

文章编号: 0258-7025(2010)03-0733-06

# 不同类型合成光束在湍流大气中的传输效率

周 朴 马阎星 王小林 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** 根据广义惠根斯-菲涅耳原理, 分析了单模光束相干合成、单模光束非相干合成、多模光束相干合成和多模光束非相干合成等 4 种类型的合成光束阵列在实际湍流大气中的传输特性, 计算了传输效率与有效作用距离。结果表明, 多模光束阵列相干合成与非相干合成的传输效率与有效作用范围区别不大, 单模激光阵列的传输效率优于多模激光阵列。相干合成单模激光阵列的传输效率较非相干合成情形的优势随湍流强度的增大而降低, 在湍流强度较强时, 相干合成已经没有优势。在相干合成的基础上具备倾斜像差校正能力的自适应锁相单模光纤激光阵列是构建 100 kW 战术激光单元的最佳方式。

**关键词** 大气光学; 相干合成; 非相干合成; 广义惠根斯-菲涅耳原理; 大气湍流; 光束质量

**中图分类号** TN012; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0733

## Propagation Efficiency of Various Combined Beams in Turbulent Atmosphere

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

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

**Abstract** Propagation properties of four combined beams, i. e., coherently combined single mode laser, incoherently combined single mode laser, coherently combined multi-mode laser and incoherently combined multi-mode laser, in turbulent atmosphere are analyzed by using extended Huygens-Fresnel principle. The propagation efficiency and effective range are numerically evaluated. The calculating results show that there is no significant difference in propagating efficiency and effective range of coherent or incoherent beam combining, and the single mode laser array has advantages in propagation efficiency over multi-mode beams. The advantage of coherent beam combining decreases with an increase in the intensity of turbulence, and there is no difference between coherent and incoherent combining in strong turbulence. The adaptive phase-locked single mode laser array that can correct tilted aberration is the best choice for developing a 100 kW tactical laser system.

**Key words** atmosphere optics; coherent combining; incoherent combining; extended Huygens-Fresnel principle; atmospheric turbulence; beam quality

## 1 引 言

对多路光纤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前沿热点<sup>[2~7]</sup>。美国军方也实施了 JHPSSL, APPLE 等计划, 支持研究固体激光、光纤激光的相干合成实验, 以期获得平均功率超过 100 kW 的战术激光单元。迄今为止, 最高相干合成功率率的实验均采用基于主振荡-功率放大(MOPA)结构的主动相位控制

方案<sup>[2,3]</sup>。但目前相干合成的实用性和有效性仍处在有待论证的十字路口, 一方面, 基于光纤激光相干合成获得  $10^5$  瓦量级战术激光单元还面临巨大挑战; 为了获得接近理想的相干合成的效果, MOPA 结构的主动相位控制方案一般要求各路光束保持单频、线偏光输出。受限于非线性效应的影响, 单频、线偏光纤放大器的输出功率有限, 至今仍未突破 500 瓦量级<sup>[8,9]</sup>。为了获得高功率(如  $10^5$  瓦量级)

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)资助项目。

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等领域的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

激光输出,则需要大数目的光纤放大器参与相干合成,这样无疑将增加系统的复杂性,同时给相位控制带来了更多压力。即便是采用光纤-板条混合放大链路在一定程度上可克服非线性效应引入的功率上限,单路大功率固体激光的相位的快速变化也给相位控制系统提出了巨大挑战,存在较大的相位控制残差,使得合成光束质量较差<sup>[3]</sup>。另一方面,目前研制成功的数千瓦级高功率光纤激光输出光束谱线较宽,且随机偏振<sup>[10~12]</sup>,不能用于相干合成,为此美国研究人员提出了利用多路光纤激光非相干合成作为远程定向能使用的方案。非相干合成只是用光束定向器控制每一个阵元光束的出射方向,使其在目标靶面上汇聚。美国海军研究实验室已经成功开展4路千瓦级光纤激光器非相干合成的外场实验<sup>[12]</sup>,获

