

文章编号: 0253-2239(2010)04-1066-05

# 激光阵列部分相干合成的光束质量

周 朴 王小林 马阎星 马浩统 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 由于单束激光部分相干性和相位控制系统带宽性能的限制,大功率激光阵列的相干合成一般只能取得部分相干合成的效果。对存在相位控制残差情形下部分相干合成光束在真空中的传输特性进行分析,推导激光阵列在远场光强的解析表达式。对单束激光的相干性以及相位控制残差对合成光束质量的影响进行了定量计算。

**关键词** 激光光学;相干合成;部分相干合成;光束质量;相位控制

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1066

## Beam Quality of Partially Coherent Combining of Laser Array

Zhou Pu Wang Xiaolin Ma Yanxing Ma Haotong Xu Xiaojun Liu Zejin

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

**Abstract** Due to the partially coherence property of single laser beam and bandwidth of phase control system, partially combination is often obtained in coherent beam combining of high power lasers. The propagation property in free-space of partially coherent laser array in the case of residual phase error is analyzed, and the analytical expression of far-field intensity distribution is deduced. The influence of coherence of single laser beam and residual phase error on the combined beam quality is studied.

**Key words** laser optics; coherent combining; partially coherent combining; beam quality; phase control

## 1 引言

多路激光进行相干合成是获得高亮度激光输出的有效途径<sup>[1]</sup>,已成为激光技术领域的研究热点<sup>[2~8]</sup>。最近,美国 Northrop Grumman 公布 JHPSSL 项目的最新进展为通过相干合成 7 路 15 kW 级固体激光模块获得了 105 kW 高功率固体激光输出<sup>[3,8~11]</sup>。根据 Northrop Grumman 的光束质量因子(BQ)的定义可知,105 kW 激光的主瓣功率约 11.5 kW,光束质量并不理想,或者说只取得了部分相干合成的效果。其原因主要在于:单路 15 kW 固体激光模块的光束质量为 1.58<sup>[9]</sup>,单路激光已非单模输出,表现出一定的部分相干性;随着单路激光功率的增大,激光相位起伏剧烈程度随之增大<sup>[9]</sup>,受制于相位控制系统带宽性能,不可避免会引入相位残差。单路高功率固体激光的光束质量和高

功率固体激光相位控制技术仍待突破。在实际情形下,大功率激光相干合成往往是针对部分相干光进行的,并且存在一定的相位控制残差,称之为激光阵列的部分相干合成。近年来国内外研究人员已对激光阵列的传输特性进行了深入研究<sup>[12~19]</sup>,但对于讨论存在的相位控制残差情形下部分相干光的合成尚未见讨论。本文推导真空中传输的激光阵列部分相干合成远场光强的解析表达式,分析激光单元的部分相干性和相位控制残差对部分相干合成的影响,为大功率激光相干合成实验系统设计与性能评估提供参考。

## 2 理论推导

单个部分相干光在  $z=0$  平面上的交叉谱密度为<sup>[12,20]</sup>

收稿日期: 2009-04-27; 收到修改稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国防科技大学研究生创新基金(B070701)资助课题

作者简介: 周 朴(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤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方面的研究。Email: zevinliu@vip.sina.com

$$\Gamma_0(z=0) = \langle E(x_1, y_1) E^*(x_2, y_2) \rangle = \exp\left(-\frac{x_1^2 + x_2^2 + y_1^2 + y_2^2}{\omega_0^2}\right) \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (1)$$

式中  $\omega_0, \sigma_0$  分别为束腰宽度和相关长度。对于位于  $z=0$  平面上的二维部分相干激光阵列, 其交叉谱密度可表示为

$$\begin{aligned} \Gamma(x_1, x_2, y_1, y_2, 0) &= \left\langle \left\{ \sum_m E[(x_1 - x_m), (y_1 - y_m)] \right\} \sum_n \left\{ E^*[(x_2 - x_n), (y_2 - y_n)] \right\} \right\rangle = \\ &= \sum_m \sum_n \left\{ \exp\left[-\frac{(x_1 - x_m)^2 + (x_2 - x_n)^2 + (y_1 - y_m)^2 + (y_2 - y_n)^2}{\omega_0^2}\right] \times \right. \\ &\left. \exp\left[-\frac{[(x_1 - x_m) - (x_2 - x_n)]^2 + [(y_1 - y_m) - (y_2 - y_n)]^2}{2\sigma_0^2}\right] \right\} \times \langle \exp[i(\phi_m - \phi_n)] \rangle, \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $(x_m, y_m)$  是二维激光阵列中第  $m$  束激光的中心坐标,  $\phi$  为光束的相位。假设  $\phi$  是服从均值为 0, 方差  $\sigma_\phi^2 = \langle \delta \rangle^2$  的高斯分布, 则有<sup>[21, 22]</sup>

$$\langle \exp[j(\phi_m - \phi_n)] \rangle = \exp(-\langle \delta \rangle^2 / 2). \quad (3)$$

