

β 因子用于被动相干组束系统光束质量评价的探讨

李震^{1,2} 周军¹ 薛宇豪^{1,2} 何兵¹ 刘驰¹ 漆云凤¹
董景星¹ 魏运荣¹ 楼祺洪¹ 潘志勇³

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³中国电子科技集团公司第二十三研究所, 上海 201900

摘要 利用二维 4 路光纤激光环形腔被动锁相相干组束实验平台, 对被动相干组束系统的光束质量进行了研究。以衍射极限倍数 β 因子作为光束质量的评价方法, 理论分析了光束占空比以及不同锁相模式对 β 因子的影响, 实验测量了对应不同输出功率水平的 β 因子。结果表明, 虽然 β 因子可以在一定程度上反映出不同实验条件下光束质量的差异, 但是由于 β 因子的测量核心是确定出焦平面处 83.8% 环围能量(功率)比的桶尺寸, 不能反映相干组束远场光斑的特点, 不适合用于评价被动相干组束系统的光束质量。比较分析了 β 因子与光束质量, 光束质量能更好地反映出相干组束的特点。

关键词 激光器; 光纤激光; 相干组束; 光束质量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1102012

Discussion on Applying β Factor in the Evaluation of Beam Quality of the Passive Coherent Beam Combination System

Li Zhen^{1,2} Zhou Jun¹ Xue Yuhao^{1,2} He Bing¹ Liu Chi¹ Qi Yunfeng¹
Dong Jingxing¹ Wei Yunrong¹ Lou Qihong¹ Pan Zhiyong³

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ No. 23 Research Institute of China Electronic Technology Corporation Group, Shanghai 201900, China

Abstract Beam quality of the passive coherent beam combination system is studied using the ring cavity passive phase-locking experimental platform of four fiber lasers in two-dimensional distribution. With the times-diffraction-limited factor β as the evaluation method, the impact of duty ratio of sub-beams and different phase-locked patterns on the β factor is analyzed theoretically; and the β factor corresponding to different output power levels is measured in the experiment. The results show that although the β factor can reflect the difference in beam quality under different experimental conditions to some extent, it can not reflect the characteristics of coherent beam patterns in the far-field because the focus of the β factor measurement is to determine the bucket size of 83.8% encircled energy (power) ratio at the focal plane, therefore it is not suitable for the evaluation of the beam quality of a passive coherent beam combination system. A comparative analysis of the β factor and beam quality is done, beam quality can better reflect the characteristics of the coherent beam combination.

Key words lasers; fiber laser; coherent beam combination; beam quality

OCIS codes 140.3510; 140.3295; 140.3298

收稿日期: 2011-07-13; 收到修改稿日期: 2011-08-15

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030201)、国家自然科学基金(60908011)、国家重大科技专项(2010ZX04013)和上海科技启明星基金(09QB1401700)资助课题。

作者简介: 李震(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器及相干组束方面的研究。

E-mail: lznkgx@163.com

导师简介: 周军(1972—), 男, 研究员, 主要从事高功率光纤激光器及准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

光纤激光器以光束质量好、效率高、体积小等优点得到了研究者的广泛关注。近年来,光纤激光器的输出功率迅速提升。2009年,IPG公司已经实现了单纤10 kW单模输出^[1]。在国内,中国科学院上海光学精密机械研究所于2009年利用国产掺镱双包层光纤实现了单根光纤1.75 kW功率输出^[2]。但是由于光纤中的非线性效应等,单根光纤的输出功率不可能无限提高^[3]。光纤激光的相干组束技术可以在提高总输出功率的同时保证较好的光束质量。根据相位锁定原理的不同,相干组束可以分为主动相干组束和被动相干组束两种^[4~7]。

