

## 高能激光光束质量 $\beta$ 因子的影响因素分析

王艳茹 王建忠 冉铮惠 丁宇洁

### Analysis of effects on the beam quality $\beta$ factor of high power laser

WANG Yan-ru, WANG Jian-zhong, RAN Zheng-hui, DING Yu-jie

引用本文:

王艳茹, 王建忠, 冉铮惠, 丁宇洁. 高能激光光束质量  $\beta$  因子的影响因素分析[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 353-360. doi: 10.37188/CO.2020-0137

WANG Yan-ru, WANG Jian-zhong, RAN Zheng-hui, DING Yu-jie. Analysis of effects on the beam quality factor of high power laser[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 353-360. doi: 10.37188/CO.2020-0137

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0137>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 板条激光器光束质量控制技术研究进展

Progress on beam quality control technology of slab lasers

中国光学. 2019, 12(4): 767 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0767>

#### 高光束质量高斯非稳腔固体激光器研究

Research on the high beam quality of Gaussian unstable resonators in solid state lasers

中国光学. 2019, 12(3): 559 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0559>

#### 电铸金属光栅中金属沉积过程的在线监测

In-situ monitoring of metal depositing in the fabrication of metallic grating

中国光学. 2019, 12(3): 606 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0606>

#### 高度方向性多光束有机激光

High directional multi-beam organic laser

中国光学. 2018, 11(4): 576 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0576>

#### 基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析

Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution

中国光学. 2017, 10(4): 507 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0507>

#### 采用超连续谱激光的双光束光纤光阱实验

Double-beam fiber optical trap experiments based on supercontinuum laser

中国光学. 2017, 10(3): 370 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0370>

文章编号 2095-1531(2021)02-0353-08

## 高能激光光束质量 $\beta$ 因子的影响因素分析

王艳茹, 王建忠\*, 冉铮惠, 丁宇洁

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**采用二维线性调频  $z$  变换算法, 分析了影响高能激光系统光束质量  $\beta$  因子测量准确性的因素。本文详细分析了采样点数(即衍射极限内的采样点数)和衍射光斑图像的能量损失率对光束质量  $\beta$  因子的影响。在衍射极限角直径  $2(\lambda/D)$  范围内不同采样点数的模拟结果表明: 采样点数越高, 光斑衍射图像的分辨率越高, 进而光束质量  $\beta$  因子计算越准确。在一倍衍射极限角  $2.44(\lambda/D)$  范围内应最低不少于 10 个采样点, 即可将  $\beta$  因子的测量误差控制在 3%。同时, 不同像差对光斑图像能量损失率的敏感程度不同, 相同能量损失率下, 高阶像差的  $\beta$  因子测量误差要高于低阶像差。特别是球差类的像差对能量损失最为敏感, 约 5% 的能量损失就可带来 15%~30% 的  $\beta$  因子计算误差。

**关键词:**  $z$  变换; 光束质量;  $\beta$  因子; 采样点数; 能量损失

中图分类号: O438 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2020-0137

## Analysis of effects on the beam quality $\beta$ factor of high power laser

WANG Yan-ru, WANG Jian-zhong\*, RAN Zheng-hui, DING Yu-jie

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

\* Corresponding author, E-mail: WJLZ1999@sina.com

**Abstract:** The influencing factors of beam quality  $\beta$  factor of high-energy laser system is analyzed based on two-dimension chirp  $z$  transformation. The effects of the sampling number within the diffraction limit and the beam spot's energy loss on the beam quality  $\beta$  factor are analyzed. The simulation results based on different sampling numbers indicate that a larger sampling number induces higher beam spot diffraction image resolution which is beneficial for more accurate calculation of a beam quality  $\beta$  factor. When the sampling number of the diffraction limit angle is no less than ten, the measurement error can be limited within 3%. Meanwhile, different wavefront aberrations have different sensitivities against beam spot energy loss. The beam quality  $\beta$  factor of high order wavefront aberration is larger than that of low order aberration with equal energy loss. Especially, the spherical aberration is most sensitive to energy loss, and about 5% energy loss can induce 15% to 30% calculation error of the  $\beta$  factor.