由(2)、(3)式可得  $z=0$  平面上的 Winger 分布函数为<sup>[23]</sup>

$$\begin{aligned} W_0(x, y, u, v, 0) &= \frac{k}{2\pi} \int \Gamma(x+s/2, x-s/2, y+t/2, y-t/2, 0) \exp[-ik(us+vt)] ds dv = \\ &= \frac{\beta^2 k^2 \omega_0^2}{2\pi} \sum_m \sum_n \exp\left\{-\frac{\beta^2 k^2 \omega_0^2 (u^2 + v^2)}{2} - \right. \\ &\left. \frac{[2x - (x_m + x_n)]^2 + [2y - (y_m + y_n)]^2}{2\omega_0^2} + ik(x_m - x_n)u + ik(y_m - y_n)v\right\} \times \exp(-\langle \delta_{mm} \rangle^2 / 2), \quad (4) \end{aligned}$$

式中

$$\delta_{mm} = \begin{cases} \delta, & m \neq n \\ 0, & m = n \end{cases}, \quad \beta = 1 / \sqrt{1 + (\omega_0 / \sigma_0)^2} \quad (5)$$

$\beta$  是与传输距离无关的量, 且  $0 \leq \beta \leq 1$ , 其中极限情况 ( $\beta=0$ ), ( $\beta=1$ ) 分别对应于完全空间非相干光和完全空间相干光。Winger 分布函数经过 ABCD 系统的传输满足(6)式

$$W(x, u, y, v) = W_0(Dx - Bu, Au - Cx, Dy - Bv, Av - Cy). \quad (6)$$

仅考虑激光阵列的远场特性, 由傅里叶光学知识可知, 透镜后焦面的光斑分布正好对应于真空中传输至远场的光斑分布, 激光阵列经透镜聚焦后变换矩阵为<sup>[24]</sup>

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & f \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式可得透镜后焦面上的 Winger 分布函数

$$\begin{aligned} W(x, u, y, v, f) &= \frac{\beta^2 k^2 \omega_0^2}{2\pi} \sum_m \sum_n \exp\left\{-\frac{2f^2 (u^2 + v^2)}{\omega_0^2} + \frac{4f(ux + vy)}{\omega_0^2} - (x^2 + y^2) \left(\frac{2}{\omega_0^2} + \frac{\beta^2 k^2 \omega_0^2}{2f^2}\right) - \right. \\ &\left. \frac{2uf(x_m + x_n)}{\omega_0^2} - \frac{2vf(y_m + y_n)}{\omega_0^2} - \frac{(x_m + x_n)^2 + (y_m + y_n)^2}{2\omega_0^2} + ik\left[\frac{x(x_m - x_n) + y(y_m - y_n)}{f}\right] - \langle \delta_{mm} \rangle^2 / 2\right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

则激光阵列远场的光强分布为

$$\begin{aligned} I(x, y, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(x, u, y, v, z) du dv = \\ &= \frac{\beta^2 k^2 \omega_0^4}{2f^2} \sum_m \sum_n \exp\left[-\frac{\beta^2 k^2 \omega_0^2}{2f^2} (x^2 + y^2) + ik \frac{(x_m - x_n)x + (y_m - y_n)y}{f} - \langle \delta_{mm} \rangle^2 / 2\right]. \quad (9) \end{aligned}$$

(9)式即本文的主要理论结果。为了更好地分析各种因素对合成效果的影响, 引入光束传输因子

(BPF)作为合成光束的光束质量评价因子。关注远场衍射极限环内的激光功率, BPF 为  $F_{BP} = P /$

$(0.838 \times P_{\text{total}})^{[25\sim 27]}$ , 其中  $P$  为远场半径为  $1.22\lambda f/d$  的桶中功率,  $P_{\text{total}}$  为输出光束的总功率,  $d$  为光束发射孔径的最小外接圆直径, 在实际情形中 BPF 值总是小于 1, BPF 的值越接近 1, 表明光束能量集中度越高, 光束质量越好。

### 3 数值计算

假设激光阵列由 18 束激光组成, 光束排布方式如图 1 所示。单束激光光斑半径  $\omega_0 = 4$  cm, 相邻光束中心距离为 10 cm。

假设透镜焦距为 1 m。在各路激光相位得到有效控制, 相位残差为 0 (即  $\delta = 0$ ) 的理想情形下, 根据 (9) 式计算子光束相干性不同 (即  $\beta$  值不同) 的情形下远场光斑的空间分布特性, 如图 2 所示。可以看出, 随着子光束相干性的下降, 合成光束远场光斑能量向周围旁瓣弥散, 峰值强度随之降低, 光束质量随

