

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0311-03

高精度激光光束参数(M^2 因子)测量系统的研究*

高春清 孙伟 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: 报道了高精度激光光束参数(M^2 因子)测量系统的原理、结构和实验结果。该系统以数字化制冷面阵 CCD 为探测器, 具有图像背景扣除、噪声确定、光斑能量分布二维和三维显示、图像直方图、光束宽度、发散角、 M^2 因子等光束参数测量等功能, 已用于对多种灯抽运, LD 抽运固体激光器光束参数的测量。此外, 还研制了可产生从 TEM_{0,0} 到 TEM_{35,0} 的多种光场分布的 LD 抽运固体激光横模发生器, 并对这些模式的 M^2 因子进行了实验测量, 测量值的理论值吻合。

关键词: 激光光束参数, M^2 因子, 激光模式

中图分类号 O431 文献标识码 A

Study on the High-resolution System for Measuring Laser Beam Parameters (M^2 -Factor)

GAO Chun-qing SUN Wei GAO Ming-wei LI Jia-ze WEI Guang-hui

(Department of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract This paper discussed the design, configuration and experiments of a high accuracy laser beam parameter (M^2 -factor) measurement system. The system utilizes a cooled digital CCD array as the detector and has the functions of background subtraction, noise determination, 2D and 3D energy distribution display, image histogram, beam width, divergence and M^2 -factor determinations. For testing the reliability of the above system a LD-pumped mode generator which can generate Hermite-Gaussian modes from TEM_{0,0} to TEM_{35,0} was developed. The M^2 -factor of different transverse modes were experimentally measured and the results agree with the theoretical estimation.

Key words laser beam parameter, M^2 -factor, measurement, laser mode

1 引言

在激光材料加工、激光医疗、光通信、激光军事应用等许多领域人们需要精确测定激光器的光束宽度(光斑半径或直径)、远场发散角、束腰位置和光束传输因子(M^2 因子)等参数。在上述激光光束参数的测量中, 光束宽度的测量是最基础的, 在精确测定了光束宽度后, 激光束的远场发散角、束腰位置、瑞利长度、 M^2 因子等参数可以通过二次曲线的拟合获得。激光光束宽度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光斑半径(直径)在一阶光学系统中传输时满足 ABCD 定律, 激光束 M^2 因子

也以光强二阶矩定义的光斑半径为基础^[1-4]。激光光束宽度的主要测量方法有小孔扫描法、狭缝扫描法、刀口扫描法、面阵 CCD 探测器法等。在这些方法中, CCD 面阵探测器以其测量速度快、可同时测量 x - y 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而受到广泛重视。理论分析表明, 在以面阵 CCD 为探测器测量光束参数时, CCD 的动态范围(噪声水平)、线性度、不均匀性、分辨率等参数会对测量结果产生很大影响, 特别是在计算以光强二阶矩定义的光束宽度时影响更为严重。根据数值模拟的结果, 测量高斯光束时 CCD 的动态范围应在 300 以上, 对于超高斯光束系统的动态范围应在 2^{11} 位以上; 系统的 A/D 位数应不小于 2^{10} ; 系统的空间分辨率(采样点数)应在 500×500 以上; 测量时的背景噪声响应该精确地扣除至待测光束峰值的

* 国家九五预研项目和国家自然科学基金(69908001)资助课题。

0.1% 以下^[5]。因此为了保证一定的测量精度,必须要选用低噪声、大动态范围的 CCD 探测器,并在计算软件上对测量过程中引入的图像背景、噪声进行严格扣除,并合理确定计算二阶矩半径时的积分区域。动态范围为 2^8 的商用面阵 CCD 很难用于激光光束参数的高精度测量。本文报道了我们研制的以数字化制冷面阵 CCD 为探测器的高精度激光光束参数(M^2 因子)测量系统的原理、结构和实验结果。

