

激光强度时空分布测量漫散射取样衰减技术研究

庞森^{1,2}, 周山², 吴娟², 荣健¹, 高学燕², 胡晓阳²

(1. 电子科技大学物理电子学院, 四川成都 610054;

2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 激光强度时空分布的测量对于诊断与评估激光系统的性能具有重要意义, 减少激光入射角度影响、对大尺度激光束进行高分辨力、高占空比取样是准确测量激光强度分布的关键, 结合漫散射光分布与入射光方向无关的原理, 提出了激光强度时空分布测量漫散射取样衰减方法, 设计了漫散射取样衰减单元, 建立了光强计算模型, 推导了光强计算公式并进行了验证, 光强衰减倍数实验结果与理论值一致。介绍了漫散射取样衰减装置与光电管阵列或 CCD 成像系统的组合应用。该方法的优点: 空间取样分辨率高, 可达 2mm 左右; 使用角度宽, 可达 $\pm 30^\circ$ 而不需要响应修正; 占空比高, 可达 40% 以上; 衰减倍数范围大, 可以通过调节衰减结构参数实现任意需要的衰减倍数。漫散射取样衰减为阵列探测器对大尺寸激光束进行取样和衰减提供了一种新方法, 提高了激光强度分布测量能力和测量精度。

关键词: 激光测量; 强度分布; 漫反射; 漫透射; 阵列探测器

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3213-05

Research on scattering sampling and attenuating in measurement of laser intensity distribution

Pang Miao^{1,2}, Zhou Shan², Wu Juan², Rong Jian¹, Gao Xueyan², Hu Xiaoyang²

(1. College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The measurement of laser intensity temporal-spatial distribution is of great importance for diagnosing and evaluating the performance of laser system. Spatially sampling large size laser beam is the first step to measure the laser beam parameters, decreasing the influence on measurement result from the laser incident angle and sampling large size laser beam with high spatial resolution and high duty ratio are very critical for accurately measuring laser beam intensity temporal-spatial distribution. Base on the principle of diffuse scattering, which means the distribution of scattering light has nothing to do with incident light, scattering sampling and attenuating method was put forward in array detectors for the measurement of laser intensity distribution. The diffuse scattering principle was briefly introduced. The construction of sampling and attenuating was given, the transmission laser intensity computation model

收稿日期: 2013-04-14; 修订日期: 2013-05-19

基金项目: 国家高技术发展计划

作者简介: 庞森(1977-), 男, 博士生, 主要从事激光参数诊断方面的研究。Email: pangmiao@sina.com

导师简介: 荣健(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光通信与光电检测系统技术方面的研究。

Email: Rongj@mail@163.com

was set up, the intensity formula was deduced and verified through experiments. The applications of scattering sampling unites and photodiode array or CCD were introduced. There are notable advantages, high resolution which is 2 mm or so; high duty ratio which is up to 40%; wide use angle which can be up to 30° and adjustable multiple attenuation which wants. Scattering sampling and attenuating provide a new method for array detector to sample laser beam, which overcome the shortages of technologies available, improves the measuring ability and measuring accuracy significantly and is of great significance to laser intensity distribution measurement device, the method can be widely used to development the measurement systems of laser beam parameters.

Key words: laser measurement; intensity distribution; diffused reflection; diffused transmission; array detector