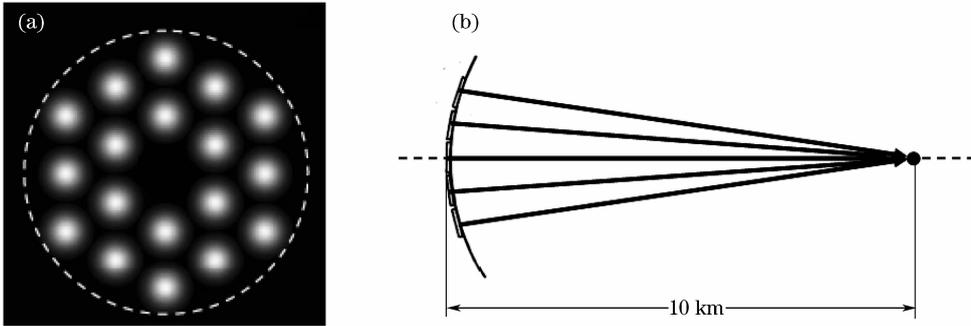


图 1 (a) 激光器阵列二维分布图;(b) 光纤激光阵列聚焦发射示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the two-dimensional (2D) fiber laser array; (b) sketch for transmitting the fiber laser

高功率光纤激光器近几年内得到了飞速发展<sup>[13~16]</sup>,单模光纤激光器(宽谱线、随机偏振)的功率已经达到10 kW<sup>[16]</sup>,而多模光纤激光早已实现50 kW功率输出<sup>[15]</sup>。为了更好地比较相干合成与非相干合成在远场的光强分布特性,对于单模光纤激光,假设光纤激光排布2圈(共18个),单个功率为10 kW,光斑半径为4 cm;而对于多模光纤激光,假设光纤激光排布1圈(共6个),单个功率为30 kW,光束质量因子  $M^2 = 4$ ,光斑半径为6.67 cm。两种方案输出光束的总功率均为180 kW且几何尺寸大小相等,总的发射口径均为40 cm。

### 3 计算模型

假设共有  $M$  路激光参与合成,光束发射端位于  $z = 0$  平面,所有子光束沿  $z$  轴传输,聚焦发射到  $z =$

得了超过90%的传输效率。为此,有必要详细分析不同类型合成光束在湍流大气中的传输特性,为100 kW战术激光单元的构建提供参考。本文根据广义惠根斯-菲涅耳原理,对4种不同类型合成光束,即单模光束相干合成、单模光束非相干合成、多模光束相干合成和多模光束非相干合成在实际湍流大气中的传输特性进行了计算,分析这4种不同类型合成光束用于构建100 kW战术激光单元的有效性。

## 2 参数设置

假设光纤激光阵列呈现如图1(a)所示的环形结构。为了在远场获得更高的峰值强度,往往采用如图1(b)所示的发射方式,阵列光束同时聚焦到远场(如10 km处)某一点。

$L$  平面。则对于单模光束相干合成的情形, $z = 0$  平面光场复振幅分布为<sup>[17,18]</sup>

$$E(x, y, 0) = \sum_m E_m(x, y, 0) \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2L}\right] \times \exp[ik(x \sin \theta_{mx} + y \sin \theta_{my})], \quad (1)$$

式中  $\theta_{mx}$  和  $\theta_{my}$  为第  $m$  束激光的光轴与  $x$  轴和  $y$  轴的夹角,  $E_m(x, y, 0)$  为第  $m$  束激光在  $z = 0$  平面光场的复振幅分布,光束中心位置为  $(a_m, b_m, 0)$ ,  $E_m(x, y, 0)$  满足

$$E_m(x, y, 0) = \exp\left[-\frac{(x - a_m)^2 + (y - b_m)^2}{\omega_0^2}\right]. \quad (2)$$

根据广义惠根斯-菲涅耳原理,单模光束相干合成在湍流大气中传输后,接收平面( $z = L$ )处的平均光强分布为<sup>[17~21]</sup>

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

式中

$$\langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle = \exp\left\{-\frac{1}{\rho_0^2}[(x - \xi)^2 - (y - \eta)^2]\right\}, \quad (4)$$

