

# 激光光斑照度的散射成像测量方法

孟晶晶<sup>1,2</sup>, 余锦<sup>1,2\*</sup>, 貉泽强<sup>1,3</sup>, 王金舵<sup>1,2</sup>, 代守军<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094

**摘要** 微透镜阵列法是实现光束匀化的主要途径之一, 通过改变成像透镜的光焦度, 可在焦平面处得到大面积的均匀光斑。基于理论和实验分析了散射成像法的可行性, 为了准确测量焦平面处光斑的照度, 在考虑漫射板反射率及相机离轴角等影响因素的基础上, 从张正友相机标定法出发, 建立了图像灰度值与目标面光斑照度的数学关系; 在实验中标定了漫反射板的双向漫反射分布函数, 针对两种焦距的主积分透镜, 测量了焦平面及附近位置处匀化光斑的照度分布。实验结果表明: 当积分透镜焦距分别为 300 mm 和 500 mm 时, 目标面处的激光通量基本一致, 光斑大小与理论值基本接近; 分别比较了两种情况下观察面离焦时光斑分布的变异系数, 得到光束经微透镜后匀化效果最佳的位置。

**关键词** 测量; 漫散射; CCD 成像法; 照度分布; 微透镜匀化

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0712004

## Laser Spot Illuminance Measurement Method Based on Scattering Imaging

Meng Jingjing<sup>1,2</sup>, Yu Jin<sup>1,2\*</sup>, Mo Zeqiang<sup>1,3</sup>, Wang Jinduo<sup>1,2</sup>, Dai Shoujun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** Micro-lens array method is one of the widely utilized approaches to realize beam homogenization. This method can achieve large-area uniform spots in the focal plane by changing the focal power of the imaging lens. Herein, the feasibility of the scattering imaging method is analyzed theoretically and experimentally. In order to accurately measure the illuminance of spots in the focal plane, the mathematical relationship between the image gray scale value and the illuminance of spots in the target plane is established using the Zhang Zhengyou's camera calibration method, after considering the interfering factors such as the reflectivity of diffusing plate and the off-axial angle of the camera. Bidirectional reflectance distribution function of the diffusing plate is experimentally calibrated. The illuminance distributions of the homogenized spots in the focal plane and its vicinity are measured for the principal integral lenses with two focal lengths. Experimental results show that when the focal lengths of the integral lens are 300 mm and 500 mm respectively, the laser fluxes are roughly equal and the measured spot sizes are basically consistent with the theoretical values in the target plane. By comparing the variation coefficients of spot distributions in the defocus observation plane for these two cases, the optimal position to realize homogenized spot distribution is obtained.

**Key words** measurement; diffuse scattering; charge-coupled device imaging; illuminance distribution; micro-lens homogenization

**OCIS codes** 120.5820; 290.1990; 040.1520; 230.3990

收稿日期: 2019-02-01; 修回日期: 2019-03-03; 录用日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407400)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170035)、中国科学院联合基金(6141A1070103)

\* E-mail: jinyu@aoe.ac.cn

# 1 引 言

光路中引入微透镜阵列可方便地实现成像、照明、光疗等领域应用中所需的大面积均匀光斑<sup>[1-5]</sup>。受常规激光能量测试设备接收口径的限制,目前主要采用探测器点阵法及成像法来实现大面积激光光斑照度分布的测量<sup>[6]</sup>。前者将一定数量的探测器按点阵排列并完成光斑强度空间取样,测量方法简单、直观,具有很快的响应速度,但探测器点阵法的空间分辨率受器件成本、尺寸等因素的限制而难以提高。相比较而言,空间分辨率高、信息量大、成本适中及复杂性低的 CCD 成像法得到了应用,如:国内外研究人员采用此方法实现了远场的光束扩展和漂移测量<sup>[7-9]</sup>;王飞等<sup>[10]</sup>采用动态取样旋臂代替静态漫反射屏,实现了激光强度的实时监测;庞森等<sup>[11-12]</sup>基于漫透射 CCD 成像法原理,实现了大尺寸光斑功率和强度分布的

测量。可以看出,这些研究大多应用于激光远场光强分布测试,而对于激光近场光强分布测试方面的研究还比较少。

为实现激光近场光强分布的测量,本文搭建了激光照度分布测试装置,对激光束经微透镜系统后的照度分布及光斑均匀性进行讨论。首先,建立 CCD 单位像元与漫反射板坐标的对应关系,采用精度高且操作简便的张正友标定法<sup>[13]</sup>对相机进行了标定;其次,建立像元灰度值与漫射板对应区域亮度关系的数学模型,并在测量过程中讨论了探测器离轴角的影响;最后,根据所建立的数学模型对观察面处光斑的均匀性进行讨论。

