

# CO<sub>2</sub> 激光功率密度分布测量的数据处理

李俊昌

(昆明工学院激光应用研究室, 昆明 650093)

**提要** 本文利用计算机图像处理技术,从一实际采样光斑出发,介绍取样数据的处理过程及最终获得激光功率密度分布。

**关键词** 激光功率密度测量,数据处理

## Data processing of CO<sub>2</sub> laser power density distribution measurement

*Li Junchang*

(Research Section of Laser Application, Kunming Institute of Technology, Kunming 650093)

**Abstract** In References [1], we have presented a method to measure the power density distribution of continuous output high power laser by using a moving slit. However, only with the proper experimental conclusion. In this paper, we introduce the experimental data processing process by using the computer graphic processing technique on an experimental collected light spot.

**Key words** measurement of laser power density, data processing

## 1 引 言

材料表面的激光处理以及大功率激光的应用研究中,激光功率密度分布的测量是一项重要技术。在文献[1]中,我们从理论上详细讨论了平动狭缝对激光采样的物理机理,导出了采样取得的热图像与作用激光功率密度的数学关系。为利用采样图像求出激光的功率密度分布,在通常情况下可以认为作为记录介质用的探测纸面的灰度值与纸面吸收的光能成正比,因此,根据采样图案的灰度分布即可近似确定作用激光的功率密度分布。但是,在实际测量中,由于种种原因,例如记录介质表面的不均匀以及灰度测量时的量化误差等,不可避免地会对测量结果引入噪声或失真。因此,只有合理地对测试信息进行处理,才能较正确地获得待测激光的功率密度分布。

本文将从一个实际采样光斑出发,利用与计算机连用的图形扫描仪对图像取样,介绍取样数据的处理过程及最终获得的激光功率密度分布。

## 2 热敏纸及常用复印白纸的热敏特性

选择一种打印用热敏纸,我们曾对大功率激光的功率密度进行过成功的测量<sup>[2]</sup>。由于这种热敏纸是我们对复印白纸热敏特性进行相对定标的基础,因此,在叙述测试数据的处理过程之前,先对它们的热敏特性作简要介绍。

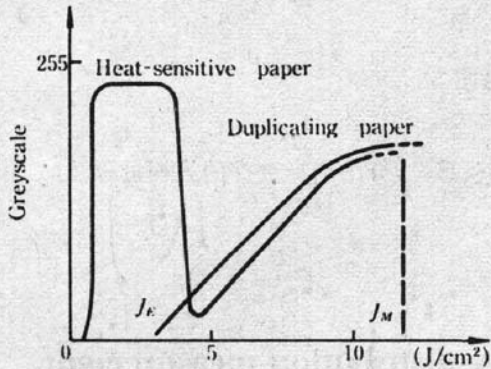


Fig. 1 Heat-sensitivity curve of heat-sensitive paper and duplicating paper

在图 1 中,我们在同一尺度下绘出了已经经过正确定标的热敏纸<sup>[2]</sup>以及一种复印用白纸的“灰度—能量密度”之间的关系曲线。由图可见,热敏纸在吸收光能密度介于 0.8 与 4.5 J/cm<sup>2</sup> 时纸面上呈现一数值几乎恒定的高灰度区,而当吸收的光能密度大于 5 J/cm<sup>2</sup> 但小于 10.7 J/cm<sup>2</sup> 时,纸面灰度近似呈线性变化。相比较而言,复印用白纸的热敏感性略差,热敏复盖范围较窄,由于灰度反应的阈值(图上约 3 J/cm<sup>2</sup>)较高,探测激光时容易将光束的低功率密度分布区遗漏掉。但是,由于复印白纸材料获取容易,数据处理简单,并且,只要找到灰度反应阈值较低且热敏复盖范围较宽的材料,我们所讨论的数据处理方法就不失实际意义。

