

文章编号: 0258-7025(2005)07-0993-04

面阵 CCD 激光束参量测量系统及其实验研究

高雪松, 高春清, 杨绍状, 高明伟, 李家泽, 魏光辉

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 采用面阵 CCD 探测器测量连续和脉冲激光器空间光束的技术, 研制了一套高精度激光参量测量系统, 测量了激光二极管连续抽运输出波长为 1064 nm 的固体模式发生器产生的不同阶次厄米-高斯光束和脉宽 10 ns 调 Q 灯抽运固体激光器的光束参量, 分析对比了模式发生器输出光束的理论值和实验测量结果, 证明了该系统测量精度优于 5%, 讨论了测量系统中各种因素对光束参量测量结果的影响。

关键词 激光物理; 物理电子学; 光束参量测量; 面阵 CCD; 模式发生器; M^2 因子

中图分类号 O348.11 **文献标识码** A

Experimental Study on Beam Parameter Measurement System by Using Area Array CCD

GAO Xue-song, GAO Chun-qing, YANG Shao-zhuang, GAO Ming-wei,
LI Jia-ze, WEI Guang-hui

(Department of Optical-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The technical problems concerning the determination of the laser beam parameters by using area array charge couple device (CCD) detector were studied. The beam parameters of Hermite-Gaussian modes generated from laser diode (LD) pumped CW Nd:YAG laser with 1064 nm and a lamp pumped Q-switched Nd:YAG laser with 10 ns pulse width were experimentally measured. Comparing the measured beam quality factor M^2 with theoretical one, the measuring deviation of M^2 was less than 5%. The measuring error of the divergence was also less than 5%. The influences of various factors on the measured beam parameters were discussed.

Key words laser physics; physicelectronics; beam parameter measurement; area array CCD; mode generator; M^2 -factor

1 引 言

激光器的空间光束参量(光场分布、光束宽度、发散角、光束质量、光束稳定性等)是影响激光器应用效果的重要因素^[1~3]。许多领域需要精确测定激光器的束宽、远场发散角、束腰位置和光束质量因子(M^2 因子)等参量,其中束宽的测量是基础。只有精确测量了激光器的束宽,才可以精确测得激光器的发散角,束腰位置, M^2 因子等参量。激光器束宽的测量结果与其定义有关,目前束宽的定义方法主要有光强二阶矩法、内含功率(能量)法、光强 $1/e^2$ 法、拐点法等,其中根据光强二阶矩定义的束宽在一阶光学系统中传输时满足 ABCD 定律,是国际标准

化组织(ISO)推荐使用的一种定义方法。束宽的主要测量方法有小孔扫描法、狭缝扫描法、刀口扫描法、可变光阑法和面阵 CCD 探测器法等。这些方法中,面阵 CCD 探测器法以其响应速度快、可同时测量光束横截面二维方向上的光场分布、适用于脉冲激光器的光束测量等特点受到广泛重视。

本文以光强二阶矩定义激光器束宽,以面阵 CCD 探测器作为测量元件,研制了一套高精度面阵 CCD 激光束参量测量系统,并利用此系统实际测量了激光二极管(LD)连续抽运固体模式发生器产生的各阶次厄米-高斯光束的光束参量和调 Q 灯抽运固体激光器的光束的参量,分析了系统中光学元器件,CCD 的性能和测量软件等给光束参量测量造成的影响。

收稿日期: 2004-09-01; 收到修改稿日期: 2004-11-05

作者简介: 高雪松(1980—),男,北京理工大学博士研究生,主要从事激光光束参量测量和新型固体激光器与技术方面的研究。E-mail: gxs1980@sina.com

2 测量系统

激光光束测量系统如图 1 所示。包括棱镜衰减器,中性衰减片组,变换透镜,CCD 探测器,图像采集卡,PC 机以及相关测试软件等几部分。

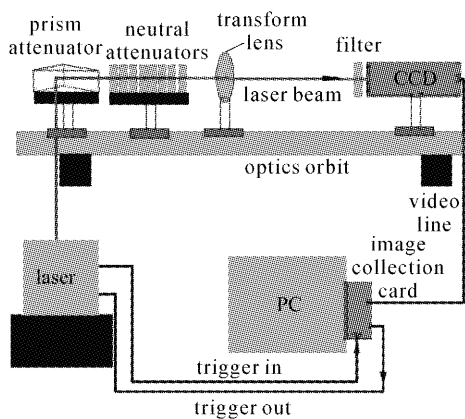


图 1 测量系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of laser beam parameters measurement system

