

# 基于相机式激光光束参数测量精度的影响因素分析

肖青<sup>1,2</sup>, 刘侠<sup>2</sup>, 邓剑钦<sup>2</sup>, 姚建铨<sup>1</sup>, 张大鹏<sup>2</sup>, 王兴龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

<sup>2</sup>珠海光库科技股份有限公司, 广东 珠海 519000

**摘要** 针对相机式光束质量分析仪测量光束的结果不一致问题,分析了相关参数对测量误差的影响。基于高斯光束模型,并添加与实际对应的噪声,根据 ISO 11146 标准计算了光斑直径。结合实验测试时的实际操作过程,提炼出光强饱和度和积分面积比、信噪比和光斑尺寸 4 个关键参数。不仅阐明了相机参数对测量误差影响的关键趋势,还分析了各个参数之间的关联影响,最终对如何选择相机的像元、像素、动态范围、暗噪声,以及如何设置积分时间、计算区域等提出了更明确的要求。

**关键词** 激光光学; 激光光束; 光束参数; 精度分析; 相机

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071401

## Analysis of the Influence Factors on High Precision Measurement of Laser Beam Parameter Based on Camera

Xiao Qing<sup>1,2</sup>, Liu Xia<sup>2</sup>, Deng Jianqin<sup>2</sup>, Yao Jianquan<sup>1</sup>, Zhang Dapeng<sup>2</sup>, Wang Xinglong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup>Advanced Fiber Resources (Zhuhai) Co. Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000, China

**Abstract** To tackle the problem that the camera-based beam analyzer often gives the different results of the laser beam quality, we analyze the impact of the relevant parameters on the measurement error of the laser beam. The beam diameter is calculated by the ISO 11146 standard based on the Gaussian model with the noise level corresponding to the real one. According to the actual operation during testing, four parameters are analyzed, including the light intensity saturation, integral area ratio, signal to noise ratio and actual beam size. Compared with the prior works, we found the key trend of the camera parameters on the measurement error and the correlation between the parameters, which will be helpful to put forward more specific requirements on how to choose the camera and how to set the integration time and the calculation area.

**Key words** laser optics; laser beam; beam parameter; precision analysis; camera

**OCIS codes** 140.3295; 040.1490; 120.4640; 060.3510; 080.2720

## 1 引言

激光在工业、医疗、商业、科研、信息和军事等领域有着重要的应用,而激光光束质量直接影响应用的效果<sup>[1-4]</sup>。为了科学地评价和测量激光器的光束质量,国际标准化组织(ISO)于1999年通过了ISO 11146文件,以此作为激光光束参数测量的标准<sup>[5-6]</sup>,其中详细规定了光斑直径、发散角、光束传播因子 $M^2$ 的测量和计算方法<sup>[5]</sup>。通常可以选择商用

的激光光束质量分析仪对激光光束的光斑大小、能量分布、椭圆度和发散角等参数进行测量。光束质量分析仪可分为基于面阵列探测器(相机式)和基于狭缝扫描式两种,两者相比,相机式分析仪能捕获更加详细的光束轮廓,并提供真实的光束功率密度分布,还适用于脉冲光源,因此相机式光束质量分析仪有无可比拟的优势和更广阔的应用范围。

