

# 大功率激光功率密度分布的简易测试

李俊昌

(昆明工学院, 昆明 650093)

**提要** 本文提出一种测量连续输出大功率红外激光功率密度分布的实用方法,并详细分析其物理机理。

**关键词** 红外激光,功率密度分布,检测

## Simple measurement of power density distribution of high power laser

*Li Junchang*

(Kunming Institute of Technology, Kunming 650093)

**Abstract** In this article, we present a practical method which can be used to measure the density distribution of CW mechanism are analysed in detail.

**Key words** infrared laser, power density distribution, detection

## 1 引言

近年来,大功率激光在工业生产及科学研究中获得日益广泛的应用。但是,对于大功率激光,尤其是连续输出功率在数千瓦以上,以 $\text{CO}_2$ 气体激光为代表的红外激光,其光束功率密度分布的测量一直是一个棘手的问题。国内外目前虽然存在一些测试装置,但由于采用了昂贵的红外传感器件,高昂的装置价格通常不能为实际使用部门所承受。因此,研究一种简易实用的测量方法,对于大功率激光的应用及研究均具有重要的意义。

利用热敏纸作为探测材料,我们曾经提出过一种测量方法<sup>[1]</sup>,只要对热敏纸的红外感光特性进行正确的标定,便可以非常直观和简便地测量出作用激光的功率密度分布。但是,这种方法要求能够准确控制热敏纸对激光采样的时间,其控制精度通常要达到ms数量级,这对于国内流行的工业用 $\text{CO}_2$ 激光设备来说,是一个难题。为解决这个问题,我们提出利用平动狭缝采样的方法,实现了对大功率激光功率密度分布的直接测量。本文将讨论狭缝采样的物理机理,并给出实验结论。

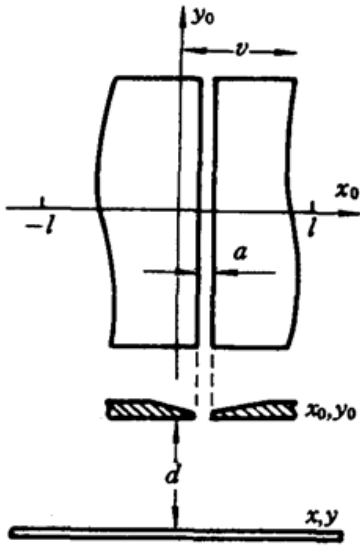


Fig. 1 Schematic drawing of the slit sampling

## 2 测量方法简介

设  $x_0 y_0$  为与光束垂直的采样平面(见图 1), 在该平面上放置宽度为  $a$  的狭缝, 使狭缝平行于  $y_0$  轴, 并能沿  $x_0$  方向往复运动; 在狭缝平面后距离  $d$  处为热敏探测平面  $xy$ . 在激光照射下以速度  $v$  沿  $x_0$  方向平移狭缝, 将能在探测材料上获得能量密度为  $J(x, y)$  的图样. 我们将证明, 作用激光在  $xy$  平面的功率密度为

$$P\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) = J(x, y) M^2 v / a$$

式中  $P(x_0, y_0)$  为作用激光在采样平面的功率密度;  $M = (R + d) / R$ , 为光场的横向放大率;  $R$  为在  $x_0 y_0$  平面上激光束的波面曲率半径(对于未经聚焦的光束,

由于  $R$  通长甚大, 可令  $M \approx 1$ , 否则可以认为曲率中心在激光束光腰中心处)。

## 3 理论依据

### 3.1 几何光学近似

为确定采样过程中狭缝宽度、平移速度与等效采样时间之间的简明关系, 并对本测量方法的物理机理有一个明晰的概念, 我们暂且忽略光的衍射作用, 利用光传播的几何光学近似进行讨论。

沿用图 1 所设参数, 若  $t = 0$  时刻狭缝中央在  $x_0 = -l$  处, 则以速率  $v$  沿  $x_0$  正向移动的狭缝作用可以表达为  $x_0 y_0$  平面具有一个随时间变化的复振幅透过率:

$$\text{rect}\left(\frac{x_0 - vt + l}{a}\right)$$

这样, 激光光波在穿过采样平面时的复振幅可以表示为

$$U_0(x_0, y_0, t) = \text{rect}\left(\frac{x_0 - vt + l}{a}\right) E_0(x_0, y_0) \exp\left[\frac{jk}{2R}(x_0^2 + y_0^2)\right] \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为激光波长,  $E_0(x_0, y_0)$  为实函数, 而  $E_0^2(x_0, y_0)$  即为待测激光的功率密度。