因为 CCD 探测器具有高灵敏度和低饱和光强的特点,所以光学衰减器是高功率激光参量测量系统中必不可少的光学元件。其中棱镜衰减器以其可适用于高功率激光、无畸变等特点而作为第一级衰减器,工作原理如图 2(a)所示。系统采用石英玻璃制成楔角为 6.5° 的衰减器。空气折射率 $n_1=1$,石英玻璃折射率 $n_2=1.46$,角 1 为入射角,以 θ_1 表示(角 1~7 分别用 $\theta_1 \sim \theta_7$ 表示),其中 $\theta_1=45^\circ$,根据折射定律计算可得: $\theta_2=45^\circ$; $\theta_3=57.9^\circ$; $\theta_7=77.7^\circ$ 。根据

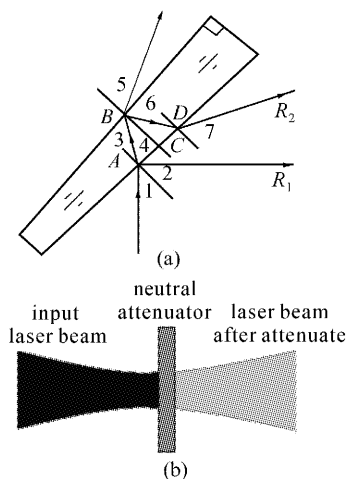


图 2 (a) 光楔衰减器和(b)中性衰减片的原理图

Fig. 2 Principle of cuneal attenuator (a) and neutral glasses attenuator (b)

菲涅耳公式可得一个表面反射光能量与入射光能量比 $R_1=0.043=4.3\%$ 。设棱镜衰减器中心厚度 $BC=a$, $\theta_3=28.97^\circ$, $\theta_4=35.47^\circ$,则 $AC \approx a/\sqrt{3}$, $AD \approx 2a/\sqrt{3}$ 。因为激光光斑束宽远比厚度 a 小,且 $\theta_7=77.7^\circ > \theta_2=45^\circ$,所以反射光 R_1 和 R_2 不会相交,且反射光 R_1 仅有入射光 4.3% 的能量,因此利用棱镜第一个表面的反射光可以实现对光束的无畸变定量衰减,组合多块棱镜使用还可以实现对强激光束的衰减,故该系统可完成对强激光光束参量的测量。

为更精细控制衰减程度,需要使用有吸收特性的中性玻璃制成衰减片。如图 2(b)所示,衰减片可以保护 CCD,适当选择衰减幅度(衰减幅度为 3% , 5% , 10% , 20% , 30% 和 50% 等)能有效利用 CCD 的动态范围,精确计算光束参量,减小测量值与理论值之间的误差。可通过改变衰减片的数量与型号灵活控制光束衰减程度。

由于被测激光斑大小大多数情况下不能保证与 CCD 探测面大小匹配,因此很多情况下需要加入透镜对激光束进行变换后测量,原理如图 3 所示。由于变换透镜的像差对于光束参量测量结果有较大影响,优化情况下选用双分离或双胶合透镜消除像差($f=300\text{ mm}$ 双分离和 $f=1000\text{ mm}$ 双胶合),透镜表面镀被测激光波长的增透膜。特别是在测量激光器 M^2 因子时,需要在透镜后面形成一个人造束腰,在该束腰两侧二倍瑞利长度范围内不同位置上采集激光束光斑,利用双曲线拟合的方法求出激光器的 M^2 因子。

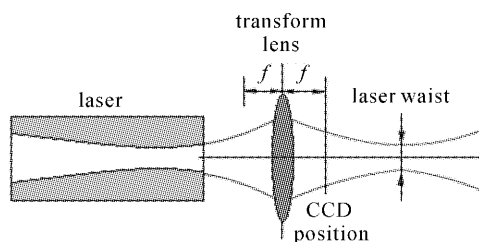


图 3 变换透镜工作原理图

Fig. 3 Principle of transform lens

面阵 CCD 探测器用于采集激光光斑,是光束参量测量中的重要元器件。选择 CCD 时要考虑其光谱响应、动态范围、非线性度、均匀性等特性,对于脉冲激光器的测量,要考虑 CCD 与激光器的同步问题,系统中采用 MTV-1881CB 型 CCD。图像采集卡用于获取 CCD 采集的图像,由软件计算测量结果。

3 固体激光模式发生器光束参量的实验测量

固体激光模式发生器是一种可以产生各种阶次厄米-高斯光束的激光器,其原理如图 4 所示。该激光器的抽运源是波长为 808 nm 的激光二极管,增益介质是 Nd:YAG 晶体,激光二极管发出的抽运光通过准直聚焦系统后会聚到 Nd:YAG 晶体上。激光器采用平凹腔结构。在实验中,激光二极管与其光束耦合系统放在同一个二维工作台上,在垂直于光轴的平面内改变抽运光离轴位置时,可以激发出不同阶次的厄米-高斯光束。图 5 是所产生的几个厄米-高斯光束的光斑实例。

