

光热光束偏转方法测量激光束特征参数

李斌成* 曾昭信 何舜华
(中国电子科技大学, 成都)

提要: 本文叙述了光热光束偏转方法的基本原理, 介绍了一种新的应用光热光束偏转方法测量聚焦激光束的特征参数及聚焦透镜焦距的方法。实验测量了经单一透镜聚焦后的 CO₂ 激光束的腰斑半径和位置, 同时确定了聚焦透镜的焦距, 其结果与实际情况一致。

关键词: 光热, 光束偏转, 倾斜度

Measurement of characteristic parameters of laser beams with photothermal optical beam deflection method

Li Binchen, Zeng Zhaoxin, He Shunhua

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu)

Abstract: The basic principle of photo-thermal optical beam deflection is described, A new method for measuring the characteristic parameters of focused laser beam and the focal length of the focusing lens by photothermal optical beam deflection method is introduced. The radius and position of waist spot of CO₂ laser beam focused by a single Ge lens were measured experimentally, and the focal length of the Ge lens was determined. The result is in agreement with that obtained in practice.

Key words: photothermal, beam deflection, inclination

一、引 言

聚焦激光束的特征参数,如腰斑半径等在激光工程应用中是非常重要的参量,因此测量的方法很多。现在已经报道和正在使用的测量激光束光斑(腰斑)半径的主要方法有:针孔法^[1]、刀口法^[2]、狭缝法^[3]、取点测量法^[4]和损伤打点法^[5]。除损伤打点法外,其它几种测量方法都用光电探测器直接接收被测光束,故一般只能用于较低功率密度的激光光斑。而损伤打点法虽能测稍高功率密度的光斑,但精度较差,且为有损测量。本文中介绍的光热光束偏转方法因采用了利用第二光束探测的间接测量方法,克服了上述方法的缺点,能够测量小到微米、瓦级功率的激光束的光斑(腰斑)半径,同时还能准确地确定聚焦激光束的束腰位置和聚焦透镜的焦距。配合精密的光学微调系统和低噪声信号处理系统,能达到较高的测量精度。

收稿日期:1988年5月3日。

* 现在中国科学院光电技术研究所工作。

二、测量原理

2.1 光热光束偏转的原理

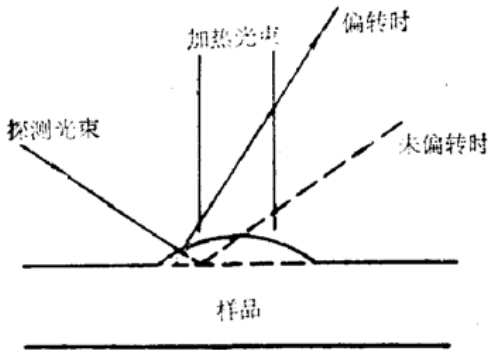


图1 光热光束偏转的原理示意图

光热光束偏转的物理基础是热弹性形变。当一激光束(加热光束)照射到某一物体的表面时,物体吸收能量,内部温度上升而发生膨胀,表面发生形变,产生表面位移(隆起)而形成一定的倾斜度,当另一激光束(探测光束)照射到这一区域时,其反射方向就会发生偏转,如图1所示。如果加热光束强度周期性调制,探测光束的反射方向也将发生周期性偏转,若采用位置灵敏探测器探测,则产生一交流信号,该交流信号的大小和位相与被加热物体的物理性质和加热激光束的光斑尺寸有关。

由参考文献[6],物体表面的倾斜度为:

$$\frac{\partial u_z}{\partial r}(r, 0) = -\frac{\alpha_{th}\alpha P \cdot (1+\nu)}{16\pi K_{th}(1-\nu)} \cdot \left[\int_0^{\infty} \frac{\Delta^2 d\Delta J_1(\Delta r/L) \exp(-\Delta^2 a^2/4L^2)}{\text{sh}(\Delta) \cdot [(\alpha L)^2 - S^2]} \cdot \{R(-\alpha L) + C_1 R(-S) + C_2 R(S)\} \right] \quad (1)$$