**Key words:** chirp  $z$  transformation; beam quality;  $\beta$  factor; sampling number; energy loss

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-08-15

基金项目: 国防科工局技术基础项目 (No. JSJL2017212B002)

Supported by Basic Project of Science Technology and Industry for National Defense (No. JSJL2017212B002)

## 1 引言

能量输运型的高能激光系统<sup>[1-3]</sup>,除了要求高的输出功率和能量外,对于远场激光系统的能量集中度也较为关注。高能激光输运系统的作用效能直接取决于发射激光到达目标处光斑的能量密度和作用时间。而目标处的光斑分布直接影响能量分布,进而对高能激光输运系统的作用效果产生直接影响。因此对激光光斑开展测试与研究,可以对激光系统的性能和工作状态做出判断,为激光武器作用效能的定量评估提供依据。

远场焦斑空间能量分布的测量以及光束质量评估计算是激光光学领域十分重要的研究课题。由于远场焦斑的空间能量分布包含了非常丰富光束质量信息,对其进行准确测量是正确评估光束质量的前提<sup>[4-6]</sup>。激光远场焦斑分析的理论 and 测试方法主要有 3 类:第一类是采用机械扫描法;第二类是采用阵列探测器直接测量激光能量分布情况,进而获得光斑的空间强度分布;第三类是采用 CCD/CMOS 面阵探测器件获得激光光斑的图像显示,再经计算机分析得到激光光斑的相关参数<sup>[7-9]</sup>。由于 CCD 成像方法具有实时性好,灵敏度高和数据处理方便等诸多优点,已经成为测量远场焦斑空间分布以及评价光束质量的主要手段。

关于 CCD 探测器对光斑分布测量的影响,国内外相关学者进行了多方面的研究。清华大学的杨鹏翎等人研制了中红外高能激光光斑探测器,该探测器可以测量最大能量超过 50 kJ 数秒级的脉冲红外激光,可实现大面积、高能量和高空间分辨的高能激光光斑测量<sup>[10]</sup>。李晓艳等人<sup>[11]</sup>研究了基于双 CCD 探测的外场高精度激光光斑测试技术,设计了基于双 CCD 的外场高精度激光光斑测试系统,并成功应用于外场测试。中国科学院上海技术物理研究所的陈少杰<sup>[12]</sup>等人研究了探测器条状噪声对精跟踪系统光斑定位的影响。国防科技大学的贺元兴<sup>[13]</sup>等人分析了湍流下不同阈值处理方法对光束质量测量误差的影响。但目前还没有看到衍射极限内不同采样点数对  $\beta$  因子的影响分析,也没有查阅到关于对光斑图像进

行降噪处理而导致的探测面上能量损失对光束质量  $\beta$  因子的影响分析。

要实现光束质量  $\beta$  因子测量系统的校准,首先需要对被校准的测试系统进行建模和仿真分析。由于 CCD 探测器的性能参数以及存在的各种探测噪声都会对远场光斑分布产生影响,因此光斑图像的直接测量结果并不能真实反映真实情况。不同 CCD 探测器的性能参数会对光斑图像的测量直接产生影响,例如:衍射极限内 CCD 探测器的采样点数决定了远场光斑图像的分辨率,同时由于 CCD 存在各种固有和随机的噪声信号也会影响远场测量光斑的分布,使得远场光斑分布存在一定的噪声信号。一般情况下都要对 CCD 测量到的图像进行降噪处理,也就是减去一定的背景噪声信号。

本文拟从仿真分析的角度,研究探测器的采样点数和光斑图像由于降噪处理所带来的能量损失率对光束质量  $\beta$  因子的影响。本文首先分析了不同采样点数引起的光束质量  $\beta$  因子测量误差,进而得到了在一定误差要求下对 CCD 采样点数的最低要求。同时分析了由于对光斑降噪处理带来的能量损失率与光束质量  $\beta$  因子的测量误差之间的关系,采用不同像差类型的像差板校准光束质量  $\beta$  因子测量系统时对光斑图像的能量损失率的敏感程度不同。上述分析结果为光束质量测量系统中 CCD 探测器的选型以及光斑图像处理提供了一定的指导和借鉴。

## 2 衍射光场的理论分析

根据光场的菲涅尔衍射理论,焦平面上的衍射光斑强度分布可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$I(x, y) = \frac{1}{\lambda^2 f^2} \cdot \left| \iint_s E(x_0, y_0) \exp [j\varphi(x_0, y_0)] \times \exp \left\{ \frac{j\pi}{\lambda f} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2] \right\} dx_0 dy_0 \right|^2 = \frac{1}{\lambda^2 f^2} \left| F \left\{ E(x_0, y_0) \exp [j\varphi(x_0, y_0)] \times \exp \left[ \frac{j\pi}{\lambda f} (x_0^2 + y_0^2) \right] \right\} \right|^2, \quad (1)$$

