

剪切干涉仪测量激光光束质量因子 M^2

曾秉斌 徐德衍 王润文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 在研究了激光光束质量因子 M^2 理论及测量技术^[1]基础上, 作者提出一种新的用干涉测量光束质量因子 M^2 的理论、技术与方法。文中概述了该技术的理论基础、实验结果及误差分析。结果表明, 该方法具有精度高, 适用性强, 测量简便等优点, 有可能进一步仪器化并推广应用。

关键词 光束质量因子 M^2 , 剪切干涉。

1 引 言

光束质量是激光器十分关键的性能参数。近年来, Siegman 引入空间频谱二次矩, 基于束宽积不变原理提出的光束质量因子 M^2 ,^[2] 由于其对光束质量的全面反映和对光束传输的准确描述已为国际光学界普遍接受并有趋势成为定义和评价光束质量的国际标准^[3]。探索简便可行的 M^2 因子测量方法, 并将装置仪器化以便实现标准化检测和产品质量监控。目前 M^2 的测量是利用光束自由空间传播方程将 M^2 测量转换为束宽的测量。最具代表性的 M^2 测量装置有适用于连续光束的刀口扫描装置^[4]和适用于脉冲光束的分束器-CCD 装置^[5]。

本文提出通过测量光束截面的光强分布与波面曲率半径来获取 M^2 的棱镜剪切干涉测量装置, 其特点在于: 1) 以光强分布二次矩定义束宽保证了测量精度; 2) 只需在一个截面上测量, 测试简单化了; 3) 对连续光束和脉冲光束同样适用; 4) 可同时计算出 Q 参数, 更直观地反映光束传播特性。

2 基本原理与实验装置

光束质量的本质是反映光波电场的振幅分布与相位分布特性。剪切干涉测量光束质量因子 M^2 的基本原理就是从波面剪切干涉图中获取光波的振幅和相位信息从而计算出 M^2 。如图 1 所示, 光束经剪切棱镜后, 波面在 x 方向产生横向剪切, 剪切量为 s , 倾角为 γ , 如果棱镜上下表面楔角均为 α , 那么倾角 γ 与棱镜楔角 α 关系满足 $\gamma = 4\alpha$ ^[6]。干涉波面光强分布可表示为

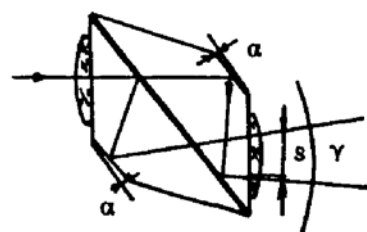


Fig. 1 Shearing prism

$$I_t(x, y) = I(x, y) + I(x - s, y) + 2 \sqrt{I(x, y) I(x - s, y)} \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{sx}{R} + \gamma x \right) \right] \quad (1)$$

式中 $I(x, y)$ 为原始波面的光强分布, R 则为干涉位置上的波面曲率半径。当剪切量略大于光束半宽时就能产生类似于图 2 的剪切干涉图。从干涉图中获取光强分布 $I(x, y)$ 的二次矩 σ^2 和波面曲率半径 R 是计算 M^2 的关键。两波面重叠范围内的相位差 Δ 和波面曲率半径 R 分别为

$$\Delta = (2\pi/\lambda) (sx/R + \gamma x), \quad R = sb/(\lambda - \gamma b) \quad (2)$$

式中 b 为干涉条纹宽度。光强分布 $I(x, y)$ 的二次矩可通过下式计算^[2,3]

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 \quad (3)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\iint (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad \sigma_y^2 = \frac{\iint (y - \bar{y})^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \quad (4)$$

式中 \bar{x} , \bar{y} 为光强分布 $I(x, y)$ 的重心坐标,

$$\bar{x} = \frac{\iint x I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad \bar{y} = \frac{\iint y I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy} \quad (5)$$