用来评价相干组束系统光束质量的参数主要有斯特雷尔(Strehl)比、描述桶中功率比或环围能量比的光束质量(BQ)、光束传输因子(BPF)等。由于Strehl比反映的是远场光轴上的峰值光强变化,不能给出不同稀疏程度的激光阵列的光束质量的差异^[8],国外研究者通常用BQ来评价相干组束系统的光束质量^[9,10],国内刘泽金等^[8]提出以光束传输因子作为高能激光光束质量的一个评价标准并对相干组束激光光束质量做了研究。BQ用于评价目标处强激光的光束质量,可以反映激光束在目标靶面上的能量集中度^[11],但BQ在对光强空间分布的描述方面有所不足。在前期工作中,重点针对BQ的实验测量方法进行了研究^[12]。衍射极限倍数 β 因子表征被测激光束的光束质量偏离同一条件下理想光束质量的程度,其值不随光束通过理想光学系统的变换而变化,从本质上反映光束质量^[13]。本文在二维4路光纤激光环形腔被动锁相相干组束实验基础上,对衍射极限倍数 β 因子用于评价被动相干组束系统的光束质量进行了探讨。理论分析了光束占空比以及不同锁相模式对 β 因子的影响。在不同功率水平下实验测量了 β 因子,并与BQ进行了比较分析。

2 β 因子的定义与测量方法

衍射极限倍数 β 因子定义为^[14]

$$\beta = \theta/\theta_0, \quad (1)$$

式中 θ 为被测实际光束的远场发散角, θ_0 为理想光束的远场发散角。

以圆形实心均匀光束作为理想光束,其远场发散角为

$$\theta_0 = 1.22\lambda/D, \quad (2)$$

式中 D 为光束直径。对于实际光束,在近场排布是阵列而非单一光束的情况下,光束直径取为该阵列的外切圆直径^[12]。实际光束的远场发散角 θ 可以通过对光束聚焦后焦斑尺寸的测量得到:

$$\theta = w/f, \quad (3)$$

式中 w 取焦平面处对应83.8%^[15]环围能量(功率)的桶半径; f 为聚焦透镜的焦距。衍射极限倍数 β 因子反映了被测实际光束质量对相同条件下理想光束质量的偏移程度,在任何情况下,均有 $\beta \geq 1$ 。

3 二维激光被动相干组束系统 β 因子的分析与测量

3.1 光束占空比对 β 因子的影响

定义光束占空比为子光束直径与相邻子光束间距的比值。光束占空比可以用来描述激光阵列的稀疏程度。对于成正方形排列的4束激光,假设子光束均为高斯光束并且已经实现完全相干,高斯光束的表达式为^[16]

$$G(x,y) = A \cdot \exp\left[-\frac{\pi(x^2 + y^2)}{w_0^2}\right], \quad (4)$$

式中 w_0 是高斯光束的束腰半径, A 是振幅。图1给出了对应不同光束占空比的相干组束输出激光 β 因子的理论计算值。从图1可以看出,随着光束占空比的增大, β 因子减小。对于子光束紧密排列的理想情况,光束占空比为1.0,此时 β 因子为1.98。从计算结果来看, β 因子可以在一定程度上反映出不同光束占空比所造成的相干组束激光光束质量的差异,但是当光束占空比较大时,不同光束占空比所对应的 β 因子差别较小。

