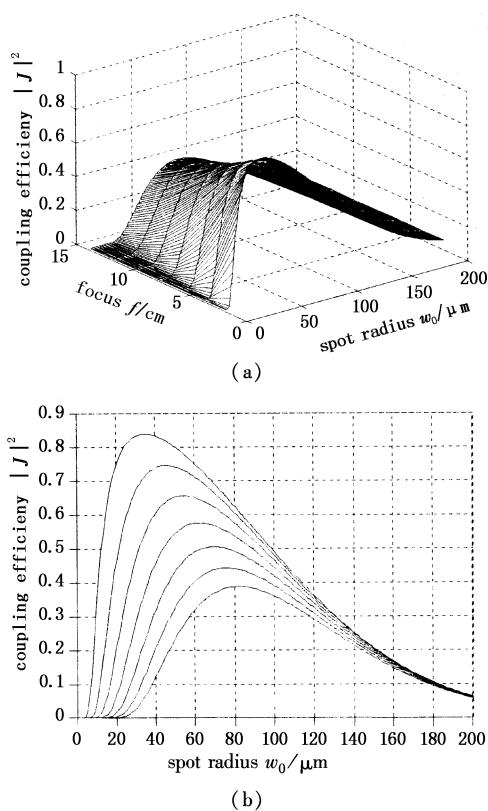


图 2 耦合效率随光斑半径 w_0 及透镜焦距 f 的变化关系

4 最大阵列宽度 W

对于图 1 所示的一维线性阵列排列光纤激光组束系统，系统的最大阵列宽度^[4] W 可表示为：

$$W = \frac{\sqrt{Z_R f}}{(\alpha^2 + \beta^2)^{1/4}} = \frac{w_0 \sqrt{\pi f / \lambda}}{(\alpha^2 + \beta^2)^{1/4}} \quad (6)$$

其中，参数 α 和 β 定义为：

$$\alpha = \frac{4n^2 + 2n - 3}{8n(n-1)^2} \quad \beta = -\frac{(2n-1)^2}{8n(n-1)^2} \quad (7)$$

很明显，决定组束系统最大阵列宽度的参数为传输透镜折射率 n ，透镜焦距 f 以及光斑半径 w_0 。首先研究最大阵列宽度 W 随折射率 n 的变化关系，如图 3 所示。

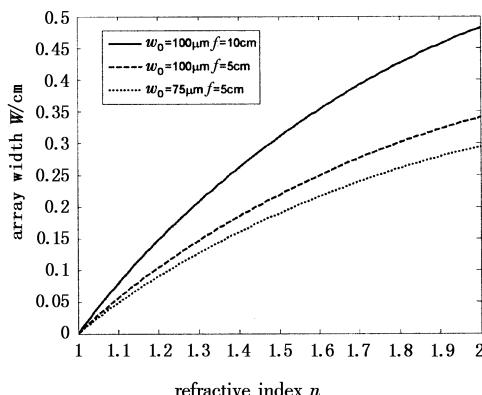


图 3 最大阵列宽度随折射率 n 的变化关系

从图3可以看出,光纤阵列的最大宽度基本上随着折射率 n 的增大而略有增加,但是增大不明显,因此对折射率 n 的控制不能成为增大光纤阵列宽度的有效途径。此外,从图3还可以看出较大的光斑半径 w_0 以及较大的透镜焦距 f 对增大光纤阵列宽度是有利的,因而取定折射率 $n=1.8$,对光斑半径 w_0 以及透镜焦距 f 作进一步的研究,研究是在确保系统耦合效率,即图2的基础上进行的。从图2可以看出,在此条件下要确保系统耦合效率在50%左右,光斑半径 w_0 不能超过100μm,透镜焦距 f 不超过20cm,折射率 n 取为1.5,仿真结果如图4所示。由图可知束系统的最大阵列宽度 W 随着光斑半径 w_0 及透镜焦距 f 的增加而增大,但变化不是很显著。在 $w_0=100\mu\text{m}, f=20\text{cm}$ 处最大阵列宽度 $W \approx$