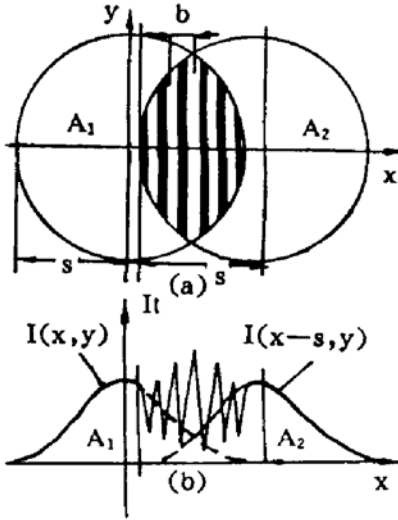


Fig. 2 (a) Shearing interferogram,
(b) intensity distribution

如图 2 所示, 将干涉图中 A_2 向 x 轴负方向平移 s 与 A_1 构成完整的光强分布 $I(x, y)$, 考虑到图像采集过程中光强分布的离散性, 将(4)式改写成

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 I_t(x_i, y_i) + \sum (x_k - s - \bar{x})^2 I_t(x_k, y_k)}{\sum I_t(x_i, y_i) + \sum I_t(x_k, y_k)} & \begin{cases} (x_i, y_i) \in A_1 \\ (x_k, y_k) \in A_2 \end{cases} \\ \sigma_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 I_t(x_i, y_i) + \sum (y_i - \bar{y})^2 I_t(x_k, y_k)}{\sum I_t(x_i, y_i) + \sum I_t(x_k, y_k)} \end{cases} \quad (6)$$

同理, 将(5)式改写为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum x_i I_t(x_i, y_i) + \sum (x_k - s) I_t(x_k, y_k)}{\sum I_t(x_i, y_i) + \sum I_t(x_k, y_k)} & \begin{cases} (x_i, y_i) \in A_1 \\ (x_k, y_k) \in A_2 \end{cases} \\ \bar{y} = \frac{\sum y_i I_t(x_i, y_i) + \sum y_i I_t(x_k, y_k)}{\sum I_t(x_i, y_i) + \sum I_t(x_k, y_k)} \end{cases} \quad (7)$$

对于任意光束普遍成立的光强分布二次矩和波面曲率半径的传播公式为^[7]

$$\sigma^2(z) = \sigma_0^2 [1 + (Z/Z_R)^2], \quad R(z) = Z + Z_R^2/Z \quad (8)$$

式中 σ_0^2 为束腰位置光强分布二次矩, Z 为测量截面到束腰距离, Z_R 为瑞利范围, 任意光束的瑞利范围定义为

$$Z_R = 4\pi\sigma_0^2/M^2\lambda \quad (9)$$

在已知束腰位置 Z 的情况下, 将测量结果 R , σ^2 以及(9)式代入方程组(8), 即可计算出光束质量因子 M^2 和 Q 参数,

$$M^2 = \frac{4\pi\sigma^2 \sqrt{(R-Z)Z}}{RZ\lambda}, \quad \frac{1}{Q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{M^2\lambda}{4\pi\sigma^2(z)} \quad (10)$$

图 3 为剪切干涉测量光束质量 M^2 的实验装置。准直光束经聚焦镜会聚, 束腰落在透镜像方焦点上。纵向调节剪切棱镜位置, 直至监视器上出现清晰的干涉条纹, CCD 采集的干涉

图像量化后输入计算机处理并运算。图 4 是计算机程序框图，数字滤波采用最频值滤波，消除噪声同时不至使图像产生较大畸变；确定边界是指确定干涉图的左边界与右边界以便得到计算光强分布 $I(x, y)$ 二次矩的 A_1 区和 A_2 区；干涉条纹的定位和细化采用 Yatagai 等人提出的算法^[8]。