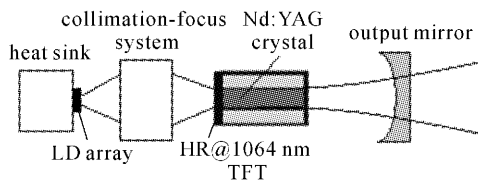


图 4 固体激光模式发生器原理图

Fig. 4 Principle of laser mode generation

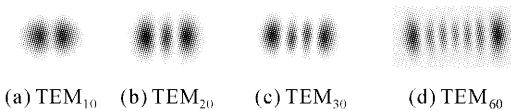


图 5 模式发生器各个阶次光斑图样

Fig. 5 Pattern of laser modes

根据光强二阶矩的定义,从同一台激光器发出的基模和高阶模所对应的束宽和发散角具有如下关系

$$\begin{cases} \omega_m = \sqrt{2m+1}\omega_0, \\ \theta_m = \sqrt{2m+1}\theta_0, \\ M^2 = (2m+1)M_0^2. \end{cases} \quad (1)$$

其中 ω_0 和 θ_0 分别为基模光束的束宽和发散角; ω_m

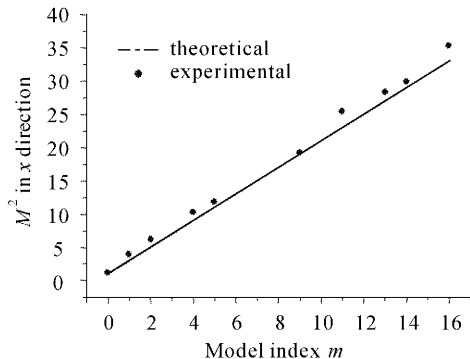


图 6 模式发生器各个阶次 M^2 分布

Fig. 6 M^2 -factor versus model index

和 θ_m 分别为高阶模光束的束宽和发散角; m 为 x 方向模阶次。因此可通过测量固体激光模式发生器输出基模和高阶模的高斯光,比较测量值与理论值的差别,检验所研制的光束参量测试系统的精度和可靠性。

从图 6 所示结果中看出,各阶次光斑 x 方向 M^2 因子测量值与理论值偏差情况,其相对误差小于 5%。实验中发现,输出光场的总能量和峰值能量波动很小,基本可以排除是激光器本身热效应引起的腔长变化导致 M^2 因子的变化,这个偏差主要是由于激光模式发生器本身多模振荡的影响。

4 调 Q 激光器发散角的测量

根据 ISO11146 标准^[4],若待测激光束不是圆对称光束,则分别描述沿 x 方向和 y 方向激光束的发散角 θ_x, θ_y (光轴方向为 z): $\theta_x = d_{xf}/f, \theta_y = d_{yf}/f$, 其中 d_{xf}, d_{yf} 分别为激光器在变换透镜后焦面上沿 x 方向和 y 方向的束宽。

脉冲激光器光束参量测量的主要问题是如何实现激光器与测量系统的同步。本系统提供两种出发同步模式:一种是由图像采集卡发出脉冲信号触发激光器出光;另一种模式是由激光器发出一定重复频率的脉冲触发图像采集卡采集光斑。实验中待测调 Q 灯抽运激光器脉宽为 10 ns 左右,对脉冲激光采样 100 帧图像后进行统计平均,在软件中使用二阶矩法计算发散角, x 和 y 方向的光斑大小分别为 1479 μm 和 1391 μm ,发散角大小分别为 17.4 mrad 和 17.9 mrad。图 7 所示其测量结果与平均值的相对误差小于 5%。

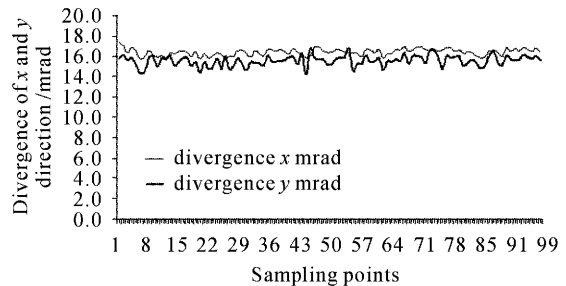


图 7 二阶矩法测量发散角采样分布图

Fig. 7 Measuring the divergence with the method of second order moments versus sampling point numbers

