

文章编号: 0258-7025(2009)04-0773-06

高能激光光束质量通用评价标准的探讨

刘泽金 周 朴 许晓军

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 激光光束质量评价是激光光学中的一个经典问题。目前国内外研究人员已经提出多种光束质量评价因子并加以利用,但是对于激光光束质量一直没有统一的评价标准和规范的测量方法。特别是近年来激光相干合成技术得到了迅猛发展,合成后光束质量的评价也缺乏统一的评价方案。本文对已有的各种光束质量因子进行简单评述,并引入光束传输因子(BPF)作为高能激光光束质量通用评价标准。详细介绍了 BPF 的物理本质与测量方法,并通过模拟计算对其用于评价单束激光和相干合成光束的普适性进行分析。结果表明,BPF 具有物理概念明晰、测量方便、通用性强等优势,适合于评价高能激光光束质量。

关键词 高能激光;光束质量;评价标准;相干合成

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0773

Study on Universal Standard for Evaluating High Energy Beam Quality

Liu Zejin Zhou Pu Xu Xiaojun

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

Abstract Laser beam quality evaluating is a classical issue in laser optics field. Several beam quality factors have been proposed and utilized. Nevertheless, there have been no standard methods for characterizing and diagnosing laser beam quality. In addition, with the development of coherent beam combining technique, there is no uniform beam quality factor to evaluate the coherently combined beam. In the present paper, several beam quality factors that already exist are summarized and discussed briefly, then beam propagation factor (BPF) as a universal standard for evaluating high energy beam quality is introduced and studied in detail. The physical principle and the measuring technique in practical engineering are briefly introduced, and the universal characters for evaluating single laser beam and coherent combined beam are analyzed. Numerical calculation results show that BPF is fit for evaluating high energy beam quality due to its advantages in perspicuous principle, handy-for-measuring and all-purpose in application fields.

Key words high energy laser; beam quality; standard for evaluation; coherent beam combining

1 引言

随着高能激光技术的不断发展和成熟,单台激光器的输出功率水平不断取得新的突破;另一方面,对多路光束进行相干合成也倍受国内外研究人员的关注^[1~4],高能激光系统开始向工程化方向发展。光束质量是高能激光系统的一项重要性能指标,高能激光对目标的作用效果不仅取决于激光器输出功率,与激光的光束质量也有密切关系。目前国内外研究人员已经提出了多种单台高能激光器的光束质量评价方法^[5~14],并对这些方法的适用范围和不确定

定性进行了详细的分析。普遍认为,目前各种评价方法各有优势和局限性,对于具有普适性的高能激光光束质量通用评价标准尚无定论。对于利用相干合成技术获得的典型非高斯型光束,也采用了不同的方法予以评价合成后的光束质量^[15~17]。如文献^[15]直接利用 M^2 因子分析各种组束因素对相干合成光束质量的影响;文献^[16]以 Strehl 比作为判断,分析相干激光阵列的相位误差对合成光束质量的影响。上述两种方法都是对单束激光现有评价因子的直接引用,但均存在不妥之处:未考虑合成光束

收稿日期: 2009-01-19; 收到修改稿日期: 2009-02-26

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等方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

的非高斯分布特征^[18], Strehl 比不能给出不同稀疏程度的激光阵列的光束质量的差异, M^2 因子则有可能引入合成光束越多、光束质量越差^[15,18], 以及相干合成与非相干合成光束质量相同^[5]等结论。诺格公司在其固体激光相干合成的实验中将光束质量因子 BQ 定义为 $(P/P_{\text{idea}})^{-1/2}$ ^[17], 其中 P 定义为实测发散角 (λ/D) 内的桶中功率, P_{idea} 是相干合成的理想情形下远场发散角大小的桶中功率。诺格公司两路固体激光相干合成 19 kW 激光输出, 光束质量为 $BQ=1.73$ ^[17], 可以认为接近衍射极限, 但仔细计算可以得出, $BQ=1.73$ 对应发散角大小的桶中功率仅占总功率的 33%。为了更加客观地评价高能激光系统的作用效能, 需要确立高能激光系统激光光束质量的通用评价标准, 为高能激光系统的设计和优化提供参考。本文探讨一种高能激光光束质量通用评价标准, 介绍其物理本质与测量方法, 并对其用于评价单束激光和相干合成光束的普适性进行分析。