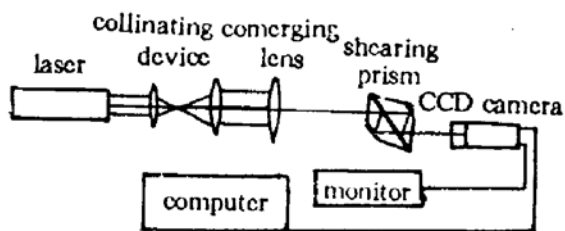


Fig. 3 Experimental setup of measuring the beam quality

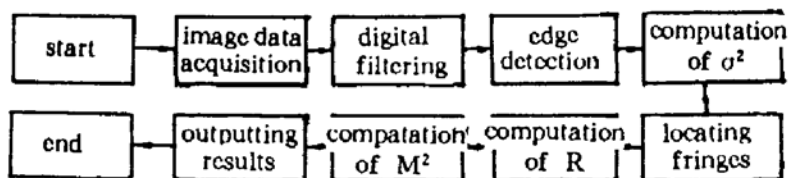


Fig. 4 Flow diagram

3 实验结果与误差分析

实验中，用上述方法对两台氮-氦激光器的光束质量因子 M^2 进行测量。#1 激光器功率为 0.5 mW 光束质量较好；#2 激光器功率为 20 mW，光束质量较差(图 5(a)、(b))。干涉波面光强分布如图 5(c)、(d)所示。由于 M^2 具有空间不变性，测量结果与测量位置无关，因此测量在不同位置分别进行 5 次，结果见表 1 和表 2 所列。测量结果表明 #1 激光器光束质量较好，与实际情况相符。

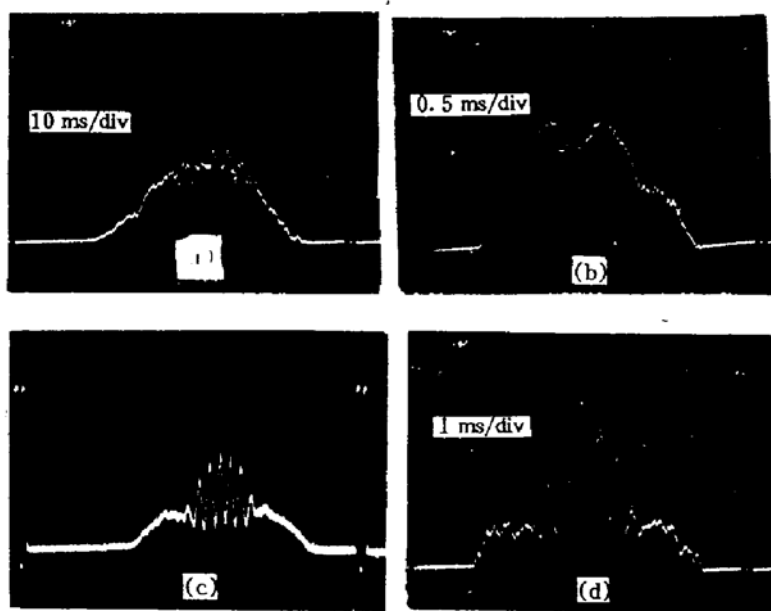


Fig. 5 (a), (b) Intensity distribution on original wave fronts of laser #1 and #2
(c), (d) Intensity distribution on shearing wave fronts of laser #1 and #2

Table 1. Results of measuring the beam quality of laser # 1

| No. | location (mm) | phase-front radius of curvature (mm) | second moment (mm ²) | beam quality factor | mean value | standard deviation |
|-----|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------|--------------------|
| 1 | 15 | 16.7 | 3.9×10^{-3} | 1.56 | 1.52 | 0.059 |
| 2 | 18 | 19.5 | 5.2×10^{-3} | 1.53 | | |
| 3 | 20 | 21.4 | 6.1×10^{-3} | 1.49 | | |
| 4 | 23 | 24.4 | 7.1×10^{-3} | 1.42 | | |
| 5 | 25 | 25.9 | 1.1×10^{-2} | 1.59 | | |

Table 2. Results of measuring the beam quality of laser # 2

| No. | location (mm) | phase-front radius of curvature (mm) | second moment (mm ²) | beam quality factor | mean value | standard deviation |
|-----|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------|--------------------|
| 1 | 17 | 18.8 | 5.8×10^{-3} | 1.99 | 1.99 | 0.073 |
| 2 | 20 | 21.5 | 8.4×10^{-3} | 2.12 | | |
| 3 | 23 | 24.4 | 9.6×10^{-3} | 1.93 | | |
| 4 | 27 | 28.3 | 1.3×10^{-2} | 2.00 | | |
| 5 | 30 | 31.2 | 1.5×10^{-2} | 1.91 | | |