0 引言

激光强度时空分布是指激光束强度空间分布随时间的变化,是激光束参数的重要特性之一,通过激光强度分布的测量可以获得激光束近场均匀性、远场激光功率密度分布、质心位置、质心抖动、光束质量等参数,因而激光强度分布的测量对于诊断与评估激光系统的性能具有重要意义^[1],在激光大气传输、激光系统跟瞄精度测量等领域应用广泛。激光强度分布的测量方法很多^[2],目前最主要应用的是成像法和阵列探测器法。无论使用哪种方法,都需要对光斑进行空间取样。漫散射取样在成像法中应用较多,普遍的应用是漫反射成像法^[3-4],漫透射成像法也有相关报道^[5]。这两种应用都是利用散射材料对被测激光束进行整体取样,然后进行成像测量。其突出优点是分辨力高,占空比高,使用方便。但整屏取样也有缺点,如面散射表面瑕疵带来取样不准确,体散射光斑匀化等。阵列探测器对激光取样方式较多,有的使用小分光镜片进行取样和衰减^[6],但镜面反射光方向性强,可能会对原光路和周围环境带来危害,此外角度引起的不确定度偏大;有的通过小孔加积分球衰减器进行取样^[7],这种方式响应值随角度变化影响也很大且衰减倍数不易控制,分辨力难以提高;为了克服目前激光强度分布测量中取样和衰减的这些不足,文中利用漫散射原理在阵列探测器研制中提出一种新的取样衰减方法,提高了激光束空间取样分辨力,解决了入射角度影响光电探测器响应值的问题,同时,可以获得任意需要的衰减倍数,因而对于阵列探测器的研制具有重要意义。

1 漫散射取样衰减单元设计

光波遇到不均匀结构时,根据介质表面和体内颗粒情况,会发生镜面反射、定向漫反射、漫反射、直接透射、定向漫透射、漫透射。漫散(反、透)射的最重要的性质有两点:第一,散射光强分布符合 Lambert 定律,可用公式(1)表示。

$$I_\alpha = I_N \cos \alpha \quad (1)$$

式中: I_N 为发光面在法线方向上的发光强度; I_α 为和法线成任意角度 α 方向上的发光强度。根据漫散射的这一性质,可以计算得到空间任意位置的光强,从而可以通过设计合适的结构来得到需要的光强,同时漫反射可以让取样反射光完全散开,避免对周围环境或原光路造成干扰或危害。

漫散射第二点重要性质就是反(透)射光强分布与入射光方向无关。利用这一点,可以解决激光入射角变化探测器响应值变化的问题,从而提高测量精度。

利用漫散射的性质,设计了取样衰减单元,结构如图 1 所示,衰减腔侧壁表面进行发黑处理,能对散射激光进行全吸收,如果衰减倍数很大(如 10^6 以上),需要很长的衰减腔,为了减小取样装置尺寸,可以加上光学衰减片,以达到需要的衰减倍数。衰减倍数可以通过衰减腔长度和直径以及光学衰减片倍率来进行调节。

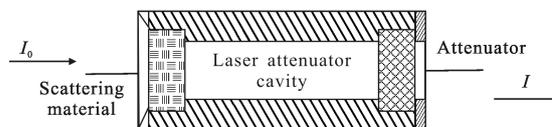


图 1 取样衰减单元结构示意图

Fig.1 Sketch of sampling and attenuating configuration

设衰减腔长度为 L , 散射材料半径为 R , 入射激光功率密度为 I_0 , 衰减腔出口光强为 I , p 为入射激光功率, 散射材料透过率为 t , 衰减片透过率为 t_1 。

图 2 中, y 方向为图 1 中通光方向, O 点为漫散射材料中心, 设与原点距离为 L 的任意一点 Q 处面元为 $d\sigma$, φ 为 OQ 在平面 yo 上投影与 z 轴的夹角, θ 为 OQ 在平面 xoy 上投影与 y 轴的夹角, $d\varphi$ 、 $d\theta$ 为微小增量, α 为 OQ 与 y 轴夹角。

