

高能固态激光阵列光束合成技术浅析

刘泽金 周 朴 陶汝茂 马阎星 司 磊

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 建立了高能固态激光阵列合成的模型,对相干合成型和非相干合成型的高能固态激光系统进行了分析和比较。引入光束传输因子(BPF)作为评价合成光束的光束质量,对湍流大气对板条激光器和光纤激光器相干合成与非相干合成远场光束质量的影响进行了定量分析。计算模型和结果为工程实际中合成方案的选择和评估提供了参考。

关键词 光纤激光器;板条激光器;大气湍流;相干合成;非相干合成

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900113

Analysis of Beam Combination Technology of High-Power LD Pumped Laser Array

Liu Zejin Zhou Pu Tao Rumao Ma Yanxing Si Lei

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

Abstract The model of high-power LD pumped laser array is established and based on slab laser and fiber laser, two typical high-energy LD pumped laser systems, coherent- and incoherent-combining types, are analyzed and compared. The influence of atmospheric turbulence on far-field beam quality of coherent and incoherent laser beams of these two lasers is evaluated quantitatively with the beam propagation factor (BPF) to characterize the beam quality. The mathematic model and calculation result can provide a reference for choosing and evaluating different combining schemes.

Key words fiber laser; slab laser; atmospheric turbulence; coherent combining; incoherent combining

OCIS codes 140.3580; 140.3290; 010.7060

1 引 言

自从半导体激光抽运技术诞生以来,固态激光技术的高效率和高亮度输出正在引起激光技术领域的一场新的革命。近年来,随着半导体激光技术的日臻完善和半导体激光器性能的大幅增长,高亮度固态激光技术取得了重大突破^[1]。2009年3月18日,美国 Northrop Grumman 公司通过对 7 路 15 kW 级固体激光模块进行相干合成获得了 105.5 kW 的高功率固体激光输出^[2]。2010 年,美国 Textron 公司也成功实现了超过 100 kW 的高能固体激光输出^[3]。固态激光器具有结构紧凑、体积小巧、电力驱动、无污染、成本低廉和续发能力强等诸多优势^[4],在工业加工、国

防军事和科学研究等领域有着广泛的应用需求^[5,6],并涌现了光纤激光器(Fiber laser)^[7]、板条激光器(Slab laser)^[8]和薄片激光器(Thin disk laser)^[9]等一大批新颖结构,使目前全固态激光领域呈现百花齐放的景象。

光纤激光器与板条激光器作为全固态激光器的典型结构,是近年来高能激光领域关注的热点。光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便和结构紧凑等优点^[10,11],随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,单根光纤激光器的最大输出功率不断快速提升,目前,IPG 光子技术公司已经研制成功万瓦单模光纤激光器。光

收稿日期: 2011-08-03; **收到修改稿日期**: 2011-08-15

作者简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术领域方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

纤激光器在高能激光系统中的巨大应用潜力也被各国军方和科研人员一致看好^[12~17]。“宙斯”激光扫雷系统选择 IPG 公司生产的 2 kW 多模光纤激光器,在阿富汗执行了扫雷任务,其在恶劣环境下稳定的表现得到了美国军方的一致赞扬^[18]。波音公司的“复仇者”激光系统以及雷神公司的激光区域防御系统(LADS)均获得了成功^[19,20]。单根光纤激光器的最大输出功率不能无限提升,美国利弗莫尔国家实验室 Dawson 等通过对各种因素引入的光纤激光输出功率极限进行分析,计算结果表明,单模宽谱光纤激光的输出功率极限约为 36.6 kW^[21],单频(一般谱宽小于或与布里渊增益的线宽量级相同,即小于 100 MHz)光纤激光的输出功率极限约为 1.86 kW^[22]。板条激光器的概念早在 20 世纪 70 年代就被提出,是目前功率水平最高的固体激光器,其能够凭借特殊的光路设计降低热效应影响^[23~25],是当前高能固体激光技术的发展热点之一,当前世界上仅有的两例功率突破百千瓦的固体激光系统均采用了板条结构。根据抽运方式的不同,高能板条激光器可以分为侧面抽运板条激光器、部分端面抽运板条激光器、角抽运板条激光器和传导冷却端面抽运板条激光器等^[26]。2009 年,美国 Northrop Grumman 公司的研究人员采用板条结构,实现了输出功率 15 kW、光束质量因子 M^2 约为 1.58 的单链路激光放大器模块^[25];2010 年,美国 Textron 公司采用板条激光器实现了单口径输出 30 kW、光束质量为 3.3 倍衍射极限的高能激光^[26];2008 年,华北光电技术研究所采用自行设计的传导冷却端面抽运板条模块,获得了 11.4 kW 的激光输出,经光束净化后 M^2 约为 4.8,是目前国内公开报道最高功率水平的固体激光器^[27]。然而,由于受到非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机理的限制,要想大幅度提高单个激光器的功率是相当困难的^[4,28]。

对于远程定向能等应用领域,提高功率的同时通常还需要具备良好的传输性能,因此对光束质量有特殊要求。为了提升功率的同时保持良好的光束质量^[29],一种技术途径是激光器采用多模块结构,实现多路激光的合成输出,引起了各国研究人员的高度关注,是现在研究的热点^[29~32]。光束合成主要分为谱合成、相干合成和非相干合成 3 种类型。谱合成利用色散元件使不同入射方向的单元激光束在空间重叠,其关键在于耐高功率激光辐照的光栅等色散元件的设计制作,作为百千瓦级激光的候选方案,美国军方也对谱合成投入了大量的经费资