2 光束传输因子的定义与测量方法

对于实际高能激光系统, 传输到远距离处的光束聚焦能力是激光光束质量的典型表征^[13], 也是人们最为关注的性能指标。无论采用固体激光器、化学激光器还是其他类型的激光器, 也无论是采用稳定腔还是非稳腔, 光束聚焦能力的最直观体现就是远场靶面上的能量集中度。因此, 对于相同发射口径的光束而言, 传输到远场靶面上的激光能量集中度直接反映了光束质量的优劣。参考美国 DARPA 在 MTO 办公室提出的光束传输因子 (BPF) 的概念, 光束传输因子可以直接用于定量分析远场靶面上的能量集中度。 BPF 的计算方法为^[19]

$$BPF = 1.19P/P_{\text{total}}, \quad (1)$$

式中 P 定义为远场半径为 $1.22\lambda L/D$ 大小的桶中功率, L 为光束传输距离, P_{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, 如图 1 所示。

(1) 式中 $1.22\lambda L/D$ 和 1.19 是从理想均匀平面波

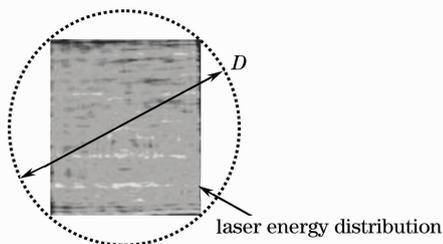


图 1 光束发射孔径的定义

Fig. 1 Definition of the aperture for beam transmission

的圆孔衍射得到的判据, 1.19 是圆孔衍射远场艾里斑内能量占总能量的 83.8%。从本质而言, 判断该半径的圆域内能量的多少就是判断实际光束与理想均匀平面波的差别。如果圆域半径取值超过 $1.22\lambda L/D$ (例如 $2.44\lambda L/D$), 则如文献[6]中的图 1 所示, 即便是该圆域半径内总功率超过理想均匀平面波的情形, 光束在远场中心轴上的能量集中度也极低, 且高阶旁瓣的能量集中度也远不如中心只有一个主瓣时的情形。因此, $1.22\lambda L/D$ 作为远场靶面能量集中度的测量标尺是较为合适的。 BPF 的理想值为 1, 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。

BPF 的测量也较为方便, 如图 2 所示, 激光 (单束或合成光束) 经由一焦距为 f 的透镜聚焦, 功率探测器放置在透镜焦平面上, 将一半径为 $1.22\lambda f/D$ 的小孔放置在探测器靶面前方, 读出探测器输出功率大小 P_1 , 再撤去圆孔, 读出此时探测器输出功率大小 P_2 , 则 $BPF = P_1 / (0.838 \times P_2)$ 。

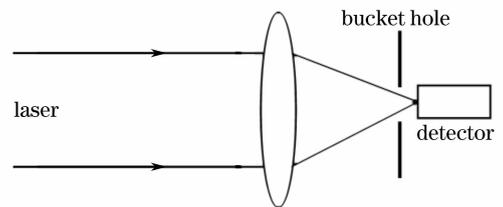


图 2 光束传输因子测量系统示意图

Fig. 2 Experimental sketch for measuring BPF

3 与以往光束质量评价因子的比较

对于任意一种高能激光光束质量评价标准, 在实际测量过程中还必须满足下列准则^[13]:

