文章编号:1002-2082 (2024) 03-0537-06

高能激光光束质量 β 因子测量方法

阴万宏[1],董再天[1],张云龙[1],王文涛[2],刘　磊[2],陈豪远[1],段园园[1],吴　磊[1],
黎高平[1],于东钰[1],吴　沛[1],俞　兵[1],孙鹏程[1]

(1. 西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站,陕西 西安 710065; 2. 中国电子科技集团公司第十一研究所 固体激光技术重点实验室,北京 100020)

摘　要: 高能激光光束质量 β 因子测量装置主要用于强激光系统状态调试和综合性能参数诊断,用于评价激光系统出光性能以及远场光斑可聚焦的能力。针对接近衍射极限光束质量 β 因子测量过程中被测光斑在面阵相机上所占的像素点太少等缺陷,研究了采用聚焦显微放大与高精度扫描狭缝相结合的光束质量 β 因子测量方法,并对相关方案进行了分析计算。此外还设计了采用固定像差元件及平行光管光源组合的激光光束质量 β 因子测量结果验证方案,对研制的高能激光光束质量 β 因子测量装置进行了不确定度分析,测量不确定度优于 10%。

关键词: 高能激光;β 因子;测量方法;显微放大;扫描狭缝

中图分类号: TN247　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.5768/JAO202445.0310007

Measurement method of beam quality factor β for high energy laser

YIN Wanhong[1], DONG Zaitian[1], ZHANG Yunlong[1], WANG Wentao[2], LIU Lei[2], CHEN Haoyuan[1], DUAN Yuanyuan[1], WU Lei[1], LI Gaoping[1], YU Dongyu[1], WU Pei[1], YU Bing[1], SUN Pengcheng[1]

(1. Primary Optical Metrology Station of National Defense Science and Technology Industry, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100020, China)

Abstract: The measurement system of high energy laser beam quality factor β is mainly used for state debugging and comprehensive performance parameters diagnosis of laser system, while these parameters can evaluate the laser output performance and the far-field spot focusing ability of the laser system. Aiming at the defect that the beam quality factor β close to the diffraction limit occupying too few pixels in the area array detectors, a measurement method was proposed based on microscopic magnification with high-precision scanning slit, and the relevant scheme was analyzed and calculated. In addition, a verification scheme of measurement results using the combination of fixed aberration elements and collimator light sources was designed to analyze the uncertainty of measuring device of developed high energy laser beam quality factor β, and the measurement uncertainty was better than 10%.

Key words: high energy laser; β factor; measurement method; microscopic magnification; scanning slit

引言

激光光束质量因子能够从本质上评价激光系统的性能,对激光系统的设计及应用具有重要的指导意义[1-6]。在高能激光领域,激光的作用效果取决于照射到目标上的功率密度,而目标上的功率密度既与激光的输出功率有关,也取决于激光的光束质量因子[5-7]。如果说功率和能量能够从线性等级表现激光的作用效果,则光束质量可以从平方等级表现激光的作用效果,因此,与功率和能量等参数相比较,光束质量甚至是更为重要的参数[6,8-10]。为了更加客观准确地评价高能激光系统在能量输运过程中的作用效能,需要对高能激光

收稿日期: 2022-12-26;　**修回日期:** 2023-10-25

基金项目: 国防计量技术基础科研项目(JSJL2020208A003);国防重点预先研究项目(JZX7Y20221183000007)。

作者简介: 阴万宏(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事光学计量及激光参数测试研究。E-mail: 515070709@qq.com

系统的光束质量因子进行深入研究和精确测量，为改善和控制高能激光的光束质量，研制和优化各种类型的激光系统提供评价方法依据[10-13]。

由于高能激光器一般采用正支虚共焦非稳腔，输出光束很多为非高斯光束，因此，采用传统的光束质量 M^2 因子等评价指标有诸多不妥和不确定之处，不适合作为高能激光评价标准[10-15]。此外，高功率激光衰减对测量结果的影响、测试光路引入的波前畸变、相机分辨率等原因阻碍了高能激光光束质量测量技术的研究和发展。近年来，通过理论分析和相关研究，认识到 β 因子的判定基准来源于光学系统衍射极限，系统测到的光斑尺寸一定大于衍射极限尺寸，可作为参照标准，具有明确的物理意义，是比较理想和实用的高能光束质量评价指标，因此高能激光研制、集成单位取得共识将 β 因子作为评价标准；通过将系统引入的波像差控制在 $\lambda/4$ 以内，确保测量结果不受系统波前畸变影响，真实反映光源光束质量，与此同时亚像素图像处理技术、狭缝扫描激光光斑测试技术的成熟，使研究高能激光光束质量高精度测量技术成为可能。