助^[33~36]。由于谱合成最终输出光束为单口径光束,其光束传输特性与传统单口径光束传输类似,这里将不再赘述。将多路中等功率激光进行相干合成是解决全固态高功率激光的核心科学问题——“三高”(高功率、高光束质量和高转换效率)的可行途径之一^[29,37~40]。美国定向能协会近几年举办的会议均设有相干合成专题研讨^[41,42],美国军方也相继开始实施各类计划,如 JHPSSL^[43,44],APPLE^[45]和 ADHEL^[46]等,用以支持固体激光阵列的相干合成实验研究,希望最终能获得平均功率达到百千瓦级的高光束质量全固态激光。2009 年,美国 Northrop Grumman 公司通过相干合成获得的 105.5 kW 输出的高能激光系统,截止 2010 年 11 月,这一系统累计满功率运行时间已达到 6 h,已被美国国防部作为实用高能激光系统原型的示范项目纳入海事激光论证(MLD)^[2,47]。由此可见,对多路中等功率激光进行相干合成是形成全固态激光相干阵列百千瓦高平均功率固体激光器的有效实现途径。非相干合成由于对激光器阵元的相位、波长和偏振态没有任何要求,只是用光束定向器控制每个阵元光束的出射方向,使其在目标靶面上会聚,获得远场高强度分布^[29,32,44,48]。2008 年,美国海军水面作战中心进行了 6 路 5.5 kW 光纤激光的非相干合成实验^[49],并在 2009~2010 年进行了多次打靶实验,该系统也同样被纳入原型论证(LaWS)^[47],可见,高能固体激光阵列非相干合成也不失为一种颇具竞争力的定向能应用系统方案。

通过上述分析可见,光纤激光和板条激光是现阶段光束合成的理想单元,本文对基于两种典型激光光束合成的高能固体激光系统进行分析比较,对湍流大气对两种固体激光阵列相干合成与非相干合成光束质量的影响进行了定量分析,为高能激光系统的未来发展提供一定的参考。

2 理论模型

2.1 光纤激光阵列理论模型

光纤激光器的输出光束用基模高斯光束描述,则单元光束的复振幅分布为

$$E_{\text{single}}(x, y, z = 0) = \exp\{-[(x-a)^2 + (y-b)^2]/\omega_0^2\}, \quad (1)$$

式中 ω_0 为光束腰斑半径。

光纤激光阵列在发射端总的光场复振幅分布为

$$E(x, y, z = 0) = \sum_{\alpha=1}^N E_{\alpha}(x, y, z = 0). \quad (2)$$

根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式,在传输距离 z 后,接收平面处的平均光强分布为^[50~54]

$$\langle I(p, q, z) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle E(x, y, z=0) E^*(\xi, \eta, z=0) \rangle \times \exp\left\{ \frac{ik}{2z} [(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2] \right\} \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(x, y, p, q)] dx dy d\xi d\eta, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ (λ 为激光波长), (p, q) 表示接收面的横向坐标。(3)式中的系综平均可以表示为^[50,51,55]

$$\langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(x, y, p, q)] \rangle = \exp\left\{ -\frac{1}{r_0^2} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2] \right\}, \quad (4)$$

式中 $r_0 = (0.545C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ 为大气相干长度, C_n^2 为折射率结构常数。

将(1),(2)式代入(3)式可得

$$\langle I(p, q, z) \rangle = \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1}^N \Gamma_{\alpha\beta}, \quad (5)$$

式中

$$\Gamma_{\alpha\beta} = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{ -[(x-a_\alpha)^2 + (y-b_\alpha)^2]/w_0^2 - [(\xi-a_\beta)^2 + (\eta-b_\beta)^2]/w_0^2 \right\} \times \exp\left\{ \frac{ik}{2z} [(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2] \right\} \times \exp\left\{ -\frac{1}{r_0^2} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2] \right\} dx dy d\xi d\eta. \quad (6)$$

通过积分,(6)式可以简化为

$$\Gamma_{\alpha\beta} = L_{\alpha\beta}(p, z) L_{\alpha\beta}(q, z), \quad (7)$$

$$L_{\alpha\beta}(p, z) = \frac{1}{2z} \frac{k}{\sqrt{\alpha_1 \alpha_2} - 1/r_0^4} \exp\left(-\frac{a_\alpha^2 + a_\beta^2}{w_0^2} + \frac{L_{1x}^2}{\alpha_1} \right) \exp\left[\frac{(\alpha_1 L_{2x} \rho_0^2 + L_{1x})^2}{\left(\alpha_1 \alpha_2 - \frac{1}{r_0^4}\right) \alpha_1 r_0^4} \right], \quad (8)$$

$$L_{\alpha\beta}(q, z) = \frac{1}{2z} \frac{k}{\sqrt{\alpha_1 \alpha_2} - 1/r_0^4} \exp\left(-\frac{b_\alpha^2 + b_\beta^2}{w_0^2} + \frac{L_{1y}^2}{\alpha_1} \right) \exp\left[\frac{(\alpha_1 L_{2y} \rho_0^2 + L_{1y})^2}{\left(\alpha_1 \alpha_2 - \frac{1}{r_0^4}\right) \alpha_1 r_0^4} \right], \quad (9)$$

式中 $\alpha_1 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{ik}{2z} + \frac{1}{r_0^2}$, $\alpha_2 = \frac{1}{w_0^2} - \frac{ik}{2z} + \frac{1}{r_0^2}$, $L_{1x} = \frac{a_\beta}{w_0^2} + \frac{ikp}{2z}$, $L_{2x} = \frac{a_\alpha}{w_0^2} - \frac{ikp}{2z}$, $L_{1y} = \frac{b_\beta}{w_0^2} + \frac{ikq}{2z}$, $L_{2y} = \frac{b_\alpha}{w_0^2} - \frac{ikq}{2z}$ 。

对于非相干合成的情形,接收平面上光强分布为个子光束单独传输到接受平面上光强分布的直接叠加,即利用(5)式对每束光进行计算,然后在接收面上将光强进行叠加。

2.2 板条激光阵列理论模型

板条激光的输出光场可以用矩形对称平顶光束来描述^[51]。单元光束的复振幅分布为

$$E_{\text{single}}(x, y, z=0) = \sum_{Q_x=1}^{N_x} \sum_{Q_y=1}^{N_y} \frac{(-1)^{Q_x+Q_y}}{N_x N_y} \begin{bmatrix} N_x \\ Q_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_y \\ Q_y \end{bmatrix} \exp\left[-\frac{Q_x(x-a)^2}{w_{0x}^2} - \frac{Q_y(y-a)^2}{w_{0y}^2} \right], \quad (10)$$

式中 N_x 和 N_y 为矩形平顶光束的阶数, w_{0x} 和 w_{0y} 为在 x 方向和 y 方向的腰斑半径。

光源的部分相干性可以用复空间相干函数表示,对于平顶光束阵列,复空间相干函数可以写作^[56]

$$G(x, \xi, y, \eta) = \exp\left[-(x-\xi)^2/2\sigma_x^2 - (y-\eta)^2/2\sigma_y^2 \right], \quad (11)$$