## 2 基本原理与测量装置

### 2.1 激光经微透镜传输的理论模型

为了计算方便,以一维传输为例进行分析。激光通过衍射型微透镜阵列的示意图如图 1 所示。

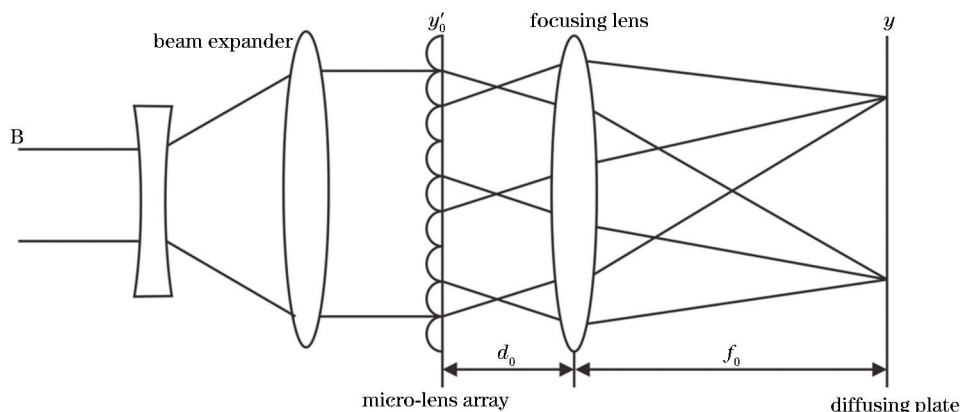


图 1 激光通过衍射型微透镜阵列示意图

Fig. 1 Schematic of laser beam passing through diffractive micro-lens array

光源 B 发出的波长为  $\lambda$  的激光经准直扩束系统后入射到微透镜的前表面  $y'_0$ , 经过微透镜阵列入射到与  $y'_0$  面相距  $d_0$  的主积分透镜上, 之后在透镜的后焦面得到目标光场。其基本原理可理解为: 一束光强分布不均匀的光束入射到由  $N_0$  个子透镜组成的微透镜阵列, 光源被分割为不同模式的子光束, 经单透镜衍射后的多光束在积分透镜的后焦面处干涉叠加。

考虑到入射激光的光束质量, 假设入射到微透镜阵列上的光场分布为  $U(y')$ , 令微透镜阵列的透过率函数为  $t_p$ , 则在目标面  $y_0$  上的光场分布  $U(y)$  可以表示为

$$U(y) = \frac{1}{i\lambda f_0} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f_0}\left(1 - \frac{d_0}{f_0}\right)y^2\right] \mathcal{F}\{U(y')t_p\}, \quad (1)$$

式中:  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  表示傅里叶变换;  $f_0$  为积分透镜的焦距。

微透镜阵列是一个周期重复的结构, 假设阵列中微透镜的个数为  $N_0$  ( $N_0 = 2N + 1$ ,  $N$  为正实数), 则整个结构的透过率函数可表示为  $N_0$  个单孔径透过率的组合, 即

$$t_p(y') = t_{pl}(y') * \sum_{n=-N}^N \delta(y' - nd), \quad (2)$$

式中:  $*$  代表卷积运算;  $\delta$  为脉冲函数;  $d$  为阵列中单个透镜的尺寸。

将(2)式代入(1)式可得

$$U(y) = \frac{1}{i\lambda f_0} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f_0}\left(1 - \frac{d_0}{f_0}\right)y^2\right] \mathcal{F}\{U(y')t_p\} = \frac{1}{i\lambda f_0} \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda f_0}\left(1 - \frac{d_0}{f_0}\right)y^2\right] \mathcal{F}\{U(y')t_{pl}(y')\} \times \text{sinc}\left(\pi d \frac{y}{\lambda f_0}\right), \quad (3)$$

则目标面处的照度分布  $E$  可表示为

$$E(y) \propto |U(y)|^2. \quad (4)$$

### 2.2 照度分布测量原理与实验装置

散射成像式激光照度分布原理如图 2(a) 所示,其中包括一块面积为  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  的聚四氟乙烯板、一台  $1280\text{ pixel} \times 1024\text{ pixel}$  的 CCD 工业相机(像元尺寸为  $5.2\text{ }\mu\text{m} \times 5.2\text{ }\mu\text{m}$ ,配有焦距为  $25\text{ mm}$  的定焦镜头,物距范围为  $0.3\text{ m} \sim \infty$ ,实验中数值孔径固定为  $0.3$ )以及一台用于数据处理的计算机。计算中定义  $OXY$  为漫反射板所在的世界坐标系, $O_cX_cY_c$  为 CCD 镜头所在的相机坐标系, $ouv$  为 CCD 采集图像中以像素为单位的图像坐标系。

