

# 可用于高功率脉冲激光的面阵 CCD 模式测量装置

孙小卫 杨 杰 于意仲 龙 晓 张 锐\*

(天津大学精仪系, 天津 300072)

史红民 段振广 王 昊

(北京光电所, 北京 100010)

**提要** 本文介绍了一种用面阵 CCD 摄像机作探测器的激光光束测量装置。整个装置包括光束衰减器、单脉冲选取及脉冲同步、光束直径匹配、CCD 摄像机、图像卡、计算机及显示器以及系统软件。软件根据激光混合模的二阶矩阵理论<sup>[1]</sup>编制, 可测量高功率、高重复频率脉冲激光的空间能量分布, 并可对所测结果进行模拟。由软件给出所测的光束参数, 可对光束质量作出正确评价。

**关键词** 面阵 CCD 摄像机, 高功率脉冲激光, 混合模, 空间能量分布

## 1 引 言

光束质量通常由光斑半径  $\omega$  和发散角  $\theta$  的乘积来决定。一般情况下, 混合模激光中高阶模所占的比重越大、高阶模的阶次越大, 光束质量就越差。研究激光的空间能量分布, 对于激光器的设计和应用有着重要的意义。

检测激光横截面能量分布的方法有两种: 感光法和扫描法。这两种方法, 信息量少、误差大, 且不能对脉冲激光进行实时测量和显示。八十年代, 国外开始将面阵探测器用于激光束能量分布测量, 如美国 Spiricon 公司用热释电偶元件作探测器, 美国 Big Sky 公司用 CCD 摄像机作探测器<sup>[2~4]</sup>, 并都已形成产品。在国内, 用面阵 CCD 测量光束分布亦取得了一定成效<sup>[5]</sup>。但对于高重复频率脉冲、多模、混合模激光缺少必要的分析手段。本文所介绍的装置目前能测量上百次的高重复率激光脉冲能量分布, 不仅能分析单模高斯光束, 还能对高阶混合模的激光能量分布、光束参数、光束质量等进行分析 and 评价。

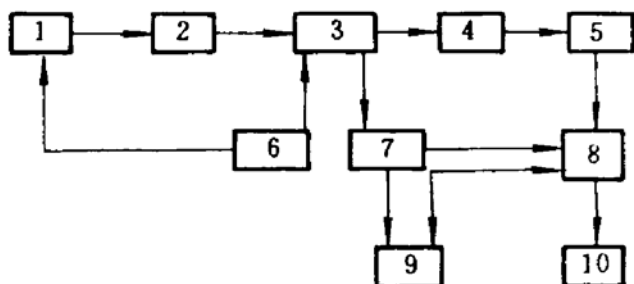


Fig. 1. Diagram of high power pulsed laser mode measuring system.

1 — pulsed laser; 2 — attenuating device; 3 — single pulse selection; 4 — beam matching device; 5 — CCD camera; 6 — laser power supply; 7 — pulse synchronizing device; 8 — frame grabber board; 9 — computer; 10 — monitor

\* 参加本工作的还有姚建铨教授。

收稿日期: 1993 年 5 月 11 日, 收到修改稿日期: 1993 年 7 月 1 日

## 2 测量装置和原理

测量装置如图 1 所示,高功率脉冲激光经过衰减器的衰减到 CCD 的可接收范围,再通过由分频电路及机械快门组成的单脉冲选择器,然后经透镜组成的光束直径匹配装置对光斑大小进行压缩,最后到达 CCD 摄像机。为对脉冲激光进行准确捕捉,需要进行同步控制。激光电源输出脉冲电信号,经过分频及延时实现同步捕捉。CCD 接收的脉冲激光信号,由图像卡进行快速 A/D 转换及采集存储。由计算机进行数据处理,可用显示器实时显示脉冲激光光斑花样。

## 3 测量装置各部分的设计

### 3.1 光束衰减器

由于高功率脉冲激光平均功率上百瓦,单脉冲能量数十焦耳,必须进行大倍率衰减。衰减器要求透过均匀、无畸变。为减少激光偏振性造成的两个方向上衰减倍率的差异,采用楔镜小角度入射作为前级衰减,接收第三级反射光。再由中性灰玻璃进行后级衰减,通过前后两级可达到对高功率激光的任意倍率衰减,见图 2 (a)。另一种透射式衰减器见图 2 (b)。