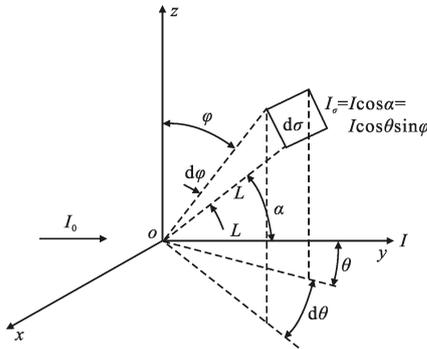


图 2 光强计算模型

Fig.2 Computational model of intensity

由公式(1), Q 点处光强为 $(I/t_1)\cos\alpha$, 根据几何关系有: $\cos\alpha=\cos\theta\sin\varphi$, 则 Q 点的光强为:

$$I_0(I/t_1)\cos\alpha = I\cos\theta\sin\varphi/t_1 \quad (2)$$

将面元 $d\sigma$ 的漫透射光微元 I_σ 对整个 π 空间进行积分得到:

$$pt = I_0 \times \pi R^2 \times t = \int_0^\pi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I\cos\theta\sin\varphi L^2 \sin\varphi / t_1 d\varphi d\theta \quad (3)$$

于是得到:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{L^2}{tt_1R^2} \quad (4)$$

$$I = \frac{ptt_1}{\pi L^2} \quad (5)$$

公式(4)即为衰减倍数, 可见通过调节腔长和散射材料的尺寸即可改变衰减器的衰减倍数, 材料透过率可以使用积分球进行测量得到, 公式(4)、(5)对于衰减器的设计具有指导意义。

2 漫散射取样衰减方法在大尺寸阵列探测器中的应用

阵列探测器进行大尺寸激光束强度时空分布测量原理框图如图 3 所示。

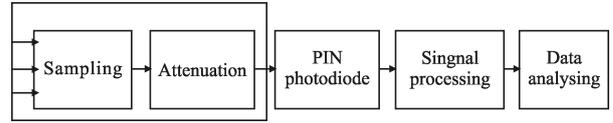


图 3 阵列探测器测量原理框图

Fig.3 Measurement principle of array detector

入射激光束照射到阵列探测器上, 阵列探测器的取样单元对其进行空间取样, 取样后的激光经过体散射后, 通过衰减腔和衰减片进行衰减, 达到 PIN 光电二极管的量程, 经光电转换后进行信号和数据处理, 得到入射激光强度分布。

将数百甚至数千个漫散射取样衰减单元按照一定规律排列起来, 便构成了大尺寸激光束空间取样衰减装置, 与光电管阵列组合起来构成激光强度时空分布测量系统。

衰减器的参数根据公式(4)来进行选取, I_0 为待测量激光功率密度, I 为所用的 PIN 光电二极管的饱和功率密度, 材料透过率 t , 衰减倍数可以通过改变衰减腔长度、直径以及衰减片的倍率来进行调节, 达到对任意强度的入射激光进行测量。

按照图 1 中的结构设计了一个取样衰减单元进行实验验证, 实验框图如图 4 所示。相关参数为: 散射材料半径 R 为 0.25 cm, 光电管直径 d 为 0.5 mm, 散射玻璃离光电管距离 L 为 25 mm, 经测试散射玻璃透过率 t 约 50%, 衰减片透过率 t_1 为 0.01, 进入单元激光功率为 142.5 mW, 光电管响应度 r 为 0.25 A/W, 根据公式(5)可计算得到光电流理论值为:

$$i = \frac{p}{\pi L^2} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times t \times r \times t_1 = \frac{142.5}{2.5^2} \times 0.025^2 \times 50\% \times 0.25 \times 0.001 = 17.8 \text{ nA} \quad (6)$$

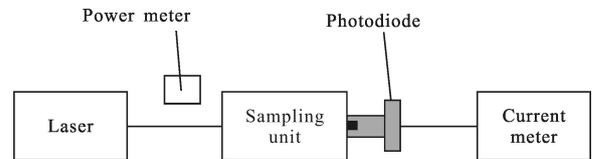


图 4 光强计算验证实验框图

Fig.4 Sketch of intensity formula confirmation

使用电流计测量得到电流为 18 nA, 实测值与理论值相符合。该结构实现的衰减倍数为:

$$\frac{I_0}{I} = \frac{L^2}{R^2} \times \frac{1}{t} \times \frac{1}{t_1} = \left(\frac{2.5}{0.25}\right)^2 \times \frac{1}{0.5} \times \frac{1}{0.01} = 20000 \text{ 倍} \quad (7)$$

