

# 激光光束传输特性分析

## ——等效波面曲率半径法

巩马理

(西南技术物理研究所新激光技术实验室, 成都, 610041)

**摘要:** 本文提出了利用光束等效波面曲率半径, 并结合束宽及远场发散角来测量分析激光光束传输特性的方法, 能以较高的精度确定激光光束的束腰位置  $z_0$ , 束腰处的束宽  $D_0$  及激光光束质量传输因子  $M^2$ 。这是一种可用于连续, 重复频率脉冲及单脉冲激光光束传输特性的分析测量方法。文中还给出了实现这一方法的具体测量方案。

**关键词:** 激光光束 光束传输 光束分析与测量

### Laser beam analysis——the beam effective radius approach

Gong Mali

(Advanced Laser Technology Laboratory, Southwest Institute of Technical Physics)

**Abstract:** A laser beam analysis method is proposed by using the beam effective radius  $R(z)$  with the measurements of beam width  $d(z)$  and beam divergence angle  $\theta$ . The location of the beam  $z_0$  and the times-diffraction-limit-factor  $M^2$  can be determined with relative high accuracy. The method is usable for CW laser beam, repetition pulsed laser beam and single pulsed laser beam. Two practical apparatus designs are also proposed.

**Key words:** laser beam beam propagation beam analysis

## 一、引言

激光光束参数分析, 特别是光束传输特性的测量分析, 对于科研、生产及实际应用都意义重大, 是近年来激光基本特性研究的重要方向, 也是国际标准化组织(ISO)十分重视的内容。在近几年的历届 ISO/TC/SC9(光学及光学仪——激光器及激光有关设备)会议上, 激光光束束宽, 发散角及传输因子, 都是参加人数最多, 花费时间最大和争议最多的内容。有关标准草案几易数稿, 多次修改、补充。作者参加了今年6月的第七届 ISO/TC172/SC9 会议。会议新形成的激光光束参数标准化文件(草案), 尽管综合吸收了各国的意见, 但仍然存在不少待解决的

问题。尤其是光束束腰的测定,是激光光束参数测量中最难的。现有方法一般都是基于对光束束宽的多点测量,如三点法,移动测量法等。对束宽的测量则有 CCD 面阵法,变孔径法,移动刀口法及移动狭缝法等。三点法的测量误差较大,移动测量法则不能测量单脉冲激光光束。况且,除 CCD 面阵法而外,其它束宽测量方法,只能适于  $M^2 \leq 4$  的测量范围<sup>[1]</sup>。为了较精确地测量束腰  $z_0$ 。本次会议上的 ISO/TC172/SC9/WGIN56 文件,提出在光束瑞利区  $Z_R$  范围作至少 10 个不同位置的束宽测量,根据所得数据进行曲线拟合,得出  $z_0$ 。在会议最终形成的意见中,又要求在束腰两侧的瑞利区内,分别作至少 5 个不同位置的束宽测量。这将使具体方案变得复杂,数据处理时间长。更困难的是需要首先大致确定光束束腰的位置,才能采用上述方法。在许多实际情况下,要做到这一点并非易事。尤其是单脉冲光束的测量就更难。对重频脉冲光束和连续波光束则要求光束质量较稳定,重复性好。我们在光束特性分析上做了一些工作,现正进行三点法方法的试验。本文在综合分析现有方法的基础上,提出利用光束等效曲率半径  $R(z)$  的概念来测量分析光束传输特性的原理。给出  $R(z)$  的测量方法以及测量光束传输特性的二种具体实验方案。

## 二、等效波面曲率半径 $R(z)$ 的概念及 $M^2$ 测量原理

对于在  $x$ - $y$ - $z$  坐标系中沿  $z$  轴传播的实际激光光束,在  $x$ - $z$  面内的光束特性,由束腰位置  $z_{0x}$ ,束腰处的束宽  $d_{0x}$  和远场发散角  $\theta_x$  来描述。其传输特性由衍射极限倍率因子  $M^2$  来描述:

$$M_x^2 = \frac{\pi}{4\lambda_0} n \cdot d_{0x} \cdot \theta_x \quad (1)$$

也可用传播因子  $K(=1/M^2)$  来描述。式中,  $\lambda_0$  是真空中波长,  $n$  是光束所在介质的折射率。(1)式实际上就是几何光学中的拉赫不变量。对圆对称光束可略去下标。