$\rho_0 = (0.545C_n^2 k^2 L)^{-3/5}$  为大气相干长度,  $C_n^2$  为折射率结构函数。

对于单模光束非相干合成的情形, 接收平面上光强分布为各子光束单独传输到接收平面上光强分布的直接叠加, 则接收平面 ( $z = L$ ) 处的平均光强分布为

$$\langle I_{N,S}(p, q, L) \rangle = \sum_m \left[ \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_m(x, y, 0) E_m^*(\xi, \eta, 0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 + (q-y)^2 + (p-\xi)^2 + (q-\eta)^2]\right\} \times \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta \right]^2. \quad (5)$$

对于多模光束合成的情形, 首先可根据光强分布将多模光束分解为非相干的厄米-高斯光束或拉盖尔-高斯光束的叠加<sup>[22,23]</sup>, 作为基底光束的模式间相互独立, 即

$$I(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n G_n^2(x, y, v), \quad (6)$$

式中  $c_n$  为模系数,  $v$  为厄米-高斯光束的光束参数(即基模高斯光束的光束宽度),  $G_n$  为直角坐标系下第  $n$  阶厄米-高斯光束的归一化复振幅分布

$$G_n(x, y, v) = \sqrt{\frac{2}{\pi v^2}} \frac{1}{2^n n!} H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{v}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{v}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{v^2}\right), \quad (7)$$

定义模权重因子为  $\lambda_n = c_n / \sum_{n=0}^{\infty} c_n$ , 则多模光束的  $M^2$  因子确定为<sup>[19]</sup>

$$M^2 = \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)\lambda_n. \quad (8)$$

文献[24]的研究结果表明, 阶数相同的高阶模光束也可以相干合成, 则多模光束相干合成在接收平面 ( $z = L$ ) 处的平均光强分布为各阶模式之间相干合成后在空间的简单叠加, 即

$$\langle I_{C,M}(p, q, L) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \sum_{n=0}^{\infty} C_n^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q(x, y, 0) Q^*(\xi, \eta, 0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} \times \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta, \quad (9)$$

式中

$$Q(x, y, v) = \sum_m^M G_{n,m}(x, y, v) = \sum_m^M \sqrt{\frac{2}{\pi v^2}} \frac{1}{2^n n!} H_n\left[\frac{\sqrt{2}(x-a_m)}{v}\right] H_n\left[\frac{\sqrt{2}(y-b_m)}{v}\right] \times \exp\left[-\frac{(x-a_m)^2 + (y-b_m)^2}{v^2}\right] \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2L}\right] \exp[ik(x \sin \theta_{mx} + y \sin \theta_{my})]. \quad (10)$$

而多模光束非相干合成在接收平面 ( $z = L$ ) 处的平均光强分布为各基底光束传输至远场光强分布的简单叠加, 即

$$\langle I_{N,M}(p, q, L) \rangle = \frac{k^2}{(2\pi z)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=1}^M \sum_{r=1}^M C_n^2 \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{n,m}(x, y, v) R_{n,m}^*(\xi, \eta, v) \times \exp\left\{\frac{ik}{2L}[(p-x)^2 + (q-y)^2 - (p-\xi)^2 - (q-\eta)^2]\right\} \times \langle \exp[\psi(x, y, p, q) + \psi^*(\xi, \eta, p, q)] \rangle dx dy d\xi d\eta \right]^2, \quad (11)$$

式中

$$R_{n,m}(x, y, v) = G_n(x, y, v) \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2L}\right] \exp[ik(x \sin \theta_{mx} + y \sin \theta_{my})]. \quad (12)$$

上述(3),(5),(9),(11)式分别给出了单模光束相干合成、单模光束非相干合成、多模光束相干合成和多模光束非相干合成在湍流大气中传输后目标靶面的光强分布。能量传输等应用领域关心远场特定面积内的(如 $100\text{ cm}^2$ ,半径为 $5.6\text{ cm}$ )桶中功率<sup>[10~12,25]</sup>。定义传输效率为远场特定面积内激光功率占激光阵列总功率的比值,即

$$\chi = \int_{S_r} \langle I(p, q, z) \rangle d^2 \mathbf{r} / \int_{-\infty}^{\infty} \langle I(p, q, z) \rangle d^2 \mathbf{r}, \quad (13)$$

式中 $S_r = \pi r^2$ ,不失一般性,考虑 $r = 5.6\text{ cm}$ 的情形,对应 $100\text{ cm}^2$ 目标靶面面积。