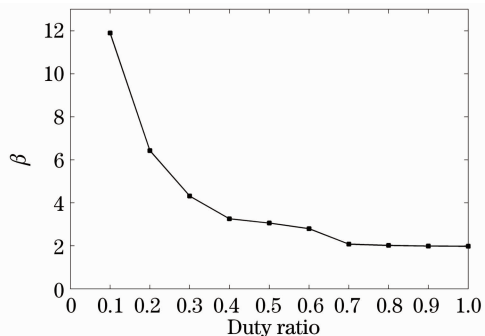


图1 β 因子与光束占空比的对应关系

Fig.1 β factor versus duty ratio of sub-beams

3.2 不同锁相模式的 β 因子

在被动锁相相干组束系统中,通常通过使同相模式获得较大的增益而异相模式产生较大的损耗,从而实现同相模式输出^[6]。同相模式即对应子光束

之间相位差为 0 或 2π 的整数倍。同相模式的远场光斑中心为光强极大值,此光强极大值为子光束中心光强的 N^2 倍, N 为子光束的数目。同相模式具有较大的中心光斑能量比,是被动相干组束系统期望输出的模式。但在实验中,若引入的异相模式损耗相对较小,那么异相模式完全可能出现。对于以正方形排布的二维 4 路激光相干组束,假定子光束均为高斯光束,光束占空比为 0.9。图 2(a)为同相模式的远场光斑图样。图 2 也给出了 3 种不同的异相模式,4 束激光的相位关系分别为:(a)[0,0,0,0];(b)[0, π , π ,0];(c)[0,0, π , π];(d)[0,0,0, π]。对图 2 中的 4 种不同锁相模式所对应的远场光斑,分别计算了其 β 因子。计算结果为:(a) $\beta=1.99$; (b) $\beta=2.04$; (c) $\beta=2.00$; (d) $\beta=2.01$ 。从计算结果可以看出,4 种锁相模式所对应的 β 因子基本相同。在 β 因子测量过程中需要涉及到焦平面处对应 83.8% 环围能量桶,如图 2 中的实线圆圈所示。从图 2 可以看出,该环围能量桶已把相干组束后的暗纹也包括在内。因此, β 因子不能反映相干组束后远场光斑强度的具体特点,无法体现不同锁相模式光束质量的差别。

3.3 实验装置

环形腔被动锁相二维 4 路光纤激光相干组束的实验装置如图 3 所示。实验中的每一路放大链路均由瓦级放大器、30 W 放大器和 300 W 放大器级联构成。所有光纤放大器中的光纤均采用掺镱光纤。为了获得较大的光束占空比,采取光束拼接系统使

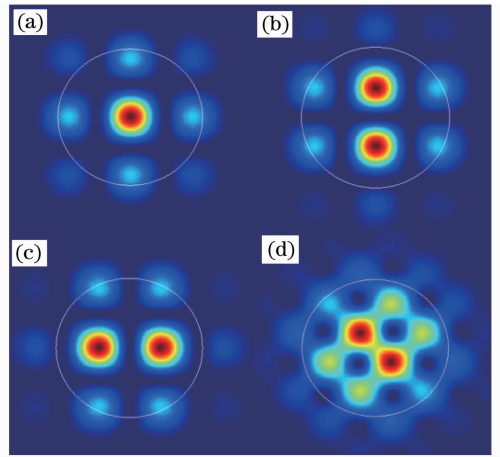


图 2 不同锁相模式下的远场光斑图样

Fig. 2 Laser beam patterns of different phasing-locking modes in the far-field

4 束从焦距均为 5.8 cm 的准直透镜输出的激光光束重新排列以足够紧密。实验中的光束占空比为 0.9。经分光比为 10:90 的分束片反射的小部分激光通过焦距为 25 cm 的傅里叶透镜耦合注入到单模光纤(SMF)。2×1 的耦合器一端连接有 1064 nm 的单模输出 LD 种子源,其线宽为 0.6 nm,工作功率为 40 mW。用于在实验调节时避免各级放大器产生自激振荡。在经过预放大器的放大之后,单模光纤中的反馈信号光等分为 4 束后分别进入 4 个光纤放大链路。组束系统的输出激光经另外一个反射率为 4% 的分束片反射小部分激光,经焦距为 40 cm 的傅里叶透镜变换到远场以供 CCD (Spiricon SP620U) 监测。