其中 $\lambda$ 为激光束波长, $f$ 为聚焦系统的焦距; $x$ 、 $y$ 为探测面上的坐标, $x_0$ 、 $y_0$ 为标准像差板的坐标, $\varphi(x_0, y_0)$ 表示像差板上的波像差分布,可以用圆域上的正交泽尼克多项式来表示。当 $\varphi(x_0, y_0)=0$ 时表示没有加载标准像差板时的光强分布,即对应理想光束的衍射强度分布; $\varphi(x_0, y_0)$ 不等于零时表示存在各种不同像差。根据式(1),利用二维线性调频 $z$ 变换可以计算出探测面上光斑的强度分布。在用于探测面上光斑强度计算式的基础上,利用式(2),便可得到光束质量 $\beta$ 因子。

光束质量 $\beta$ 因子的定义为:

$$\beta = \frac{d_\eta D}{cf\lambda} \quad (2)$$

式中: $\beta$ 为被测光束质量因子; $d_\eta$ 为与理想实心光束包含相同衍射环围能量 $\eta$ 时,对应的实际光束的环围半径(单位为mm); $c$ 为与中心遮拦相关的常数,实心束时 $c=1.2197$ ;  $D$ 为被测光束直径(单位为mm); $f$ 为测量系统等效焦距(单位为mm); $\lambda$ 为被测光束波长(单位为nm)。

其中,实际光束环围半径 $d_\eta$ 的确定与 CCD 探测器的像素尺寸、像素数、CCD 位数以及光斑处理算法等因素相关。在理想光束和实际光束环围半径都是以光束几何中心作为环围半径的计算圆心。

在下面章节中如果没有特殊说明,在计算中使用的参数如下: $\lambda=1 \mu\text{m}$ , 光束口径 $D=0.1 \text{ m}$ , $f=10 \text{ m}$ , 考虑到保护区即物平面的计算尺度 $L_0=0.4 \text{ m}$ , 物平面上的取样点数 $N=1024$ 。具体的算法实现过程见参考文献 [15]。

### 3 衍射极限内的采样点数对光斑分布测量的影响

图1(彩图见期刊电子版)分析了同时加载同一种像差(像散像差 rms 值都为 $0.2\lambda$ )时,在衍射极限角 $\lambda/D$ 范围内不同的采样点数下得到的探测面上的光强分布。从图1可以看出:衍射极限内不同的采样点数使得同一像差分布对应的焦平面上的光斑图像的分辨率不同。

