

文章编号: 0253-2239(2006)07-1057-6

截断光束的广义 M^2 因子测量的实验研究*

张 艳 郭 欣 李 琨 文 侨 张 彬 蔡 邦 维

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 提出了一种可广泛适用于截断光束和非截断光束的广义 M^2 因子测量的实验方法和相应的数据处理方法。在利用广义强度二阶矩计算光束束宽时,以积分角谱范围能够包含光束总能量的 75% 以上作为积分范围的选取标准,并遵循现有的国际标准化组织(ISO)规定的测量步骤和方法对截断高斯光束的广义 M^2 因子进行了测量,并将不同截断参量时的实验结果与理论计算结果进行了比较,证明了该方法的正确性。研究结果表明,根据该方法测量截断光束 M^2 因子时,只须将非截断光束 M^2 因子测量的数据处理部分进行适当修正,而无需增加其他硬件开销,该方法简便易行且测量步骤仍可遵循国际标准化组织规定。

关键词: 激光技术; 广义 M^2 因子; 广义强度二阶矩; 硬边光阑

中图分类号: TN247; TN012 文献标识码: A

Experimental Study on Generalized M^2 Factor of Truncated Laser Beams

Zhang Yan Guo Xin Li Kun Wen Qiao Zhang Bin Cai Bangwei

(College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: A method for the generalized M^2 factor measurement and the corresponding data processing have been proposed, which can be widely applied to the truncated and non-truncated laser beams. The integral area for calculating the beam width by using the definition of generalized second-order moments is selected to ensure the energy in the angular domain more than 75% of the total beam energy and the measurement method and steps still follow the relevant ISO standards. The generalized M^2 factor of truncated Gaussian beam has been measured. The experimental results for different truncated parameters have been compared with the theoretical results, showing the validity of the method proposed. The results indicate that the generalized M^2 factor of truncated laser beam can be measured only by properly modifying the data processing method for the measurement of M^2 factor of non-truncated laser beam without additional hardware spending. The method is simple and convenient and its measuring steps also follow the ISO standards.

Key words: laser techniques; generalized M^2 factor; generalized intensity second-order moments; hard-edge aperture

1 引 言

自从 20 世纪 90 年代初, Siegman A. E. 对 M^2 因子概念提出了较为完整的理论^[1], 在激光光束质量测量和评价的研究工作中取得了不少的进展。国际标准化组织(ISO)规定了以强度二阶矩定义光束

宽度,以光束质量因子 M^2 表征激光束的传输特性,并规定了具体的测量步骤和方法。然而,实际光束都会或多或少受到光学元件有限尺寸的限制,特别是由非稳腔输出的激光束或受硬边光阑限制的激光束,均会由于硬边光阑的衍射效应而引起光强分布

* 国家自然科学基金(60108004)资助课题。

作者简介: 张 艳(1977~),女,贵州遵义人,四川大学电子信息学院博士研究生,主要从事高功率激光技术方面的研究。
E-mail: eileen_zy001@sohu.com

导师简介: 张 彬(1969~),女,四川蓬溪人,四川大学电子信息学院教授,博士生导师,主要从事光物理与技术的研究。
E-mail: zhangbinff@sohu.com

收稿日期: 2005-06-09; 收到修改稿日期: 2005-09-26

的变化,并在计算 M^2 因子时会遇到积分发散的困难。尽管已提出渐近分析法和自收敛束宽法等多种方法^[2~5]来克服这一困难,但这些方法各有优缺点,以致于迄今为止国际标准化组织尚未规定有硬边光阑限制的激光束 M^2 因子计算和测量的方法。

本文针对截断光束 M^2 因子测量存在的问题,提出了利用截断光束的广义强度二阶矩定义及其遵循的传输公式,将现有的 ISO 标准进行推广,使之同时能适用于非截断光束和截断光束 M^2 因子的测量方法,并进行了初步的实验研究。

2 实验原理

2.1 截断光束 M^2 测量原理

激光光束通过硬边光阑时,假设强度一阶矩为零(可通过坐标系平移实现),则其空间域、空间-频率域强度二阶矩以及交叉矩可分别表示为

$$\langle x^2 \rangle = \frac{1}{I_0} \int_{-a}^a x^2 |E(x)|^2 dx, \quad (1)$$

$$\langle u^2 \rangle = \frac{1}{k^2 I_0} \int_{-a}^a |E'(x)|^2 dx + \frac{4}{k^2 I_0 a} [|E(a)|^2 + |E(-a)|^2], \quad (2)$$

$$\langle xu \rangle = \frac{1}{2ikI_0} \int_{-a}^a \{ x[E'(x)]^* E(x) - xE'(x)E^*(x) \} dx, \quad (3)$$