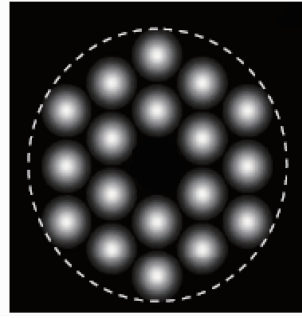


图 1 激光器阵列二维分布图

Fig. 1 Schematic diagram of the 2D laser array 之变差。为了定量分析子光束相干性对合成光束质量的影响, 对不同  $\beta$  值情形下远场光束 BPF 值进行了计算, 结果如图 3 所示。随着子光束相干性的下降, 合成光束质量随之退化。为了保证 BPF 值大于完全相干光 ( $\beta = 1$ ) 情形下的 90%, 要求单路子光束的  $\beta$  值大于 0.92。

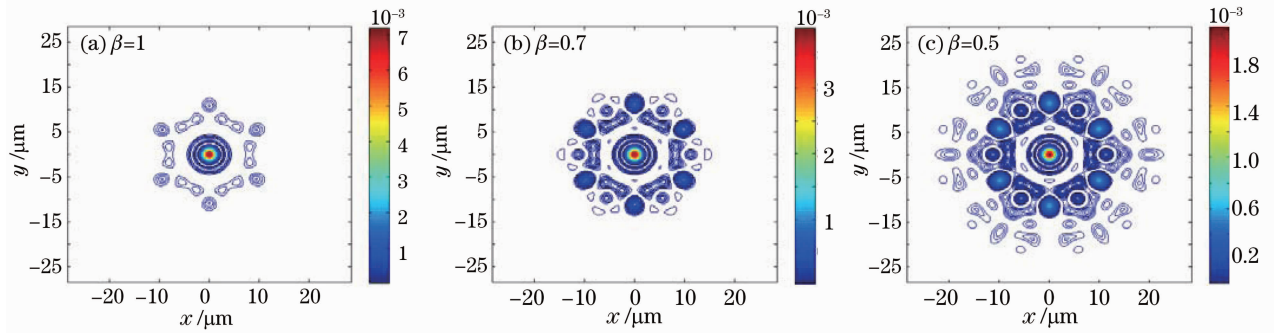


图 2  $\beta$  值不同的情形下远场光斑的分布特性

Fig. 2 Far-field intensity distribution in the case of different  $\beta$

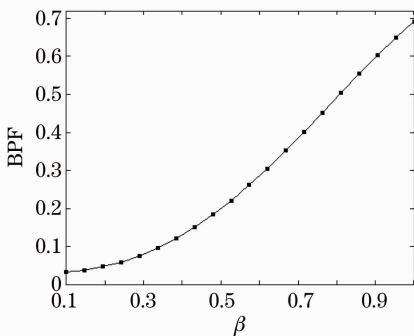


图 3 相位残差为 0 的理想情形下 BPF 值与  $\beta$  的关系

Fig. 3 Dependence of BPF on  $\beta$  in the case of no residual phase error

在实际情形中, 由于相位控制系统带宽性能限制, 不可避免地存在相位残差, 用各束光束相位  $\phi$  的方差  $\delta$  描述残差的大小。根据 (9) 式计算在子光束相干性不同的情形下, 相位控制残差对合成光束质量

的影响, 如图 4 所示。

从图 4(a) 可以看出, 相位控制残差会严重影响合成光束质量, 当  $\delta > \pi$  (rad) 时, BPF 基本不随  $\delta$  的变化而变化, 此时相位控制已经没有效果, 对应于非相干合成的情形。

为了更加明确地判断相位控制残差对光束合成的影响, 对不同  $\beta$  值情形下的 BPF 取值进行归一化, 用实际 BPF 值除以该  $\beta$  值对应的理想情形 ( $\delta = 0$ ) 时的 BPF 值, 结果如图 4(b) 所示。

从图 4(b) 可以看出, 对于具备不同相干性的激光阵列合成, 光束质量对相位控制残差的容忍度基本一致。要保证 BPF 取值大于各路激光相位完全一致的理想情形下的 90%, 要求相位残差被控制在  $\lambda/10$  以内, 这个判据对于真空中传输的不同相干性的激光阵列均成立。