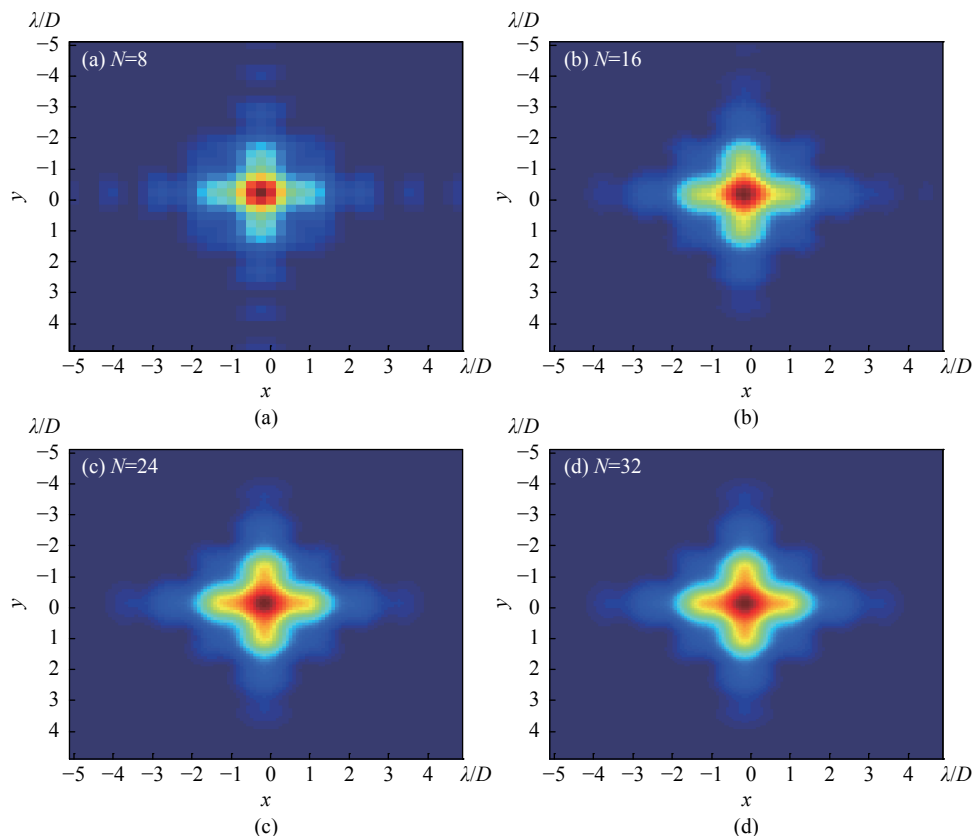


图1 基于不同采样点数的衍射光斑图像

Fig. 1 The obtained diffraction beam figures based on different sampling numbers

图 1 分别给出了衍射极限角直径  $2\lambda/D$  范围内分别占据 8 个像素、16 个像素、24 个像素、32 个像素时对应的衍射焦平面上的光斑分布。从图 1 可以看出:随着衍射极限角内采样点数的增加,衍射面上光斑分布的精细度越来越好,光斑分布的细节更为清晰。因此,单位面积上 CCD 的像元数越多,即光斑的采样点数越多,焦平面上的光斑分布测量越准确。因此采用像元数更多的 CCD 探测器得到的光束质量  $\beta$  因子更为准确。

为了定量评估上述不同采样点数(对应 CCD 像素数)对光束质量  $\beta$  因子的影响,分别计算了理想光束情况下,一倍衍射角直径( $2.44\lambda/D$  范围内)不同采样点数对光束质量  $\beta$  因子的影响程度,计算结果如图 2 所示。

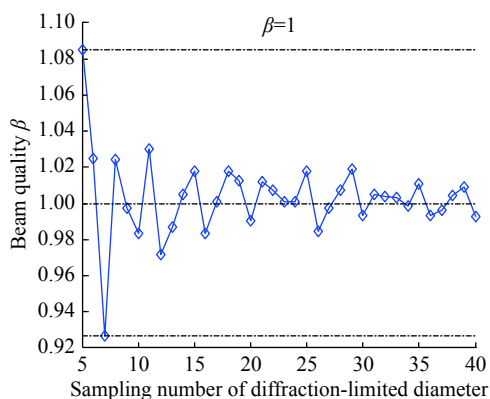


图 2 理想光束质量  $\beta$  因子随采样点数的变化规律

Fig. 2 Beam quality  $\beta$  factor varies with sampling number of the ideal beam

图 2 给出了一倍衍射极限范围内( $2.44\lambda/D$ )不同采样点数计算得到的光束质量  $\beta$  因子。从图 2 可以看出:衍射直径范围内采样点数越多,光束质量  $\beta$  因子越趋于稳定,但是只要一倍衍射极限范围内的采样点数控制在不少于 10 个,理想光束的测量误差就能控制在 3% 左右。随着光束质量  $\beta$  因子的增加,测量误差将更小。而衍射极限内 10 个像素的要求对于一般 CCD 探测器较容易满足。因此,采样点数的不同导致的光斑图像分辨率差异不是影响光束质量  $\beta$  因子的主要因素。以一组实际  $\beta$  因子测量系统为例,像素尺寸为  $20\ \mu\text{m}$ ,光束口径  $D = 0.1\ \text{m}$ ,像素数为  $512\ \text{pixel} \times 512\ \text{pixel}$ ,系统焦距  $f = 10\ \text{m}$ ,那么一倍衍射直径内的像素数约为 12 个。当光束质量为 10 时,光斑所占的像元数为 120 个,即占全靶面的 1/4,可

以保障光束质量计算的准确性。

为了进一步研究不同像差对采样点数的影响,图 3 给出了球差类的像差(包括球差 A11、二阶球差 A22、三阶球差 A37)对应的光束质量  $\beta$  因子随采样点数的变化情况。从图 3 可以看出:随着采样点数的增加,光束质量  $\beta$  因子先增加后趋于平稳。当一倍衍射极限采样点数超过 32 个后, $\beta$  因子基本趋于稳定。这也说明单一的球差类像差对采样点数的要求比理想光束对应的采样点数要求高。