设实验中所使用的漫反射板表面的双向反射分布函数(BRDF)为  $f_r$ ,反射板上入射光斑的照度分布为  $E(x, y)$ ,则反射光亮度为

$$L(x, y) = f_r E(x, y). \quad (5)$$

设漫反射屏上以  $p(x, y)$  为中心的微小面元  $dS$  成像于图像坐标系上以  $p'(u, v)$  为中心的像元  $ds$ ,相机的光学入瞳面积  $S_E$  可由镜头焦距  $f$  与光圈  $F$  表示为

$$S_E = \frac{\pi f^2}{4F^2}. \quad (6)$$

实验中固定 CCD 镜头中心与漫反射板中心的几何距离为  $1\text{ m}$ ,因此  $S_E$  对漫反射板上任意点的张角都非常小。根据亮度的定义,像面处面元  $ds$  接收到的光通量可表示为

$$\phi(u, v) = kL(x, y) dS \cos \theta \cos \omega \frac{S_E}{D^2}, \quad (7)$$

式中: $k$  为 CCD 相机成像物镜的透过率,一般认为

是常数; $dS \cos \theta$  为漫反射板面元在  $O_cX_cY_c$  平面的投影; $D$  为  $p$  点与 CCD 相机中心  $O_c$  的距离; $\cos \omega$  为  $p$  点相对相机光轴的离轴角余弦。设  $dx, dy$  分别为 CCD 像元的长度和宽度, $(u_0, v_0)$  为成像中心的像素坐标,则有

$$\cos \omega = \frac{f}{\sqrt{(u - u_0)^2 dx^2 + (v - v_0)^2 dy^2 + f^2}}. \quad (8)$$

过  $p$  点作  $O_cX_cY_c$  的平行平面  $O'_cX'_cY'_c$ ,根据几何关系,可得

$$dS \cos \theta = \frac{AD^2}{l^2}, \quad (9)$$

式中: $A$  为 CCD 像元的面积; $l$  为  $p'$  到  $O_c$  的距离,可表示为

$$l = \sqrt{(u - u_0)^2 dx^2 + (v - v_0)^2 dy^2 + f^2}. \quad (10)$$

将(5)~(6)、(8)~(10)式代入(7)式可得

$$\phi(u, v) = \frac{k\pi A f_r f^3 E(x, y)}{4F^2 [(u - u_0)^2 dx^2 + (v - v_0)^2 dy^2 + f^2]^{3/2}}. \quad (11)$$

当 CCD 相机工作在线性响应区间<sup>[14]</sup>且固定相机焦距与光圈时, $(u, v)$  像元处的灰度值  $G(u, v)$  可表示为

$$G(u, v) = a\phi(u, v) + b = a'E'(x, y) + b, \quad (12)$$

式中: $a, a', b$  均为常数; $E'(x, y) = \frac{f_r f^3 E(x, y)}{[(u - u_0)^2 dx^2 + (v - v_0)^2 dy^2 + f^2]^{3/2}}$ ,为映射后的照度值。

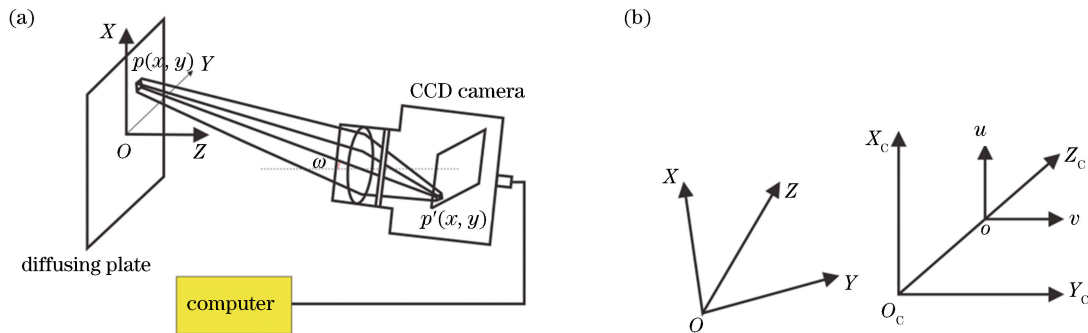


图 2 系统工作原理及坐标系转换图。(a)系统工作原理图;(b)坐标系转换图

Fig. 2 Working principle of measuring system and coordinate system conversion. (a) Working principle of measuring system; (b) coordinate system conversion