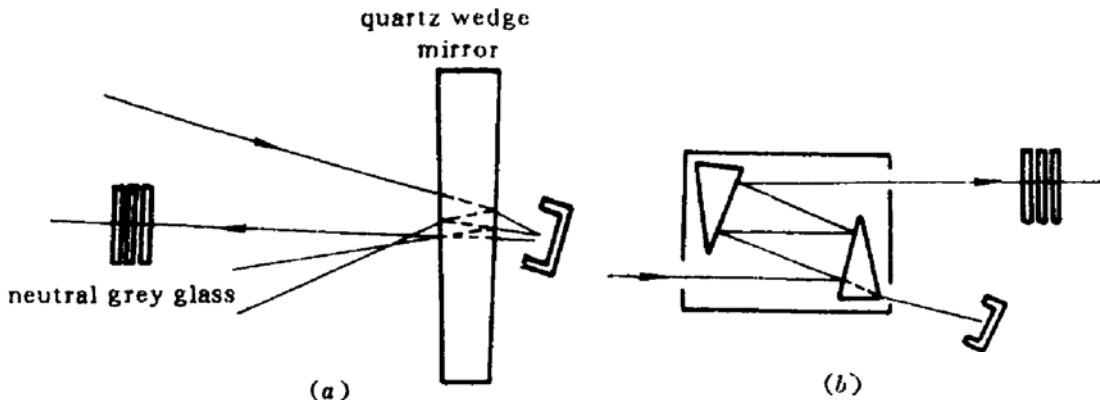


Fig. 2 (a) reflective attenuator; (b) refractive attenuator

### 3.2 单脉冲选取及脉冲同步

由于 CCD 以视频方式工作,只能接收 25 Hz 以下的脉冲信号,对上百赫兹的高重复频率激光必须进行分频处理。利用继电器控制快门,从高重复频率激光中提取单个脉冲,使 CCD 的每幅图像中仅含一个脉冲信息,避免脉冲信号重叠,产生错误结果。为了对脉冲信号进行同步捕捉,方法是利用脉冲同步电路对脉冲频率进行测量,自动给出经过恰当延时的捕捉信号,对进入帧寄存器的脉冲信息进行冻结。或者由分频电路的多谐振荡器调整延迟时间,给出同步捕捉信号;直接由图像卡进行同步捕捉。单脉冲选取及延时部分如图 3 所示。

### 3.3 光束直径匹配

由于 CCD 摄像机的接收靶面很小,只有  $4.5 \times 6.0 \text{ mm}^2$ 。而通常高功率激光光斑可达 10 mm 左右。必须进行压缩,并精确测量压缩倍率。缩束透镜要求加工精度高、透过率均匀、无畸变。在实验中我们发现,高强度脉冲氙灯的漏光对 CCD 探测器有很大影响。在靠近靶面处又加上一个干涉滤光片,防止了杂散光的干扰。

### 3.4 CCD 摄像机

探测器要求像敏元足够多,且像敏元均匀性好,使用寿命长。为此采用 MTV-1801CB 型面阵 CCD 摄像机。靶面大小为  $4.5 \times 6.0 \text{ mm}^2$ 、像元数为  $588 \times 604$ ,响应波长范围为  $400 \sim 1100 \text{ nm}$ ,空间分辨率为  $13 \mu\text{m}$ 。