然而,用相机式光束质量分析仪对光束进行测量时,经常会出现对同一光束进行多次测量的结果

收稿日期: 2017-11-27; 收到修改稿日期: 2018-01-05

作者简介: 肖青(1983—),女,博士后,主要从事光学相干层析成像系统、光学成像、光学精密测量方面的研究。

E-mail: sophierxq@foxmail.com

不一致的情况,其中包括使用同一设备设置不同参数,或使用不同品牌设备,有时甚至是同一设备及相同的参数设置时,测量结果均会出现略微的不同。针对该问题,之前也有文章研究相关参数对测量误差的影响,这些参数包括相机像元尺寸、像素、位深、动态范围、积分面积和光强饱和度等,但是这些报道都是对个别参数做单独论述,而将其他参数做限定假设,因此并没有发现各参数之间的关联<sup>[7, 10-11]</sup>。对光斑尺寸进行评估,是测量其他光斑参数的基础,所以本文采用高斯光束模型,参照实际情况添加噪声,再根据 ISO 11146 标准计算光斑直径。针对相机的实际操作过程,提炼出需要考虑的参数,通过实验模拟发现光强饱和度和积分面积比、信噪比(SNR)和光斑尺寸 4 个参数对测量误差有较大的影响,并详细讨论了参数的影响规律,以及参数之间的关联。最终对如何选择相机的像元、像素、动态范围、暗噪声,以及该如何设置积分时间、计算区域等提出了更明确的要求。

## 2 相机相关参数讨论

在光束质量分析系统中,相机的噪声是造成测量误差的主要原因<sup>[7-8]</sup>。因此要选择大动态范围、低噪声的相机作为探测设备,但是一味要求大动态范围、低噪声会使成本增加,也不一定是必要的。此外选择相机时还需要考虑像素、像元尺寸、位深,在做光束测试时需要考虑探测光强、积分时间和计算区域等。下面结合相机实际操作情况,对需要分析的参数进行讨论。

### 2.1 光强饱和度和

对激光光束进行测量,通常需要在探测器前面加衰减片,然后通过设置相机的积分时间来调节相机探测到的光强。为进行定量测量,相机对光强的响应应为均匀的、线性的<sup>[7,9]</sup>,因此可以考虑在模拟中将积分时间和发光强度归结到光强饱和度这一个参数,即测试光强与相机位深最大值的比值。为了验证这点的可行性,采用均匀光源做实验,结果证实了曝光强度与相机探测强度呈线性关系(图 1),另外还证实了相机积分时间与相机探测强度也呈线性关系(图 2)。

### 2.2 信噪比

在以往的模拟分析中,通常会取一个固定有效值的随机噪声来模拟本底噪声<sup>[7, 10-11]</sup>,然而实际中除了相机的本底噪声,还有光源引起的散粒噪声。从均匀光源照明下的图像强度可以看到各个像素点的强度并不是一致的,而是呈上下波动的,取其强度

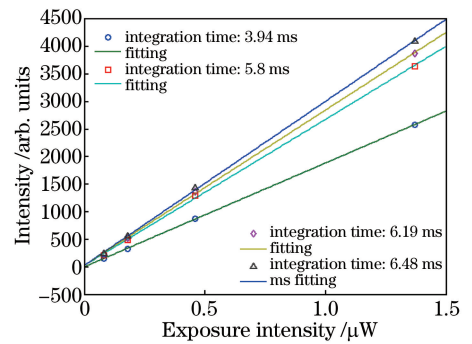


图 1 曝光强度与相机探测强度的线性关系  
Fig. 1 Linear relationship between exposure intensity and camera detected intensity

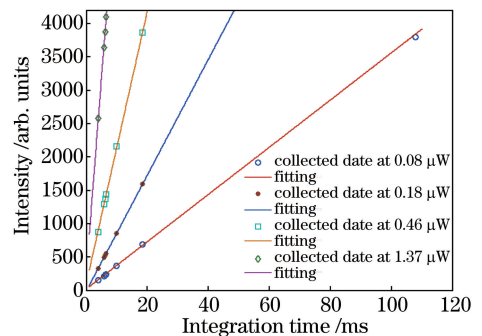


图 2 积分时间与相机探测强度的线性关系  
Fig. 2 Linear relationship between integration time and camera detected intensity

直方图,如图 3 所示,可以看到强度分布呈泊松分布。根据直方图将噪声宽度提取出来,分析光强与噪声波动范围的关系,如图 4 所示,横坐标表示光强直方图最大值位置对应的光强,纵坐标表示该均匀光强照射下的光强波动范围,用于后续模拟中噪声的添加。除了噪声,还有位深和动态范围,这都是选择相机时需要考虑的关键参数。其中动态范围为相机可探测的最强信号与暗噪声的比值,当暗噪声一定时,相机位深越大,动态范围越大,当位深一定时,