对高能激光光束质量 β 因子测量结果的影响因素很多，不仅包含光束衰减系统、聚焦光学变换系统、测试原理方法和光斑探测系统等硬件引入的影响，同时不同的数据处理方法和参数设置方法也对测量结果有较大影响。国内研制或购置的高能激光光束质量 β 因子测量装置主要采用面阵相机法和狭缝扫描法，由于光束质量 β 因子在≤2.5的接近衍射极限范围时，测试光斑在探测器靶面上占有的像素或者区域很小，大部分探测区域沦为噪声源，因此国内高能激光光束质量 β 因子测量仪在该范围内测量重复性较差，不同单位得到的结果分散性很大。在 β 因子越小时，为提高测量精度，需要测量装置的等效焦距越长，以提高测量光斑在探测系统靶面上的占比。以被测高能激光光束质量 β 因子为 2、被测光束为实心、出口光束直径 D 为 200 mm、激光波长 λ 为 1.3 μm 为例，测量装置的等效焦距为 f 进行计算，此时被测光斑在探测系统靶面上的大小 d 可用式(1)计算：

$$d = 2.44\beta f\frac{\lambda}{D} \tag{1}$$

在测量系统焦距为 3.2 m 时，经计算可得在像元大小为 15 μm 的 InGaAs 面阵相机靶面上光斑所占的有效像素仅为 7 个，当聚焦系统聚焦越短时，与光斑对应的有效像素点越少，这样造成了面阵相机上大部分像素点为无用像素点，这些无用像素点反而会成为系统的噪声来源，进而影响测量结果的准确度。因此，为了开展 β 因子的准确测量和校准，急需开展高空间分辨率光束质量测量技术研究。

1　测量原理

面阵相机法能够准确得到光束的实际相对空间分布，而且可以对低重频脉冲和单脉冲激光光束质量进行测量，但其受相机像元大小的限制，在测量近红外波段光束质量 β 因子接近衍射极限时，测量不确定度较差。扫描狭缝法具有高于 1 μm 量级的空间采样分辨率，也具有比面阵相机更大的动态响应范围，但其仅能得到光束相对狭缝垂直方向的光束空间功率分布情况，也仅适合于测量连续或者高重复频率脉冲激光光斑。为解决上述矛盾，本文研究基于面阵相机和高空间分辨率扫描狭缝探测器相结合的高能强激光光束质量测量方法，两种方法可以相互验证。

扫描狭缝法通过控制狭缝在被测光斑上的移动来完成对不同位置点处光束强度的测量，最终得到被测光束的空间分布信息。本课题选用旋转的滚轮式 45°、135°正交狭缝扫描测量方案及面阵相机结合进行高能激光光束质量因子测量，扫描狭缝法原理如图 1 所示。

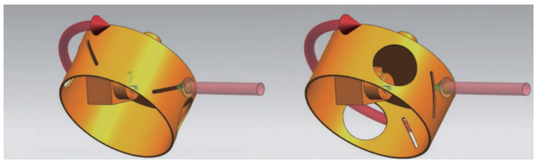

图 1　旋转滚轮式正交狭缝扫描测量原理图

Fig. 1　Schematic diagram of orthogonal slit scanning in rotary roller-type

正交的狭缝位于滚轮的侧面上，狭缝的方向与滚轮的上下表面成分别成一定的角度，探测器位于滚轮内部，其位置固定，不会随着滚轮转动。当滚轮围绕着中心轴旋转时，2 个狭缝从相互垂直的方向轮流切割被测光束，完成对光束的扫描测量。通过扫描狭缝的光在探测器上产生电流信号，电流大小与通过狭缝的光通量成比例。测量系统内部的高精度数字编码器可以精确同步定位切割狭缝的位置，从而得到测量电流和狭缝位置的对应数据变化信息，测量探头内部采用数字信