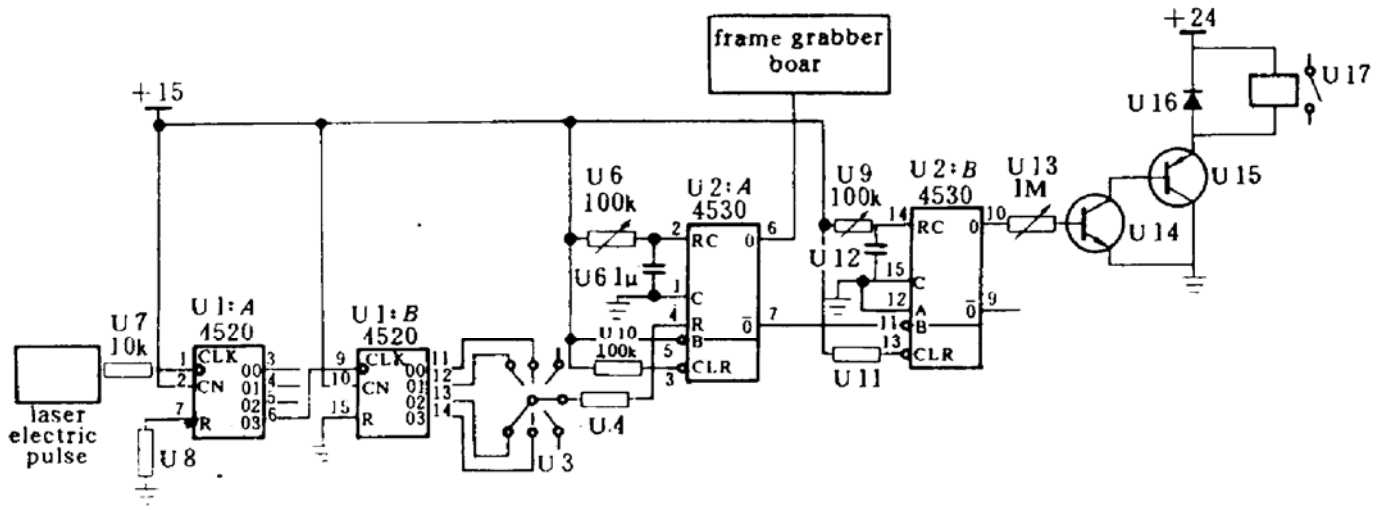


Fig. 3 Single pulse selection, frequency-division and time-delaying circuit

### 3.5 图像卡

实现对视频激光脉冲信息的同步捕捉,快速 A/D 转换及采集存储。要求转换速度快、帧存容量大,并有实时冻结功能。我们采用 QH905 伪彩色图像卡,它有  $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$  帧存量,完全满足测量要求。

### 3.6 计算机及监视器

整个测量通过计算机操作,并由计算机进行数据处理及分析。要求计算机运算速度快,我们采用带协处理器的 286 微机。用小型黑白监视器对激光光斑进行实时显示。

### 3.7 系统软件

该软件用汇编语言与 C 语言联编而成,窗口菜单调用。软件的主要执行过程如图 4 所示。

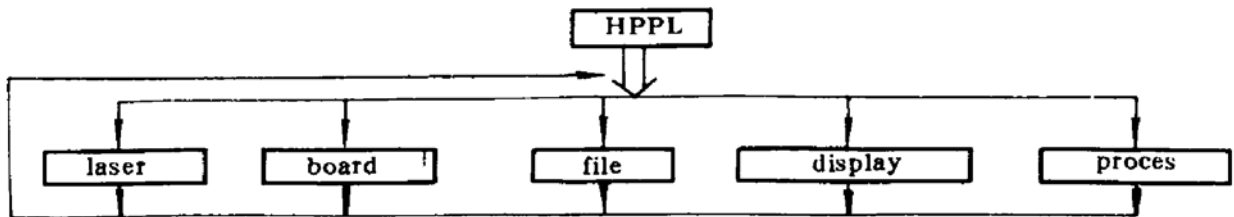


Fig. 4 Diagram of software routine

运行执行文件 HPPL 进入主菜单。LASER 子菜单部分主要完成激光光束的检测、处理、显示及参数计算等功能。执行该部分软件可将帧存图像读入内存,再对内存图像进行平滑滤波,最后完成显示。BOARD 子菜单用于设置、检测图像板。FILE 子菜单完成图像的存盘和读盘。DISPLAY 子菜单主要用于在屏幕上显示图像信息。PROCESS 子菜单完成图像滤波、图像灰度变换等功能。

该软件根据二阶矩的理论,利用空间频率分析的方法,在新的混合模光斑定义下,能对基

模、多模、混合模光束以及任意形状光束的空间能量分布进行分析,还能对实际光束进行拟合。

## 4 真实激光束的实验测量及模拟

### 4.1 测量原理与公式

我们采用较为科学的二阶矩理论<sup>[1,6]</sup>,光斑半径、发散角和光束质量因子(混合模系数)等都是对激光振幅分布的统计效果。

根据二阶矩理论,对光强分布求二阶矩即可得到光强分布的坐标方差:

$$\sigma_i^2 = \iint_{-\infty}^{+\infty} (i - \bar{i})^2 I(x, y, z) dx dy \quad i = x, y \quad (1)$$

这里,  $\bar{i}$  为光束按光强分布的重心,  $i = x, y$  是考虑到光束有可能是非对称的。混合模的光斑半径与光强分布的坐标方差存在如下关系

$$W_i(z) = 2\sigma_i(z) \quad i = x, y \quad (2)$$

由于 CCD 对光的感应是一种电荷积分效果,因此利用概率论的方法可以非常容易地计算出光斑半径,而不需要进行复杂的傅里叶变换。

高功率固体激光器通常采用平-平腔,束腰位置已知,但难以测量。实验上只要测量沿光轴方向任意两个相距足够远的平面上的光斑半径便可知激光参数。设离束腰为  $z_1, z_2$  的两平面上的光斑半径  $W(z_1), W(z_2)$  已由 CCD 测得,那么,由真实激光束的传播规律可得

$$W(z_j) = W_0 \left[ 1 + \left( \frac{M^2 \lambda z_j}{\pi W_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