式中 a 为光阑的半峰全宽; k 为波数; x' 表示对 x 的导数;角标 * 为复共轭; I_0 为进入光阑的光功率,即

$$I_0 = \int_{-a}^a |E(x)|^2 dx. \quad (4)$$

Herrero 等^[5,6]在对截断光束空间-频率域强度二阶矩进行修正时,主要考虑所选定的积分角谱范围能够包含光束总能量的 75% 以上,这为实验数据处理时积分区域的选取提供了理论依据。

与非截断光束类似,按(1)式~(3)式定义的截断光束广义强度二阶矩经理想光学系统传输时,其传输规律仍满足 ABCD 定律^[7],即

$$\langle x^2 \rangle_o = A^2 \langle x^2 \rangle_i + B^2 \langle u^2 \rangle_i + 2AB \langle xu \rangle_i, \quad (5)$$

$$\langle u^2 \rangle_o = C^2 \langle x^2 \rangle_i + D^2 \langle u^2 \rangle_i + 2CD \langle xu \rangle_i, \quad (6)$$

$$\langle xu \rangle_o = AC \langle x^2 \rangle_i + BD \langle u^2 \rangle_i + (AD + BC) \langle xu \rangle_i, \quad (7)$$

式中 A, B, C, D 分别为 ABCD 光学系统传输矩阵

元, $\langle x^2 \rangle_i, \langle u^2 \rangle_i, \langle xu \rangle_i$ 分别为入射面的空间域、空间-频率域强度二阶矩以及交叉矩, $\langle x^2 \rangle_o, \langle u^2 \rangle_o, \langle xu \rangle_o$ 分别为出射面的空间域、空间-频率域强度二阶矩以及交叉矩。

利用(1)式~(3)式的广义截断二阶矩定义,可以避免采用 Siegman 提出的强度二阶矩定义计算截断光束的空间-频率强度二阶矩值为无穷大,从而导致无法直接采用现有的 ISO 标准测量截断光束 M^2 因子的问题。并且,由于广义强度二阶矩的传输规律仍然满足 ABCD 定律,因此,在进行测量时,仍然可遵循 ISO 标准规定的测量步骤和方法,只是需要将原有的有关强度二阶矩的数据处理方法进行推广,以满足截断光束测量的需要。由于非截断光束可视为当光束截断参量趋于无穷大时截断光束的特例,因此,我们提出的有关强度二阶矩数据处理方法的推广对非截断光束同样适用。

在实验测量中,位置 z 处光束截面上 x 方向的光强分布函数的广义强度二阶矩表达式为

$$\sigma_x^2(z) = \frac{\int_{-a}^a \int_{-a}^a (x - \bar{x})^2 I(x, y, z) dx dy}{\int_{-a}^a \int_{-a}^a I(x, y, z) dx dy}, \quad (8)$$

式中 \bar{x} 为推广后的光强分布函数 $I(x, y, z)$ 的一阶矩,其表达式为

$$\bar{x} = \frac{\int_{-a}^a \int_{-a}^a x I(x, y, z) dx dy}{\int_{-a}^a \int_{-a}^a I(x, y, z) dx dy}. \quad (9)$$

在利用广义强度二阶矩定义来计算光路中某一位置处截断光束的束宽时,对积分限选取的要求是以强度一阶矩所确定的位置为中心,并保证在积分角谱范围内能够包含截断光束总能量的 75% 以上,以满足 Herrero 等对截断光束空间-频率域强度二阶矩进行修正的条件。只要确定了一个合适的能量百分比,以同一个能量百分比来选取广义强度二阶矩的积分区域,从而使截断光束的实验测量有了一个统一的标准可以进行比较分析。由此可计算出二阶矩定义下任意观测平面 z 处沿 x 方向的光束宽度为

$$D_x = 4\sigma_x(z). \quad (10)$$

当用广义强度二阶矩定义截断光束的束宽时,与非截断光束类似,仍然满足双曲线的传输公式。理论上,只需要在 z 轴上三个不同的位置采集图像进行拟合,但为了减小实验误差,提高拟合曲线的精