阵列光束的交叉谱密度为^[52,57,58]

$$W(x, y, \xi, \eta, z=0) = \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M E_\alpha(x, y, z=0) E_\beta^*(\xi, \eta, z=0) \exp\left\{ -[(x-a_\alpha) - (\xi-a_\beta)]^2/2\sigma_x^2 - [(y-b_\alpha) - (\eta-b_\beta)]^2/2\sigma_y^2 \right\} = \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \sum_{Q_{x1}=1}^{N_x} \sum_{Q_{y1}=1}^{N_y} \sum_{Q_{x2}=1}^{N_x} \sum_{Q_{y2}=1}^{N_y} \frac{(-1)^{Q_{x1}+Q_{y1}+Q_{x2}+Q_{y2}}}{N_x^2 N_y^2} \begin{bmatrix} N_x \\ Q_{x1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ Q_{x2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_y \\ Q_{y1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_y \\ Q_{y2} \end{bmatrix} \times \exp\left\{ -\frac{[Q_{x1}(x-a_\alpha)^2 + Q_{x2}(\xi-a_\beta)^2]}{w_{0x}^2} - \frac{[Q_{y1}(y-b_\alpha)^2 + Q_{y2}(\eta-b_\beta)^2]}{w_{0y}^2} \right\} \times \exp\left\{ -[(x-a_\alpha) - (\xi-a_\beta)]^2/2\sigma_x^2 - [(y-b_\alpha) - (\eta-b_\beta)]^2/2\sigma_y^2 \right\}, \quad (12)$$

则相干合成平顶阵列光束传播到平面 z 的平均强度为

$$\langle I(p, q, z) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(x, y, \xi, \eta, z=0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} [\exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(x, y, p, q)]] dx dy d\xi d\eta, \quad (13)$$

则

$$\langle I_N(p, q, z) \rangle = \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \sum_{Q_{x1}=1}^{N_x} \sum_{Q_{y1}=1}^{N_y} \sum_{Q_{x2}=1}^{N_x} \sum_{Q_{y2}=1}^{N_y} \Gamma_{\alpha\beta Q_{x1} Q_{y1} Q_{x2} Q_{y2}}, \quad (14)$$

式中

$$\Gamma_{\alpha\beta Q_{x1} Q_{y1} Q_{x2} Q_{y2}} = \frac{(-1)^{Q_{x1}+Q_{y1}+Q_{x2}+Q_{y2}}}{N_x^2 N_y^2} \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \begin{pmatrix} N_x \\ Q_{x1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ Q_{x2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_y \\ Q_{y1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_y \\ Q_{y2} \end{pmatrix} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{[Q_{x1}(x-a_\alpha)^2 + Q_{x2}(\xi-a_\beta)^2]}{w_{0x}^2} - \frac{[Q_{y1}(y-b_\alpha)^2 + Q_{y2}(\eta-b_\beta)^2]}{w_{0y}^2}\right\} \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} \exp\left\{-\frac{1}{r_0^2}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} \times \exp\{-\frac{[(x-a_\alpha) - (\xi-a_\beta)]^2}{2\sigma_x^2} - \frac{[(y-b_\alpha) - (\eta-b_\beta)]^2}{2\sigma_y^2}\} dx dy d\xi d\eta. \quad (15)$$

通过积分, (15)式可以简化为

$$\Gamma_{\alpha\beta Q_{x1} Q_{y1} Q_{x2} Q_{y2}} = H_{\alpha\beta Q_{x1} Q_{x2}}(p, z) H_{\alpha\beta Q_{y1} Q_{y2}}(q, z), \quad (16)$$

$$H_{\alpha\beta Q_{x1} Q_{x2}}(p, z) = \frac{(-1)^{Q_{x1}+Q_{x2}}}{(2N_x^2 z)} \frac{k}{\sqrt{\beta_{1x}\beta_{2x} - \frac{1}{\rho_{1x}^4}}} \begin{pmatrix} N_x \\ Q_{x1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ Q_{x2} \end{pmatrix} \times \exp\left[-(K_{1x}a_\alpha^2 + K_{2x}a_\beta^2) - \frac{(a_\alpha - a_\beta)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(a_\alpha K_{1x} - p'K_3)^2}{\beta_{1x}}\right] \times \exp\left[\frac{(a_\beta\beta_{1x}K_{2x}\rho_{1x}^2 + p'\beta_{1x}K_3\rho_{1x}^2 + a_\alpha K_{1x} - p'K_3)^2}{(\beta_{1x}\beta_{2x} - 1/\rho_{1x}^4)\beta_{1x}\rho_{1x}^4}\right], \quad (17)$$

$$H_{\alpha\beta Q_{y1} Q_{y2}}(q, z) = \frac{(-1)^{Q_{y1}+Q_{y2}}}{(2N_y^2 z)} \frac{k}{\sqrt{\beta_{1y}\beta_{2y} - \frac{1}{\rho_{1y}^4}}} \begin{pmatrix} N_y \\ Q_{y1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_y \\ Q_{y2} \end{pmatrix} \times \exp\left[-(K_{1y}b_\alpha^2 + K_{2y}b_\beta^2) - \frac{(b_\alpha - b_\beta)^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(b_\alpha K_{1y} - q'K_3)^2}{\beta_{1y}}\right] \times \exp\left[\frac{(b_\beta\beta_{1y}K_{2y}\rho_{1y}^2 + q'\beta_{1y}K_3\rho_{1y}^2 + b_\alpha K_{1y} - q'K_3)^2}{(\beta_{1y}\beta_{2y} - 1/\rho_{1y}^4)\beta_{1y}\rho_{1y}^4}\right], \quad (18)$$

式中 $\beta_{1x} = K_{1x} - K_3 + \frac{1}{\rho_{1x}^2}$, $\beta_{2x} = K_{2x} + K_3 + \frac{1}{\rho_{1x}^2}$, $\beta_{1y} = K_{1y} - K_3 + \frac{1}{\rho_{1y}^2}$, $\beta_{2y} = K_{2y} + K_3 + \frac{1}{\rho_{1y}^2}$, $K_{1x} = \frac{Q_{x1}}{w_{0x}^2}$, $K_{2x} = \frac{Q_{x2}}{w_{0x}^2}$, $K_{1y} = \frac{Q_{y1}}{w_{0y}^2}$, $K_{2y} = \frac{Q_{y2}}{w_{0y}^2}$, $K_3 = \frac{ik}{2z}$, $\rho_{1x} = \sqrt{\frac{2r_0^2\sigma_x^2}{2\sigma_x^2 + r_0^2}}$, $\rho_{1y} = \sqrt{\frac{2r_0^2\sigma_y^2}{2\sigma_y^2 + r_0^2}}$, $p' = p - \frac{a_\alpha - a_\beta}{2\sigma_x^2 K_3}$, $q' = q - \frac{b_\alpha - b_\beta}{2\sigma_y^2 K_3}$.