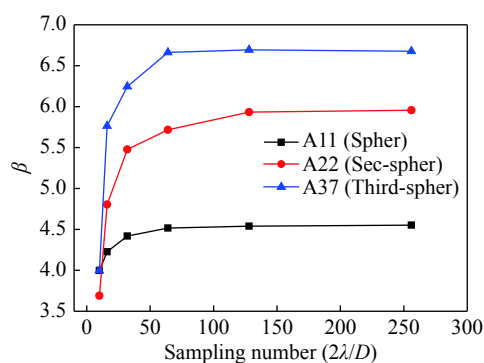


图 3 球差类像差对应的光束质量  $\beta$  因子随采样点数的变化规律

Fig. 3 Variations of beam quality  $\beta$  with sampling number corresponding to the spherical, second-spherical and third-spherical wavefront aberrations

图 4(彩图见期刊电子版)为加载球差像差( $\text{rms} = 0.2\lambda$ )类型时,不同采样点数下对应的环围能量曲线。可以看出:球差这种环带状像差,使得环围能量的累积存在“台阶”效应,在台阶附近,能量累积不明显,因此,计算在 83.8% 能量下对应的光斑半径时存在较大的误差,进而使得到的光束质量  $\beta$  因子值存在较大误差。因此,在使用球差这种像差板进行光束质量  $\beta$  因子校准时, $\beta$  因子测量值对采样点数最敏感。图 4 插图给出了不同采样点数对应的光束质量  $\beta$  因子。可以看出,当一倍衍射极限内的采样点数从 10 变化到 256 时, $\beta$  因子的计算值从 4.0 变化为 4.5,最终趋近于稳定, $\beta$  因子的计算误差在 10% 左右。

图 5(彩图见期刊电子版)给出了几种典型像差对应的环围能量曲线和光束质量  $\beta$  因子计算结果,可以看出:在相同的采样点数情况下,在 83.8% 能量点附近,由于球差类的像差类型(A11, A22 和 A37)对应的环围能量曲线存在很多台阶,

而 83.8% 的能量范围正好在台阶附近时, 故包含 83.8% 的能量对应的光斑半径误差较大。在 3 种球差类像差中, 二阶球差 A22 对应的桶中功率 (PIB) 曲线最为平坦, 如图 5 中的紫色曲线所示。也就是说二阶球差 A22 是所有球差类型中对采样点数要求最高的。

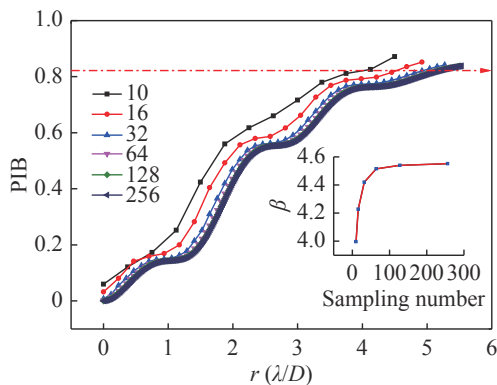


图 4 球差像差 A11 对应的桶中功率(PIB)随采样点数的变化

Fig. 4 Variations of power in bucket (PIB) with sampling number for the spherical wavefront aberration

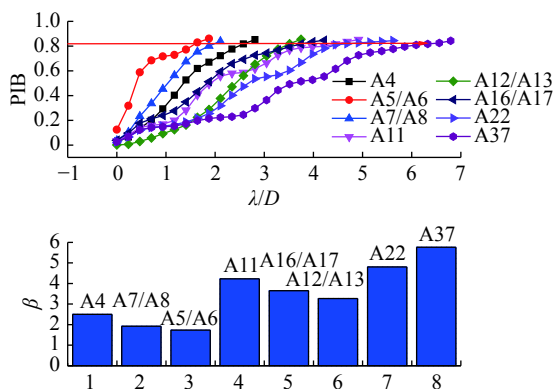


图 5 几种典型像差类型的 PIB 曲线和光束质量  $\beta$  因子值  
Fig. 5 PIB curves and beam quality  $\beta$  of several typical wavefront aberrations

从图 5 还可以看出: 相同的采样点数, 相同的 rms 值(都为  $0.2\lambda$ )下, 不同像差类型对应的光束质量  $\beta$  因子的变化从 1.9 到 5.8, 进一步证明了不同像差类型对光束质量  $\beta$  因子的影响程度不同。球差类像差由于像差分布中除了中央“亮斑”(面形分布亮高点)外, 外围还存在多级“亮环”, 因此使得远场衍射光斑更为发散, 有较多能量较低的次极大, 也就是在中央亮斑周围存在其他“亮环”, 导致环围能量曲线存在很多台阶, 能量分布更为分散, 因此光束质量  $\beta$  因子也较大。