由此可得到真实激光束的束腰半径和光束质量因子

$$W_0 = \frac{z_2^2 W^2(z_1) - z_1^2 W^2(z_2)}{z_2^2 - z_1^2} \quad (4)$$

$$M^4 = \frac{\pi^2 [W^2(z_2) - W^2(z_1)] [z_2^2 W^2(z_1) - z_1^2 W^2(z_2)]}{\lambda^2 (z_2^2 - z_1^2)^2} \quad (5)$$

真实激光束的发散角

$$\theta = M^2 \lambda / \pi W_0 \quad (6)$$

### 4.2 激光模式测量系统的实验测量与模拟

我们对高功率、中功率脉冲 YAG 激光进行了实验测量,并对测量结果进行计算机拟合。

4.2.1 图 5(a) 为测得的一个脉冲 YAG 激光的混合模分布图,图 5(b) 为经过滤波处理后的激光混合模,通过改变模的比例,找到模拟混合模,如图 5(c) 所示,各模所占比例为  $TEM_{00} : 70\%$ 、 $TEM_{01} : 22\%$ 、 $TEM_{02} : 2.5\%$ 、 $TEM_{10} : 2.5\%$ 、 $TEM_{03} : 1.5\%$ 、 $TEM_{11} : 1.5\%$ 。图 5(d) 为真实激光混合模和模拟混合模的比较,两者基本吻合。由于实际激光在空间分布不是平滑的,有很多毛刺,为此我们对 CCD 测量到的截面光强作了滤波处理,即 CCD 每个像素上的光强与周围几点取平均。每个光斑覆盖上万个像素,这样做并不影响光强分布,并且能得到平滑的光强包络。

4.2.2 对单个模的模拟是比较容易的。图 6(a) 为实验测得的一个脉冲 YAG  $TEM_{02}$  模,图 6(b) 为其模拟模式图。实际上  $TEM_{02}$  模由于受各种因素的影响,并不对称。

4.2.3 图 7 为实验测得的另一个脉冲 YAG 模式。由于激光束的不规则性,要模拟如图 7 的激光混合模,目前还比较困难。由于它很不规则,只能说它以  $TEM_{00}$  和  $TEM_{01}$  为主,还包含其