### 3 实验分析

#### 3.1 CCD 探测角度的选取

实验中,探测器几何方位的选取关系到 CCD 成像时光斑形状畸变的大小<sup>[15]</sup>。探测光斑尺寸对 CCD 的影响如图 3 所示。

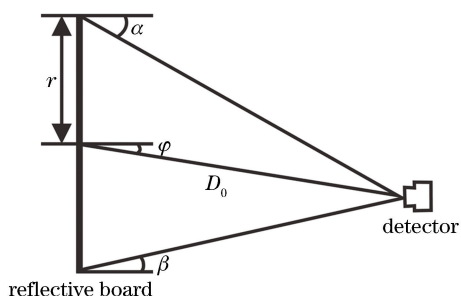


图 3 光斑尺寸对探测角度的影响

Fig. 3 Influence of spot size on detecting angle

光斑中心法线与探测器所成的角度为  $\varphi$ , 光斑直径两端的法线与探测器所成的角度分别为  $\alpha$ 、 $\beta$ , 如图 3 所示。设探测器与散射板上光斑中心的距离为  $D_0$ , 光斑半径为  $r$ , 则

$$\frac{1}{\tan(\alpha - \beta)} = \frac{1}{\tan \varphi} + \frac{2r}{D_0^2 \sin(2\varphi)} - \tan \varphi. \quad (13)$$

在实际测量中,为保证探测器视场始终未完全充满视场(即一直满足  $D > r$ ), 以及避免由光斑尺寸引起的测量误差,应尽量减小  $\varphi$  值。本实验中,选择  $\varphi$  为  $5^\circ$ 。

#### 3.2 标 定

使用散射测量仪(REFLET 180 s, Light Tec, 法国)对实验中使用的聚四氟乙烯板的漫散射特性进行测量。受测量仪器机械结构的限制,当探测角度与光源入射角度完全一致时,会对光源发射造成遮挡,导致相应探测角度上数据缺失,如图 4(a)所示。通过样条插值法处理可以得到光源在  $5^\circ$  方位角时材料完整的 BRDF 值,如图 4(b)所示。测量结果表明,漫射板的 BRDF 在探测器天顶角( $-90^\circ \sim 90^\circ$ )变化范围内的标准偏差约为 1.28%, 因此可以认为实验中使用的漫射板具有良好的朗伯特特性,同时得到(1)式中的  $f_r$  约为 0.289。

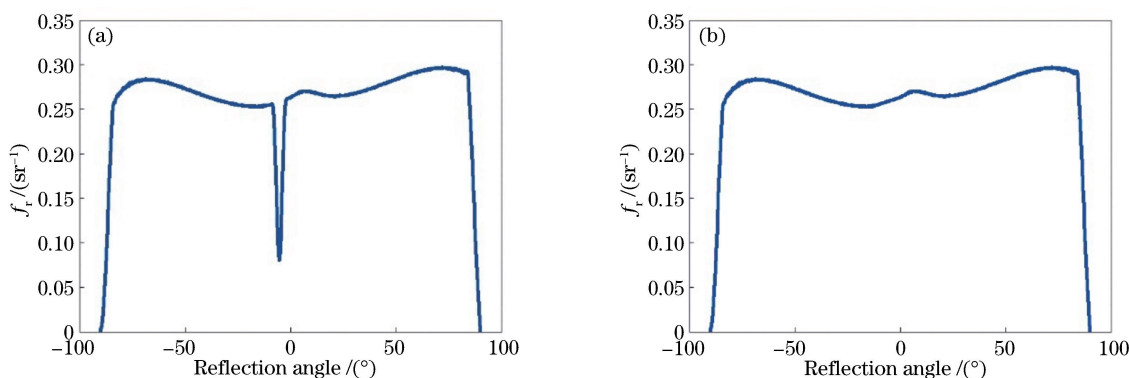


图 4 聚四氟乙烯 BRDF 的实验测量结果。(a)初始测量结果;(b)插值后的结果

Fig. 4 Experimental measurement results of BRDF for polytetrafluoroethylene plate.

(a) Initial measurement result; (b) interpolated result

使用张正友标定法<sup>[11]</sup>对摄像机的像素坐标系和漫射板的世界坐标系进行标定,得到转换关系中的内参阵、外参阵及畸变矩阵,所以像素坐标系与世界坐标系的转换关系可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.7012 \times 10^3 & 162.6720 & 2.9144 \times 10^5 \\ -92.7801 & 298.23 & 4.70 \times 10^5 \\ -0.2048 & -0.0071 & 1.0719 \times 10^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