- 1) 测量次数少 (最好是单次测量): 由于高能激光器长时间持续出光需要较高的经济成本, 因此最理想的情形下是单次测量即可获得评价结果;
- 2) 探测器的噪声对测量结果影响不大;
- 3) 适用于评价各种激光谐振腔的出射光束;
- 4) 不同高能激光系统 (含光束变换系统等) 出射激光光束质量之间的可比较性;
- 5) 测量结果具有唯一性且不会因此带来争论或有悖于基本物理定律;
- 6) 测量结果能为实际应用提供直接参考。

传统的 M^2 因子、 β 因子测量需对激光能量衰减、取样后利用面阵探测器探测远场光斑强度分布, 计算远场光斑半径, 受面阵探测器 (如 CCD) 的噪声及能量衰减、取样器件的不均匀性影响, 测量结果不

确定性很大,文献[13]的计算结果甚至表明,受探测器量子噪声、量化噪声、激光能量取样等因素的影响, M^2 因子测量值只有在小于 1.5 的情形下才比较可信。而 Strehl 比只能给出远场轴上的峰值光强,实际上高能激光与远场目标的作用需要在具有一定作用面积 S 内进行,因此 Strehl 比不能直接反映光束聚焦能力。

相比之下,光束传输因子作为一种评价标准,不仅满足上述所有准则,而且在实际操作中,测量也较为简单。高功率激光功率测量方法现已较为成熟^[9]。只需测量激光光束总的输出功率以及远场靶面上半径为 $1.22\lambda L/D$ 的圆内激光功率即可。与基于远场光斑半径的评价方法相比,光束传输因子的测量误差要低得多。另外,对任意光束,光束传输因子计算的是远场半径为 $1.22\lambda L/D$ 大小的桶中功率与发射功率的比值,相当于对远场靶面的尺寸作了归一化处理。因此,测量结果仅是激光光束本身聚焦能力的表征,与激光谐振腔的类型无关,也与光束发射系统、发射口径等非激光器本身的参数无关。各种评价因子是否满足上述测量准则总结于表 1。

表 1 各种评价因子对评价准则的符合程度

Table 1 Fitness of different evaluating factors to the measuring guidelines

	M^2 factor	β factor	Strehl ratio	N_{BPF}
Criterion 1	×	√	√	√
Criterion 2	×	×	×	√
Criterion 3	×	√	√	√
Criterion 4	×	√	√	√
Criterion 5	×	×	√	√
Criterion 6	×	×	×	√

4 光束传输因子用于评价单束激光光束质量

本部分以非稳腔激光器和卡塞格林望远镜发射系统为例,分析利用光束传输因子评价单束激光光束质量的可行性。非稳腔激光器出射激光经过卡塞格林望远镜发射后形成环形光束,假设环形光束外半径为 a ,内半径为 b ,定义中心遮拦比为 $\epsilon=b/a$,如图 3 所示。假设激光波长为 $1.07 \mu\text{m}$,环形光束外半径为 50 cm,聚焦发射到 10 km 处的目标靶面上。若不考虑发射系统抖动等因素,则远场靶面上的能量集中度主要受中心遮拦比、出射光束的振幅不均匀以及大气湍流等因素的影响。强度不均匀的程度用 $m=(E_{\text{max}}-E_{\text{min}})/E_{\text{max}}$ 来描述^[9],其中 E_{max} 和 E_{min} 分别表示最大振幅和最小振幅。大气湍流的强度用

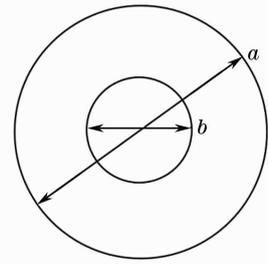


图 3 环形光束示意图

相干长度 r_0 来描述。图 4~图 6 给出了上述因素对光束质量影响的数值计算结果,图 5 和图 6 中取 $\epsilon=0$ 。可以看出,光束传输因子能够清晰地反映各种因素对光束质量的影响。