利用光传播的几何光学近似, 并忽略光波由  $x_0 y_0$  面传播到  $xy$  平面的时间, 我们得到探测平面  $xy$  上光波的复振幅:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{M} \text{rect}\left(\frac{x - Mvt + Ml}{Ma}\right) E_0\left(\frac{x}{M}, \frac{y}{M}\right) \exp\left[\frac{jk}{2(R+d)}(x^2 + y^2)\right] \quad (2)$$

由于探测材料记录的是激光照射下吸收的能量密度分布, 因此, 对于狭缝从  $x_0 = -l$  到  $x_0 = l$  的一次采样过程,  $xy$  平面上所接收的能量密度可以表为

$$J(x, y) = \int_0^{2l/v} dt U(x, y, t) U^*(x, y, t) \quad (3)$$

将有关各量代入上式, 并利用代换  $\xi = (x - Mvt + Ml) / Ma$  得到

$$J(x, y) = E_0^2 \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) \frac{a}{M^2 v} \int_{\frac{z-Ml}{Ma}}^{\frac{z+Ml}{Ma}} \text{rect}(\xi) d\xi \quad (4)$$

根据  $\text{rect}(\xi)$  函数的性质, 我们可以得出, 只要探测位置的  $x$  坐标满足  $Ma/2 - Ml \leq x \leq Ml - Ma/2$ , (4) 式中积分值为 1, 即

$$J(x, y) = E_0^2 \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) \frac{a}{M^2 v} \quad (5)$$

以上结论表明, 利用狭缝进行采样, 探测平面受激光的照射作用将与一束功率密度分布为  $E_0^2(x/M, y/M)$  的激光直接照射  $\Delta t = a/M^2 v$  时间后的作用等价。对于给定的探测材料,  $J(x, y)$  是已知量, 于是, 适当选择  $M$ 、 $v$  以及  $a$  的数值, 即可求得作用光束的功率密度

$$P \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) = J(x, y) M^2 v / a \quad (6)$$

### 3.2 衍射对测量结果的影响

利用光传播的几何光学近似虽然可以求得各物理量之间的简明关系, 但是其结果是不精确的。为正确处理采样获得的信息, 得出较满意的测量值, 我们利用标量衍射理论<sup>[2]</sup>进行较严格的计算。

仍然沿用已定义的坐标以及忽略光波由  $x_0 y_0$  面传播到  $xy$  面的时间, 根据衍射的非涅耳近似,  $t$  时刻在探测平面上光波的复振幅应写为

$$U(x, y, t) = \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \iint_{-\infty}^{\infty} E_0(x_0, y_0) \exp \left[ \frac{jk}{2R} (x_0^2 + y_0^2) \right] \text{rect} \left( \frac{x_0 - vt + l}{a} \right) \cdot \exp \left\{ \frac{jk}{2d} [(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2] \right\} dx_0 dy_0 \quad (7)$$

将上式代入(3)式, 狭缝由  $x_0 = -l$  平动到  $x_0 = l$  的一次采样后, 在探测平面上接收的能量分布为

$$J(x, y) = \int_0^{2l/v} dt \frac{1}{M^4 \lambda^2 d^2} \left| \iint_{-\infty}^{\infty} E_0 \left( \frac{x'}{M}, \frac{y'}{M} \right) \text{rect} \left( \frac{x' - Mvt + Ml}{Ma} \right) \cdot \exp \left\{ \frac{jk}{2Md} [(x' - x)^2 + (y' - y)^2] \right\} dx' dy' \right|^2 \quad (8)$$

考查上式可知, 在通常情况下绝对值号内  $E_0(x'/M, y'/M)$  的空间变化率甚小于复相位因子的空间变化率, 绝对值号内积分的数值将主要取决于函数  $E_0(x'/M, y'/M)$  在  $(x, y)$  点邻域的数值<sup>[3]</sup>。因此, 为便于计算, 可以将  $E_0(x'/M, y'/M)$  在  $(x, y)$  点的邻域按台劳级数展开, 并仅取前面三项, 即在(8)式中令

$$E_0 \left( \frac{x'}{M}, \frac{y'}{M} \right) = E_0 \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) + \frac{\partial E_0}{\partial x} \Big|_{x,y} (x' - x) + \frac{\partial E_0}{\partial y} \Big|_{x,y} (y' - y)$$