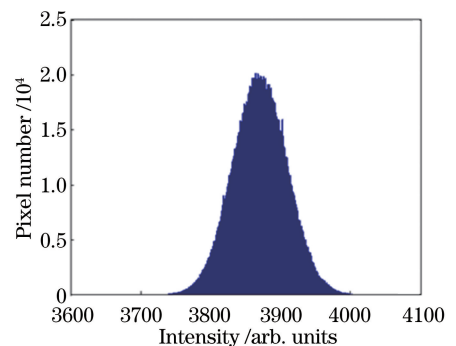


图 3 均匀照明时相机图像的直方图  
Fig. 3 Histogram of the camera image under uniform illumination

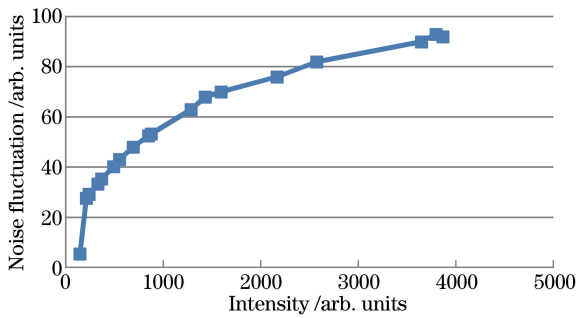


图4 光强与噪声波动范围的关系  
Fig. 4 Relationship between noise fluctuation and light intensity

暗噪声越小则动态范围越大。而通常关注的信噪比则是探测到的实际信号与噪声的比值,此时的噪声需包含暗噪声和与光强相关的散粒噪声。所以在后续模拟的高斯光斑中,参考实际噪声大小加入了暗噪声和散粒噪声。

### 2.3 积分面积比

在选择相机时,还需结合目标光斑的大小考虑像素、像元尺寸,在做测试时需要设置计算面积。为了方便分析,引入了积分面积比这一参数,即计算面积与待测光斑大小的比值。后续模拟证明,积分面积比对光斑尺寸分析有着重要意义。

### 2.4 光斑尺寸

在选择相机像素和像元尺寸时,还需要考虑到被测光斑的大小。通常相机感光面需要覆盖整个光斑,因光斑超出的部分测不到,所以无法得到准确的测量结果。被测光斑在感光面上的占比要求,可以参照积分面积比这一参数。后面通过模拟发现,除了要满足积分面积比,光斑所占像素太小,也会严重影响测量的准确性。

## 3 数值模拟分析

### 3.1 建模

为了简化模型,按照基模高斯光束公式来设置光强分布:

$$I = I_0 \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot (x^2 + y^2)}{w}\right], \quad (1)$$

式中: $I_0$ 为初始光强, $(x, y)$ 为光斑中某点的位置, $w$ 为光斑半径。如果对其他光斑模式感兴趣,也可以采用与下面类似的分析方法。让光斑居于分辨率为 $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ 的成像面的正中间,光斑尺寸和积分面积都以像素为单位,在每个像素中添加固定有效值的随机噪声(假设相位位深为 $12 \text{ bit}$ ,随机噪声的标准差为 $1.2$ ,最大值为 $5.1$ )和与探测光

强平方根呈正比的散粒噪声。根据 ISO 11146 文件,光斑功率的计算表达式为

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) dx dy, \quad (2)$$

式中: $I(x, y)$ 为光斑光强。采用一阶矩公式得到质心位置:

$$\bar{x} = \frac{1}{P} \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot I(x, y) dx dy, \quad (3)$$