为确定(12)式中 CCD 灰度值与照度值的对应关系,将光束经 20 倍扩束后照射在漫反射屏上。任

取光斑上的 15 个点,图像中心点 Q 的坐标为(640, 512),用照度测量计分别测量所选点处的照度,则对应点映射后的照度和灰度关系如表 1 所示。

上述映射关系如图 5 所示,可以看出,经映射后的照度值与灰度之间近似满足线性关系,拟合后可得到(12)式中的参数  $a' = 0.4596, b = -28.72$ 。

#### 3.3 微透镜匀化效果分析

实验中使用 793 nm 且功率可调的光纤耦合半导体激光器,调节功率至 7 W,所用微透镜参数如表 2 所示(透镜材料为石英玻璃),聚焦透镜焦距  $f_0$  分别为 300 mm 和 500 mm。由(4)式可知,微透镜与聚焦透镜间的距离  $d_0$  对目标面处的光照分布并没有影响。

表 1 对应点映射前后的照度与灰度关系

Table 1 Relationship between illuminance and gray scale before and after corresponding point mapping

Point No.	Image coordinate	Spatial coordinate / mm	Illumination before map $E / (10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2})$	Illumination after map $E' / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	Gray scale
1	(664,535)	(90,54)	1.2637	365.1803	141
2	(701,533)	(99,54)	1.2191	352.2325	135
3	(813,528)	(126,54)	1.2446	358.9836	138
4	(588,538)	(72,54)	0.9899	286.0310	104
5	(550,540)	(63,54)	0.8913	257.4279	90
6	(512,542)	(54,54)	0.7257	209.5057	67
7	(474,543)	(45,54)	0.5284	152.4238	43
8	(551,579)	(63,63)	0.8594	248.1773	87
9	(552,618)	(63,72)	0.9677	279.3102	92
10	(554,657)	(63,81)	0.8499	245.1651	84
11	(556,696)	(63,90)	0.7130	205.5152	66
12	(557,736)	(63,99)	0.6525	187.8865	53
13	(558,736)	(63,108)	0.4806	138.2259	32
14	(660,814)	(63,117)	0.3597	103.2955	20
15	(661,853)	(63,126)	0.2642	75.7499	10

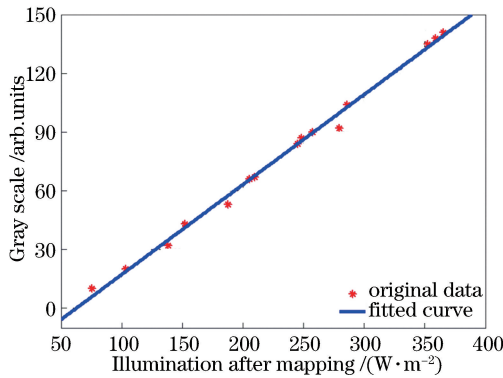


图 5 灰度值与映射后照度值的关系

Fig. 5 Gray scale as a function of illuminance after mapping

表 2 实验所用微透镜的参数

Table 2 Micro-lens parameters in experiment

Parameter	Value
Lens size / (mm×mm)	0.11×0.11
Radius of curvature /mm	0.2
Dimension / (mm×mm×mm)	36×24×1

为减小像差,  $d_0$  应尽量小, 实验中固定  $d_0$  为 25 mm。

匀化系统出射光斑直径  $D_{\text{out}}$  和干涉条纹间距  $\Delta x$  的理论值的计算公式分别为

$$\begin{cases} D_{\text{out}} = \frac{f_0}{f_p} d \\ \Delta x = \frac{f_0 \lambda}{d} \end{cases}, \quad (15)$$

式中:  $f_p$  为微透镜阵列的焦距。

为评价入射光束经系统匀化前后均匀性的变化, 定义变异系数  $c_v$  (目标面处光亮度的均方差  $\sigma$  与平均值  $\mu$  的比值) 来描述经不同聚焦透镜后目标面上光斑的均匀性:

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_i - \bar{E})^2}}{\bar{E}}, \quad (16)$$

式中:  $M$  为光斑的取样总点数;  $E_i$  为对应点处的光照度;  $\bar{E}$  为光场分布中照度的平均值。

利用散射成像法对激光经过微透镜匀化系统后的近场光斑空间分布进行测量, 图 6~7 为光束经过微透镜及焦距分别为 300 mm 和 500 mm 聚焦透镜后, 在探测面上的三维及一维光照度分布, 得到的光斑直径分别约为 75 mm 和 125 mm, 与理论计算结果相符。