对于非相干合成的情形, 只需利用(14)式对每束光进行计算, 然后在接收面上将光强进行叠加。

2.3 合成光束的质量评价

M^2 因子, β 因子等常被用来评价单束激光的光束质量^[59], 对于合成光束而言, 研究表明^[60], 由于合成光束远场呈现的多旁瓣、非高斯分布特性, 这些因

子并不适合用于评价合成光束的光束质量。对于能量传输的应用领域, 关心的是远场特定面积内的功率, 因此采用光束传输因子(BPF)评价光束合成质量, BPF 定义为^[61]

$$x_{\text{BPF}} = \frac{P}{P_{\text{DL}}}, \quad (19)$$

式中 P 定义为远场半径为 $(1.22\lambda L/D)$ 大小的桶中能量, L 为传输距离, D 为输出口径, P_{DL} 为激光器阵列输出光束的总能量。

3 高能固体激光系统理论分析

根据理论模型,可以计算光纤激光阵列与板条激光阵列相干合成和非相干合成光束大气传输后远场光强的分布。对于光纤激光阵列经大气湍流的传输,已有详细的研究^[62~65],而关于板条激光阵列光束的大气传输性能研究较少^[52],因此,首先对板条激光阵列经大气湍流的传输进行分析。

3.1 板条激光阵列光束合成

单口径板条激光的输出功率高达 30 kW^[26],计算中,选取单口径输出功率为 12.5 kW,8 单元板条激光平行输出,总输出功率为 100 kW,激光阵列近场排布如图 1 所示,板条激光阵列的外接圆半径为 11 cm。计算参数选为 $\lambda=1.06 \mu\text{m}$, $w_{0x}=1.5 \text{ cm}$, $w_{0y}=4 \text{ cm}$, $z=60 \text{ km}$, $N_x=N_y=4$,同时假设 $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_0$ 。

利用(19)式计算板条激光阵列经不同湍流强度

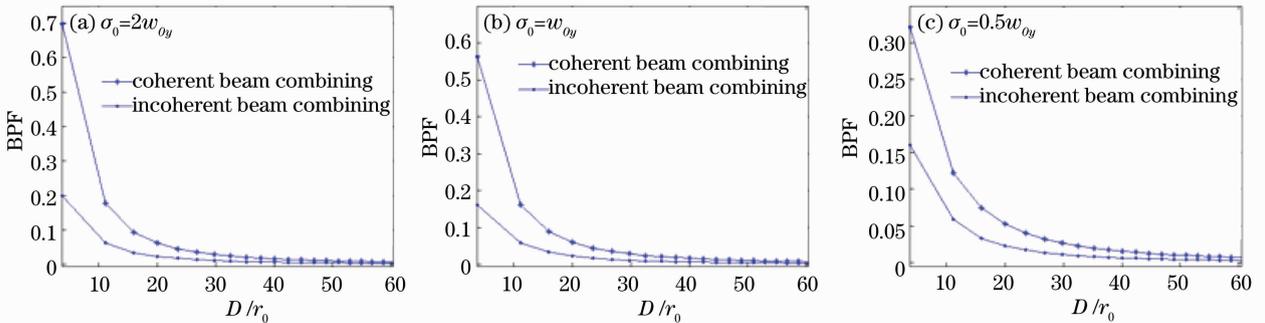


图 2 板条激光阵列在不同湍流强度大气中的传输性能

Fig. 2 Far-field beam quality of slab laser array with different atmospheric turbulences

3.2 光纤激光阵列光束合成

为与板条激光阵列进行比较,计算 91 单元单频

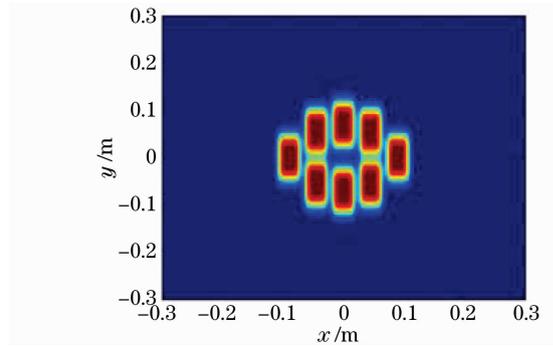


图 1 板条激光阵列近场强度分布

Fig. 1 Near-field intensity distributions of slab-laser array

大气传输后的远场光束质量,计算结果如图 2 所示。在湍流强度较弱(如 $D/r_0=3.78$, $\sigma_0=2w_{0y}$)时,相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.7 和 0.2,相干合成与非相干合成光束相比均具有明显优势,同时随着光束相干性降低,相干合成光束质量显著下降,但较非相干合成的优势仍然明显;在较强的湍流大气中传输(如 $D/r_0=60$, $\sigma_0=2w_{0y}$)时,相干合成和非相干合成的 BPF 值分别为 0.007 和 0.003,相干合成与非相干合成光束相比优势减小。

光纤激光平行输出,单路输出功率为 1.1 kW,则输出总功率为 100 kW,激光阵列近场排布如图 3 所

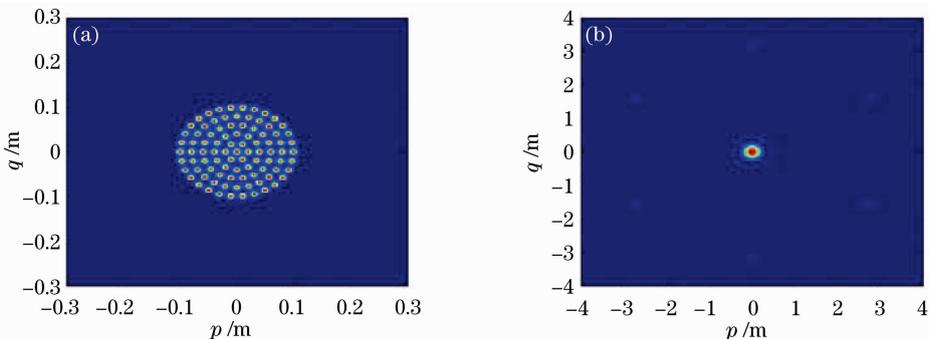


图 3 光纤激光阵列强度分布。(a)近场;(b)60 km,自由空间

Fig. 3 Intensity distributions of fiber laser array. (a) Near field; (b) 60 km, free space