2 测量系统

高精度光束参数(M^2 因子)测量系统的结构如图 1 所示,其探测器为 Kodak 数字化制冷面阵 CCD,像元数为 1536×1024 ,像元大小为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$,16 位 A/D。经过测试,该 CCD 的信号传输环节的失真 $< 1\%$,动态范围大于 $4000:1$,不均匀性低于 0.5% ,线性度极佳。由于 CCD 具有高灵敏度和低饱和光强的特点,故设计加工了大倍数的光强衰减器。高功率激光的衰减首先通过棱镜分束器实现,由于棱镜表面反射可看作是无像差的理想光学系统,因此可利用其反射光实现无像差定量衰减。在使用棱镜分束器后,更为精细的衰减可以使用吸收性的中性衰减片实现。在使用中性衰减片时,为了减小衰减片不同反射面反射光束的干涉以及相邻衰减片不同反射面反射光束间的干涉的影响,本系统使用了带楔角的中性衰减片。在测量激光束的 M^2 因子时,需要在光束传输路径上的不同位置测量光束半径,故要求仪器能精确改变 CCD 和激光器之间的距离。为了减小测量系统的体积,本系统采取由计算机控制的步进电机精密移动两组平行平面反射镜的位置获得被测光束在沿传输方向不同位置上的光斑分布。为了测量脉冲激光器的光束参数,保证激光脉冲正好落在 CCD 探测器的积分时间内,

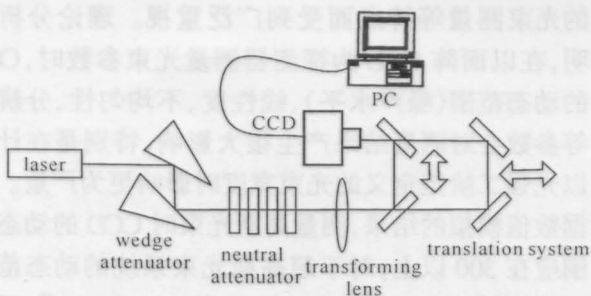


图 1 高精度激光光束参数(M^2 因子)测量系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of high resolution laser beam parameters (M^2 -factor) measurement system

以及保证只选择一个脉冲进行测量,本系统通过软件控制 CCD 的快门实现脉冲激光的同步采集和测量。

本系统对激光光束宽度的计算是基于一套自行开发的 Windows 95/98/2000/NT 的实用软件-BIT BeamAnalyzer WorkShop。软件包含测量系统电机控制,CCD 曝光时间控制,与脉冲激光的同步控制,光斑能量分布的二维和三维显示,图像直方图,光束宽度,发散角和 M^2 因子等光束参数的计算、误差传递分析及测量结果误差估计等功能。与光束参数测量相关的大部分工作都可以在此软件内完成^[5]。

3 实验研究

我们利用研制的激光光束参数测量系统已对 LD 抽运单频固体激光器,灯泵高功率固体激光器、LD 抽运高功率连续输出固体激光器、LD 抽运高重频固体激光器,灯抽运大能量固体激光器的光束参数进行了测量。作为例子,图 2 给出了 LD 抽运单频 Nd:YAG 激光器的测量结果^[6],其中图 2(a)是该激光器的光场分布,图 2(b)是激光器 M^2 因子随输出功率的变化情况。

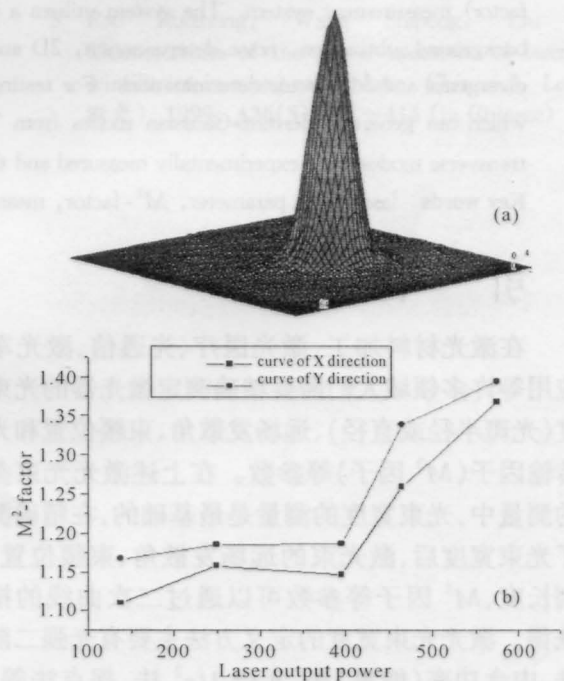


图 2 (a) LD 抽运单频 Nd:YAG 激光器的光场分布;
(b) LD 抽运单频激光器的 M^2 因子与输出功率的关系
Fig. 2 (a) Intensity distribution of LD-pumped single-frequency Nd:YAG laser; (b) M^2 -factor versus output power of LD pumped single-frequency Nd:YAG laser