号处理器实现对被测光电信号进行数据采集和处理,数字信号处理器通过位置编码器信号和被测光电信号的对应信息,可以获得被测量光束沿着2个正交狭缝方向的光强分布情况,通过对2个方向的测量数据进行计算处理,可以得到测量位置处的光斑空间分布、光斑大小、重心和束宽等信息。根据狭缝获得的光斑空间分布信息可以获得光束束宽等信息,再根据聚焦系统的焦距,可以计算出发散角,最后得到相应的光束质量 β 因子。

高能激光光束质量 β 因子测量装置由前置衰减光学系统、离轴抛物面聚焦光学系统、楔形分束镜激光线性衰减系统、光束分束系统、基于面阵相机的激光光束质量测量系统和图像与数据采集处理系统等组成。高精度扫描狭缝探测器及面阵相机放置于聚焦光学系统的焦平面位置处,两者位于楔形分束镜1两侧。采用前置衰减光学系统与测量装置中的反射镜和衰减器相结合,可以调节光强使其处于面阵相机或扫描狭缝探测器的最佳工作范围内,再经过分束镜分束后采用扫描狭缝探测器或面阵进行激光光束质量 β 因子测量。为解决面阵相机靶面光斑有效像素点少的问题,采用在相机前端增加显微物镜对聚焦光斑进行放大。高能激光光束质量 β 因子测量装置原理如图2所示。

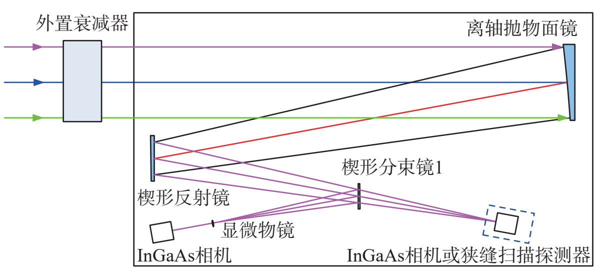

图2　高能激光光束质量 β 因子测量装置原理图

Fig. 2　Schematic diagram of measuring device of high energy laser beam quality factor β

2　系统方案分析及计算

2.1　聚焦显微放大法方案分析及计算

以入射光最大直径为200 mm进行计算,此时与被测光束同口径的参考激光光束在聚焦系统焦面上的光斑最小。在聚焦系统焦距设计指标为3.2 m、选用波长响应范围900 nm～1 700 nm、像元尺寸为15 μm、分辨率为640×512的近红外InGaAs面阵相机作为探测器,采用衍射极限倍数条件,计算不同衍射极限的1.3 μm波长实心激光光斑在相机上的光斑直径及其对应的像素数,计算结果如表1所示。

表1　光斑直径及其在相机水平方向上对应的像素数

Table 1　Spot diameter and its number of pixels corresponding to horizontal direction of camera

衍射极限倍数	激光波长1.3 μm	
	光斑直径/μm	相机上像素数
1	50.75	3
2	101.50	7
3	152.26	10
4	203.01	13
5	253.76	17
6	304.51	20
7	355.26	24
8	406.02	27
9	456.77	30
10	507.52	34

由表1可以看出,若被测光束质量 β 因子为2.0,此时聚焦光斑在相机光敏面上水平方向有效像素数仅为7个。此时,由于有效像素点太少,大部分像素点沦为噪声源,会严重影响测量结果。因此需要在InGaAs相机前加4×、20×显微物镜,成像在InGaAs相机靶面的光斑大小计算结果如表2所示。

表2　采用显微放大法的光斑直径及其在相机水平方向上对应的像素数

Table 2　Spot diameter by microscopic amplification method and its number of pixels corresponding to horizontal direction of camera

衍射极限倍数	原始光斑直径/μm	放大4×		放大20×	
		光斑直径/μm	相机上像素数	光斑直径/μm	相机上像素数
1	50.75	203.01	13	1 015.04	68
2	101.50	406.02	27	2 030.08	135
3	152.26	609.02	41	3 045.12	203
4	203.01	812.03	54	4 060.16	270
5	253.76	1 015.04	68	5 075.20	338
6	304.51	1 218.05	81	6 090.24	406
7	355.26	1 421.06	95	7 105.28	474
8	406.02	1 624.06	108	8 120.32	541
9	456.77	1 827.07	122	9 135.36	609
10	507.52	2 030.08	135	10 150.40	677