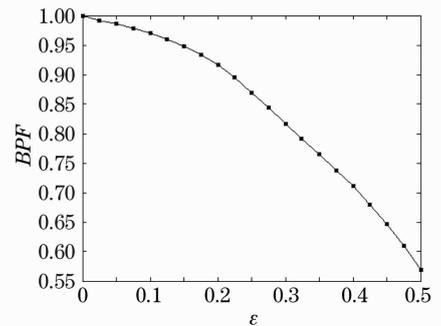


图 4 中心遮拦比对光束质量的影响

Fig. 4 Dependence of BPF on truncation ratio

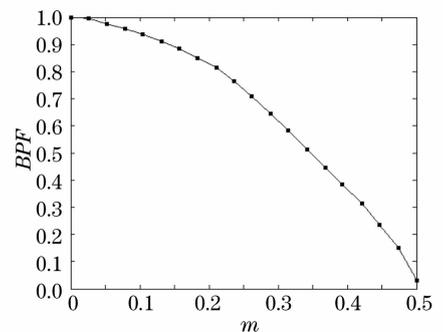


图 5 强度分布不均匀对光束质量的影响

Fig. 5 Dependence of BPF on non-uniformity in intensity distribution

图 4 计算结果表明,环形光束的光束质量不及实心光束,且光束质量随遮拦比的增大而降低;图 5 计算结果表明,激光近场强度不均匀对光束质量的影响不可忽略,不均匀程度越大,包含在远场衍射极限桶中功率的能量越少,光束质量随之降低;图 6 计算结果给出了大气相干长度对光束质量的影响,随着大气湍流强度的增强,相干长度随之减小,光束传输至远场光斑也就愈加弥散,光束质量随之降低。

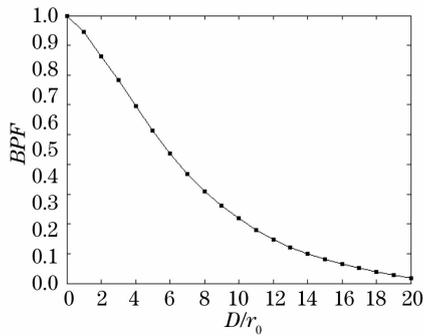


图 6 大气相干长度对光束质量的影响

Fig. 6 Dependence of BPF on atmosphere coherence length

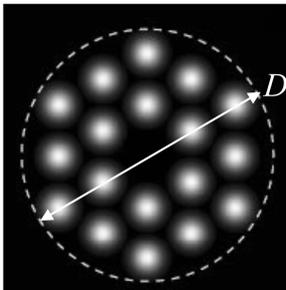


图 7 激光阵列的近场排布

Fig. 7 Scheme of the laser array

5 光束传输因子用于评价相干合成激光光束质量

本部分讨论利用光传输因子评价相干合成激光光束质量的可行性。以 18 束单模激光器相干合成为例(激光器单元近场排布如图 7 所示,单元光束的口径为 10 cm,激光波长为 $1.07 \mu\text{m}$,整个激光阵列的发射口径为 50 cm),假设各束激光排布紧密,两相邻光束中心距离为单元光束光斑半径的两倍。与传统的单一口径高能激光系统不同,相干合成型高能激光系统输出光束是由若干彼此相干的小口径光束阵列拼接而成。因此在实际应用中,除了大气和发射系统抖动等因素外,倾斜误差、相位误差、填充因子等因素也会影响高能激光系统的性能^[18,20]。在实际系统中,相干合成的光束的光轴指向不可能严格与设计值一致,而是有一个倾斜量,这是相干合成高能激光系统与传统单一口径高能激光系统的一个重要区别。定义各路光束偏离设计值的均方根值为系统的倾斜误差。合成光束远场能量集中度的大小取决于采用的主动或被动相位控制机制能否有效抑制各路光束的相位起伏,一般而言,由于抽运电流不稳定以及外界因素的影响,相干合成系统中的相位控制机制或多或少地会存在控制残差,本文称之