示。计算参数选为 $\lambda=1.06\ \mu\text{m}$, $w_0=0.75\ \text{cm}$, 相邻光束中心间距为 $d=2.05\ \text{cm}$, $z=60\ \text{km}$, 整个光束阵列外接圆直径 $D=22\ \text{cm}$, 与板条激光阵列相同。

光纤激光阵列经不同湍流强度大气传输后的远场光束质量如图4所示。在强度较弱的湍流大气中传输(如 $D/r_0=3.78$)时, 相干合成和非相干合成光束的BPF值分别为0.552和0.023, 相干合成与非相干合成光束相比均具有明显优势。在较强的湍流大气中传输(如 $D/r_0=60$)时, 激光单元之间的相干性遭到破坏, 相干合成与非相干合成光束的BPF值分别为0.006和0.003, 相干合成与非相干合成光束相比不占明显优势。对比图2和图4结果, 在较强的湍流大气中传输时, 激光单元的相干性遭到破

坏, 板条激光与光纤激光相干合成的光束质量与非相干合成的光束质量相比均不占优势, 若非相干合成的效果能满足实际需要, 其不失为一种值得考虑的系统设计方案。

4 战术距离下高能固体激光系统性能比较

目前的高能激光实验, 均在战术作用距离下进行, 激光传输距离在数千米左右^[32,47,49], 因此, 有必要基于本文理论模型对战术距离下高能固体激光系统性能进行具体分析。

4.1 板条激光阵列合成与光纤激光阵列合成比较

以直径为5 cm的桶中的平均功率密度作为光束质量评价依据, 则单频光纤激光阵列合成后经不同湍流强度大气传输后的平均功率密度值如表1, 2所示。不同空间相干性板条激光阵列经不同强度大气湍流传输性能如图5, 6所示(相应的光纤激光阵列平均功率密度在图中以虚线标出)。随着板条激光空间相干性增大, 接收平面合成光束的光束质量亦不断变好并趋于一个稳定值。总体来说, 对于本文所采用的参数, 在战术使用距离情况下, $\sigma_0 > 0.4w_{0y}$ 时, 板条激光采用非相干合成方案, 优于单频光纤激光采用该方案; 单频光纤激光采用相干合成方案优于板条激光采用此种方案。

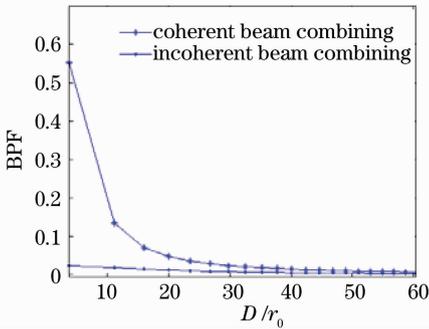


图4 光纤激光阵列在不同湍流强度大气中的传输性能
Fig. 4 Far-field beam quality of slab-laser array with different atmospheric turbulences

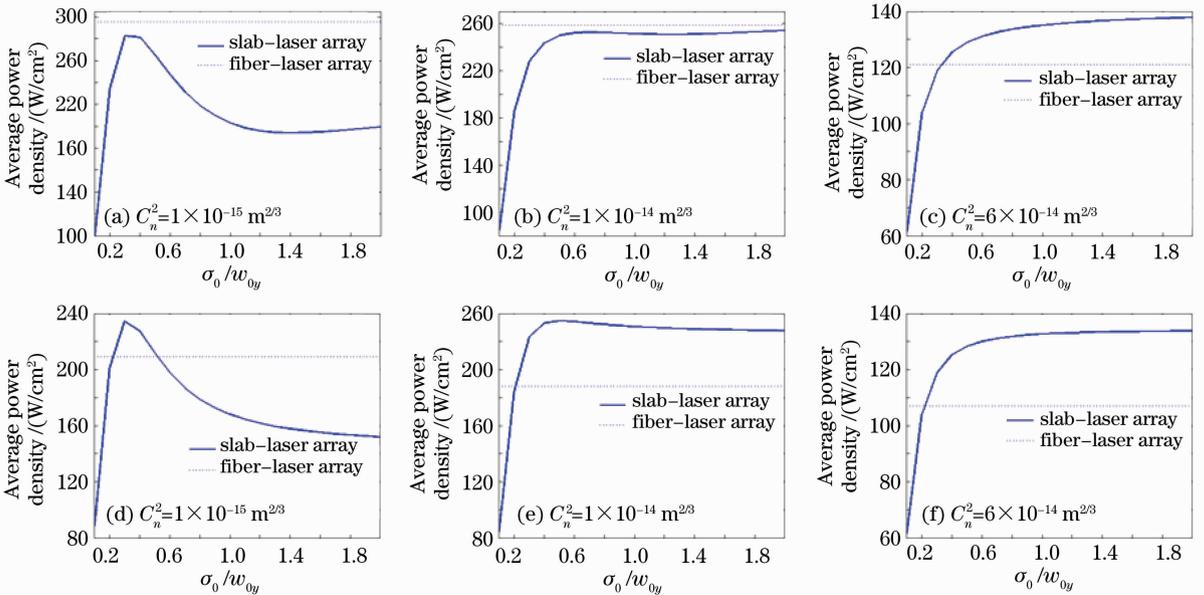


图5 3 km处不同空间相干性板条激光阵列经不同强度大气湍流传输性能。(a)~(c)相干合成;(d)~(f)非相干合成
Fig. 5 Far-field beam quality of different spatial coherent slab-laser array with different atmospheric turbulences.