经过运算整理, 并略弃小量, 最终可将(8)式表示为

$$J(x, y) = A + B + C \quad (9)$$

其中

$$A = E_0^2 \left( \frac{x}{M}, \frac{y}{M} \right) \cdot \Phi$$

$$\Phi = \frac{1}{M^2} \int_0^{2l/v} dt \left| \int_{(Mvt-Ml+Ma/2-z)/\sqrt{M\lambda d}}^{(Mvt-Ml-Ma/2-z)/\sqrt{M\lambda d}} \exp(j\pi\beta^2) d\beta \right|^2$$

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

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

利用数值分析可以发现,  $A$  表达式中的  $\Phi$  具有图 2 所示的形式, 在  $-Ml + Ma/2 \leq x \leq Ml - Ma/2$  的区域,  $\Phi$  几乎为常数, 并且其数值为  $a/M^2v$ 。将该结论与 (5) 式相对照, 我们可以认为  $A$  代表了与待测功率密度成正比的无畸变信息。因此, 其余两项为由于光的衍射所引入的失真量。此外, 由  $B$ 、 $C$  的表达式可知, 测试信息的失真与被测试信息的空间变化率有关, 并且, 尽可能减小狭缝平面到探测平面间的距离  $d$ , 将能得到失真很小的测量结果。

为对衍射影响的大小有一个直观的概念, 我们假设  $E_0^2(x_0, y_0) = \exp\left(-2 \frac{x_0^2 + y_0^2}{\omega^2}\right) \cdot \frac{x_0^2 + y_0^2}{\omega^2}$  (即准几何光学近似下的  $TEM_{10}$  模), 并分别利用 (5) 式和 (9) 式进行了计算, 其结果由曲线表示如图 3。由图可见, 在原点附近, 由于衍射作用, 其测量将为非零值。但是我们也看到, 在绝大部分区域, 两种结果已很难区分。因此, 我们可以根据对测量结果的不同精度要求, 选择 (5) 式或 (9) 式来处理采样获得的信息。事实上, 在大多数情况利用 (5) 式已能得到足够满意的结果。

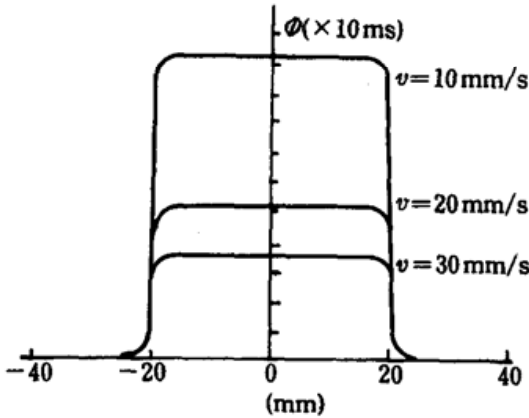


Fig. 2 Numerical analyses of  $\Phi$ .  $l = 20$  mm,  $a = 1$  mm,  $m = 1$ ,  $d = 100$  mm

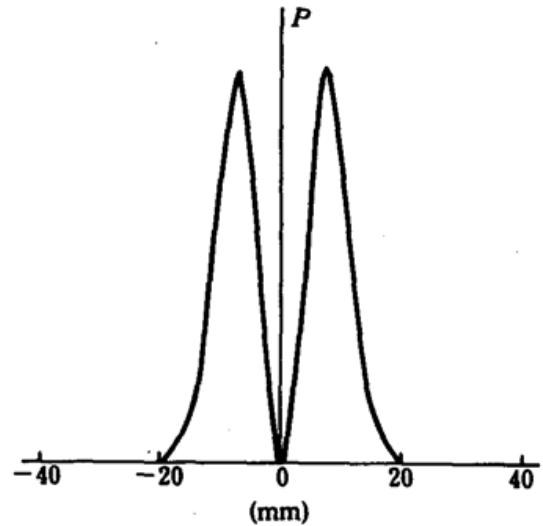


Fig. 3 Effect of diffraction on the measured results.  $\omega = 10$  mm,  $a = 1$  mm,  $v = 10$  mm/s,  $l = 20$  mm,  $d = 100$  mm