为相位误差。要完成各路光束的相干合成,对激光的相位控制是决定合成效果的关键因素。填充因子指的是近场激光阵列有效出光面积占整个孔径的比率,填充因子是影响远场能量集中度的一个重要因素^[21~24]。由于机械装配等因素的影响,各路光束排布不可能无限紧密,实际系统填充因子一般小于 1。

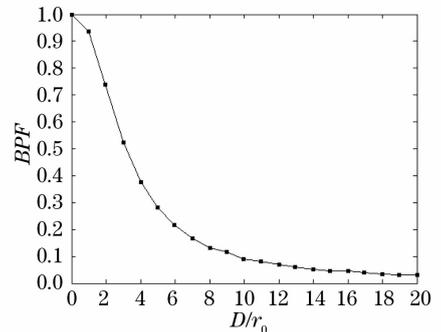


图 8 大气相干长度对光束质量的影响

Fig. 8 Dependence of BPF on atmosphere coherence length

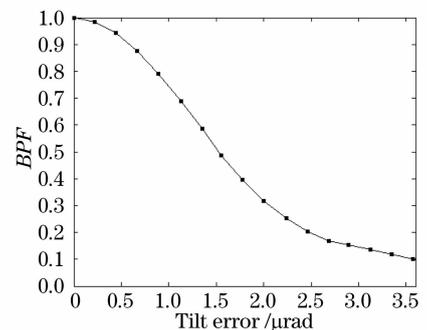


图 9 倾斜误差对光束质量的影响

Fig. 9 Dependence of BPF on tilt error

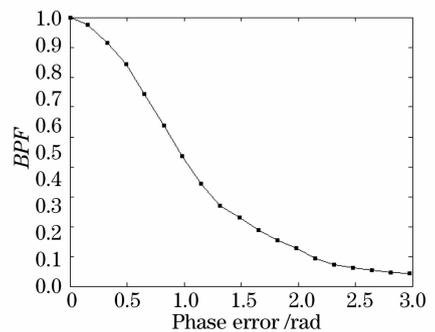


图 10 相位控制残差对光束质量的影响

Fig. 10 Dependence of BPF on phase error

图 8~图 11 分别给出了图 7 所示的激光阵列输出激光的光束质量受大气相干长度、倾斜误差、相位误差、填充因子等因素影响的数值计算结果。相干合成激光光束质量受上述因素的影响也可以用多项式精确拟合^[16]。图 8~图 10 中假设阵列的填充因子为理想值 1。值得注意的是,对于大气透过率

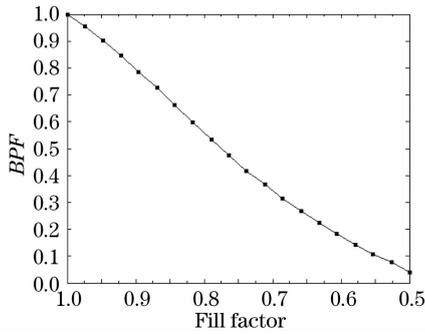


图 11 填充因子对光束质量的影响

Fig. 11 Dependence of BPF on fill factor

较高的 $1 \mu\text{m}$ 左右的波长, 大气的相干长度 r_0 较小, 相干合成光束质量会因受大气湍流的影响而严重退化^[25,26]。在实际大气中传输时, 相干合成技术需要与现有的自适应光学技术统一考虑, 才能更好地发挥相干光束的作用。由图 9~图 11 可以看出, 倾斜误差越小、相位控制残差越少、填充因子越大, 远场光束的能量集中度也就越高, 相应的 BPF 值也就越接近理想值。在工程实际中, 除了尽可能减小相位控制残差外, 相干合成高能激光系统还需要解决高精度的机械加工与装配问题, 以尽可能增加激光阵列的填充因子、减小倾斜误差。光束传输因子反映了远场光束的能量集中度与填充因子、倾斜误差、相位起伏程度之间的关系, 用于描述和评价相干合成光束的质量十分合适。