#### 4 能量损失率对光束质量 $\beta$ 因子的影响分析

在光束质量  $\beta$  因子的测量过程中, 通常采用 CCD 探测器获取光斑的远场强度分布图像。由于 CCD 中各种噪声(读出噪声、暗噪声等)的存在使得噪声信号不可避免地叠加在真实光信号上, 因此, CCD 测量得到的是含有噪声的光斑图像进而对光束质量  $\beta$  因子的测量和计算产生影响。在实际中, 为了消除噪声信号对真实光斑信号的影响, 通常的做法是在测量光斑衍射图中直接减去背景信号。显然, 减背景操作会使远场光斑图像出现能量损失。因此, 需要研究不同像差对能量损失的敏感程度, 以及同一光束质量  $\beta$  因子值下不同像差对能量损失率的敏感程度。

存在像差的光束会使远场光斑发生扩散, 光斑扩散将导致出现较多的外围高频能量分布, 这部分能量将不能被动态范围有限的 CCD 准确测量。此外, 减背景的处理方法会同时将噪声信号和低频信号滤除, 会导致远场的总能量测量损失, 产生的测量误差  $\delta$  表示为:

$$\delta = \frac{\beta_l - \beta_0}{\beta_0} \quad (3)$$

其中,  $\beta_l$  为存在能量损失率  $l$  时的光束质量测量值,  $\beta_0$  为没有能量损失时的理论值。

能量损失率  $l$  的定义为:

$$l = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - q_0)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)} \quad (4)$$

其中,  $I(i, j)$  表示 CCD 探测器中第  $(i, j)$  个像素位置处的光强,  $M, N$  分别表示 CCD 探测器的行、列像素数。  $q_0$  表示减去的背景信号, 是为与能量损失率  $l$  相关的常数。当  $q_0 = 0$  时, 表示没有能量损失。

图 6 给出了相同像差类型, 不同像差大小 (rms 值分别为  $0\lambda, 0.2\lambda, 0.4\lambda, 0.6\lambda$ ) 时光束质量  $\beta$  因子的测量误差  $\delta$  与能量损失率的关系。从图 6(a)~6(d) 可以看出: 测量误差  $\delta$  整体都为负值, 说明  $\beta$  因子的整体测量结果都偏小。这是由于减背景信号的处理方法会损失探测面的光能

量,从而使得光束质量  $\beta$  因子测量值变小,最终使测量误差  $\delta$  为负。通过减背景的方式会使得测量的光束质量变好。同时对比图 6(c)~6(d)与图 6(a)~6(b)的曲线下降速率(斜率)可以看出:图 6(c)~6(d)的曲线斜率更大一些,也就是说,在

几种常见的低阶像差中,A11 球差和 A7/A8 彗差对能量损失率的敏感程度更高,相同的能量损失下,球差和彗差引起的光束质量测量误差要大于离焦和像散。因此,在用球差类像差板进行校准时,对光斑图像背景信号处理过程中要更小心。