然后再根据二阶矩公式计算出光斑直径 $d$ :

$$\delta_x^2 = \frac{1}{P} \iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y) (x - \bar{x})^2 dx dy, \quad (4)$$

$$d = 4 \cdot \sqrt{\delta_x^2}, \quad (5)$$

然后与实际设置的直径 $2w$ 进行比较。

### 3.2 光强饱和度、积分面积比和光斑直径误差的关系

设置高斯光束直径为 $282 \text{ pixel}$ ,如图5所示。

积分面积比的表达式设置为

$$\eta = \Gamma/d, \quad (6)$$

式中: $\eta$ 为积分面积比; $\Gamma$ 为积分范围。

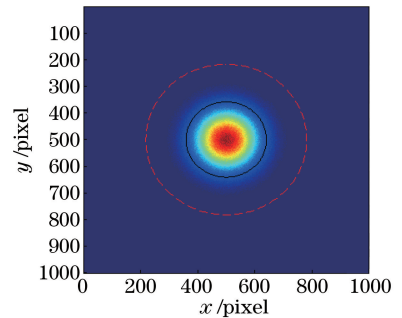


图5 直径为 $282 \text{ pixel}$ 的高斯光束

Fig. 5 Gaussian beam with the diameter of  $282 \text{ pixel}$

参照3.1节的理论公式计算出光斑直径的测量误差,测量误差与积分面积比的对应关系如图6所示。同时还模拟了不同光强饱和度下,光斑直径测量误差与积分面积比的关系。

从图6可以看出,当积分面积比在 $1.7$ 附近时,即使在不同光强饱和度下,光斑直径计算的误差都是最小的。可见积分面积比为 $1.7$ 的点是一个关键点。在光斑强度图中,如图5所示,将光斑实际直径位置和积分面积比为 $1.7$ 的位置分别用黑色实线和红色虚线标出,然后再将光斑强度图中心位置的强度值( $y=500 \text{ pixel}$ 位置)用曲线表示,如图7所示。从图7可以看出,当计算面积小于光强覆盖范围时,因部分光强计算不到而引入误差,故计算范围越小,误差越大;而当积分面积大于光强覆盖范围时,噪声的影响会增加,从而使误差也变大。表1列出了与

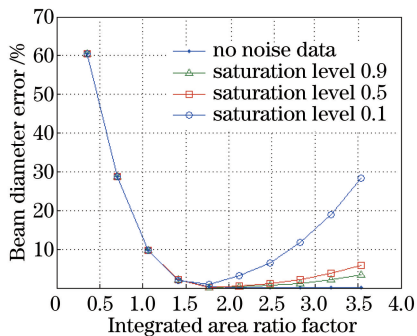


图 6 不同光强饱和度下光斑直径的测量误差与积分面积比的对应关系

Fig. 6 Relationship between integrated area ratio and beam diameter error under different light intensity saturation levels

积分面积比对应的区域的能量占比情况,印证了积分面积比约为 1.7 时,刚好包含了整个光斑能量。

另外从图6还可以看到,以积分面积比 1.7 为

参考,当计算面积偏小时,不同光强饱和度的误差情况几乎没有差别,而当计算面积增大时,计算误差呈变大趋势,并且光强饱和度越小,误差变大趋势越明显。表 2 列出了积分面积比为 3.5 时不同光强饱和度与光束直径误差的对应关系,可以看出光强越小,噪声对光束直径误差的影响越大。

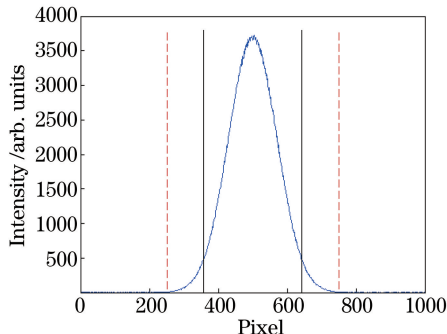


图 7  $y=500$  pixel 时的光束强度

Fig. 7 Intensity of the beam at  $y=500$  pixel

表 1 积分能量占比与积分面积比的关系

Table 1 Relationship between integrated energy ratio and integrated area ratio

Integrated area ratio	0.354	0.707	1.061	1.414	1.768	2.121	2.475	2.828	3.182	3.536
Integrated energy ratio	0.271	0.710	0.933	0.991	0.999	1	1	1	1	1