度,根据 ISO 制定的光束质量测量标准,应该在 z 轴上选取不少于十次的不同位置测量束宽,并确保至少由五次在光束的瑞利长度内。于是,可以采用多点测量法对束宽进行双曲线拟合^[8],

$$D_x^2(z) = A'z^2 + B'z + C'. \quad (11)$$

通过双曲线拟合求出系数 A', B', C' 后,可以计算在 x 方向广义 M^2 因子的实验计算公式(同理,也可以得到 y 方向的相应参量)

$$M_x^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \sqrt{A'C' - \frac{B'^2}{4}}. \quad (12)$$

2.2 实验设计

根据实际测量截断光束 M^2 因子的需要设计实验装置,如图 1 所示。实验中采用 He-Ne 激光器输

出的波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 的激光作为入射光,光阑的可选直径为 $a = 1.000 \text{ mm}$ 、 $a = 0.500 \text{ mm}$ 、 $a = 0.200 \text{ mm}$,实验测得光阑处的光束宽度 $w = 0.858 \text{ mm}$,于是,对应的光束截断参量分别为 $\delta = 1.166$ 、 $\delta = 0.583$ 、 $\delta = 0.233$ 。无像差透镜的作用是重构束腰以满足 ISO 标准对束宽测量的要求,同时还可以压缩或扩大光束截面以适应 CCD 光敏面的尺寸大小。滤光片用来调整入射到 CCD 的光强,同时除去杂散光。选择滤光片的原则是能对光束进行无畸变的适量衰减,既不要让 CCD 饱和,又要使得在整个移动测量中采集图像的信噪比足够大,即要保证在实验采集中光强的灰度值在 200 左右。

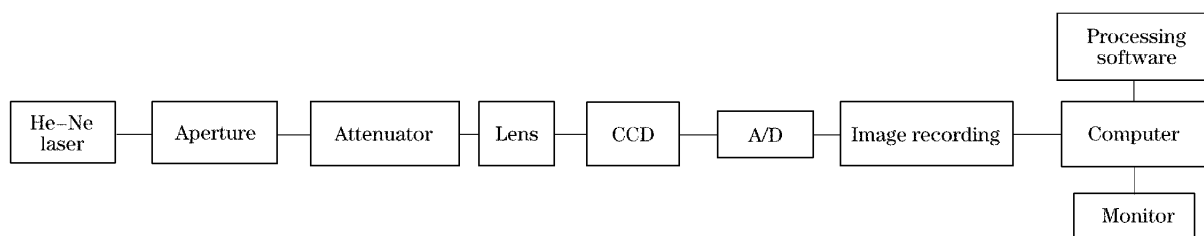


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

在实验测量中需要采集多幅图像,可采用多点拟合法来减小实验误差。为了满足 ISO 制定的光束质量测量标准,同时保持数据的典型性和有效性,实验中采用“分区域等步长采集”的方法采集图像,即在瑞利长度以内以较小步长等间距采集 5 幅以上,在瑞利长度以外的区域以较大步长等间距采集 5 幅以上图像。

3 实验结果及分析

利用广义强度二阶矩测量不同截断参量所对应的 M^2 因子时, M^2 因子对远离中心的光强分布十分

敏感,实验中由于背景噪声以及探测器噪声等各种噪声的存在,给 M^2 因子的测量带来很大的误差^[9,10],甚至还会导致错误的结论。因此,对实验采集的图像进行预处理减小噪声就至关重要。

实际图像的功率密度分布至少由以下三部分构成^[11]:

$$I_{\text{mean}}(x, y) = I_{\text{theo}}(x, y) + N(x, y) + I_{\text{off}}, \quad (13)$$

式中, $I_{\text{theo}}(x, y)$ 表示激光束的功率密度分布, $N(x, y)$ 为采集图像中的一些随机噪声, I_{off} 为持续的本底阈值。为了从实际图像中准确有效地提取出目标光强分布 $I_{\text{theo}}(x, y)$, 必须对 $N(x, y)$ 和 I_{off} 进