利用该取样衰减方法对远场光斑进行了测量,

如图 5 所示,该测量中空间分辨力为 5 mm。

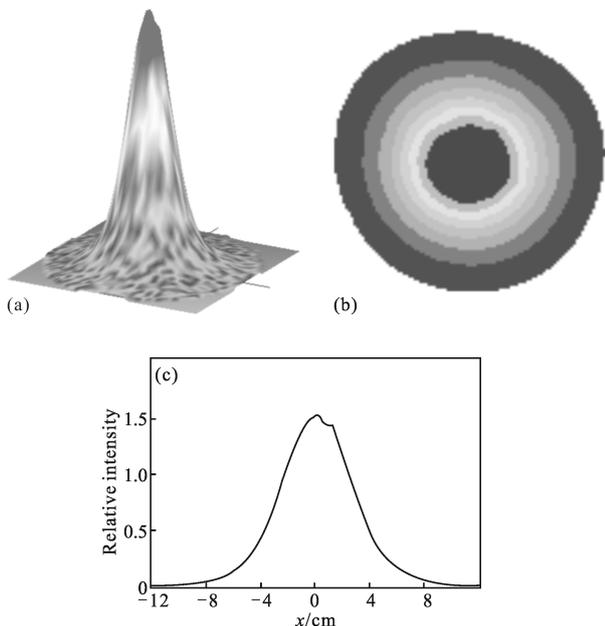


图 5 远场光斑图
Fig.5 Far field laser spot

为了验证大角度响应的特点,在实验室对近场光斑进行测量,保持入射光斑不动,转动测量系统,采集大光斑电流值,结果表明在±30°内响应值变化在 2.5% 以内(包含激光功率起伏因素),如图 6 所示。

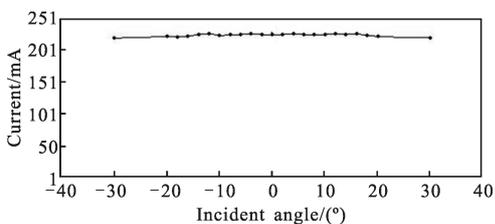


图 6 电流值随入射角的变化
Fig.6 Current vs incident angle

图 7 是角度响应验证试验中正入射和 30° 入射的光斑。



图 7 正入射与 30° 入射光斑图
Fig.7 Laser spot of 0° and 30°

采用光电法测量大光斑激光功率时,不需要阵列探测器与入射激光精确对准,尤其是在动态载体上测量激光大气传输效率时误差很小,而目前其他测量方式当入射角改变时,响应值相应改变,当入射角为 10° 左右时,响应值下降已经非常严重,不能进行测量或者测量误差显著增加,需要进行修正^[9]。

利用漫散射取样衰减装置,将衰减片换为漫散射材料,用 CCD 对漫透射光斑进行成像,便组成了成像型阵列探测器,如图 8 所示。通过采用已有的系统集成方法和光斑校正算法进行系统集成和光斑校正^[5,10]。散射材料目前可以加工的最小尺寸为 Φ1.5 mm 左右,衰减腔为通孔,加工没有特殊要求,因而取样单元可以很小,取样通道间隔可以到 2 mm 左右,从而分辨力达到 2 mm 左右,占空比 44%,而目前常用的阵列探测方法分辨力在 10 mm 左右^[7-8,11],占空比仅 3% 左右。