5 分析与讨论

很多文献中都只对影响激光光束测量的因素进

行理论分析,在以 CCD 为探测器的光束参量测量系统中,许多因素会影响测量结果的精度,文献[5]中研究采用面阵 CCD 探测器测量激光束空间光束参量中的问题,采用计算机模拟的方法讨论了 CCD 的积分范围、动态范围及 A/D 转换量化精度和光斑最大光强等 CCD 本身的性能参量对光束参量测量精度的影响。本文则从具体实现上对各种影响因素进行分析,提出技术要求。

5.1 噪声与背景

束宽测量的随机噪声由被测激光器光强无规律起伏带来的噪声和 CCD 的固有噪声组成。前者可通过多幅图像平均的方法减小,后者可通过选用较高精度的 CCD 实现。因此要求软件算法中应包含统计平均的功能。取 10 幅背景图像平均作为背景进行扣除,测量应该在低背景能量水平的环境下进行,以免一些较弱的信号光淹没在亮背景中,使测量精度降低。因此要求测量装置密封性好,采用内部涂敷黑漆等方法用来吸收杂散光。

5.2 CCD 的影响

主要考虑 CCD 的有效积分区域、动态范围和 A/D 量化精度以及光斑的最大强度这几个方面的影响。CCD 面积有限,距离中心较远位置的信号往往淹没在噪声之中,为避免选取过大积分面积将许多信噪比小于 1 的像素点添加进来进行计算,影响计算的速度和精度,因此要求软件应具有积分区域的取舍功能,只选取在一定积分范围内的光强信号进行加权积分计算;CCD 动态范围大,就可在更大积分区域内探测光斑能量分布;A/D 变换过程中,小于半个量化单位的采样值被舍掉。选取图像采集卡需要至少 8 位以上的 A/D 转换精度;在条件允许的情况下,可使被采集光斑的最大光强尽量接近饱和和光强值,充分利用 CCD 动态范围。因此要求实际测量中应保证光斑最大强度在 CCD 动态范围上半区以确保测量精度。

5.3 中性衰减片的不均匀性

衰减片上不同点的衰减度不能完全一样,激光束经过衰减片后其能量二维分布有所改变,由此引入误差而影响参量的测量精度。因此要求,选择有待测激光波长范围内吸收系数稳定、表面均匀性较好的中性玻璃制作衰减片,以减小光场畸变。必要

时在其表面镀膜,以滤掉其他波长的光。

5.4 光路调整中的影响

主要考察伴随杂散光斑和光学元件不同轴的影响。在实际测量时常会有待测光束的反射折射像随待测光束一起进入 CCD 探测器。因此要求,在测量中尽量避免杂散光的进入,可采用加装孔径光阑的方法消除,并尽量保证光束与主光轴重合;在设计测量装置时,考虑使用光学调整架保证中性衰减片组、变换透镜及 CCD 探测器等关键部件的光学中心通过光轴,并加入至少二维的微调机构进行调节。

6 结 论

报道了一种高精度面阵 CCD 激光束参量测量系统,测量了波长为 1064 nm,脉宽 10 ns,灯抽运脉冲调 Q 激光器与激光二极管端抽运连续激光模式发生器的光束参量,实现了脉冲激光与测量系统的同步,测量了高阶厄米-高斯光束的光束参量,比较了理论与实验结果,证明该系统测量精度优于 5%,分析了系统中各光学元件及 CCD 的性能和测量软件等对测量结果的影响,对同类系统研制提出了具体的技术要求。

参 考 文 献

- 1 Deng Xiaojie, Xie Lisha, Liu Caixia. Beam quality and beam quality factor [J]. *Guangxi Physic*, 2003, **24**(2): 11~12
邓小玖,谢莉莎,刘彩霞. 光束质量与光束质量因子 [J]. *广西物理*, 2003, **24**(2): 11~12
- 2 Sun Wei, Gao Chunqing, Wei Guanghui. Design of a precision CCD measurement system for beam characterization [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2000, **20**(4): 471~474
孙 伟,高春清,魏光辉. 精确 CCD 光束参量测量与评价系统的设计 [J]. *北京理工大学学报*, 2000, **20**(4): 471~474
- 3 Qing Yushan, Lü Baida. M^2 factor of hand-edge a perturbed laguerre — Gaussian beams-self-convergen beam width method and comparison with the asymptotic analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 231~235
卿与三,吕百达. 受硬边光阑限制的拉盖尔-高斯光束的 M^2 因子——自收敛束宽法及其与渐近分析法的比较 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 231~235
- 4 International Standard organization 1999 ISO 11146: Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle and beam propagation factor [S].
- 5 Cao Yilei, Gao Chunqing. Analysis on the accuracy of beam parameter measurement by using CCD array [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(5): 583~586
曹一磊,高春清. 基于面阵 CCD 的激光光束参量测量系统精度分析 [J]. *光学技术*, 2004, **30**(5): 583~586