## 4 数值计算与讨论

联立(3),(5),(9),(11),(13)式,可得单模光束相干合成、单模光束非相干合成、多模光束相干合成

和多模光束非相干合成在湍流大气中的传输效率与传输距离之间的关系,如图2,3所示。计算结果表明,在真空中传输时,单模相干合成光束的传输效率明显大于非相干合成的情形。而在湍流大气中传输时,由于光束空间相干度的下降,传输效率的优势随之降低。特别是当湍流强度较强(如 $C_n^2 = 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ )时,单模光束相干合成与非相干合成传输效率基本一致。如以 $1000\text{ W/cm}^2$ 为作用阈值,则要求总输出功率为 $180\text{ kW}$ 的激光阵列传输效率大于 $56\%$ 。在 $C_n^2 = 10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ 和 $C_n^2 = 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 两种情形下,单模相干合成光束阵列的有效作用距离分别为 $8$ 和 $3.3\text{ km}$ ,而单模非相干合成光束阵列的有效作用距离分别为 $6.5$ 和 $3.2\text{ km}$ 。无论是相干合成还是非相干合成,单模光束阵列的传输效率随湍流强度的增大而明显降低。

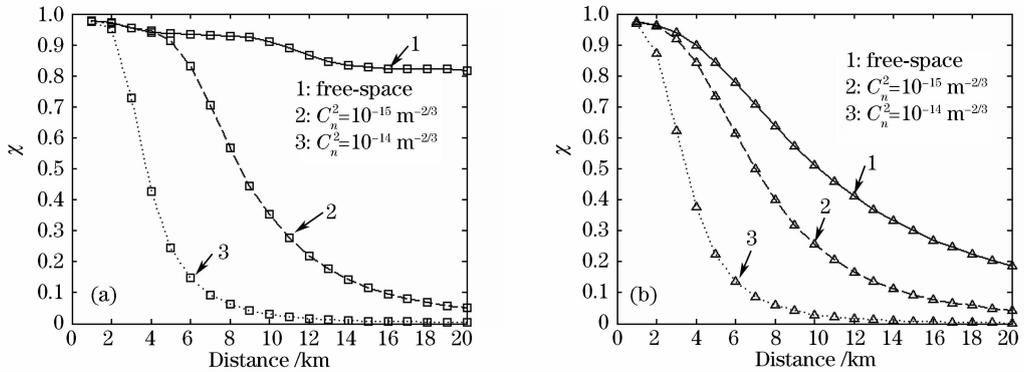


图2 单模激光阵列的传输效率。(a) 相干合成;(b) 非相干合成

Fig. 2 Propagation efficiency of single mode laser array. (a) coherently combined; (b) incoherently combined