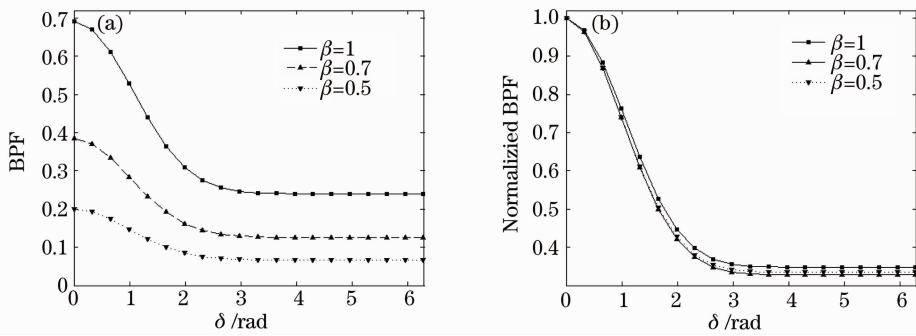


图 4  $\beta$  取不同值的情形下(a)BPF 值和(b)归一化 BPF 值与  $\delta$  的关系

Fig. 4 Dependence of (a) BPF and (b) normalized BPF on  $\delta$  for different  $\beta$

## 4 结 论

由于单束激光的部分相干性和相位控制系统带宽性能限制,大功率激光阵列的相干合成一般只能取得部分相干合成的效果。对存在相位控制残差情形下部分相干合成光束在真空中的传输特性进行了分析,推导出激光阵列在远场光强的解析表达式。为保证光束质量大于理想情形下的 90%,要求单路子光束的  $\beta$  值大于 0.92,且相位残差被控制在  $\lambda/10$  以内。其中  $\lambda/10$  这个判据对于真空中传输的不同相干性的激光阵列均成立。

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U-1~5
- 3 Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts From a Solid-State Laser [EB/OL]. (2009-03-18) [2009-03-24] [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=161575](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575)
- 4 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianmin *et al.*. Experiment on coherent-locking of two photonics crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926  
李剑峰,段开棕,王建明等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 5 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-Injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81  
程 勇,刘 洋,许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- 6 Q. H. Lou, J. Zhou, B. He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Optics Photonics News*, 2008, **19**(5): 46~51
- 7 R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2015~2022
- 8 Northrop Grumman Introduces Vesta a Compact, High-Power, Excellent Beam Quality Solid-State Laser for Multiple Military Missions [EB/OL]. (2006-10-25) [2008-10-1] [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.mhtml?d=107455](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.mhtml?d=107455)

- 9 G. D. Goodno, C. P. Asman, J. Anderegg *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2007, **13**(3): 460~472
- 10 Northrop Grumman Scores Biggest Successes Yet for Solid-State Laser Weapon Production by Industry [EB/OL]. (2008-9-2) [2008-10-1] [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=149444](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=149444)
- 11 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements northrop grumman[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507-1~6
- 12 B. Li, B. Lü. Characterization of off-axis superposition of partially coherent beams[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**: 303~307
- 13 B. Lü, H. Ma. Coherent and incoherent combinations of off-axis Gaussian beams with rectangular symmetry[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **171**, 185~194
- 14 X. Ji, E. Zhang, B. Lü. Superimposed partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(5): 825~833
- 15 X. Ji, X. Li. Influence of turbulence on the coherent and incoherent combinations of off-axis Gaussian beams [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(12): 7674~7679
- 16 Y. Zhu, D. Zhao, Du X. Propagation of stochastic Gaussian-Schell model array beams in turbulent atmosphere [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 18437~18442
- 17 E. Zhang, X. Ji, B. Lü. Propagation of the off-axis superposition of partially coherent beams through atmospheric turbulence[J]. *Chin. Phys. B.*, 2009, **18**(2): 571~580
- 18 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere[J]. *App. Phys. B*, 2007, **88**: 467~475
- 19 X. Chu, Z. Liu, Y. Wu. Propagation of a general multi-Gaussian beam in turbulent atmosphere in a slant path [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(1): 74~79
- 20 A. Starikov, E. Wolf. Coherent-mode representation of Gaussian Schell-model sources and their radiation fields[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(7): 923~928
- 21 C. D. Nabors. Effects of phased errors on coherent emitter arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(12): 2284~2289
- 22 D. S. Elliot, R. Roy, S. J. Smith. Extracavity laser band-shape and bandwidth modification [J]. *Phys. Rev. A*, 1982, **26**(1): 12~18
- 23 M. J. Bastianns. Application of the Wigner distribution function to partially coherent light [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1227~1238
- 24 Lü Baida. *Laser Optics* (3rd ed) [M]. Beijing: Higher education press, 2003

- 吕百达. 激光光学(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2003
- 25 Architecture for Diode High Energy Laser Systems[EB/OL]. (2008-8-10)[2009-1-5] <http://www.darpa.mil/mto/programs/adhels/index.htm>
- 26 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 773~778
- 刘泽金,周 朴,许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 773~778
- 27 P. Zhou, Z. Liu, X. Xu *et al.*. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3350~3359