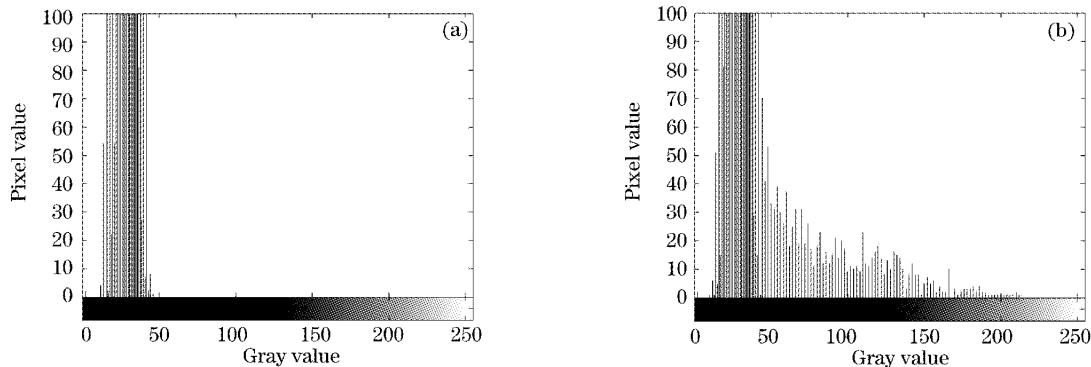


图 2 (a)背景图和(b)光斑图所对应的直方图

Fig. 2 Histogram of the (a) background pattern and the (b) light spot pattern

行校正或减小。

对于实验的本底 I_{off} , 可以分析同一位置光斑图和背景图的直方图利用阈值法扣除本底, 光斑图和背景图的直方图对比如图 2 所示, 其纵坐标为像素值, 横坐标为灰度值。对于随机噪声 $N(x, y)$, 可以进一步采用像素合并技术^[12] 减小其影响, 经处理后的效果对比如图 3 所示。

图 4 给出了不同光阑情况下在同一位置 CCD

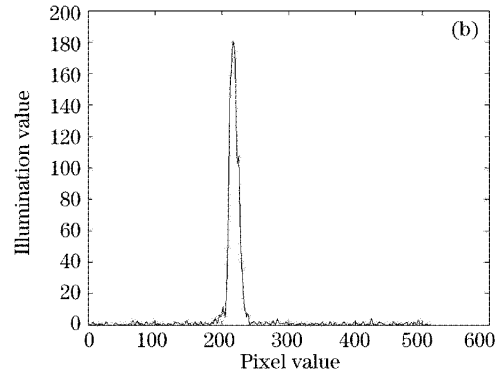
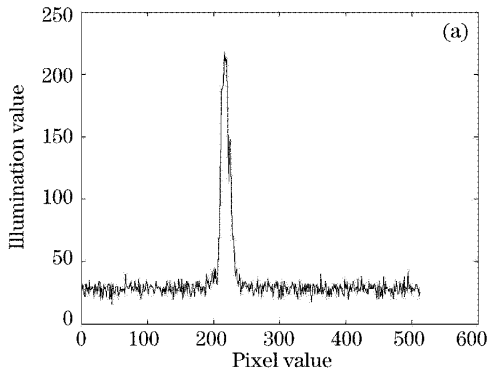


图 3 光斑图的灰度分布。(a)校正前,(b)校正后

Fig. 3 Gray value distribution of light spot pattern. (a) Before correction, (b) after correction

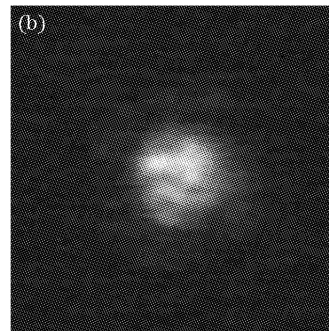
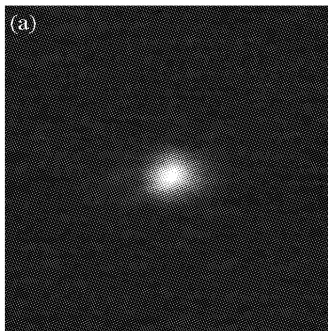


图 4 CCD 采集的不同截断参数的光斑图。(a) $\delta=1.166$, (b) $\delta=0.233$

Fig. 4 Light spot pattern of different truncation parameter collected by CCD camera. (a) $\delta=1.166$, (b) $\delta=0.233$