由表 3 可知: 两种匀化情况下测量的光通量基本一致; 此外还可以看出, 聚焦透镜焦距为 500 mm

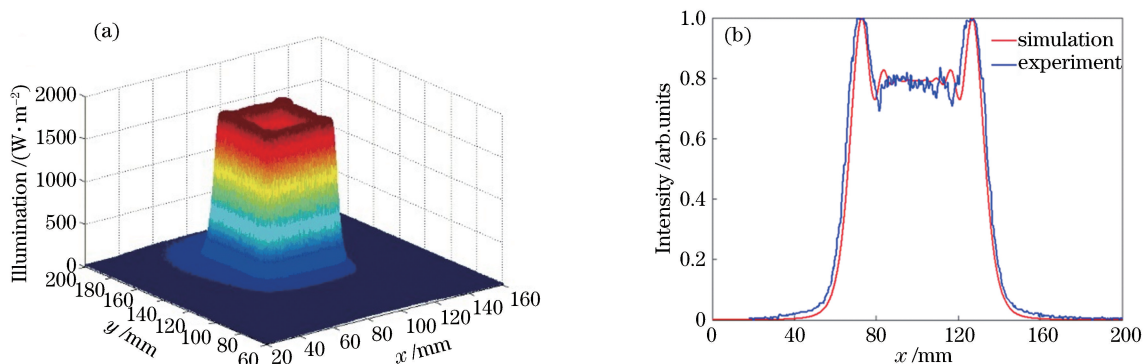


图 6 聚焦透镜焦距为 300 mm 时焦平面上光斑的照度分布。(a)三维图;(b)一维图

Fig. 6 Spot illuminance distributions in focal plane when focal length of lens is 300 mm. (a) Three-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

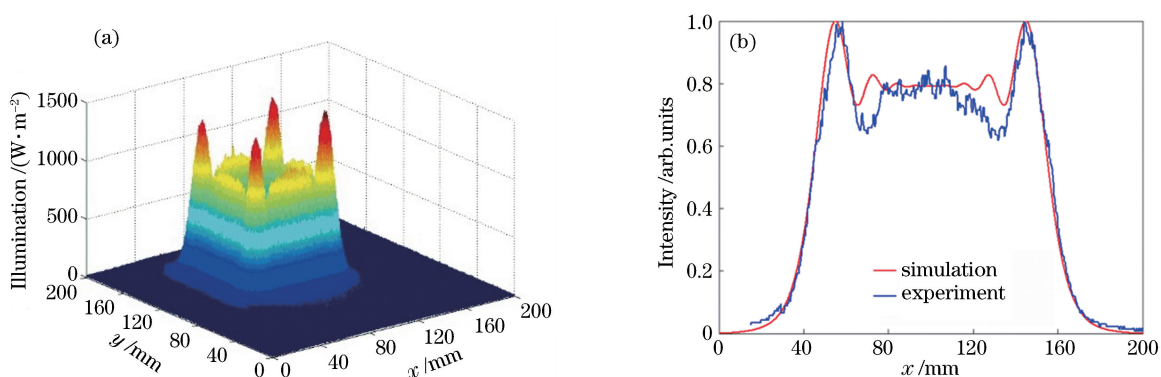


图 7 聚焦透镜焦距为 500 mm 时焦平面上光斑的照度分布。(a)三维图;(b)一维图

Fig. 7 Spot illuminance distributions in focal plane when focal length of lens is 500 mm. (a) Three-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

时,光斑在焦平面处的  $c_v$  值较大,原因是随着透镜焦距增大,干涉条纹间距增大,干涉条纹密度减小,最终导致焦面光斑的均匀性降低。

表 3 不同条件下焦平面上的光斑参数

Table 3 Spot parameters in focal plane under different conditions

Focal length of lens / mm	Luminous flux / W	Variation coefficient
300	4.89	0.214
500	4.93	0.283

实验中,漫反射板位于平移台上,沿着光轴方向调节漫反射板的位置,可以观察到光屏离焦时的光场分布情况。图 8~9 分别展示了光束经过 300 mm 和 500 mm 聚焦透镜后在离焦量为  $\pm 5$  mm 时探测面上光斑的照度分布(定义正方向光屏靠近聚焦透镜的方向)。图 10 为这两种情况下光斑  $c_v$  值的变化情况(虚线表示焦平面处的  $c_v$  值),可以看出,当观测位置轻微离焦时,获得的光斑均匀性对比焦点

处有所优化,从理论上可解释为经微透镜阵列后的干涉点阵被扩展为弥散光斑,导致焦斑的均匀性提高。因此,在实验中可以通过轻微离焦的方法降低干涉效应对匀化的影响。

## 4 结 论

基于散射成像法原理,建立了激光近场光斑照度与图像灰度关系的数学模型,当 CCD 相机工作于线性响应区间时,该数学模型可以较好地描述激光近场光斑照度的变化规律。在此基础上搭建了实验测量光路,并对激光经微透镜后的光斑照度分布进行了测试,测量结果表明,经不同焦距透镜匀化后的光通量基本一致,光斑大小与理论值相符,验证了散射成像测量方法的可行性,同时证明在实际应用中可通过轻微离焦的方法来降低微透镜匀化过程中干涉对光斑匀化效果的影响。随着 CCD 相机分辨率、动态范围、信噪比等性能的提高,基于 CCD 成像法的光斑参数测量方法将会得到更广泛的应用。