只要找到灰度反应阈值较低且热敏复盖范围较宽的材料,我们所讨论的数据处理方法就不失实际意义。

## 3 图像取样及其数据处理

图 2 为我们利用复印白纸及热敏纸分别采样获得的同一光束在相同等效作用时间<sup>[1]</sup>下的光斑图样。比较两幅图样可以发现,除了热敏纸采样图案(图 2(b))在光斑边沿处有一几乎灰度均匀的黑带外,两幅图样的灰度分布具有完全相似的形状。

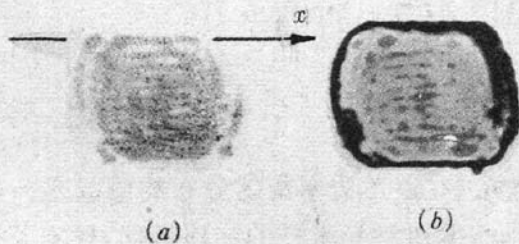


Fig. 2 Sampled light spot on heat-sensitive paper and duplicating paper

$P = 900 \text{ W}, V = 40 \text{ mm/s}, a = 1 \text{ mm}$

利用图形扫描仪,我们很容易求得复印白纸采样图案(图 2(a))上 0~255 个灰度等级的量化信息。根据未经处理的灰度量值,图 3(a) 绘出了该采样图案的灰度分布。显而易见,由于直接取样数据中含有大量的噪声及失真,我们很难由该图形成待测光束功率密度分布的清晰概念。对测试信息进行正确处理,是获得激光功率密度分布所必须进行的工作。

### 3.1 直接取样图像的失真分析

正确分析引起图像失真的原因,是合理选择图像处理手段的关键。研究图 2(a) 及图 3(a) 可以发现有几项必须进行的工作:

3.1.1 在远离高灰度聚集区的离散斑痕(例如图 3“\*”处)通常是探测纸面的局部灰度不均匀(如纸面预先就存在的斑迹)所引起的结果。可以作为噪声直接清除。

3.1.2 纸面在激光照射下的灰度反应存在一个起始的吸收能量的阈值(参见图 1),并且,扫描仪在取样时还存在量化误差,从而使功率密度较小的区域在取样图像上不能反映。应

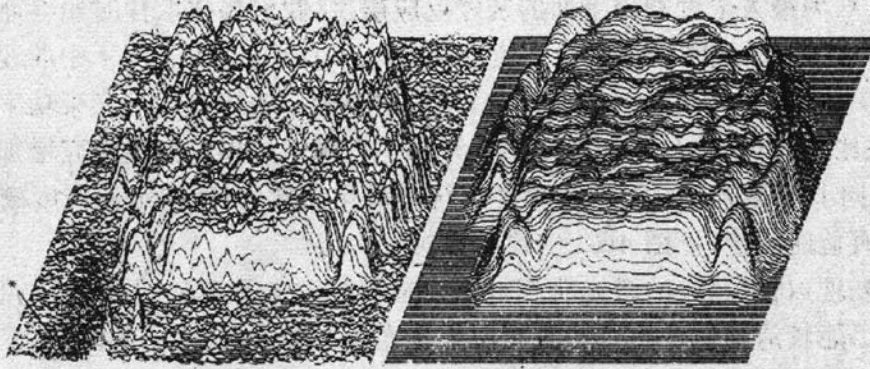


Fig. 3 Shape comparison of greyscale distribution of light spot before graph processing with that after graph processing

进行适当的补偿。

3.1.3 根据对激光模式的研究可知,图像上灰度变化的高频成份不可能与某种振荡模式相对应,它事实上是纸面的背景噪声(形成这些噪声的原因可以归结为纸张纤维或颗粒有一定的尺寸及这些纤维或颗粒受热后灰度反应的各向异性)。有必要进行高频滤波处理。

3.1.4 应建立图像处理后的灰度—功率密度之间的数值关系,以便实际应用。

### 3.2 取样数据的处理

根据以上分析,为获得正确的测试结果,我们对直接取样数据进行了相应的处理措施。以下我们以图 2 标记的轴向数据(图 4(a)中曲线  $a_1$ )处理为例,跟踪图像处理过程。