(a)~(c) Coherent combining; (d)~(f) incoherent combining

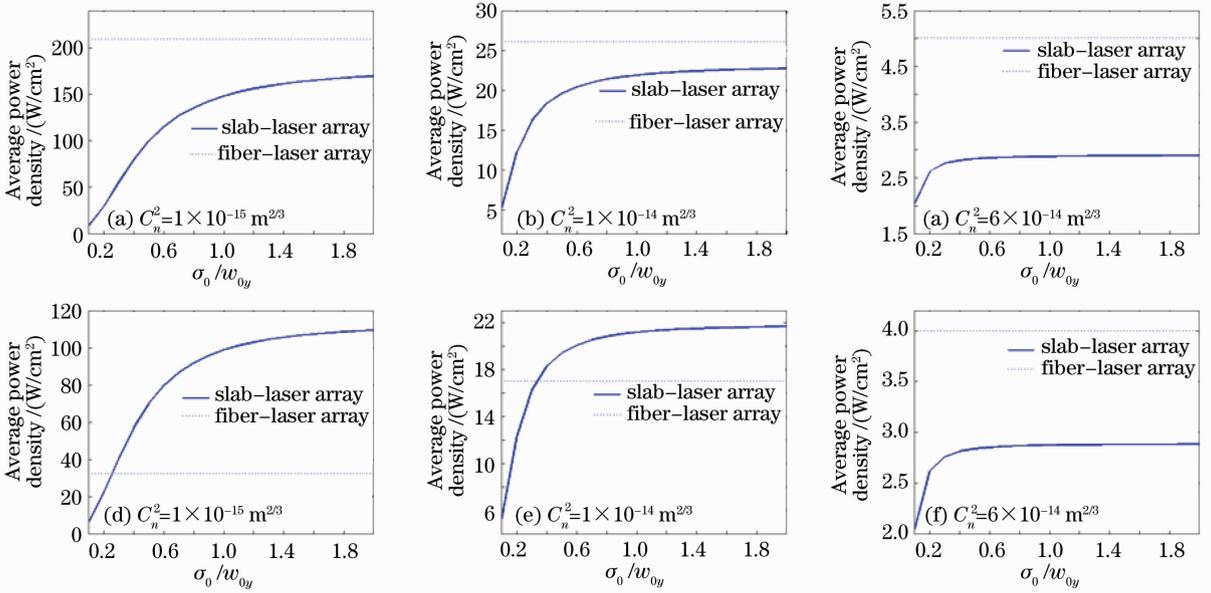


图 6 10 km 处不同空间相干性板条激光阵列经不同强度大气湍流传输性能。(a)~(c)相干合成;(d)~(f)非相干合成
Fig. 6 Far-field beam quality of different spatial coherent slab laser arrays with different atmospheric turbulences.

(a)~(c) Coherent combining; (d)~(f) incoherent combining

表 1 光纤激光阵列相干合成的平均功率密度

	Average power density of coherently combined fiber-laser array W/cm ²		
	$C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{2/3}$	$C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$	$C_n^2=6 \times 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$
3 km	295	258	121
10 km	204	26	5

表 2 光纤激光阵列非相干合成的平均功率密度

	Average power density of incoherently combined fiber-laser array W/cm ²		
	$C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{2/3}$	$C_n^2=1 \times 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$	$C_n^2=6 \times 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$
3 km	209	188	107
10 km	32	17	4

4.2 板条激光阵列相干合成与光纤激光阵列非相干合成的比较

板条激光由于受光束质量的限制^[25~27],实际中常采用相干合成技术,以获得高的功率输出的同时尽可能保持光束质量。相干合成对谱宽、偏振等都有严格要求,但单频光纤激光的理论输出功率极限不足 2 kW^[22],至今单频光纤激光器的输出功率仍远低于 1 kW^[26]。因此,若要通过相干合成获得百千瓦级的功率输出,至少需要数百个单频光纤激光单元,系统的复杂性会大大增加^[52]。此外,一些主动^[66,67]和被动^[68]相位控制技术的有效控制带宽也会大幅降低。若放宽对谱宽、偏振等的要求,采用非相干合成,则单根光纤激光的输出功率可以成量级

提升^[21],可以大大减少合成光纤激光的数量,降低系统的复杂性、提高可靠性,形成紧凑的结构。同时由于光纤激光具有极佳的光束质量,光束质量并不成为限制其合成方式的关键因素。由此可见,单模宽谱光纤激光的非相干合成也是一种重要的备选方案,有必要将板条激光阵列相干合成与单模宽谱光纤激光阵列非相干合成做具体比较。

板条激光阵列参数选择不变,如图 1 所示。为了比较方便,计算 9 单元单模宽谱光纤激光输出,单路输出功率为 11.1 kW, $\omega_0=3$ cm,单元光束中心间距为 6 cm,则外接圆口径约为 22 cm,近场分布如图 7 所示。