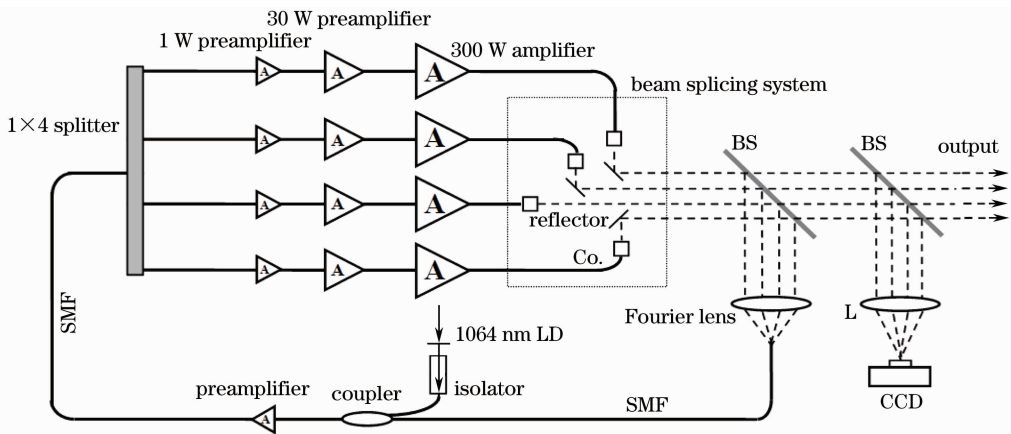


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

3.4 实验结果

首先在低功率水平下进行实验调节,精密调节反馈单模光纤的位置以获取最佳的锁相效果。在输出功率为 19 W 时,得到相干组束后激光远场强度

分布如图 4(a)所示。远场光斑图样中的中心亮斑的相干对比度为 0.80。利用 CCD 软件测量出对应 83.8% 环围能量的桶直径为 $129.5 \mu\text{m}$ 。根据 (3) 式,对于被测激光光束,其远场发散角 $\theta =$

0.1619 mrad。为了确定理想光束的直径 D , 将子光束视为从一个口径发射出来, 其外切圆的直径即为 D 。实验中, $D=18$ mm。激光波长 λ 约为 1080 nm。根据 (2) 式, 理想光束的远场发散角 $\theta_0 = 0.0732$ mrad。由 (1) 式可得 $\beta=2.21$ 。继续增加抽运功率, 可以进一步提高组束后的激光输出功率。在组束输出功率为 510 W 时, 采集的相干组束光束远场强度分布如图 4(b) 所示。此时对应的远场光斑图样中的中心亮斑的相干对比度为 0.49。对应 83.8% 环围能量的桶直径为 146.5 μm 。被测激光光束远场发散角 $\theta=0.1830$ mrad, $\beta=2.50$ 。当整个相干组束系统的输出功率较高时, 由于热效应等所导致的光纤输出端抖动等原因都会使得输出激光的光束质量变差, 中心亮斑的相干对比度下降, β 因子也增大。采用 β 因子来描述相干组束系统的输出激光光束质量, 可以反映出不同的远场聚焦效果, 在一定程度上反映出实验中光束质量的差异。

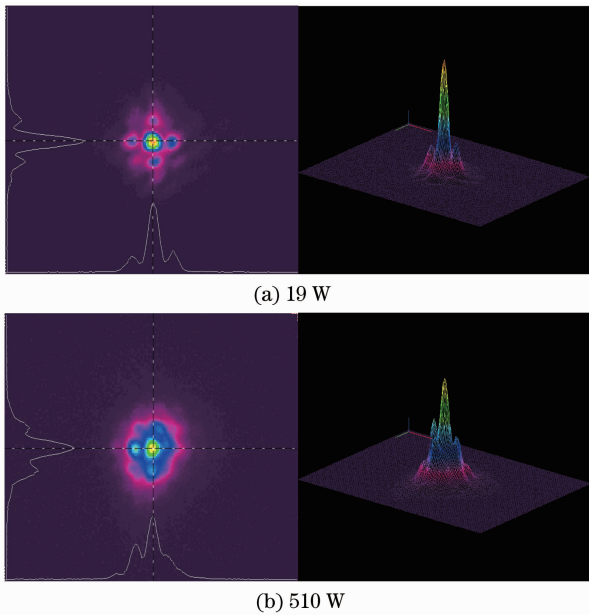


图 4 不同输出功率下输出激光光束的远场光强分布
Fig. 4 Intensity distribution of output laser in the far-field at different output powers