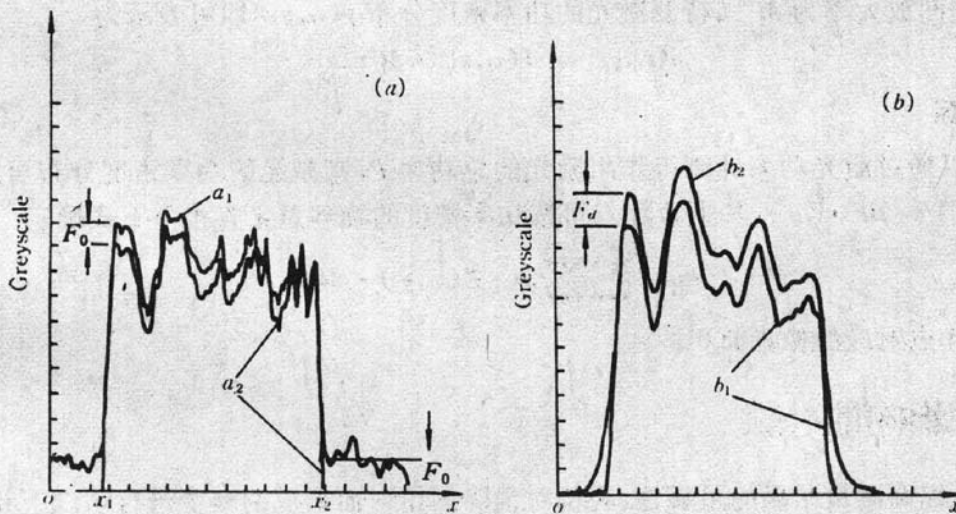


Fig. 4 Data handling process of graph

3.2.1 利用图像的灰度直方图<sup>[3]</sup>确定图像二值化的阈值,然后采用二值图像的边界收缩与膨胀技术<sup>[3]</sup>先初步确定光斑边界(图 4(a)中  $x_1, x_2$ )。

3.2.2 以边界外的数据平均值  $F_0$  作为背景灰度。将图像向下平移  $F_0$ ,消除背景灰度对测试结果的影响(图 4(a)中曲线  $a_2$ )。

3.2.3 以二值图像为模板,在光斑内利用移动平均法滤除图像的高频噪声,然后根据图 1 中的曲线灰度值进行非线性补偿(图 4(b)中曲线  $b_1$ )。

3.2.4 设二值图像的阈值为  $F_B$ ,整幅图像的极大值为  $F_M$ ,它们所对应的能量密度值分别

为  $J_E$  及  $J_M$  (注: 为最大限度利用纸面的灰度反应层次, 我们每次取样时始终通过控制等效作用时间<sup>[1]</sup>, 让纸面灰度反应刚好出现最大值点, 这样,  $J_E$  及  $J_M$  对应于图 1 中曲线两个端点的横坐标。本例中  $J_E \approx 3 \text{ J/cm}^2$ ,  $J_M \approx 12 \text{ J/cm}^2$ )。为对初步确定的边界内外光束功率密度分布作近似补偿, 我们按比例式  $(F_i + F_M) : (F_i + F_E) = J_M : J_E$  确定边界以内图像应增加的灰度补偿量  $F_i$ , 将整幅图像向上平移  $F_i$ 。最后, 对边界外进行平滑化处理, 以便对纸面灰度阈值之下不能探测的区域进行有益的补偿 (见图 4(b) 中的曲线  $b_2$ )。

经过上述处理, 我们获得的激光功率密度分布形貌示于图 3(b)。与图 3(a) 比较可以发现, 处理后的数据已能较清晰地给出待测激光功率密度分布的信息。余下的问题, 是建立处理后数据与功率密度之间的量值转化关系。