表 2 光强饱和度与光束直径误差的关系

Table 2 Relationship between light intensity saturation level and beam diameter error

Light intensity saturation	10	50	70	80	90	100
Beam diameter error	28.31	5.92	4.24	3.68	3.29	2.96

为了使积分面积比、光强饱和度以及测量误差之间的关系更直观,将图 7 转换成图 8,图 8 描述的是在不同积分面积比的情况下,光强饱和度与计算误差的关系。从图 8 可以看到只有在积分面积比约

为 1.7 时,光强饱和度大于 50%,光斑直径的测量误差小于 2%。当积分面积比小于 1.7 时,计算面积越小,误差越大,而且误差大小为恒定值,与光强无关。当积分面积比大于 1.7 时,误差会随着光强的增大而减小,而且积分面积比越大,噪声对误差的影响越大。

### 3.3 噪声对测量误差的影响

根据前面的模拟分析,将积分面积比设为 1.768。通过模拟计算发现,散粒噪声由于与光强相关,对光斑外区域的噪声贡献不大,故并不会对测量误差产生明显的影响,但图像本底噪声产生的影响则很大,所以本节后面提到的噪声均指本底噪声。现在最为常见的光斑分析仪的相机位深为 8 bit 和 12 bit,动态范围为 62 dB,为与之对应,将 12 bit 相机的噪声最大值设置为 5.39,将 8 bit 相机的噪声最大值设置为 0.27。此外还针对 8 bit 相机设置另外

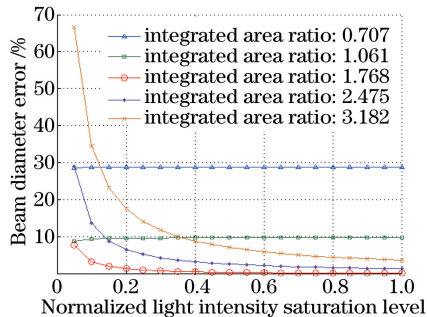


图 8 不同积分面积比时光强饱和度与光束直径误差的关系  
Fig. 8 Relationship between light intensity saturation level and beam diameter error under different integrated area ratios



3组不同的噪声数据,对应不同的动态范围,其模拟结果如图9所示。从这组模拟结果可以看到噪声越大,误差越大,而光强饱和度的提高也可以大大减小误差。然而12 bit(暗噪声为5.39)和8 bit(暗噪声为0.27)这两组数据的噪声范围相差很大,两条模拟曲线几乎重合,可以看出与测量误差直接关联的是相机动态范围,而不是噪声绝对值和相机的绝对位深,这一点在表3中表现得更为直观。表3列出了当光强饱和度为90%时,不同噪声情况下信噪比与光斑直径误差的关系。

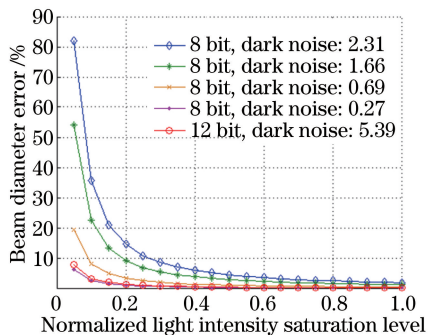


图9 不同噪声时光强饱和度与光束直径误差的关系

Fig. 9 Relationship between beam diameter error and light intensity saturation level under different noises

表3 光强饱和度为90%时信噪比与光束直径误差的关系

Table 3 Relationship between SNR and beam diameter error when the light intensity saturation level is 90%

Parameter	Value				
Dark noise /bit	2.31	1.66	0.69	0.27	5.40
Bit depth /bit	8	8	8	8	12
SNR/dB	40	42.8	50.5	58.6	56.7
Beam diameter error /%	2.1	1.3	0.38	0.018	0.045