他高阶模。对这种混合模的模拟,目前正在研究之中。

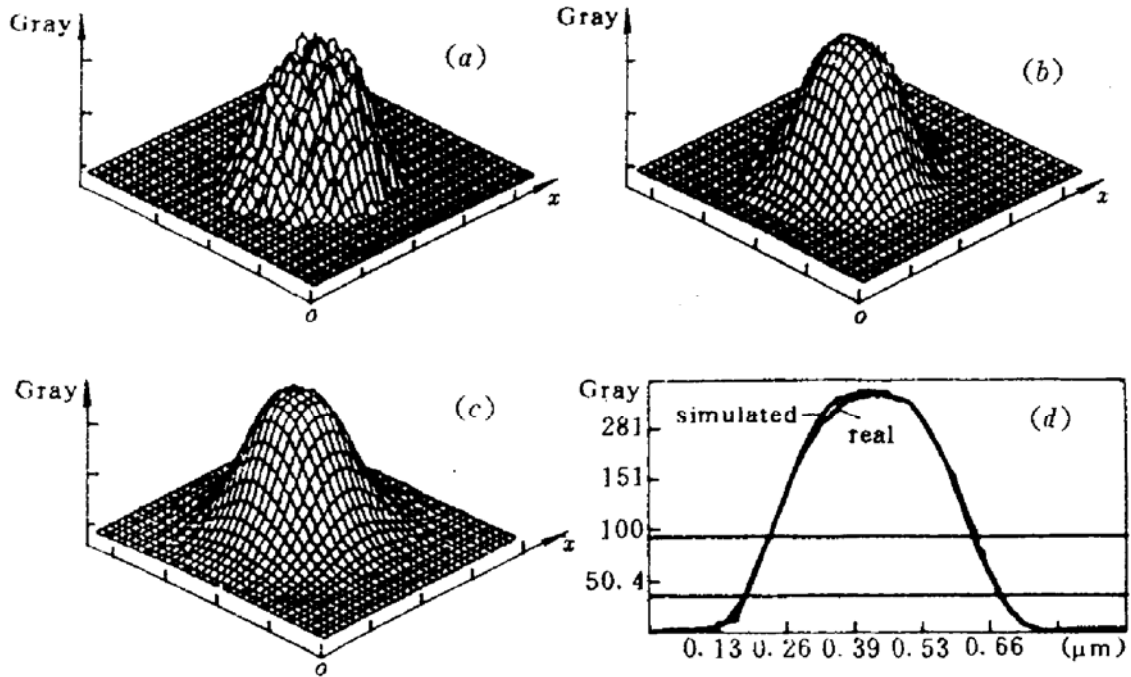


Fig. 5 Simulation of real laser mixing-mode

(a) A pulsed YAG laser mixing-mode; (b) The mixing-mode after filter-processed;

(c) Simulated mixing-mode, 70%  $TEM_{00}$  + 22%  $TEM_{01}$  + 2.5%  $TEM_{10}$  + 2.5%  $TEM_{02}$  + 1.5%  $TEM_{03}$  + 1.5%  $TEM_{11}$ ;

(d) Comparison

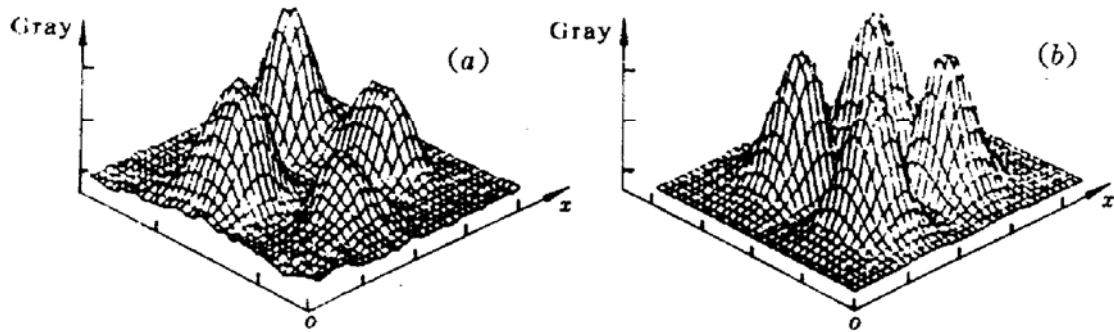


Fig. 6 Simulation of pulsed YAG  $TEM_{02}$  mode

(a) A pulsed YAG  $TEM_{02}$  mode; (b) Simulation of  $TEM_{02}$  mode

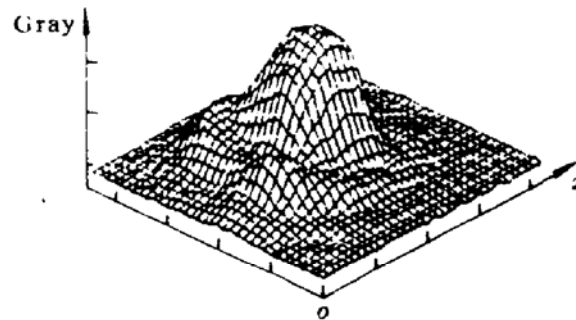


Fig. 7 Another pulsed YAG mixing-mode

## 参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman *et al.*. *IEEE J. of Quant. Electr.*, in preparation
- 2 J. A. Riff *et al.*. *App. Opt.*, to be published
- 3 Spiricon Inc., Spiricon Inc. Technical Data, 1990, (5) : 2~11
- 4 Steren W. Fine. *Laser & Optics*, 1989, (12) : 57~60
- 5 王廷福等. *激光技术*, 1991, 15(2) : 97~103
- 6 A. E. Siegman, *Proceedings of the SPIE*, 1990, 1224 : 2~14

## High Power Pulsed Laser Mode Measuring System Using Planar CCD Camera

Sun Xiaowei Yang Jie Yu Yizhong Long Xiao Zhang Rui

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Shi Hongmin Duan Zhunguang Wang Hao

(Beijing Opto-electronics Institute, Beijing 100010)

**Abstract** A high power pulsed laser mode measuring system using planar CCD camera is hereby introduced in this paper. The system includes beam attenuator, single pulse selection and pulse synchronizing, beam matching, CCD camera, frame grabber board, monitor, computer and system software. The software is based on Intensity-Moments Analyses. It can give spatial energy distributions of high power, high repetition rate laser pulses, and simulate measurements. The  $M^2$  factor of laser beam quality is calculated from the data measured, and the laser beam quality can be valued.

**Key words** planar CCD camera, high power pulsed laser, mixing-mode, spatial energy distribution