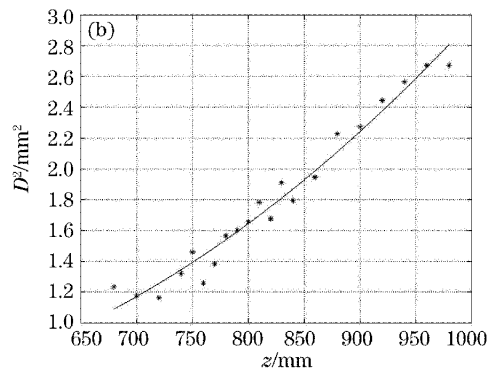
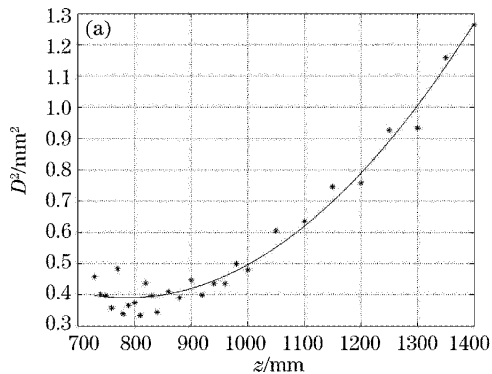


图 5 束宽的平方随传输距离的变化曲线。(a) $\delta=1.166$, (b) $\delta=0.233$

Fig. 5 Square of beam width varies as a function of propagation distance. (a) $\delta=1.166$, (b) $\delta=0.233$

本实验采用灰度等级为 256 的 CCD 采集图像, 主要针对光斑主峰进行图像采集, 由于动态范围不

采集的光斑图。可以看出, 当光阑尺寸越小, 对应的截断参量也越小, 在同一位置的光斑越大, 光斑强度分布越不均匀, 说明衍射现象就越明显。

对经过预处理的图像可利用(8)式~(10)式进行光束束宽的测量, 再利用(11)式进行最小二乘法拟合, 获得不同光阑孔径时束宽直径平方随传输距离的变化曲线, 如图 5 所示。可以看出, 截断参量越小, 拟合曲线变化越陡峭, 表明光束发散得越剧烈。

够大, 无法同时有效采集强截断光束衍射光斑的主峰和旁瓣。这样就丢失了部分衍射旁瓣的信息, 从

而使利用强度二阶矩定义计算的束宽值偏小。如果改用科学级 CCD 进行图像采集,则可更大幅度地提取衍射旁瓣的光强值,减小因数据丢失带来的误差。此外,在实验中本底阈值的测量对结果影响甚大,保持一个足够低并且均匀的测量背景,对计算中确定合适的本底值甚为关键。

在实验中由于噪声的存在,在利用二阶矩定义进行计算时会放大边缘处噪声的影响,如果积分区域选取不当,则会给结果带来很大的误差。可以根

据光斑尺寸对实际光斑的能量区域进行粗定,然后,选择合适的能量百分比来确定积分区域,以有效减小边缘的噪声影响。此外,在实验操作中还存在像素标定误差、光学元件不同轴带来的误差、光学元件畸变带来的误差以及测量读数误差等。

根据不确定度传递律^[13],由(12)式可以得到用标准偏差表示的激光光束广义 M^2 因子的不确定度为

$$\sigma(M^2) = \sqrt{\left(\frac{\partial M^2}{\partial A'}\right)^2 \sigma^2(A') + \left(\frac{\partial M^2}{\partial B'}\right)^2 \sigma^2(B') + \left(\frac{\partial M^2}{\partial C'}\right)^2 \sigma^2(C')}, \quad (14)$$

式中 $\sigma(M^2)$ 为广义 M^2 因子的标准偏差, $\sigma(A')$ 、 $\sigma(B')$ 、 $\sigma(C')$ 表示了曲线拟合系数 A' 、 B' 、 C' 的标准偏差,主要由图像位置的测量误差、实际光束束腰宽度的测量误差、远场发散角的测量误差等因素决定。

针对不同尺寸的光阑,实验拟合曲线的参量 A' 、 B' 、 C' ,实验测量的广义 M^2 因子及其不确定度 $\sigma(M^2)$ 以及相应的理论计算结果^[14] 示于表 1。由表 1 可知,实验测量结果与理论计算结果吻合较好。

表 1 不同截断参量的拟合系数和 M^2 因子

Table 1 Fitting coefficients and M^2 factor of different truncation parameters

Fitting coefficient	A'	B'	C'	M^2	$\sigma(M^2)$	M^2 (theory)
Truncation parameter						
$\delta=0.233$	6.178×10^{-6}	-4.528×10^{-3}	1.313	2.144	0.131	2.176
$\delta=0.583$	3.788×10^{-6}	-4.768×10^{-3}	2.084	1.846	0.107	1.802
$\delta=1.166$	2.340×10^{-6}	-3.683×10^{-3}	1.839	1.186	0.082	1.111