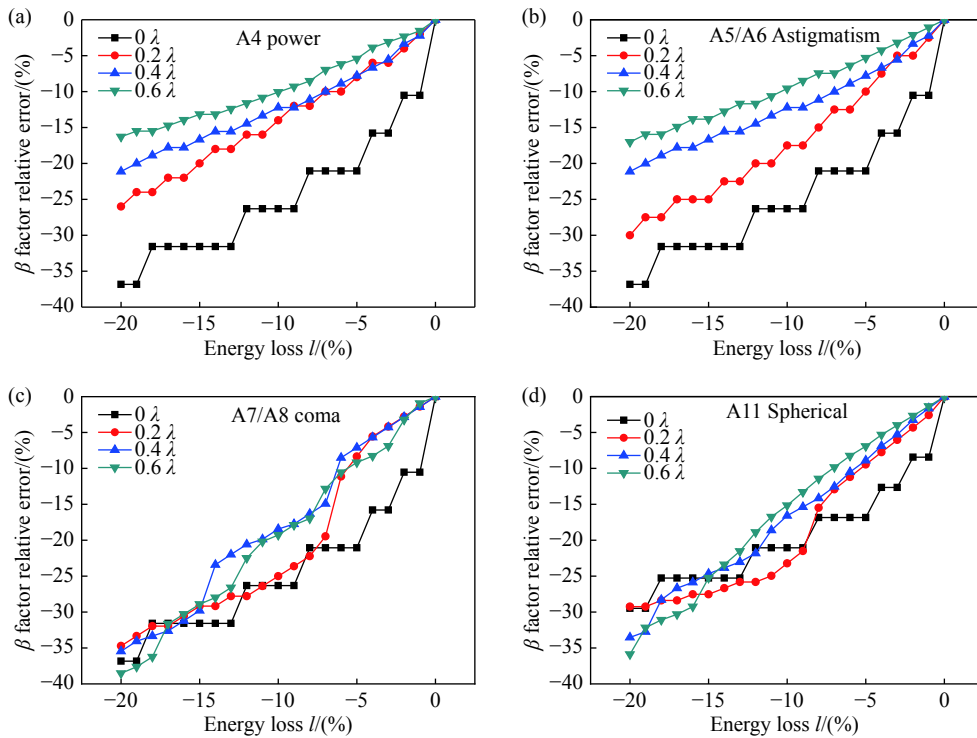


图 6 (a)离焦、(b)像散、(c)彗差和(d)初级球差对应的光束质量  $\beta$  因子测量误差与能量损失比的关系曲线

Fig. 6 Relationship of measurement error curves of  $\beta$  factor with different energy losses corresponding to (a) the power, (b) the astigmatism, (c) the coma and (d) the spherical aberrations respectively

图 7(彩图见期刊电子版)给出了光束质量  $\beta$  因子理论值  $\beta_0$  都为 3 时,不同类型像差的能量损失率与光束质量  $\beta$  因子的测量误差关系曲线。从图中可以看出:在理论光束质量  $\beta$  因子相同时( $\beta_0=3$ )时,像散 A5/A6 对能量损失最不敏感;慧差 A7/A8 和球差 A11 的测量误差存在周期性波动,这是由两者远场光斑周期性衍射环引起的。当 83.8% 的能量正好位于球差暗环和慧差彗尾暗环处时,此时的环围能量曲线最平缓,对测量误差最为敏感,特别是球差类像差(A11 和 A22)远场存在很多高频分量的衍射环,使得能量测量损失对光束质量测量的影响非常大,约 5% 的能量损失会带来 15%~30% 的计算误差。

2% 到 3% 的能量损失,会带来 10% 左右的测量误差,5% 到 7% 的能量损失,会带来 15% 左右的测量误差。对于不可避免的量化误差以及减背景处理,对球差的影响同样最大。

对不同像差类型的分析结果表明:球差能量 2% 到 3% 的损失,会带来 15% 左右的光束质量  $\beta$  因子测量误差,5% 到 7% 的能量损失,会带来 30% 左右的测量误差;其他像差远场分布中,

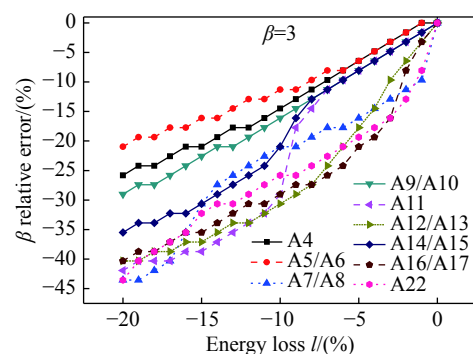


图 7 不同像差的能量损失比与光束质量  $\beta$  因子的测量误差的关系

Fig. 7 Relationship between measurement errors of  $\beta$  factor and energy loss ratios of different aberrations

## 5 结 论

本文采用二维线性调频 $z$ 变换算法, 分析了影响高能激光光束质量 $\beta$ 因子测量准确性的两方面因素。对衍射极限内不同采样点数的分析结果表明: 采样点数越高, 光斑衍射图像分辨率越高, 而光束质量 $\beta$ 因子计算越准确, 衍射极限内最低

不少于10个采样点即可将 $\beta$ 因子的测量误差控制在3%。所有像差中, 二阶球差A22是对采样点数要求最高的。同时, 不同像差对光斑图像能量损失率的敏感程度不同, 相同能量损失率下, 高阶像差的 $\beta$ 因子测量误差要高于低阶像差的测量误差。特别是球差类的像差对能量损失最为敏感, 约5%的能量损失会带来15%~30%的计算误差。