#### 4 减小测量误差的简单讨论及测试实例

根据以上对 (9) 式的讨论, 为减小衍射对测试结果的影响, 应尽可能减小狭缝平面到热敏探测平面间的距离  $d$ 。当  $d$  足够小时, 几何光学近似成立 (见文献 [2] P83 ~ 84), 我们可以利用 (6) 式来对测试误差作简明分析。

设采样平面相对于狭缝平面光场的横向放大率  $M$  可以准确测量 (当光束未通过聚焦系统时, 事实上  $M$  可视为 1), 功率密度  $P$  的绝对误差可以表为

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial J} \right| \Delta J + \left| \frac{\partial P}{\partial v} \right| \Delta v + \left| \frac{\partial P}{\partial a} \right| \Delta a$$

$$\text{即} \quad \Delta P(x, y) = \frac{M^2}{a} \left[ v \Delta J(x, y) + J(x, y) \Delta v + \frac{v J(x, y)}{a} \Delta a \right] \quad (10)$$

由此可见, 对于一个给定的测试系统, 增大狭缝的宽度及减小平移速度将能得到较小的测量误差。换言之, 增加等效作用时间  $\Delta t$  可以获得较好的测量结果。但是, 热敏纸或探测材料

能承受的光辐照能力是有限的,  $\Delta t$  的增加会受到一定的限制。因此, 主要应从减小  $\Delta J(x, y)$ 、 $\Delta v$  以及  $\Delta a$  的方向着手进行测试系统的设计工作。为此, 我们采取了以下措施: (1). 利用与计算机联用的彩色扫描仪读取采样图案上的座标及色彩信息, 较好地保证了  $J(x, y)$  的测量精度及测试的可重复性; (2). 根据误差的要求, 利用步距角较小的步进电机作为狭缝平动的动力源, 使狭缝平动速度的设置及精度得到了较好的控制; (3). 选择精度在 0.01 mm 的微动螺旋来控制及读取狭缝实际宽度。

根据以上措施, 我们设计了采样狭缝, 并进行了一系列测试工作。作为实例, 我们给出实验室内 HJ-3 型千瓦  $\text{CO}_2$  激光器在输出功率为 1400 W、输出窗口前约 2.1 m 处由热敏纸采样获得的图样(图 4(a)), 以及所求得的沿图上所示  $x, y$  方向的功率密度分布(图 4(b)、(c))。

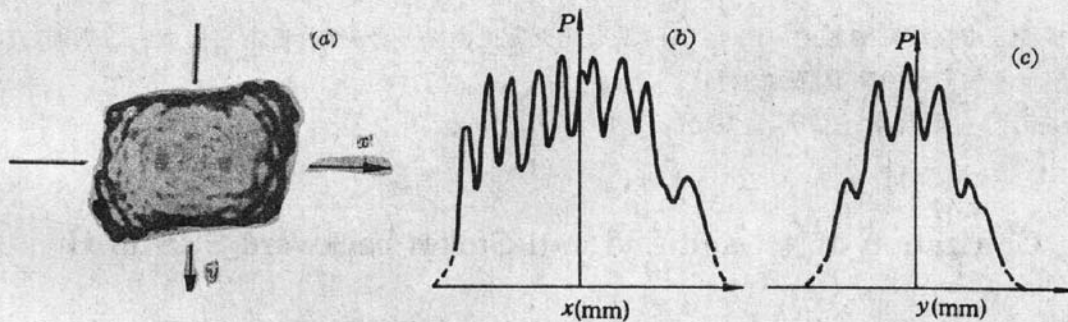


Fig. 4 Sampling spot of HJ-3-kW  $\text{CO}_2$  laser with 1400 W output (a) and the distribution of the laser beam intensity along the axis pointed in the figure (b,c)

应指出, 本文测量方法是基于一次采样过程中激光输出基本稳定这一假设。此外, 为获得较好的测量值, 应对衍射的影响采取补偿措施, 并借助于一些计算机图象处理技术。

### 参 考 文 献

- 1 J. Merlin, Li Junchang *et al.*, *J. of Opt.*, **21**, 51~61(1990)
- 2 J. W. 顾德门 著, 詹达三等译, 傅里叶光学导论, 科学出版社, 北京, 1976, 60
- 3 Li Junchang, J. Merlin *et al.*, *Revue de Physique Appliquée*, **21**, 425~433(1986)