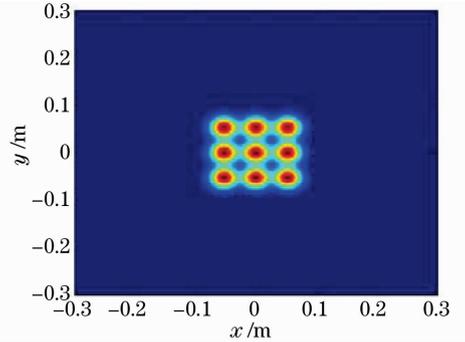


图 7 光纤激光阵列近场强度分布

Fig. 7 Near-field intensity distributions of fiber laser-array

非相干合成光纤激光阵列经不同湍流强度大气传输后的平均功率密度如表 3 所示。不同空间相干性板条激光阵列经不同强度大气湍流传输性能如图

8 所示,相应的光纤激光非相干合成平均功率密度在图中用虚线标示。可见,在战术使用距离情况下,

对于本文所采用的参数,单模宽谱光纤激光非相干合成方案明显优于板条激光相干合成的方案。

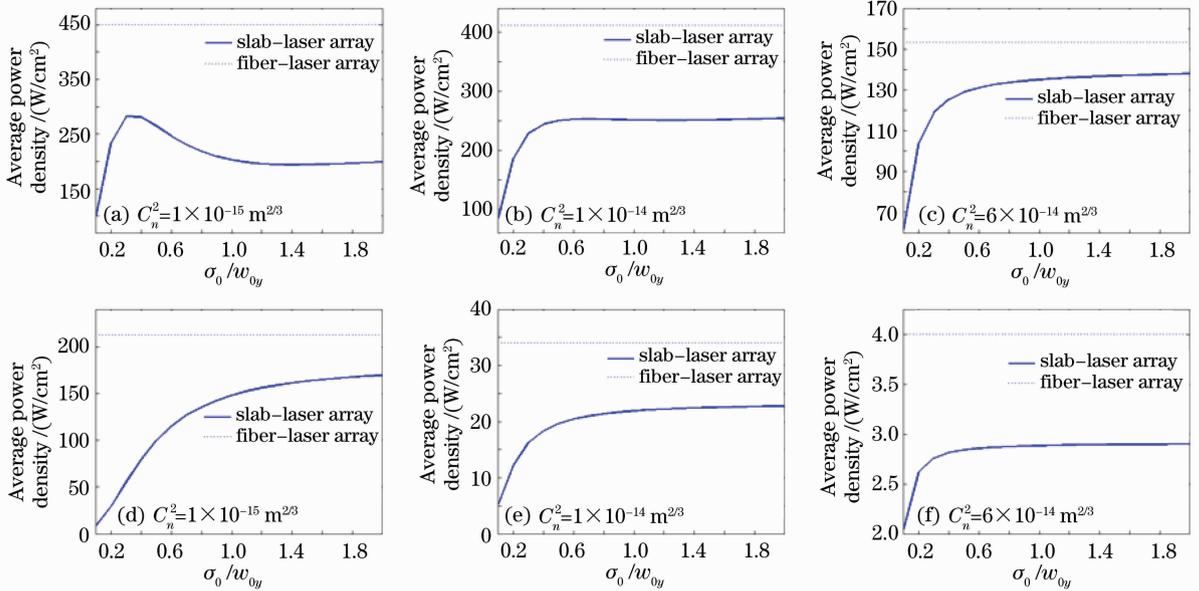


图 8 不同空间相干性板条激光阵列经不同强度大气湍流传输性能。(a)~(c) $z = 3\text{ km}$; (d)~(f) $z = 10\text{ km}$

Fig. 8 Far-field beam quality of different spatial coherent slab-laser array with different atmospheric turbulence.

(a)~(c) $z = 3\text{ km}$; (d)~(f) $z = 10\text{ km}$

表 3 光纤激光非相干合成的平均功率密度

Table 3 Average power density of incoherently

	combined fiber-laser array			W/cm^2
	$C_n^2 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^{2/3}$	$C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$	$C_n^2 = 6 \times 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$	
3 km	450	411	153	
10 km	212	34	4	

激光器的光束质量,是大功率板条激光器实用化的必由之路,同时光纤激光器以其高效的转换效率、优良的光束质量、方便的热管理及紧凑的结构,在未来的高能激光系统中必有其一席之地。

参 考 文 献

- Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. 100 kW level LD pumped coherent laser array system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 1~9
- 刘泽金, 周 朴, 许晓军. 对百千瓦级全固态激光相干阵列系统的分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 1~9
- S. J. McNaught, H. Komine, S. B. Weiss *et al.*. 100 kW coherently combined slab MOPAs [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009, CThA1
- A. Mandl, D. E. Klimek. Textron's J-HPSSL 100 kW thin ZagR laser program [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2010, JThH2
- Li Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 16~29
- 李晋闽. 高平均功率全固态激光器的发展现状、趋势及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 16~29
- Wang Xuejun. Developments and trends of US naval shipborne laser weapons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 27~37
- 王学军. 美国海军舰载激光武器研发进展与趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(12): 27~37
- Li Jinmin. Research and application of high-power all solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S): 1~3
- 李晋闽. 高功率全固态激光器研究及应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(S): 1~3
- Hecht Jeff. Fiber lasers ramp up the power [J]. *Laser Focus World*, 2009, **45**(12): 53~57

5 结 论

光纤激光的优势已经使其成为下一代高能激光系统的重要候选光源之一,而板条激光以其独特的优势和巨大潜力,也成为当前高能固体激光技术的发展热点之一。研究表明,在湍流强度较弱的湍流大气中传输时,相干合成光束明显优于非相干合成光束。但随着湍流强度的增大,相干合成光束的远场光强分布逐渐演化成与非相干合成的情形一致,相干合成的光束质量与非相干合成的光束质量相比均不占优势。通过定量分析表明,对于本文所采用的参数,在战术使用距离情况下, $\sigma_0 > 0.4w_{0y}$ 时,板条激光采用非相干合成方案,优于单频光纤激光采用非相干合成方案;单频光纤激光采用相干合成方案优于板条激光采用相干合成方案;单模宽谱光纤激光非相干合成方案优于板条激光相干合成方案。因此,进一步改进板条激光器的工艺,改善板条