4 LD 抽运固体激光模式发生器及其光束参数测量

为了检验 M^2 因子测量系统的可靠性,我们研制了 LD 抽运的固体激光横模发生器并用上述系统对其输出光束的 M^2 因子进行了测量。所研制的横模发生器由光纤输出半导体激光器端面抽运 Nd:YAG

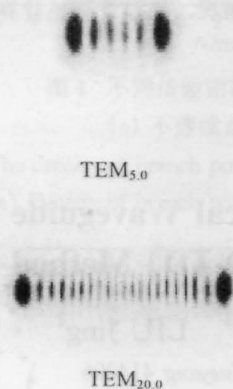


图3 LD 抽运固体激光模式发生器输出的厄密-高斯光束实例

Fig. 3 Examples of Hermite-Gaussian modes generated from LD pumped solid-state mode generator

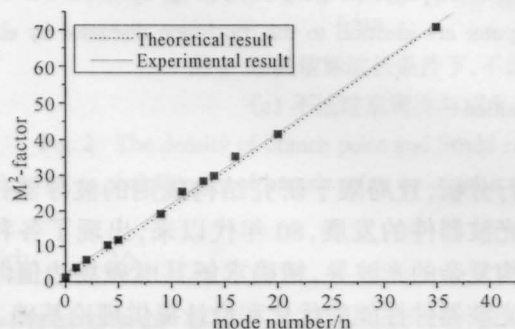


图4 厄密-高斯光束 M^2 因子与横模阶次的关系曲线
Fig. 4 M^2 -factor versus transverse mode number of Hermite-Gaussian modes

激光器构成,当沿着与 Nd:YAG 激光器光束垂直的方向平移抽运光纤时,该激光器可产生从 $TEM_{0,0}$ 到 $TEM_{35,0}$ 的多种厄密-高斯光束,图 3 所示为横模发生器输出的厄密-高斯模的两个实例。根据理论计算,厄密-高斯光束的 M^2 因子有确定的理论值 $M^2 = 2m + 1$,其中 m 为厄密-高斯模式的阶次。我们用所研制的 M^2 因子测量系统测量了从 $TEM_{0,0}$ 到 $TEM_{35,0}$ 之间多种横模的 M^2 因子,测量结果如图 4 所示。根据图 4,实验所测各高阶横模的 M^2 因子的实验值与它们的理论值吻合,从而验证了测量系统的可靠性和测量精度。

5 结 论

本文报道了所研制的以数字化制冷面阵 CCD 为探测器的高精度激光光束参数(M^2 因子)测量系统及其在测量多种激光器中的应用。由于该测量系统采用了动态范围大于 4000 的 CCD 作为探测器,并采用了多种背景、噪声处理计算进行了光斑图像的处理和计算,因此该系统的测量精度比以小动态范围的商用 CCD 作为探测器的光束参数测量系统的测量精度明显提高,该系统已在科学研究和产品开发中发挥了重要作用。

参 考 文 献

- 1 A. E. Siegman. New developments in laser resonators. *Proc. SPIE*, 1990, **1224**:2~4
- 2 ISO/TC 172/SC 9/WG 1N80, ISO/DIS 11146. Test methods for laser beam parameters: Beam width, divergence angle and beam propagation factor. 1995.
- 3 吕百达,张彬,蔡邦维. M^2 因子的概念和激光光束质量控制. *激光技术*, 1992, (16):278~284
- 4 高春清,魏光辉. 像散光束的光束参数与光强二阶矩的关系. *光学技术*, 2000, **143**(3):207~210
- 5 W. Sun, C. Gao, G. Wei. Processing applications in laser beam characterization. *Proc. SPIE*, 2000, **4222**:81~86
- 6 吴克瑛. LD 抽运非平面单向行波环形腔单频激光器[北京理工大学博士学位论文],2001