由表 2 可知，当光斑尺寸为 1 倍～5 倍衍射极限时，采用 20×倍显微物镜，相机靶面像素数为 68～338；当光斑尺寸为 5 倍～10 倍衍射极限时，采用 4×倍显微物镜，相机靶面像素数为 68～135，此时可以由图像处理光斑大小引入的测量不确定度可以控制到 2.0%。

2.2 扫描狭缝法方案分析及计算

由于扫描狭缝与旋转滚轮的上下表面具有夹角 θ，因此，狭缝运动方向和旋转滚轮转动切向方向成夹角也为 θ，滚轮的转动线速度 $v_{滚轮}$和狭缝的切割速度 $v_{狭缝}$的关系为

$$v_{狭缝} = v_{滚轮}\cos\theta \tag{2}$$

扫描狭缝探头内部旋转滚轮的半径为 r，滚轮的旋转频率为 f滚轮，则其旋转线速度为

$$v_{滚轮} = 2\pi r f_{滚轮} \tag{3}$$

若探头内部光电信号的数字采样时钟为 f采样，则测量仪能够达到的最小空间分辨率 R 的最小值为

$$R_{采样} = \frac{v_{滚轮}\cos\theta}{f_{采样}} \tag{4}$$

以测量滚轮旋转频率从 1.25 Hz～20 Hz 变化，滚轮直径为 5 cm，数字采样时钟为最大为 10 MHz 进行计算，扫描狭缝探头能够达到的理论最小空间分辨率与滚轮旋转频率关系如表 3 所示。

表 3 最小空间分辨率与滚轮旋转频率及数字采样时钟的关系

Table 3 Relationship between minimum spatial resolution and roller rotation frequency as well as digital sampling clock

滚轮转频/Hz	1.25	2.5	5	10	20
最小空间分辨率/μm	0.085	0.170	0.340	0.680	1.360

由表 3 分析可得，在探测器响应率高于 1 μs 的情况下，采用采样频率超过 10 Mhz 的模数转换芯片，结合对扫描狭缝的控制，在理论上可以达到小于 0.1 μm 级别的空间采样分辨率，远高于面阵相机的采样分辨率，因此采用高精度扫描狭缝探测器可以实现对具有对高斯型等具有对称特性的光斑进行精确测量。

项目组基于聚焦显微放大及扫描狭缝法研制的高能激光光束质量 β 因子测量装置如图 3 所示。采用高功率光纤激光对其性能参数进行测试，该装置具有测量重复性较高等优势。

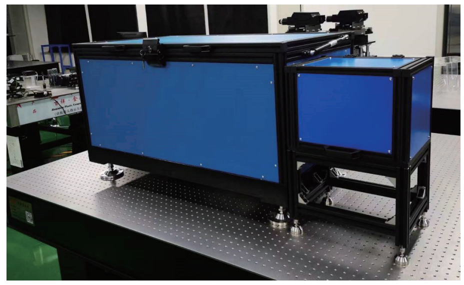

图 3 研制的高能激光光束质量 β 因子测量装置实物图

Fig. 3 Physical picture of measuring device of developed high energy laser beam quality factor β

3 试验及测量结果验证

采用固定像差元件及平行光管光源组合进行激光光束质量 β 因子测量结果验证。验证方法为：将固定像差元件放置在激光干涉仪出口位置，同时用圆环形遮光板遮挡固定像差元件，使其有效通光口径与被验证光束质量 β 因子测量系统使用口径相同；启动激光干涉仪测量固定像差元件组合的像差分布，获得 Zernike 多项式各阶系数 $a_i(\lambda_1)$，λ_1 为激光干涉仪工作波长；若激光干涉仪工作波长与被验证光束质量 β 因子测量系统工作波长不相同，则由式(5)计算 λ_2 波长下可变像质装置像差分布 Zernike 多项式第 i 阶系数：

$$a_i(\lambda_2) = a_i(\lambda_1) \times \lambda_1 / \lambda_2 \tag{5}$$

式中：$a_i(\lambda_2)$ 对应 λ_2 波长下固定像差元件的像差分布 Zernike 多项式第 i 阶系数；λ_1 为激光干涉仪工作波长，单位 nm；λ_2 为被校光束质量 β 因子测量系统工作波长，单位 nm。