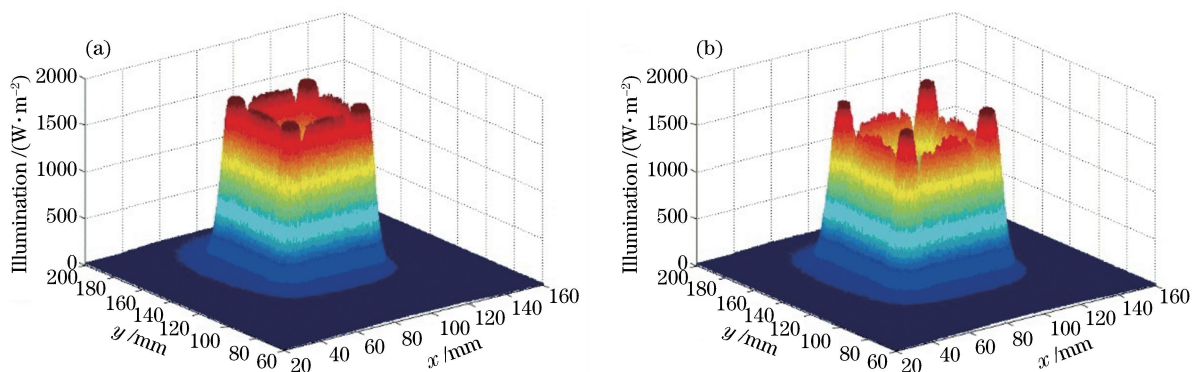


图 8 聚焦透镜焦距为 300 mm 时,不同离焦量下光斑的照度分布。(a)离焦量为 5 mm;(b)离焦量为 -5 mm

Fig. 8 Spot illuminance distributions in different defocus distances when focal length of lens is 300 mm.

(a) Defocus distance of 5 mm; (b) defocus distance of -5 mm

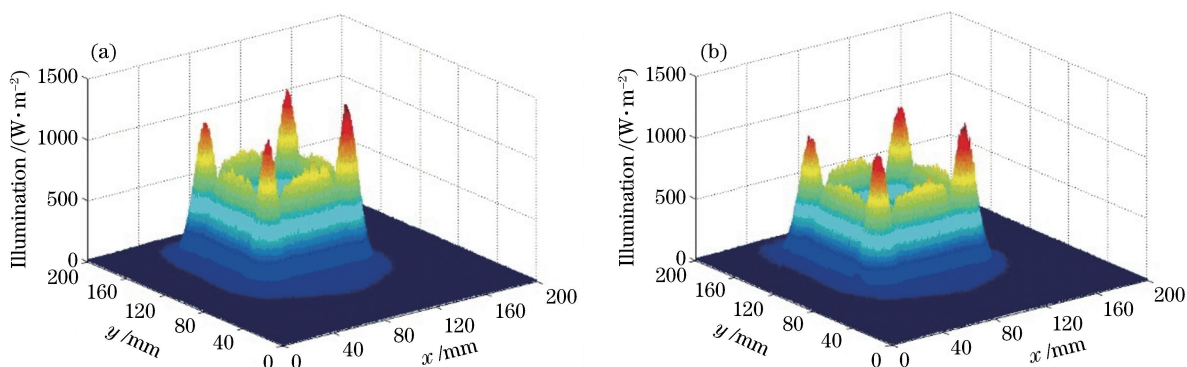


图 9 聚焦透镜焦距为 500 mm 时,不同离焦量下光斑的照度分布。(a)离焦量为 5 mm;(b)离焦量为 -5 mm

Fig. 9 Spot illuminance distributions in different defocus distances when focal length of lens is 500 mm.