6 结 论

对已有的各种光束质量因子进行简单评述, 并引入光束传输因子作为高能激光光束质量通用评价标准。详细介绍了光束传输因子的物理本质与测量方法, 并通过模拟计算对其用于评价单束激光和相干合成光束的普适性进行了分析。结果表明, 光束传输因子具有物理概念明晰、测量方便等优势, 不仅可以用于评价单束激光的光束质量, 还适合于评价相干合成激光光束质量, 能够有效体现各种因素对光束质量的影响, 具有较强的通用性。

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**: 567~577
- 2 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Plain analysis on high power fiber laser system[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
- 3 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
- 4 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al.*. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351~358
曹涧秋, 陆启生, 侯静等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 351~358
- 5 A. E. Siegman. How to (maybe) measure laser beam quality[J]. *OSA Annual Meeting*, 1997
- 6 Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far-field[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **24**(4): 327~332
杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, **24**(4): 327~332
- 7 Liu Zejin, Lu Qisheng, Zhao Yijun. Study of evaluating beam quality of high energy lasers with unstable resonators[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **25**(3): 193~196
刘泽金, 陆启生, 赵伊君. 高能非稳腔激光器光束质量评价的探讨[J]. *中国激光*, 1998, **25**(3): 193~196
- 8 Lü Baida, Kang Xiaoping. Some aspects of laser beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 47~51
吕百达, 康小平. 对激光光束质量一些问题的认识[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 47~51
- 9 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006
- 10 Wu Hanping. Evaluation and applied analysis of laser beam quality[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(2): 128~132
吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(2): 128~132
- 11 Wang Kewei, Sun Xiaoquan, Ma Chaojie. Evaluation and application of high energy laser weapon system beam quality[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, **41**(8): 13~16
王科伟, 孙晓泉, 马超杰. 高能激光武器系统中的光束质量评价及应用[J]. *激光与光电子进展*, 2005, **41**(8): 13~16
- 12 Wang Yunping, Huang Jianyu, Qiao Guanglin. A method for evaluating high energy laser beam quality[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(10): 1029~1033
王云萍, 黄建余, 乔广林. 高能激光光束质量的评价方法[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(10): 1029~1033
- 13 T. Sean Ross, William P. Latham. Appropriate measures and consistent standard for high energy laser beam quality[J]. *J. Directed Energy*, 2006, **2**: 22~58
- 14 Tian Yinghua, Ye Yidong, Xiang Ruijan *et al.*. Evaluation of uncertainty in beam quality measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7): 1076~1078
田英华, 叶一东, 向汝建等. 光束质量因子测量的不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7): 1076~1078
- 15 Yongzhong Li, Liejia Qian, Daquan Lu *et al.*. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 957~963
- 16 C. D. Nabors. Effect of phase errors on coherent emitter arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(12): 2284~2289
- 17 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 1247~1249
- 18 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**: 3350~3359
- 19 <http://www.darpa.mil/mto/programs/adhels/index.htm>.

- Architecture for Diode High Energy Laser Systems
- 20 J. B. Shellan. Phased-array performance degradation due to mirror misfigures, piston errors, jitter, and polarization errors [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**: 555~567
- 21 Thomas H. Loftus, Alison M. Thomas, Paul R. Hoffman *et al.*. Honea spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 487~497
- 22 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**: 354~356
- 23 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U-1~61020U-5
- 24 Tang Qianjin, Shi Xiangchun, Hu Qiquan. Effect of the filled factor on the far-field profiles of laser beam combination[J]. *J. Propulsion Technology*, 2007, **28**(5): 566~569
唐前进,施翔春,胡企铨. 填充因子对激光组束远场功率分布的影响[J]. *推进技术*, 2007, **28**(5): 566~569
- 25 S. L. Lachinova, M. 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**: 1960~1973
- 26 S. L. Lachinova, M. A. Vorontsov. Performance analysis of an adaptive phase-locked tiled fiber array in atmospheric turbulence conditions[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950O1~58950O14