4 结 论

针对高斯光束被光阑衍射的广义 M^2 因子进行了测量,提出了一种可以普遍适用于截断光束和非截断光束的广义 M^2 因子测量的实验方法和相应的数据处理方法。利用广义强度二阶矩的定义计算束宽,在实验测量中以积分角谱范围能够包含截断光束总能量的 75% 以上作为积分范围的选取标准,将原有的有关强度二阶矩的数据处理方法进行推广,并遵循现有的 ISO 标准规定的测量步骤和方法对截断光束的 M^2 因子进行了测量。实验研究了截断高斯光束的广义 M^2 因子与光束截断参量的定量变化关系,并与理论计算结果进行了比较。在此基础上,还进一步分析了截断光束 M^2 因子测量存在的实验误差,并指出了改进和优化的途径。值得指出的是,虽然,部分相干光的广义 M^2 因子不仅与光束截断参量有关,而且还与光束相干性有关,然而,已有的研究表明,与完全相干光类似,部分相干光的广义强度二阶矩经理想光学系统传输时,其传输规律仍满足 ABCD 定律^[14,15],因此,该方法同样适

用于部分相干光的情况。

参 考 文 献

- 1 Sigeman A E. New developments in laser resonators[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1224**: 6~9
- 2 Claude Paré, Pierre-André Bélanger. Propagation law and quasi-invariance properties of the truncated second-order moment of a diffracted laser laser beam[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**: 679~693
- 3 Stefan Amarande, Adolf Giesen, Helmut Hügel. Propagation analysis of self-convergent beam width and characterization of hard-edge diffracted beams[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(22): 3914~3924
- 4 Chu Xiaoliang, Zhang Bin. Generalized M^2 factor of partially coherent beams propagating through hard-edged apertures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1051~1054 (in Chinese)
楚晓亮,张 彬. 部分相干光束通过硬边光阑的推广光束传输 M^2 因子[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1051~1054
- 5 Wen Qiao, Chu Xiaoliang, Zhang Bin. Generalized M^2 factor of laser beams with amplitude modulations and phase distortion passing through hard-edge apertures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 274~278 (in Chinese)
文 乔,楚晓亮,张 彬. 有振幅调制和相位畸变光束通过硬边光阑的 M^2 因子[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 274~278
- 6 Lü Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong *et al.*. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(1): 14~17
吕百达,季小玲,罗时荣等. 激光的参量描述和光束质量[J]. 红

- 外与激光工程, 2004, **33**(1): 14~17
- 7 Martínez-Herrero R, Mejías P M. Second-order spatial characterization of hard-edge diffracted beams[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(19): 1669~1671
- 8 Martínez-Herrero R, Mejías P M, M. Arias. Parametric characterization of coherent, lowest-order Gaussian beams propagation through hard-edged apertures[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 124~126
- 9 Sun Wei, Gao Chunqing, Wei Guanghui. Design of precision CCD measurement system for beam characterization [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(4): 471~474 (in Chinese)
孙 伟, 高春清, 魏光辉. 精确 CCD 光束参量测量与评价系统的设计[J]. 北京理工大学学报, 2000, **20**(4): 471~474
- 10 Zhao Changming. Investigation on the experimental measurement of laser beam quality[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(6): 341~344 (in Chinese)
赵长明. 激光光束质量参量测量的实验研究[J]. 激光技术, 2000, **24**(6): 341~344
- 11 R. Mästle, C. Schmitz, F. Varnik *et al.*. Instruments and standard measurement procedures for laser beam characterization [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3045**: 978~989
- 12 Xu Fei, Shi Xiaohong, *et al.*. *MATLAB Applications Image Processor* [M]. Xi'an: Xi'dian University Press 2002. 56~61 (in Chinese)
许 飞, 施晓红, 等. MATLAB 应用图像处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 56~61
- 13 Qian Shaosheng. *Uncertainty in Measurement; the Processing and Expression of the Experimental Data* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 80~82 (in Chinese)
钱绍圣. 测量不确定度: 实验数据的处理与表示[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 80~82
- 14 Xiaoliang Chu, Bin Zhang, Qiao Wen. Generalized factor of a partially coherent beam propagating through a circular hard-edged aperture[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(21): 4280~4284
- 15 Bin Zhang, Xiaoliang Chu, Qiang Li. Generalized beam-propagation factor of partially coherent beams propagating through hard-edged apertures[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(7): 1370~1375