根据 $a_i(\lambda_2)$ 和被测试系统输出光束的近场强度分布，通过软件得到远场分布图，同时计算出固定像差元件组合对应的 β 因子标准值 β_s；打开平行光管光源正常出光，按图 4 把固定像差元件组合装置、被测试光束质量测量装置安装在光路中。固定像差元件组合应垂直于光束并与被校系统同轴；被校系统与平行光管同轴；采用被验证光束质量 β 因子测量装置控制软件得到光斑远场分布图，同时得到被校系统装置输出的光束质量值 β_t。

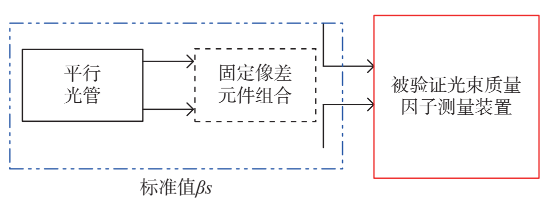

图 4 光束质量 β 因子验证原理

Fig. 4 Verification principle of beam quality factor β

由式(6)计算被验证光束质量β因子测量系统的相对误差δ:

$$\delta = \frac{\beta_t - \beta_s}{\beta_s} \times 100\% \tag{6}$$

式中: β_s为某一固定像差元件下对应的光束质量β因子的标准值; β_t为该固定像差元件对应的光束质量β因子的实际测量值。

采用固定像差元件及平行光管光源组合对光束质量β因子验证的结果如表4所示。

表4　光束质量β因子验证结果

Table 4　Verification results of beam quality factor β

光束质量标准值β_s	光束质量测量值β_t	相对误差
1.79	1.65	8%
3.56	3.25	4%
5.27	5.14	3%
7.93	7.86	1%

4　测量不确定度分析

高能激光光束质量β因子定义为实际光束发散角θ_{real}与同样尺寸的理想参考光束发散角θ_{ideal}之比，表征光束的定向性，其值不随光束通过理想光学系统的变换而变化，因而可以从本质上反应光束质量。

实际光束发散角$\theta_{\text{real}} = \frac{\alpha d}{f}$，其中$d$为由被测光束在探测系统靶面上的光束束宽，$\alpha$为放大倍率，$f$为测量装置的等效焦距。理想参考光束发散角$\theta_{\text{ideal}} = c\frac{\lambda}{D}$，其中$c$为与被测高能激光系统遮拦比有关的常数，$\lambda$为被测激光波长，$D$为被测系统出光口径。依据$\beta$因子定义，其测量的基本数学模型如式(7)所示。

$$\beta = f(d, D, f, \lambda) = \frac{\alpha d D}{c f \lambda} \tag{7}$$

高能激光光束衰减普遍采用楔形衰减器和中性密度衰减器相结合的方式。通过对衰减器的光学面型和光学材料均匀性等指标进行严格控制，可以将衰减系统对光束质量测量结果的影响约束到可控范围内。

全面分析测量过程中影响测量结果的各个误差因素，在忽略环境因素影响的条件下，光束质量β因子只与光斑直径d、被测光束出光口径D、聚焦系统焦距f、被测波长λ和光斑放大倍数α这5个参量有关。光束质量β因子的测量误差由直接测量量d、D、f和λ的测量误差决定，并且测量量d、D、f、α和λ的测量误差相互独立。根据方和根的运算方法，光束质量β因子的测量不确定度数学模型如式(8)所示。

$$u_k = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D}\right)^2 u_D^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 u_\alpha^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial f}\right)^2 u_f^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \lambda}\right)^2 u_\lambda^2}$$
$$= \frac{1}{c f \lambda}\sqrt{D^2 u_d^2 + d^2 u_D^2 + \alpha^2 u_\alpha^2 + \left(\frac{dD}{f}\right)^2 u_f^2 + \left(\frac{dD}{\lambda}\right)^2 u_\lambda^2} \tag{8}$$

由式(8)对课题组研制的光束质量β因子测量装置进行不确定度评定，依据测量不确定度评定标准，A类不确定度时通过对测量结果进行分析评定得到的，B类不确定度来源于溯源证书、操作者经验和装置使用说明书等途径。本项目中测量重复性引入的不确定度采用贝塞尔公式计算得到，由光斑直径、系统等效焦距、激光波长等指标引入的测量不确定度采用溯源证书评定得到，光学衰减系统引入的不确定度依据经验得到。测量不确定度评定结果如表5所示。