(a) Defocus distance of 5 mm; (b) defocus distance of -5 mm

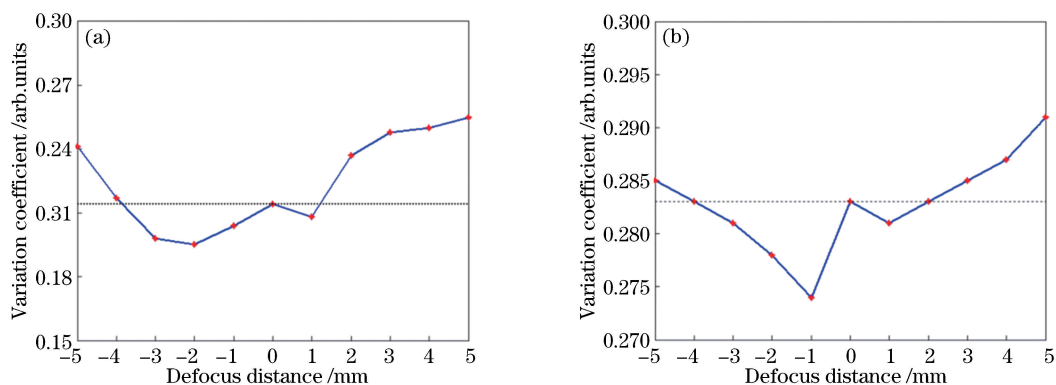


图 10 离焦距离变化时目标面上光斑照度的变异系数。(a)聚焦透镜焦距为 300 mm;(b)聚焦透镜焦距为 500 mm

Fig. 10 Variation coefficient of spot illuminance in target plane as a function of defocus distance for two cases.

(a) Focal length of lens is 300 mm; (b) focal length of lens is 500 mm

参 考 文 献

[1] Kim Y, Park J H, Min S W, *et al.* Wide-viewing-angle integral three-dimensional imaging system by curving a screen and a lens array[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(4): 546-552.  
 [2] Shuai C F, Yin S Y, Liu X M, *et al.* Homogenized

white light beam generated by red, green and blue lasers based on double fly-eye lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0314002.  
 帅词凤, 尹韶云, 刘显明, 等. 基于双复眼透镜的三基色激光合成均匀白光束[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0314002.

[3] Chen Z Y, Yin S Y, Sun X H, *et al.* Design of fly-

- eye lens with free-form surface used in parallel light exposure machine with large area and high uniformity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 0422011.
- 陈忠雨, 尹韶云, 孙秀辉, 等. 大面积高均匀度平行光曝光机用自由曲面复眼透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 0422011.
- [4] Hu J, Li X Y. Development of a portable high-power light-emitting diode phototherapy system for neonatal jaundice [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2012, 29(1): 89-92.
- 胡江, 李晓原. 便携式大功率 LED 黄疸光疗仪的研制[J]. *生物医学工程学杂志*, 2012, 29(1): 89-92.
- [5] Liu S, Zhang L Y, Sun G F, *et al.* Design of divergence solar simulator with large irradiated surface and high uniformity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0418005.
- 刘石, 张利云, 孙高飞, 等. 大光斑高均匀度发散式太阳模拟器设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 0418005.
- [6] Pang M, Rong J, Zhou S, *et al.* Array detector for high energy laser based on diffuse transmission sampling [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 013105.
- [7] Roundy C B. Instrumentation for laser beam profile measurement [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1625: 318-329.
- [8] Zhang Y X, Wang Y P, Wang Y. Development and application of far-field laser spot measurement system based on CCD [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(4): 11-13, 52.
- 张颖新, 王云萍, 王禹. 基于 CCD 的远场激光光斑测量系统开发与应用[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(4): 11-13, 52.
- [9] Zhang S D, Sun H H. High precision method of long-ranged laser spot position measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0708003.
- 张少迪, 孙宏海. 远距离激光光斑位置高精度测量方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0708003.
- [10] Wang F, Xu Z D, Ji Y F, *et al.* Measurement system for laser intensity distribution based on scanning diffuse reflection imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2219-2222.
- 王飞, 徐作冬, 戢运峰, 等. 采用扫描式漫反射成像法的激光强度分布测量装置[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2219-2222.
- [11] Pang M, Yuan X W, Gao X Y. Measurement system of laser intensity distribution based on diffused transmission imaging [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2839-2842.
- 庞淼, 袁学文, 高学燕. 漫透射成像法激光强度时空分布测量装置[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 2839-2842.
- [12] Li Y N, Tang L T, Xie X Y, *et al.* Measuring far-field instantaneous facula intensity space-time distribution of solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0817002.
- 李艳娜, 唐力铁, 谢翔云, 等. 固体激光远场瞬时光斑时空分布测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0817002.
- [13] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] Qin L, Dong L L, Xu W H, *et al.* Method for conversion calibration between CCD image gray value and illumination [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3): 639-644.
- 秦莉, 董丽丽, 许文海, 等. CCD 图像灰度与照度的转换标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(3): 639-644.
- [15] Chen H Y, Zhang L M, Yang B Y, *et al.* Diffuser reflection method for measuring power/energy of far-field laser spot [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1441-1445.
- 陈洪耀, 张黎明, 杨本永, 等. 漫射板反射式大直径激光功率-能量测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(10): 1441-1445.