在具体测量中,通常是用一透镜对待测量光束作变换,测得变换后的光束参数,再变换得到实际光束的参数。对变换后的光束,通常是先确定  $z_{0x}$ ,再测出  $d_{0x}$  或是确定  $z_{0x}$  后,由光轴上  $z$  点处测得的束宽  $d_x(z)$  及其传播规律:

$$d_x^2(z) = d_{0x}^2 + (z - z_{0x})^2 \theta_x^2 \quad (2)$$

确定出  $d_{0x}$ ,而  $\theta_x$  则可由变换透镜后焦面上的束宽及透镜焦距测得。(2)式中的  $d_x(z)$ ,  $d_{0x}$  及  $\theta_x$  均是在二阶矩定义下的束宽及发散角。因此,实际测量中应着重解决  $z_{0x}$  的测量。

由激光光束传播理论并根据理想高斯光束波面曲率半径  $R(z)$  的概念,对实际激光光束的波前可采用如下定义的曲率半径  $R_x(z)$  来描述<sup>[2]</sup>

$$\frac{1}{R_x(z)} = \frac{\lambda}{j4\pi\sigma_x^2(z)} \iint_{-\infty}^{+\infty} x \left( E \cdot \frac{\partial E}{\partial x} - E \frac{\partial E^*}{\partial x} \right) dx dy \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  是波长,  $E$  是电场复矢量,  $\sigma_x^2(z)$  是沿  $x$  方向的光强方差,即二阶矩。  $R_x(z)$  的传播规律为:

$$R_x(z) = (z - z_{0x}) + d_{0x}^2 / [\theta_x^2 (z - z_{0x})] \quad (4)$$

这样,光束的  $\tilde{Q}$  参数为

$$1/\tilde{Q}_x(z) = 1/R_x(z) - jM_x^2\lambda / [\pi d_x^2(z)] \quad (5)$$

在光学系统中,  $\tilde{Q}_x(z)$  参数满足变换定律:

$$\check{Q}_x(z_2) = [A\check{Q}_x(z_1) + B]/[C\check{Q}_x(z_1) + D] \quad (6)$$

由(4),(2)式,得到光束束腰位置及束宽分别为:

$$z_{0z} = z - d_{0z}^2 / [\theta_z^2 R_z(z)] \quad (7)$$

$$d_{0z} = \{d_z^2(z) - d_z^2(z) / [\theta_z^2 R_z^2(z)]\}^{1/2} \quad (8)$$

(5)~(8)式及(1)式就是利用等效曲率半径分析激光光束传输特性的原理。实际上,用此方法还可以得到象散、非对称性等一系列参数。

### 三、等效曲率半径的测量方法

激光光束的空间相干性较好时,等效曲率半径  $R(z)$  的测量(为简便,略去下标  $x$ ),可采用各种干涉方法实现。这通常要求较高精度的调整,专用的干涉仪及较复杂的数据处理方法。当光束空间相干性较差时,就更无法采用干涉法完成  $R(z)$  的测量。通过对待测波面上各点光线的入射角的测量,可以实现对相干性较差波面的测量,克服了干涉法的不足。这就是 Hardmann 波面测量法的基本思想。

对实际激光光束引入等效曲率半径  $R(z)$  的概念后,在沿光轴某点  $z$  处,可将光束视为一曲率半径为  $R(z)$  的球面波。这样,在离轴  $H$  处的光线方向为球心与该点的连线方向,与光轴的夹角为:

$$U = \text{tg}^{-1}(H/R) \quad (9)$$

由傅里叶光学原理得知,透镜后焦面上的光场是入射到透镜表面(入瞳)上光场的方向角谱。故采用如图 1 所示的方法就可测量  $R(z)$ 。在沿光轴方向  $z$  点处放置一测试透镜(焦距  $F$ ),并在透镜的入瞳前设立一带有一系列透光小孔的屏,这些小孔距光轴的垂直距离为  $H_i$ 。入射到该屏上的光束,经该屏后成为一束发散(或汇聚)的光线束。各光线经透镜后分别在后焦面上成象于  $H_{iF}$  处。测出  $H_{iF}$  的大小,就可分别测出各光线的方向角:

$$\theta_i = \text{tg}^{-1}(H_{iF}/F) \quad (10)$$

并由(9)式得到  $R(z)$

$$R(z) = H_i H_{iF} / F \quad (11)$$

如果由各  $H_i, H_{iF}$  根据(11)式所得到的  $R(z)$  各不相等,则表明有象差,例如球差。

实际光束沿光轴径向有光强变化,如果小孔足够小,则可认为孔内的光强是均匀的,  $H_i$  为小孔的中心。对于小孔内光强分布不可忽时,可采用一阶矩所定义的光束“中心”来确定  $H_i$ :

$$H_i = \iint_{-\infty}^{+\infty} x H_i(x, y) I(x, y) dx dy \quad (12)$$

$I(x, y)$  为  $z$  处光强分布,  $H_i(x, y)$  为小孔函数,  $x$  为小孔方向的坐标。这是因为一阶矩定义的光束“中心”的传播是一直线方程,其传播轨迹即为几何光学中的光线。这样,方向角

$$\theta_i = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{1}{F} \iint_{-\infty}^{+\infty} x_f I_i(x_f, y_f) dx_f dy_f \right] \quad (13)$$