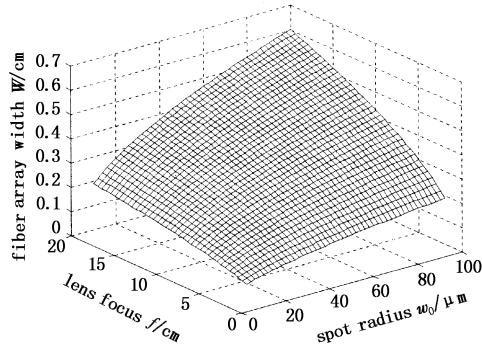


图4 最大阵列宽度随光斑半径 w_0 及透镜焦距 f 的变化关系

(上接第704页)

与谐振腔的激光振荡输出,如图10(b)所示。

另外,根据战术激光武器战场移动性的要求,LLNL于2002年开始研制用于驱动激光器的可充电锂电池能源系统。经过4年的研究,能源系统的体积已缩小为最初的1/4(如图11所示),并解决了与现有的混合电力战车兼容性问题,为实现100kW移动演示系统提供了保证。

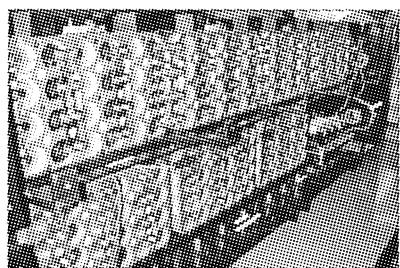


图11 SSHCL能源驱动系统

5 小结

在“J-HPSSL”计划竞标失败后,LLNL对激光

0.6cm,若以光纤之间间隔250μm计算,则可参与束的光纤激光器个数为24个,并且每个光纤激光器的耦合效率都可以保持在50%左右。

5 结论

束系统的最大阵列宽度随着光斑半径 w_0 及透镜焦距 f 的增加而略有增大,在 $w_0=100\mu\text{m}, f=20\text{cm}$ 处最大阵列宽度 $W \approx 0.6\text{cm}$ 。由于光斑半径 w_0 对应系统耦合效率的极大值,变化范围不能过大,因而增大最大阵列宽度的有效途径将是通过调整其他系统参数,在确保系统耦合效率的基础上获得尽可能大的透镜焦距 f 。

参考文献:

- [1] 胥杰,赵尚弘,等.利用光纤束获得机载软杀伤高功率光源[J].激光与红外,2006,36(10):1001-1003.
- [2] Erik J Bochow. Theory of spectral beam combining of fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002,38(5):431-432.
- [3] Erik J Bochow. Spectral beam combining model for fiber lasers[C]//Proceedings of SPIE, 2001, 4270(1):93-96.
- [4] Armen Sevian, Oleksiy Andrusyak. Spectral beam combining with volume Bragg gratings: Cross-talk analysis and optimization schemes[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6216(6):136-137.

介质、光学元件及泵浦耦合三个方面改进,使固体热容激光器在输出能量和光束质量方面都取得了重大突破,并进行了一系列损伤效应实验研究。100kW移动演示系统正在加紧研制,预计于2007年底完成。正是通过LLNL的这一系列研究工作,使固体热容激光器再度成为热点。

参考文献:

- [1] Yamamoto R M, et al. The solid-state heat-capacity laser (SSHCL) program at LLNL[C]//Proceedings of the Eight Annual Directed Energy Symposium, November 2005.
- [2] Goodno, et al. Coherent combination of high-power zigzag slab lasers[J]. Optics Letters, 2006, 31(9):1247.
- [3] Abbott R P, et al. 2006: High-powered solid-state laser: lethality testing and modeling[C]//Proceeding of the ASC2006, November 2006.
- [4] Yamamoto R M, et al. A solid state laser for the battlefield[C]//Proceeding of the ASC2006, November 2006.