4 β 因子与 BQ 比的比较

BQ 描述了桶中功率比或环围能量比, 其定义为^[11]: 规定桶尺寸内理想光斑环围功率(或能量)与相同桶尺寸内实际光斑环围功率(或能量)比值的算术平方根。在具体测量计算时, 可将 BQ 定义为^[17] $\sqrt{f_{\text{DL}}/f_{\text{real}}}$, 式中 f_{DL} 为理想近衍射极限、光束直径为 D 的光束在发散角为 $1.22\lambda/D$ 内的功率与出射功率的比值, 这是一个理论计算值。 f_{real} 为待测实

际激光光束在发散角 $1.22\lambda/D$ 内的功率与该激光光束出射功率的比值。BQ 测量中涉及到的理想光束选取为圆形平顶光束, 这与 β 因子的测量中所选取的圆形实心均匀光束是一致的, 理想光束直径 D 的选取与 β 因子中也是相同的。桶半径取为 $1.22\lambda f/D$ 。实验中对应图 4 中两种功率水平下的 BQ 的测量结果如下: (a) 19 W 时, BQ 的值为 1.50; (b) 510 W 时, BQ 的值为 2.01。高功率水平下的光束质量变差从 BQ 上也得到了体现。

实验中 β 因子和 BQ 的测量所涉及的 D, f , 以及总能量在 CCD 上的选取均一致。对于完全相干的四束二维光纤激光阵列, 以高斯光束作为每路光纤激光的出射光束, 图 5 所示为光束占空比分别为 1.0 和 0.5 时的远场光斑强度分布。图 5 中的虚线圆圈对应的桶半径为 $1.22\lambda f/D$; 实线圆圈则对应桶内能量比为 83.8% 时的桶。从图 5 中也能够看出, β 因子在测量时把远场光斑中的暗条纹也包括在内, 并不注重 83.8% 能量桶内激光功率的具体分布情况, 这使得它虽然能够基本反映激光的可聚焦能力, 但是在反映相干组束的具体特点这一方面较为欠缺。BQ 注重中央主瓣的能量, 能更好地反映相干组束的特点, 体现出远场光斑中心主瓣能量集中的特点, 同时也可反映激光的可聚焦能力。由于 BQ 反映的是中央主瓣的能量集中程度, 两个相干度不同、光场分布不同的相干光束也有可能具有同样的 BQ, 实验中也发现光束占空比对 BQ 的影响较大。 β 因子和 BQ 的测量均是将光束变换到远场, 通过远场一定尺寸的桶中功率集中度来反应被测激光的光束质量。对于 4 束二维光纤激光阵列, 单路出射光束均假定为高斯光束, 在完全相干的情况下, 图 6 给出了对应两种光束占空比情况下的桶中功率比与桶尺寸(半径)的变化关系。 β 因子的测量核心是确定出焦平面处 83.8% 环围能量(功率)比的桶

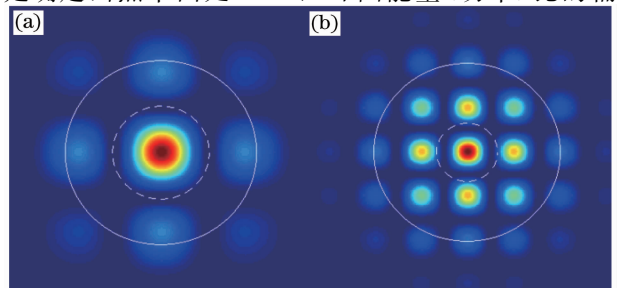


图 5 不同光束占空比下的远场光斑图样。
(a) 占空比为 1.0; (b) 占空比为 0.5

Fig. 5 Laser beam patterns for different duty ratio of sub-beams. (a) Duty ratio is 1.0; (b) duty ratio is 0.5