上述结果的误差来源于系统不完善引起的系统误差以及测量过程中的随机误差。系统误差主要是光学系统波像差引起的光束质量畸变,为减小系统误差,对各光学元件均有较高的质量要求,这也就是测量系统力求光路简单的原因。光强分布二次矩 σ^2 的测量误差主要取决于 CCD 的线性、灵敏度、分辨率、信噪比、量化误差等。线性、灵敏度不均可通过标定而校准,选用动态范围 200/1 的 CCD 可达较高信噪比,如果 CCD 分辨率为 512×512 ,并以 8 位量化输出,不难控制 σ^2 的测量误差 $\delta\sigma^2$ 达到 $\pm 5\%$ 。波面曲率半径的测量误差由下式计算

$$\delta_R = \frac{\lambda}{\lambda - \gamma b} \delta_b \quad (13)$$

式中 δ_b 为干涉条纹宽度的测量误差,如果选取适当的测量位置控制条纹数,使条纹宽度占据 30 个以上像素单元,就能做到 δ_b 小于 $\pm 3\%$, δ_R 也可达 $\pm 5\%$ 。由(11)式可知, M^2 的测量误差可近似表示为

$$\delta_{M^2} \approx \sqrt{\delta_{\sigma^2}^2 + (\delta_R/2)^2 + (\delta_z/2)^2} \quad (14)$$

式中 δ_z 为 Z 的测量误差,不难控制在 $\pm 5\%$,这样总的 M^2 测量误差为 $\pm 6.2\%$ 。

结 论 理论分析和实验结果表明,通过对剪切干涉图形的处理与计算,获取激光光束质量因子 M^2 值的这一新途径是可行的。由于同时得到光斑半径 $w = 2\sigma$,等相面曲率半径 R ,从而确定了光束的几个主要空间参数:质量因子 M^2 ,束腰半径 $\omega_0 = 2\sigma_0$,远场发散角 $\theta = M^2\lambda/\pi\sigma_0$ 。虽然这种方法不适用于相干性较差的光束,但是,毕竟高光束质量总意味着高空间相干性,故由此确定光束质量是否优劣也是可行的。

参 考 文 献

- [1] 曾秉斌, 徐德衍, 王润文, 光束质量因子 M^2 的物理概念与测试方法. *应用激光*, 1994, 14(3): 104 ~ 108
- [2] A. E. Siegman, New development in Laser resonators. *Proc. SPIE*, 1990, 1224: 2~14
- [3] ISO/TC 172/SC9/WG1 N46
- [4] M. W. Sasnett, Apparatus for measuring the mode quality of a laser beam, *U. S. Patent*, No. 5100231
- [5] J. A. Ruff *et al.*, Single-pulse laser beam quality measurements using a CCD camera system. *Appl. Opt.*, 1992, 31(24): 4907~4908
- [6] 徐德衍, 编著, 剪切干涉仪及其应用. 1987 年第一版, 机械工业出版社, 北京, 1987: 126~163
- [7] A. E. Siegman, Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam. *IEEE, J. Quant. Electron.*, 1991, QE-25(5): 1146~1148
- [8] T. Yatagai *et al.*, Automatic fringe analysis using digital image processing technique. *Opt. Eng.*, 1982, 21(3): 432~435

Shearing Interferometer for Measuring Laser Beam Quality Factor M^2

Zeng Bingbing Xu Deyan Wang Renwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 25 November 1994; revised 20 January 1995)

Abstract A new method for measuring the laser beam quality factor M^2 is proposed based on the shearing interference in this paper. This method is beneficial to accuracy, simplicity and universality. The principle experimental result and error analysis are presented.

Key words beam quality factor M^2 , shearing interference.