## 4 测试数据的定标

确定光斑的灰度分布与待测激光功率密度分布之间的关系可以采取绝对定标及相对定标两种方式, 以下分别进行讨论。

### 4.1 绝对定标

设取样数据构成  $N \times N$  方阵, 经处理后的灰度分布为  $F(x_i, y_j)$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N$ )。若灰度分布的极大值为  $F_{\max} = F_M + F_i$ , 则光斑的能量密度分布  $J(x_i, y_j)$  为

$$J(x_i, y_j) = \frac{F(x_i, y_j)}{F_{\max}} \cdot J_M$$

根据文献[1], 若采样时狭缝宽度为  $a$ , 狭缝平移速度为  $v$  以及探测纸面上的光场相对于狭缝平面上光场的横向放大率为  $M$ <sup>[1]</sup>, 待测激光的功率密度分布  $p(x_i, y_j)$  即可表示为

$$p(x_i, y_j) = J(x_i, y_j) \cdot M^2 v / a$$

### 4.2 相对定标

如果可以通过激光功率计测得作用激光的总功率  $P$ , 则激光的功率密度分布可以简单地表示为  $p(x_i, y_j) = DF(x_i, y_j)$ , 其中常数  $D$  可按功率密度的物理意义直接由下式确定

$$P = \sum_i^N \sum_j^N D \cdot F(x_i, y_j) \cdot \Delta S$$

$\Delta S$  为一个采样点对应的像素面积。

## 5 对衍射影响的补偿

为进一步提高测量结果的可靠性, 我们对消除因衍射而形成的畸变进行了以下补偿研究。

文献[1]中, 利用标量衍射理论我们求得热敏材料上吸收的光能  $J(x, y)$  与狭缝宽度  $a$ 、狭缝沿  $x$  轴向平移速度  $v$  等参数之间的关系为

$$J(x, y) = A + B + C$$

其中

$$A E_0^2 \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) \frac{a}{M^2 v};$$

$$B = \frac{\lambda d l}{\pi^2 M^3 v} \left( \frac{\partial E_0}{\partial x} \Big|_{x,y} \right)^2;$$

$$C = \frac{-\lambda^2 d^2}{2\pi^3 M^4 a v} \left( \frac{\partial E_0}{\partial x} \Big|_{x,y} \right)^2 \sin \left( \frac{2\pi a}{\lambda d} M l \right) \cos \left( \frac{2\pi a}{\lambda d} x \right)$$

式中  $E_0^2 \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right)$  为激光在探测平面  $xy$  的功率密度;  $M$  为  $xy$  平面相对于狭缝平面的光场横向放

大率;  $\lambda$  为激光波长;  $d$  为狭缝平面到  $xy$  平面间的距离;  $l$  为一次采样过程中狭缝平移的半宽度。

分析  $J(x, y)$  的表达式可知, 在通常情况下满足  $B/|C|_{\max} = 2\pi Mal/\lambda d \gg 1$ 。因此, 我们可以略弃最后一项  $C$  的影响, 而将待测激光的功率密度表示为

$$E_0^2\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) = \frac{M^2 v J(x, y)}{a} - \frac{\lambda d l}{M a \pi^2} \left( \frac{\partial E}{\partial x} \Big|_{x, y} \right)^2$$

上式中, 第二项相较第一项通常仍然较小, 因此, 我们可以先将它略弃, 求出  $E_0$  与  $J(x, y)$  之间的关系, 然后将第二项中的偏微分由差分代替。于是可将上式重新写为

$$E_0^2\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) = \frac{M^2 v J(x, y)}{a} - \frac{\lambda d l M v}{a^2 \pi^2} \left[ \frac{\sqrt{J(x + \Delta x, y)} - \sqrt{J(x, y)}}{\Delta x} \right]^2$$

对上式进行计算时,  $\Delta x$  可以直接选用采样间距值。利用这个表达式, 即可对光波的衍射作用进行较好的补偿。

### 参 考 文 献

- 1 李俊昌, 中国激光, 待发表
- 2 Merlin J., Li Junchang *et al.*, *J. of Opt.*, (Paris), 21, 51~61(1990)
- 3 [日]田村秀行等著, 赫荣威等编译, 计算机图像处理技术, 北京师范大学出版社, 1988年9月