- 8 Chen Lin, He Shaobo, Liu Jianguo *et al.*. Progress of hundred-kilowatt high-average-power slab laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(1): 37~42
陈林, 贺少勃, 刘建国等. 新一代百千瓦高平均功率板条激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(1): 37~42
- 9 David Havrilla, Rudiger Brockmann. Third generation of disk lasers [J]. *Laser Technik Journal*, 2009, **6**(3): 26~31
- 10 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1442~1447
周朴, 刘泽金, 许晓军等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1442~1447
- 11 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Tiled-aperture coherent beam combining of two high-power fibre amplifiers[J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(1): 014202
- 12 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing *et al.*. Coherent beam combining of hybrid phase control in master oscillator-power amplifier configuration [J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(9): 094202
- 13 A. Galvanauskas. High power fiber lasers [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, **15**(7): 42~47
- 14 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Analysis of high energy fiber laser systems [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1795~1801
刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能光纤激光系统浅析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(11): 1795~1801
- 15 Lou Qihong, Zhou Jun, Wang Zhijiang. Analysis of high-power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3): 161~165
楼祺洪, 周军, 王之江. 光纤激光作为激光武器的能力分析[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3): 161~165
- 16 J. R. Leger, J. Nilsson, J. P. Huignard *et al.*. Introduction to the issue on laser beam combining and fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 237~239
- 17 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1142~1147
周朴, 刘泽金, 许晓军等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1142~1147
- 18 Surface land mines are neutralized by IPG fiber laser in Afghanistan [EB/OL]. [2008-07-31] http://www.ipgbeijing.com/content/view/85_115.html
IPG 光纤激光在阿富汗成功执行扫雷任务[EB/OL]. [2008-07-31]http://www.ipgbeijing.com/content/view/85_115.html
- 19 The laser avenger zaps its target [EB/OL]. [2008207231] <http://www.defensetech.org/archives/003791.html>
- 20 Mike B. Raytheon's directed energy solutions [EB/OL]. [2008-07-31] http://www.raytheon.com/newsroom/rtnwcm/groups/public/document/s/content/de_media.pdf
- 21 J. W. Dawson. Scaling limits of high average power fiber lasers [J]. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, 2008, 725~726
- 22 J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13241~13266
- 23 W. Koehler. Solid-State Laser Engineering [M]. New York: Springer, 2005. 458~470
- 24 T. J. Kane, R. C. Eckardt, R. L. Byer. Reduced thermal focusing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1983, **19**(9): 1351~1354
- 25 Gregory D. Doodno, Charles P. Asman, Jesse Anderegg *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 460~472
- 26 Li Xiao. Study on Coherent Beam Combination Technology of Slab Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 3~8
李霄. 板条激光放大器相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. 3~8
- 27 Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liujiun *et al.*. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2807~2809
王超, 唐晓军, 徐凌婧等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2807~2809
- 28 Tso Yee Fan, Antonio Sanchez, Vincenzo Daneu *et al.*. Laser beam combining for power and brightness scaling [J]. *IEEE*, 2000, 49~54
- 29 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 30 Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 24~25
周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 24~27
- 31 Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2221~2234
刘泽金, 周朴, 王小林等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2221~2234
- 32 Phillip Sprangle, Antonio Ting, Joseph Penano *et al.*. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, **45**(2): 138~148
- 33 A. Liu, R. Mead, T. Vatter *et al.*. Spectral beam combining of high power fiber lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 81~88
- 34 P. Madasamy, T. Loftus, A. Thomas *et al.*. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems [C]. *SPIE*, 2008, **6952**: 695207
- 35 Progress on development of high energy laser sources for defense applications [C]. <http://www.creol.ucf.edu/Partnerships/Affiliates/AffiliatesDay2009/Presentation/AlbertOgloza.pdf>
- 36 A. Brown. Spectrally beam combined lasers for high-brightness, high power application [EB/OL]. <http://www.downbreaker.com/virtual2004>
- 37 Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber laser and it's coherent beam combination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 155~159
楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干组束[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 155~159
- 38 Wu Bo, Liu Yongzhi. Coherent combination of high power fiber laser beams [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **43**(8): 56~61
伍波, 刘永智. 高功率光纤激光器相干合成研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **43**(8): 56~61
- 39 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 163~166
程勇, 刘洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 163~166
- 40 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 26~29
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): 26~29
- 41 Directed Energy Professional Society. 21st annual solid state and diode laser technology review[OL]. [2011-07-01], <http://www.deps.org/DEPSpages/SSDLTR08DetailedAgenda.html>
- 42 Directed Energy Professional Society. Eleventh annual directed energy symposium [OL]. [2011-07-01], <http://www.deps.org>

- org/DEPSpages/DEsymp08.html
- 43 Ren Guoguang, Huang Yunian. Diode pumped solid state laser stride forward 100 kW [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8): 617~622
任国光, 黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向 100 kW[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(8): 617~622
- 44 Laser focus world, TRW wins high-power laser contract[OL]. [2011-07-01], http://www.laserfocusworld.com/display_article/163438/12/none/none/INDUS/TRW-Wins-High-Power-Laser-Contract
- 45 Terry A. Dorschner. Adaptive Photonic Phase Locked Elements [R]. MTO Symposium March, 2007
- 46 Joe Mangano. Architecture for Diode High Energy Laser Systems [R]. MTO Symposium, March 7, 2007
- 47 O'Rourke Ronald. Navy shipboard lasers for surface, air, and missile defense: background and issues for congress. 2010
- 48 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Influence of atmospheric turbulence on far-field beam quality of coherent and incoherent combined laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1042~1046
周朴, 刘泽金, 许晓军. 湍流对相干合成与非相干合成远场光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1042~1046
- 49 Navy Laser Success Key in Unmanned Aerial Vehicle Research, Development [EB/OL]. http://www.navy.mil/search/display.asp?story_id=46368
- 50 Xiuxiang Chu, Zejin Liu, Yi 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
- 51 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere [J]. *App. Phy. B*, 2007, **88**(3): 467~475
- 52 Pu Zhou, Yanxing Ma, Xiaolin Wang *et al.*. Average intensity of a partially coherent rectangular flat-topped laser array propagating in a turbulent atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(28): 5251~5258
- 53 H. T. Eyyuboglu, Y. Baykal. Reciprocity of cos-Gaussian and cosh-Gaussian laser beams in turbulent atmosphere [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20): 4659~4674
- 54 S. C. H. Wang, M. A. Plonus. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(8): 1297~1304
- 55 Y. Cai, Q. Lin, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Off-axis Gaussian Schell-model beam and partially coherent laser array in a turbulent atmosphere [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **278**(1): 157~167
- 56 B. Li, B. Lü. Characterization of off-axis superposition of partially coherent beams [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(4): 303~307
- 57 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
- 58 X. Ji, Z. Pu. Angular spread of Gaussian Schell-model array beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **93**(4): 915~923
- 59 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006, 39
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006, 39
- 60 A. E. Siegman. How to (maybe) measure laser beam quality [C]. Proc. OSA Annual Meeting, 1998
- 61 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
- 62 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation of phase-locked truncated Gaussian beam array in turbulent atmosphere [J]. *Chin. Phys. B*, 2010, **19**(2): 024205
- 63 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing *et al.*. Optimal truncation of element beam in a coherent fiber laser array [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044206
- 64 Eric C. Cheung, James G. Ho, Gregory D. Goodno *et al.*. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 354~356
- 65 Pu Zhou, Xiaolin Wang, Yanxing Ma *et al.*. Average intensity and beam directionality of phase-locked conformal focused beam array in a turbulent atmosphere [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(10): 105707
- 66 L. Liu, M. A. Vorontsov, E. Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners [C]. *SPIE*, 2007, **6708**: 67080K
- 67 P. Zhou, Z. Liu, X. Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(7): 248~256
- 68 J. E. Rothenberg. Passive coherent phasing of fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687315