尺寸;而BQ的测量核心则是确定出特定桶尺寸内的功率(能量)占总功率(能量)的比例。

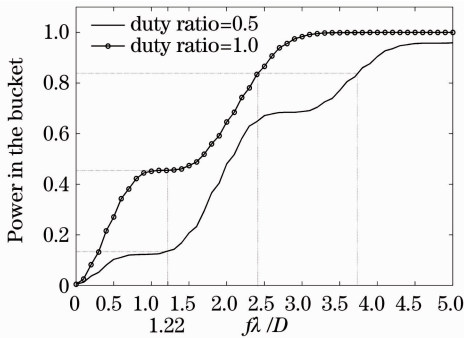


图6 不同光束占空比下的桶中功率比与桶尺寸(半径)的变化关系

Fig. 6 Power in the bucket versus the bucket size (radius) for different duty ratio of sub-beams

5 结 论

利用环形腔被动锁相相干组束实验平台对二维光纤激光被动相干组束激光光束质量进行了研究。理论分析了光束占空比以及不同锁相模式对输出激光衍射极限倍数 β 因子的影响。当光束占空比较大时,不同占空比所对应的 β 因子差别较小;对应不同锁相模式的 β 因子也差别很小,这是由于 β 因子并不注重83.8%能量桶内激光功率的具体分布情况所致。实验测量了不同输出功率水平下的 β 因子,并与BQ进行了对比。由于 β 因子的测量核心是确定出焦平面处83.8%环围能量(功率)比的桶尺寸,不能反映相干组束远场光斑的特点,这使得 β 因子不适合用于评价被动相干组束系统的光束质量。BQ注重特定桶尺寸内的环围功率(能量)比,能更好地反映相干组束的特点,在评价相干组束系统的光束质量时可考虑采用BQ,或者采用光束传输因子等参数。

参 考 文 献

- 1 M. O'Connor, V. Gapontsev, V. Fomin *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009. CThA3
- 2 Lou Qihong, He Bing, Xue Yuhao *et al.*. 1.75 kW from a double-clad Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1277
楼祺洪, 何兵, 薛宇豪等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1277
- 3 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
- 4 C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 20118~20121
- 5 J. Lhermite, A. Desfarges-Berthelemot, V. Kermene *et al.*. Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1842~1844
- 6 Li Zhen, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Coherent beam combination of passive phase locking of an array of three fiber lasers in one dimension by a ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3209~3214
李震, 周军, 何兵等. 环形腔被动锁相一维三路光纤激光相干组束研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3209~3214
- 7 Liu Zejin, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 518~524
刘泽金, 周朴, 侯静等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 518~524
- 8 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
- 9 Sami A. Shakir, Bill Culver, Burke Nelson *et al.*. Power scaling of passively phased fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2008, **7070**: 70700N
- 10 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- 11 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1643~1653
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643~1653
- 12 Li Zhen, Xue Yuhao, Zhou Jun *et al.*. Evaluation and measurement for beam quality of coherent beam combination of lasers in two-dimensional distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0402002
李震, 薛宇豪, 周军等. 二维激光相干组束系统光束质量的评价与测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0402002
- 13 Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(1): 61~64
高卫, 王云萍, 李斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(1): 61~64
- 14 Gao Wei, Qiao Guanglin, Wang Yunping. Evaluation parameters and characteristics analysis of laser beam quality[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2002, **21**(2): 17~21
高卫, 乔广林, 王云萍. 激光光束质量的评价参数及其特性分析[J]. *飞行器测控学报*, 2002, **21**(2): 17~21
- 15 W. D. Fountain. Far-field brightness of amplified laser systems [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(10): 2383~2384
- 16 M. Tondusson, C. Froehly, V. Kermene *et al.*. Coherent combination of four laser beams in a multi-axis Fourier cavity using a diffractive optical element [J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2001, **3**(6): 521~526
- 17 Gregory D. Goodno, Charles P. Asman, Jesse 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