### 3.4 光斑尺寸对测量误差的影响

在前面的模拟中,光斑直径为282 pixel,计算过程中采用的是积分面积比的概念。而在选择相机像素和像元尺寸时,还需要考虑实际光斑尺寸。当积分面积比为1.768、光强饱和度为90%、相机位深为12 bit、动态范围为62 dB时,计算光斑尺寸与误差的关系如图10所示,可以看出:当光斑直径小于100 pixel时,误差会随着光斑直径的减小而急剧增大,因此在选择相机时,光斑在相机面上的占比情况也是需要考虑的,光斑所占像素太小,会直接影响光斑测量的准确性。

## 4 结论

激光光束质量会直接影响激光应用的效果,对光斑尺寸进行评估,是测量其他光斑参数的基础。

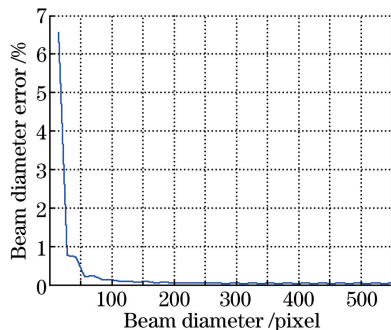


图10 光斑尺寸与计算误差的关系

Fig. 10 Relationship between actual beam diameter and calculated error

采用高斯光束模型,参照实际情况添加噪声,再根据ISO 11146标准计算光斑直径。针对相机的实际操作过程,提炼出需要考虑的参数,通过模拟发现光强饱和度、积分面积比、信噪比和光斑尺寸这4个参数对测量误差有较大的影响,并详细讨论了参数的影响规律,以及参数之间的关联。最终对如何选择相机的像元、像素、动态范围、暗噪声,以及如何设置积分时间、计算区域等提出了更明确的要求。

## 参考文献

- [1] Fu F X, Chang G R, Zhao X X, *et al.* Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 031401.  
付福兴, 畅庚榕, 赵小侠, 等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 031401.
- [2] Liu H Q, Li W J, Chang K, *et al.* Error characteristics of laser beam quality based on knife-edge measuring method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121402.  
刘海强, 李文娟, 常坤, 等. 基于刀口测量法的激光光束质量误差特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121402.
- [3] Zhu F, Huang K, Zhou S Q, *et al.* Laser beam quality optimization of no-chain pulsed HF laser using unstable resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401002.  
朱峰, 黄珂, 周松青, 等. 基于非稳腔的非链式脉冲HF激光光束质量优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401002.
- [4] Peng Y M, Su Z P. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522003.  
彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面

- 透镜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522003.
- [5] Technical Committee ISO/TC 172, Optics and photonics, Subcommittee SC 9, Electro-optical systems. Lasers and laser-related equipment: test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios: ISO 11146[S]. 1999.
- [6] Yin Z B, Chen H, Wang X B, *et al.* Research and standardization on diagnostic of laser beam characteristics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081406.  
尹志斌, 陈虹, 王旭葆, 等. 激光光束光斑质量诊断技术研究及其标准化进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081406.
- [7] Roundy C B. Techniques for accurately measuring laser beam width with commercial CCD cameras[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3405: 1045-1055.
- [8] Xu X Z, Li Z T, Xue L J. Analysis and processing of CCD noise [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 343-347.  
许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD噪声分析及处理技术[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 343-347.
- [9] Liu Y Q, Tang S X, Guo Y J, *et al.* Analysis of influence of CCD's nonlinear photoelectric characterization on evaluating the high power laser beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0402001.  
刘亚群, 唐顺兴, 郭亚晶, 等. CCD光电响应非线性特性对高功率激光光束质量评价的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0402001.
- [10] Cao Y L, Gao C Q. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 583-586.  
曹一磊, 高春清. 基于面阵 CCD 的激光光束参数测量系统精度分析[J]. 光学技术, 2004, 30(5): 583-586.
- [11] Gao X S, Gao C Q, Yang S Z, *et al.* Experimental study on beam parameter measurement system by using area array CCD[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(7): 993-996.  
高雪松, 高春清, 杨绍状, 等. 面阵 CCD 激光束参量测量系统及其实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(7): 993-996.