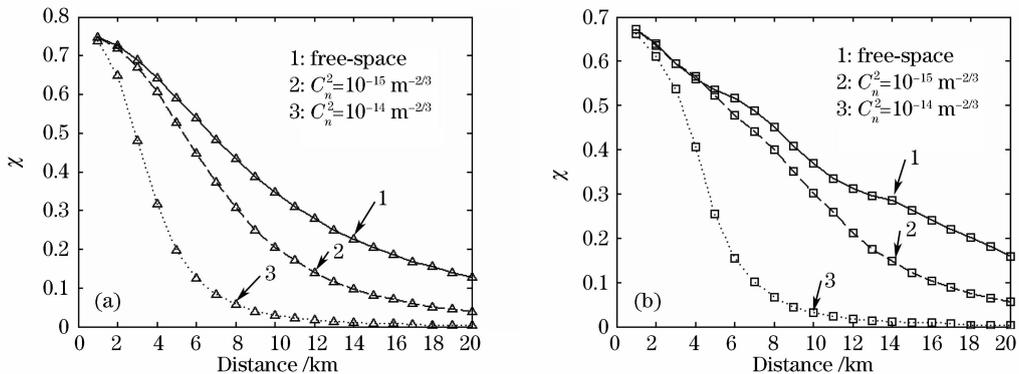


图3 多模激光阵列的传输效率。(a) 相干合成;(b) 非相干合成

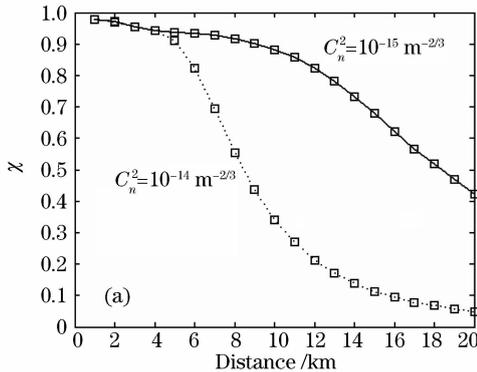
Fig. 3 Propagation efficiency of multi-mode laser array. (a) coherently combined; (b) incoherently combined

对于多模光束阵列,即便是在真空中传输,相干合成的传输效率与非相干合成相比也无明显优势。仍以 $1000\text{ W/cm}^2$ 为作用阈值,则在 $C_n^2 = 10^{-15}\text{ m}^{-2/3}$ 和 $C_n^2 = 10^{-14}\text{ m}^{-2/3}$ 两种情形下,多模相干合成光束阵列的有效作用距离分别为 $4.6$ 和

$2.4\text{ km}$ ,而非相干合成光束阵列的有效作用距离分别为 $4.2$ 和 $2.3\text{ km}$ 。由此可见,一方面,多模合成光束阵列的传输效率受湍流强度的影响比单模光束阵列小,这是由于光斑能量的弥散是由湍流和衍射两个因素造成的,对于单模光束,湍流的影响较大,而

对于多模光束而言,光束本身的衍射引起的光斑扩散造成的传输效率下降更为明显。另一方面,多模光束阵列相干合成与非相干合成的传输效率与有效作用范围区别不大,因此对于多模光束阵列,没有必要采用相干合成的方式。

为了克服湍流大气对相干合成光束传输效率的影响,Ling Liu 等<sup>[26,27]</sup>提出了自适应锁相光纤激光阵列,该阵列除了具备控制各路光束相位外,还具备校正倾斜像差的能力,在相干合成的基础上消除了湍流大气引入的倾斜像差。自适应锁相光纤激光阵列在湍流大气中的传输特性可以用相位屏法进行分



析<sup>[28]</sup>。对于本文研究的 18 束单模激光和 6 束多模激光组成的自适应锁相光纤激光阵列,在不同湍流大气中的传输效率如图 4 所示。在  $C_n^2 = 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  和  $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  两种情形下,单模自适应锁相光纤激光阵列的有效作用距离分别为 17.2 和 8.1 km,多模自适应锁相光纤激光阵列的有效作用距离均为 4.6 km 左右。自适应锁相光纤激光阵列具备的倾斜像差校正能力大大拓展了单模光纤激光阵列的有效作用距离,而对于多模光纤激光阵列,倾斜像差校正能力仅在湍流强度较强时(如  $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ )有一定的效果。

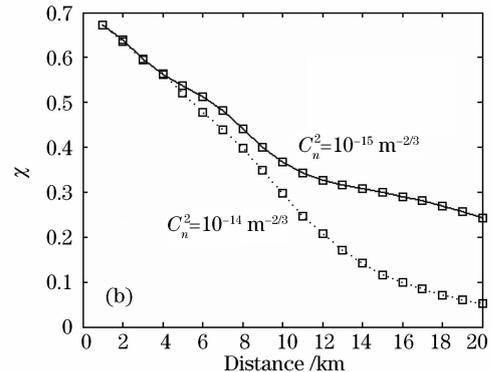


图 4 自适应锁相光纤激光阵列的传输效率。(a) 单模阵列;(b) 多模阵列

Fig. 4 Propagation efficiency of adaptive phase-locked fiber laser array. (a) single mode; (b) multi-mode