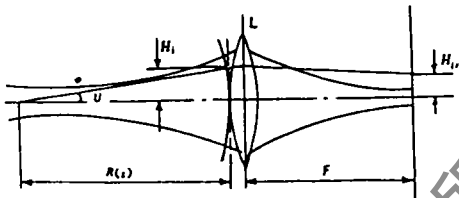


Fig. 1 The measurement of laser beam effective radius  $R(z)$

式中,  $I_i(x_i, y_i)$  为第  $i$  个孔在后焦面上的光强分布,  $x_i, y_i$  为后焦距处垂直于  $z$  的坐标。

## 四、实验方案

通过测量  $R(z)$ ,  $d(z)$  和  $\theta$  而得到  $M^2$ ,  $d_0$  及  $z_0$  的实验方案, 可采用二个 CCD 探测器的方法, 也可采用一个 CCD 探测器的方法。图 2 是采用二个 CCD 的方案, 图 3 是采用一个 CCD 的方案。 $L_1$  是变换透镜,  $L_2$  是测量透镜。 $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ) 是分光镜。 $H$  是有小孔的光屏。在图 2 中,  $CCD_2$  位于  $L_2$  的后焦面上;  $S_2-S_4-S_3-CCD_1$  的光程等于  $S_2-L_2$  的光程;  $CCD_1$  位于  $L_1$  的后焦面上; 这样,  $CCD_1$  上可测得  $\theta$ ,  $d(z)$ , 而  $R(z)$  则由  $CCD_2$  测得。 $S_3, S_4$  还应使  $L_1$  焦面光斑与  $d(z)$  光斑在空间上分开, 以便分别处理。

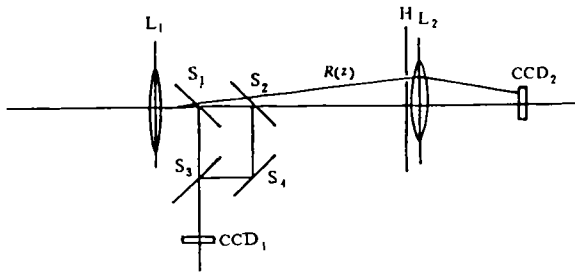


Fig. 2 The laser beam analysis apparatus with two CCD cameras

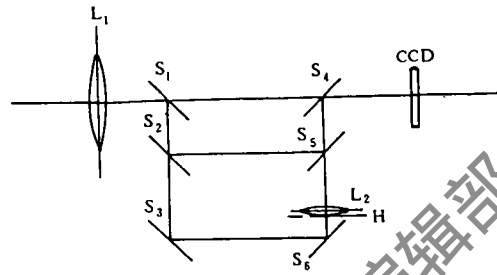


Fig. 3 The laser beam analysis apparatus with one CCD camera

图 3 是采用一个 CCD 的测量方案。基本结构源于正在本实验所开展的三点法测量方法。CCD 位于  $L_1, L_2$  的焦面上,  $S_2-S_5-S_4-CCD$  的光程与  $S_2-S_3-S_6-L_2$  的光程相等。

## 五、结 语

本文给出了利用实际激光光束等效波面曲率半径  $R(z)$  分析测量激光光束参数和传输特性的原理及其  $R(z)$  的测量方法, 还提出了两种实际测量方案。我们注意到, 测量所得到的  $R(z)$  是有一定取向的, 实际上这一测量方法得到的是光束的波面<sup>[3]</sup>。由于本方法无需在正式测量前预先确定  $z_0$  的大致范围, 因此本方法完全可用于对单脉冲激光光束的测量和分析, 对重频和 CW 激光光束, 在完成其分析测试的同时, 还可实时监测光束特性的变化。本方法得到的  $z_0$  的相对误差, 初步估算为  $<5\%$ 。关于测量误差以及衍射效应的影响, 将另行文分析。

作者在参加本年度 ISO/TC172/SC9 会议中, 曾与魏光辉教授, 麦禄波同志等中国代表就光束质量测量分析进行过有益讨论; 与本实验室万作文, 金峰同志也进行过有益探讨。特在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- 1 ISO 文件, ISO/TC172/SC9/WG1 N56, 1993
- 2 Siegman A E. IEEE J Q E, 1991, 27(5), 1146~1148
- 3 Golden L J. Appl Opt, 1975, 14(10), 2391

作者简介: 巩马理, 男, 1959年10月出生。博士, 副研究员。现主要从事新型固体激光器及光束传输特性的研究工作。

收稿日期: 1994-07-28