其中:

$$R(x) = \left[\frac{e^x - e^{-x}}{x - \Delta} - \frac{e^x - e^{-x}}{x + \Delta} \right] + B_1 \cdot \left[\frac{e^{x+\Delta/2} - e^{-\Delta/2}}{x + \Delta} + \frac{e^{x-\Delta/2} - e^{-\Delta/2}}{x - \Delta} \right] + B_2 \cdot \left[\frac{e^{x+\Delta/2} - e^{-\Delta/2}}{x + \Delta} - \frac{e^{x-\Delta/2} - e^{-\Delta/2}}{x - \Delta} \right]$$

$$C_{1,2} = (\alpha L/S) \cdot \{[\exp(-\alpha L) - \exp(\pm S)]/2\text{sh}(S)\}$$

$$B_1 = -\text{sh}(\Delta/2) [\Delta - (1-2\nu)\text{sh}(\Delta)] / [\Delta + \text{sh}(\Delta)]$$

$$B_2 = \text{ch}(\Delta/2) [\Delta + (1-2\nu)\text{sh}(\Delta)] / [\Delta - \text{sh}(\Delta)]$$

$$S^2 = \Delta^2 + i(2L^2/L_{th}^2)$$

α_{th} : 物体的线性热膨胀系数; α : 物体对加热光的光学吸收系数; P : 加热光功率; ν : 泊松比率; K_{th} : 物体的热导率; L : 物体厚度; a : 加热光的光斑半径(强度的 $1/e$ 点); L_{th} : 物体的热扩散长度, $L_{th} = (K_{th}/\pi f \rho C)^{1/2}$ (ρ : 密度, C : 热容量, f : 加热光强的调制频率); r : 探测点到加热光斑中心的距离; J_1 : 第一类一阶贝塞尔函数; Δ : 积分变量。

由(1)式计算出在低频时(对一般金属样品调制频率小于 1000 kHz) 表面倾斜度的大小与两光点间距 r (假设探测光为无限细光束) 的关系如图 2 所示。从图中可以看出, 当两光点重合时, 信号为零, 当两光点间距为加热光光斑半径 a 的 1.12 倍时信号出现最大, 即:

$$r_{\max} \approx 1.12a \quad (2)$$

2.2 测量原理

由(2)式, 有:

$$a \approx r_{\max}/1.12 \approx 0.9r_{\max} \quad (3)$$

采用移动加热光聚焦透镜横向位置的方法改变两光点的相对位置。由图 3 可以看出透镜横向位置的移动量并不等于两光点相对位置的改变量, 而是

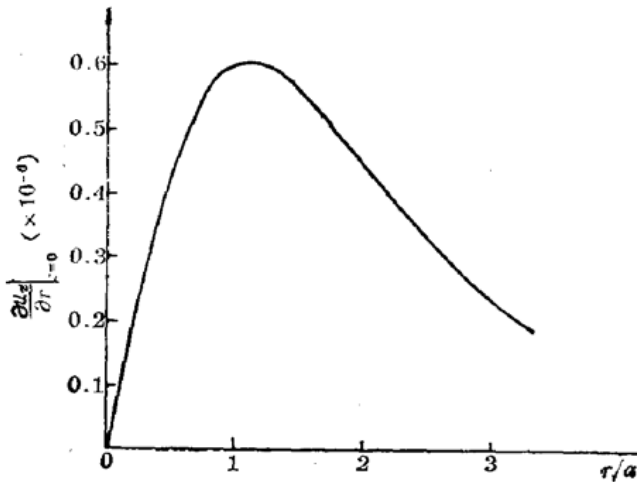


图2 光束偏转信号与两光点间距 \$r\$ 的关系

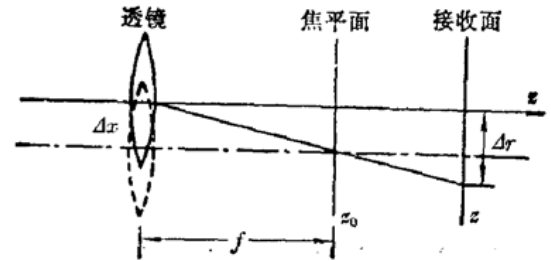


图3 \$\Delta r\$ 与 \$\Delta x\$ 的关系图

$$r_{\max} = \left[1 + \frac{z - z_0}{f} \right] \Delta x_{\max} \quad (4)$$

其中 Δx_{\max} 为信号从零到最大时透镜横向位置的改变量, f 为透镜焦距, z_0 为焦平面的位置, z 为接收面的位置 (取相对于透镜静止的坐标系)。在一般情况下 (物距远大于聚焦透镜的焦距), 聚焦激光束的束腰位置近似在焦点位置上, 根据高斯光束的传输特性, 有^[7]:

$$a(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z - z_0}{f_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