致谢: 感谢中国工程物理研究院应用电子学研究所的黄德权与作者的有益讨论。

### 参考文献:

- [1] 苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 1-9.  
SU Y, WAN M. *High Energy Laser System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 1-9. (in Chinese)
- [2] 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.  
LÜ B D, KANG X P. Some aspects of laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 47-51. (in Chinese)
- [3] 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.  
TIAN Y H, YE Y D, XIANG R J, *et al.*. Evaluation of uncertainty in beam quality measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1076-1078. (in Chinese)
- [4] 闫宏宇, 高欣, 宋健, 等. 976 nm宽条形高功率半导体激光器的光束质量 $M^2$ 评价[J]. *发光学报*, 2019, 40(2): 196-203.  
YAN H Y, GAO X, SONG J, *et al.*. Evaluation of beam quality  $M^2$  for 976 nm wide stripe high power semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(2): 196-203. (in Chinese)
- [5] 陈诚, 郑加金, 韦玮, 等. 基于CCD测量激光光束质量 $M^2$ [J]. *发光学报*, 2017, 38(5): 643-648.  
CHEN CH, ZHENG J J, WEI W, *et al.*. Measurement of laser beam quality  $M^2$  based on CCD [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(5): 643-648. (in Chinese)
- [6] 许坤, 付林杰, 钟发成, 等. 高光束质量垂直腔面发射激光器同相耦合阵列[J]. *发光学报*, 2018, 39(6): 844-849.  
XU K, FU L J, ZHONG F CH, *et al.*. High beam quality in-phase coupled vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(6): 844-849. (in Chinese)
- [7] 张震, 周孟莲, 张检民, 等. CCD中的激光光斑阴影现象及机理[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1365-1371.  
ZHANG ZH, ZHOU M L, ZHANG J M, *et al.*. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1365-1371. (in Chinese)
- [8] 熊刚, 丁天怀, 王鹏. 应用属性距离加权平均滤波提高CCD光斑的亚像素定位精度[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1102-1109.  
XIONG G, DING T H, WANG P. Improvement of sub-pixel location accuracy of light-spot on CCD with ADWA filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(5): 1102-1109. (in Chinese)
- [9] 宋建中, 韩广良, 顾海军. 提高外场脉冲激光光斑测量距离的有效方法[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 300-303.  
SONG J ZH, HAN G L, GU H J. Effective methods for raising the measured distance of the pulse laser spots removed target in outfield [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 300-303. (in Chinese)
- [10] 杨鹏翎, 冯国斌, 王群书, 等. 中红外高能激光光斑探测器[J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 1979-1985.  
YANG P L, FENG G B, WANG Q SH, *et al.*. Min-infrared high energy laser beam sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 1979-1985. (in Chinese)
- [11] 李晓艳, 张磊, 张红刚, 等. 基于双CCD探测的外场高精度激光光斑测试技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 59-64.  
LI X Y, ZHANG L, ZHANG H G, *et al.*. Technology of high precision test for laser spot based on double CCD detection in the outfield [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 59-64. (in Chinese)
- [12] 陈少杰, 张亮, 王建宇. 探测器条状噪声对精跟踪系统光斑定位的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0906008.



- CHEN SH J, ZHANG L, WANG J Y. Effect of stripe noise of detector on light spot location of fine tracking system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0906008. (in Chinese)
- [13] 贺元兴, 李新阳. 阈值法对激光远场焦斑质量测量和计算的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1208001.  
HE Y X, LI X Y. Influence of threshold method on calculation results of far-field spot quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1208001. (in Chinese)
- [14] 刘志强, 宋庆和, 刘超, 等. 基于虚拟光波场的菲涅耳衍射计算及应用研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(2): 196-199.  
LIU ZH Q, SONG Q H, LIU CH, *et al.*. Fresnel diffraction calculation with virtual light wave field and its application[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(2): 196-199. (in Chinese)
- [15] 王艳茹, 冉铮惠, 丁宇洁. 二维线性调频 $z$ 变换用于光束质量 $\beta$ 因子计算[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 965-974.  
WANG Y R, RAN ZH H, DING Y J. Beam quality  $\beta$  factor calculation based on two-dimensional chirp  $z$  transformation[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 965-974. (in Chinese)

#### 作者简介:



王艳茹(1983—), 女, 陕西渭南人, 博士, 高级工程师, 2011年于中国科学院光电技术研究所光学工程专业获得博士学位, 目前主要从事光学计量与检测技术方面的研究工作。E-mail: wyr3235@163.com



王建忠(1974—), 男, 四川大邑人, 硕士, 高级工程师, 分别于四川大学和电子科技大学获学士和硕士学位, 主要从事无线电及光学计量测试技术研究。E-mail: WJLZ1999@sina.com

## 《发光学报》

—EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年480元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org