表5　光束质量β因子测量装置不确定度评定结果

Table 5　Measuring device uncertainty assessment results of beam quality factor β

不确定度分量	相对不确定度/%	评定方法
光斑直径计算引入的不确定度	2	B类
光学衰减系统引入的不确定度	2	B类
系统等效焦距引入的不确定度	0.5	B类
出光孔径测量引入的不确定度	0.7	B类
激光波长引入的不确定度	0.5	B类
测量重复性引入的不确定度	1.0	A类
合成标准不确定度/%	3.2	
扩展不确定度/%(k=2)	7	

由表5可知，课题组研制的光束质量β因子测量不确定度优于10%。

5　结论

论文研究了采用聚焦显微放大与高精度扫描狭缝相结合的光束质量β因子测量方法，对相关方案进行了分析计算，并设计了采用固定像差元件及平行光管光源组合的激光光束质量β因子测量结果验证方案，证明所研制的高能激光光束质量β因子测量装置具有优于10%的测量不确定度，能够有效解决接近衍射极限光束质量β因子在面阵

相机上所占的像素点太少等缺陷。

参考文献:

[1] 黎高平, 陈超, 李栋, 等. 高能高功率激光参数测量技术研究[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 645-650.
LI Gaoping, CHEN Chao, LI Dong, et al. Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(4): 645-650.

[2] WIDENHORN R. Influence of illumination on dark current in charge-coupled device imagers[J]. Journal of Electronic Imaging, 2009, 18(3): 033015.

[3] KUMAR A, SARKAR S, AGARWAL R P. A novel algorithm and hardware implementation for correcting sensor non-uniformities in infrared focal plane array based staring system[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 50(1): 9-13.

[4] SCRIBNER D A, SARKADY K A, KRUER M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal-plane arrays using neural networks[J]. SPDE-IntSoc for Opt Engineering, 1991: 100-109.

[5] 杨鸿儒, 吴磊, 史继芳, 等. 高能激光光束质量的测量[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(5): 48-51.
YANG Hongru, WU Lei, SHI Jifang, et al. Beam quality measurement for high-energy lasers[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007, 27(5): 48-51.

[6] 赵俊成, 阴万宏, 刘建平, 等. 正交狭缝扫描式激光光束质量测量方法研究[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 704-710.
ZHAO Juncheng, YIN Wanhong, LIU Jianping, et al. Research on measurement method of laser beam quality with orthogonal slit scanning[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(4): 704-710.

[7] 周炳琨. 激光原理[M]. 6版. 北京: 国防工业出版社, 2009: 84-96.
ZHOU Bingkun. Laser principle[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 84-96.

[8] 李俊昌, 熊秉衡. 信息光学理论与计算[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 49-63.
LI Junchang, XIONG Bingheng. Theory and calculation of information optics[M]. Beijing: Science Press, 2009: 49-63.

[9] 刘福华, 戢运峰, 王飞, 等. 强激光光束质量测量系统研制[J]. 现代应用物理, 2014, 5(3): 182-186.
LIU Fuhua, JI Yunfeng, WANG Fei, et al. Development of a beam quality measurement system for high power laser[J]. Modern Applied Physics, 2014, 5(3): 182-186.

[10] 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.
DU Xiangwan. Evaluation factors of beam quality on far-field target surface of actual intense laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24(4): 327-332.

[11] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 39-59.
SU Yi, WAN Min. High energy laser system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 39-59.

[12] 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.
LIU Zejin, ZHOU Pu, XU Xiaojun. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 773-778.

[13] BSI. Laser and laser-related equipment-test methods for laser beam parameters-beam width, divergence angle and beam. ISO: 11146[S]. London: ISO, 2000.

[14] 杜祥琬. 影响高能激光系统核心特征量的要素[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 945-947.
DU Xiangwan. Factors influencing key characteristic quantity of high energy laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 945-947.

[15] 苏毅. 高能激光系统中的物理问题[J]. 物理, 2005, 34(8): 583-588.
SU Yi. Physics problems in high energy laser system[J]. Physics, 2005, 34(8): 583-588.