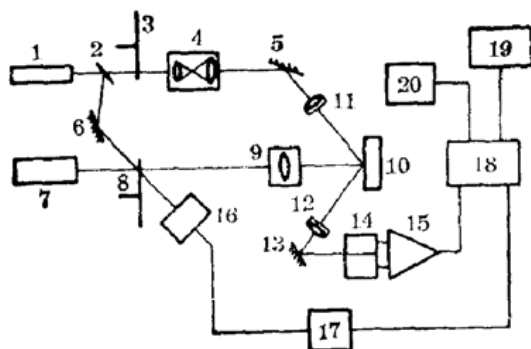
其中 w_0 为激光束的腰斑半径 ($1/e$ 光强点, 为文献[7]中的 $\sqrt{2}/2$ 倍), f_0 为共焦参数: $f_0 = 2\pi w_0^2 / \lambda$ (λ 为激光波长)。于是, 有:

$$0.9 \left(1 + \frac{z - z_0}{f} \right) \Delta x_{\max} = w_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{z - z_0}{f_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

在(6)式中有三个待求参数 w_0 、 z_0 和 f , 故只要测得三组以上不同位置 z 处的 Δx_{\max} , 代入(6)式求解或拟合, 即可得到聚焦激光束的腰斑半径 w_0 、束腰位置 z_0 , 同时还可确定聚焦透镜的焦距。知道了激光束的 w_0 及 z_0 , 即可求出激光束的其它特征参数^[7]。

三、实验系统及说明

实验系统如图4所示。由 CO_2 激光器输出的激光束经机械斩波器调制、Ge 透镜聚焦后照射到样品表面, 形成加热光束。由 He-Ne 激光器输出的光束经扩束后聚焦在样品表面的加热



- 1—He-Ne 激光器; 2—分束片; 3、8—机械斩波器; 4—扩束透镜组; 5、6、13—全反镜; 7— CO_2 激光器; 9—三维可调谐透镜; 10—样品; 11、12—聚焦、准直透镜; 14—二像限光电探测器; 15—差分放大器; 16—光电探测器; 17—放大器; 18—锁定放大器; 19—示波器; 20—频率计

图4 实验装置图

光点附近, 形成探测光束。反射的探测光束经准直后进入二像限光电探测器产生的两电信号经差分放大后送入锁定放大器。由分束片分出的另一 He-Ne 光束经斩波器 8, 光电探测器接收, 产生的电信号经放大后作为参考信号送入锁定放大器的参考通道。示波器和频率计用来监视信号波形和调制频率, 而斩波器 3 则用于初始时调零。信号值由锁定放大器上的表头直接读出。

四、实验结果及分析

实验采用铜片作样品, 频率大约在 640 Hz 左右。测量 CO₂ 光经焦距为 30 mm 的 Ge 透镜聚焦后的腰斑半径和束腰位置。图 5 和图 6 为测量结果。图 5 是测得的 Δx_{\max} 与透镜纵向位置的关系曲线。图 6 是根据图 5 得到的 CO₂ 激光束的光斑半径 α 与透镜纵向位置的关系图, 图中的实线是按 (6) 式拟合的曲线, 可以看出, 其测量结果与高斯光束相近。拟合得到的结果为:

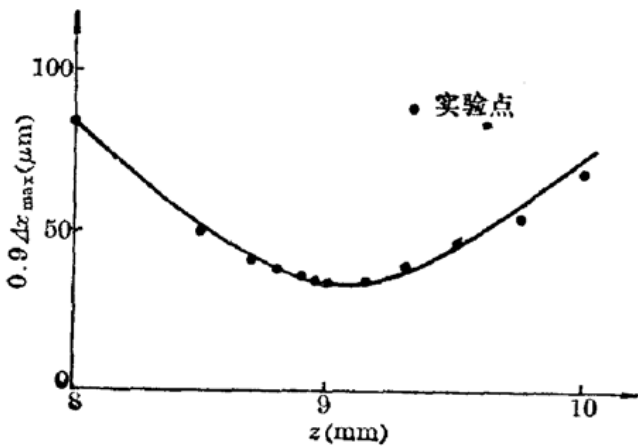


图 5 Δx_{\max} 与透镜纵向位置的实验关系

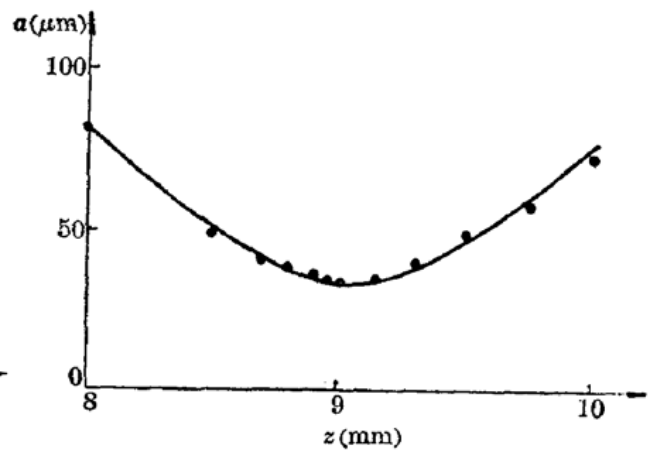


图 6 α 与透镜纵向位置的实验关系

$$\left. \begin{aligned} w_0 &\approx 34 \mu\text{m} \\ z_0 &\approx 9.05 \text{ mm} \\ f &\approx 30 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

实验中使用的 CO₂ 激光管的参数为: 全反镜: 镀金, 曲率半径 $R=1\text{ m}$; 输出镜: 锗平面镜; 腔长: $L=450\text{ mm}$ 。由此计算出的激光管的光束参数为: 腰斑半径: $w'_0=1.2956\text{ mm}$; 束腰位置: 输出镜镜面。输出镜离聚焦透镜的距离 $l=1.02\text{ m}$, 透镜焦距 $f=30\text{ mm}$, 计算出经透镜聚焦后 CO₂ 激光束的腰斑半径:

$$w \approx 35.1 \mu\text{m} \quad (8)$$

采用光热光束偏转方法测得的腰斑半径为 $34\ \mu\text{m}$, 两者相近。另外, (7) 式中的束腰位置与实测的位置一致, 计算的透镜焦距也与实际值相同。造成 (7) 式中的 w_0 与 (8) 式比偏小的原因主要是: 当 $r=1.12\alpha$ 时信号出现最大是稳态结果, 当频率较高时最大值点将向中心移动, 而本实验中的频率为 640 Hz 左右, 故稍偏小。产生误差的另一个主要原因是探测光束的粗细, 探测光

(下转第72页)

$R' = H$ 的 444.9 nm 红移到取代基为二- CH_3 时的 459.0 nm, 向长波方向移动了 14.1 nm。

实验研究了溶剂对激光染料调谐性能的影响。选取 $(t\text{BuBzOE})_2\text{P}$ 为例, 测试了它在二氧六环、甲苯、二甲基甲酰胺(DMF)三种溶剂中的激光特性, 结果示于图 5。可见随着溶剂介电常数的增大, 其激光峰值波长也逐步红移, 峰值从二氧六环溶剂时的 450.6 nm, 移至 DMF 溶剂($\epsilon = 36.7$)时的 455.1 nm。

$(\text{BzOE})_2\text{P}$ 类染料的化学结构是较好的平面共轭体系。光化学性能比较稳定。我们曾以 $(\text{二-}i\text{prBzOE})_2\text{P}$ 染料为例, 在上述 N_2 激光功率泵浦下连续工作 8 个小时, 用 XWD1 自动电位差计记录仪监测染料激光输出能量的变化, 并没有看到其输出有任何下降的趋向。

参 考 文 献

- 1 周一民 *et al.*, 高等学校化学学报, **10**(7), 724(1988)
- 2 Vernigor E. M. *et al.*, *Khim. Geterotsikl. Soedin.*, **5**, 508 (1980).

(上接第94页)

束越细, 越可看作无限细几何光束, 对测量结果影响越小。本实验采用高放大倍率扩束系统, 最后照射到样品表面时探测光束的光斑半径不超过 $3\mu\text{m}$ 。

五、结 束 语

应用光热光束偏转方法可以测量高功率密度激光束的光斑尺寸。本实验中 CO_2 激光器的功率为 2 W 左右, 故其腰斑的功率密度在 10^0 W/m^2 左右。选择合适的物质作为接收材料, 能测光斑的功率密度还可以提高, 这是一般的测量方法无法做到的。

参 考 文 献

- 1 R. J. Shayler, *Appl. Opt.*, **17**(17), 2673(1978)
- 2 J. M. Khosrofiian *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**(21), 3406B(1983)
- 3 R. L. McCally, *Appl. Opt.*, **23**(14), 2227(1984)
- 4 李延彬, 中国激光, **10**(2), 90(1983)
- 5 Y. C. Kiang *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**(9), 1296(1983)
- 6 M. A. Olmstead *et al.*, *Appl. Phys. A.*, **32**(30), 143(1983)
- 7 周炳琨等编, 激光原理, (国防工业出版社, 1980)