## 5 结 论

根据广义惠根斯-菲涅耳原理,对 4 种不同类型合成光束,即单模光束相干合成、单模光束非相干合成、多模光束相干合成和多模光束非相干合成在实际湍流大气中的传输效率与有效作用范围进行了计算。结果表明,对于单模光束阵列,由于湍流大气的影响,相干合成的优势不能完全体现,特别是在湍流强度较强的情形下,有效作用距离与非相干合成的情形基本一致。并且无论是相干合成还是非相干合成,单模光束阵列的传输效率均随湍流强度的增大而明显降低。比较相同输出功率的单模、多模激光阵列可知,单模激光阵列具备更大的有效作用距离。并且对于多模光束阵列,相干合成与非相干合成的传输效率与有效作用范围区别不大,光束本身的衍射引起的光斑扩散造成的传输效率下降更为明显,没有必要采用相干合成的方式。具备校正倾斜像差的能力的自适应锁相光纤激光阵列能够明显提高单模相干合成激光阵列的传输效率,拓展阵列的有效作用范围。对于本文计算的总输出功率 180 kW 的自适应锁相光纤激光阵列,在典型大气环境中

( $C_n^2 < 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ) 水平传输的有效作用距离大于 8 km,可用于战术作战系统的反导防空及近程自卫。综合计算结果可知,自适应锁相单模光纤激光阵列是构建 100 kW 战术激光单元的最佳方式。

## 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 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 3 Bob Bishop Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts From a Solid-State Laser [EB/OL]. (2009-03-18) [2009-4-1] [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 Jianming *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,王建国等. 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 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their

- coherent beam combination [J]. *Optics Photonics News*, 2008, **19**(5):46~51
- 7 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combination of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2):431~436  
周 朴, 刘泽金, 马阎星 等. 随机并行梯度下降算法模拟两路光纤放大器相干合成与实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2):431~436
  - 8 Jens Limpert, Fabian Roser, Sandro Klingebiel *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3):537~545
  - 9 Jay W. Dawson, Michael J. Messerly, Raymond 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):13240~13266
  - 10 Phillip Sprangle, Joseph Penano, Bahman Hafizi *et al.*. Incoherent combining of high-power fiber lasers for long-range directed energy applications [C]. 2006 *SSDLTR*, Albuquerque, NM, 2006, A254254:23
  - 11 Phillip Sprangle, Antonio Ting, Joseph Penano *et al.*. Incoherent combining of high-power fiber lasers for directed-energy applications [C]. 2008 *SSDLTR*, Albuquerque, NM, 2008, A659774:25
  - 12 Phillip Sprangle, Antonio Ting, Joseph Penano *et al.*. Incoherent combining and atmosphere propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(2):138~148
  - 13 V. Gapontsev. 2 kW CW Yb-doped fiber laser with record diffraction limited brightness [C]. *CLEO Europe*, Munich, Germany, 2005, CJ11-THU
  - 14 D. Gapontsev. 6 kW CW single mode ytterbium fiber laser in all-fiber format [C]. 2008 *SSDLTR*, Albuquerque, NM, 2008, 258
  - 15 Optical Society of America. CLEO/QELS:2010 Laser Science to Photonic Application [EB/OL] (2008-09-5) [2008-10-1] <http://www.cleoconference.org>
  - 16 IPG Photonics. (2009-01-5) [2009-1-10] [EB/OL] <http://www.ipgphotonics.com>
  - 17 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Comparative study on the propagation performance of coherently combined and incoherently combined beams [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**:1640~1647
  - 18 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
  - 19 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**:467~475
  - 20 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
  - 21 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**(9):1297~1304
  - 22 F. Gori, M. Santarsiero, R. Borghi. Intensity based modal analysis of partially coherent beams with Hermite-Gaussian modes [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18):989~991
  - 23 Chu Xiaoliang, Zhang Bin.  $M^2$ -factor and mode coefficients of partially coherent Gaussian beams [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6):670~672  
楚晓亮, 张 彬. 部分相干高斯光束的  $M^2$  因子及模系数[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(6):670~672
  - 24 V. Eckhouse, M. Fridman, N. Davidson *et al.*. Phase locking and coherent combining of high-order-mode fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18):2134~2136
  - 25 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun. Comparative of coherent combining and incoherent combining of fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2):276~280  
周 朴, 刘泽金, 许晓军. 光纤激光相干合成与非相干合成的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2):276~280
  - 26 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov, Ernst Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners [C]. *SPIE*, 2007, **6708**:67080K
  - 27 Svetlana L. Lachinova, Mikhail A. Vorontsov. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. II. Analysis of atmospheric compensation efficiency [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(18):1960~1973
  - 28 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