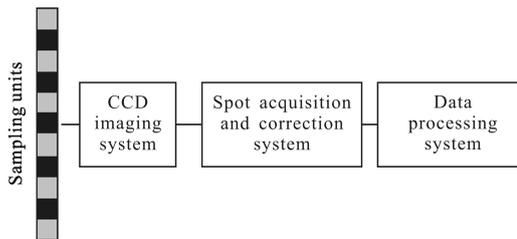


图 8 CCD 成像型阵列探测器
Fig.8 CCD imaging array detector

分辨力、占空比、角度响应是影响光斑质心(跟瞄精度)、功率密度、远场光束质量、功率等评价激光系统性能关键参数的主要因素,漫散射取样和衰减在这几方面都具有显著优势,可提高强度时空分布测量能力和测量精度。

3 结 论

提出了在阵列探测器中使用漫散射取样衰减的方法,可以提高空间取样分辨力到 2 mm 左右;占空比 40% 以上;可以实现任意需要的衰减倍数;可以增加测量设备的使用角度,±30° 甚至更大(不需要响应修正)。漫散射取样衰减为阵列探测器对大尺寸激光束进行取样衰减提供了一种新方法,克服了现有阵列探测器取样衰减技术的不足,提高了激光强度分布测量能力和测量精度,对激光强度时空分布测量具有重要作用,从而对于激光系统性能诊断与评估

具有重要意义。

参考文献:

- [1] Gao Wei, Wang Yunping, Li Bin. Study on characterization and diagnosis of high-power laser beam quality [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 61–64. (in Chinese)
高卫, 王云萍, 李斌. 强激光光束质量评价和测量方法研究. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 61–64.
- [2] Su Yi, Wan Ming. High Energy Laser System [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2004: 244–266. (in Chinese)
苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 244–266.
- [3] Tian Hailei, Wang Yuefeng, Zhang Wei, et al. Design of laser far field power density test system [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, 22(6): 24–26. (in Chinese)
田海雷, 汪岳峰, 张伟, 等. 激光远场功率密度测试系统的设计[J]. 光电技术应用, 2007, 22(6): 24–26.
- [4] Fernando R P, Wendell R W, Samuel B C, et al. Helicopter-mounted laser beam characterization test 2 [R]. ARL-TR-825, 1996.
- [5] Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan. Measurement system of laser intensity distribution based on diffused transmission imaging [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2839–2842. (in Chinese)
庞森, 袁学文, 高学燕. 漫透射成像法激光强度时空分布测量装置[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2839–2842.
- [6] Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao, et al. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese Journal Laser*, 2010, 37(2): 521–525. (in Chinese)
杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝, 等. 测量中红外激光远场光斑的光电阵列靶斑仪[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 521–525.
- [7] Zhou Dianhua. Theoretical analysis and experiments of the measurement of QKB [D]. Beijing: Graduate Department of CAEP, 2000: 50–60. (in Chinese)
周殿华. 强快靶测量的理论分析与实验[D]. 北京: 中国工程物理研究院研究生部, 2000: 50–60.
- [8] Duan Liuhua, Xie Yongjie, Ji Yunfen, et al. Development of laser beam energy distribution measuring array based on calorimetric techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1110–1114. (in Chinese)
段刘华, 谢永杰, 戟运峰, 等. 量热阵列式激光束能量分布测量系统研制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1110–1114.
- [9] Gao Xueyan, He Junzhang, Xie Chuanlin, et al. Laser power measurement uncertainty of array detectors under oblique incidence [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(7): 1656–1662. (in Chinese)
高学燕, 何均章, 谢川林, 等. 阵列探测器对斜入射激光的功率测量不确定度 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1656–1662.
- [10] Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan. Spot distortion calibration in the measurement of laser intensity distribution based on imaging by scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 451–455. (in Chinese)
庞森, 袁学文, 高学燕. 散射成像法测量激光强度分布中的光斑畸变校正[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 451–455.
- [11] Feng Guobin, Wang Qunshu, Yang Pengling. Diagnostic technology for temporal-spatial distribution of for-field high power laser beam profile [C]//International Conference on Electronics and Optoelectronics, 2011, V2: 30–33.