

文章编号: 1001-4322(2009)10-1441-05

漫射板反射式大直径激光功率-能量测量方法*

陈洪耀^{1,2}, 张黎明^{1,2}, 杨本永^{1,2}, 徐伟伟^{1,2}

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学院 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 提出了一种漫射板反射式大直径激光功率-能量测量方法。该方法利用漫射板良好的朗伯特性, 根据双向反射分布函数定义, 通过反射信号的测量, 准确得到入射在漫射板上激光束的功率-能量。技术实现上, 通过实验室标定, 将功率-能量标准传递至漫射板-探测器系统, 再利用标定好的系统实现外场大直径激光的测量。研究分析表明: 运用该测量方法, 不确定度可优于 10%, 能大大提高目前测量水平。

关键词: 激光功率-能量; 红外漫射板; 双向反射分布函数; 标准传递; 大直径激光束

中图分类号: TN82 **文献标志码:** A

大直径激光的功率-能量测量在大气传输、无线光通信、激光雷达定标等研究中有重要的意义。一般的激光功率-能量测试设备因接收口径有限, 采用直接的方法只能检测到极小空域的能量, 不能满足远场大尺寸激光束功率-能量的测量^[1-2]。目前, 主要采用探测器点阵测量法^[3-4]和 CCD 成像加漫射板透射测量法^[5-6]。这两种方法都采用取样方式对光斑功率-能量离散的测量, 然后通过积分的方法计算出光斑的总功率-能量, 因此都存在着探测器标校困难、开口处拟合精度低、抽样能量损失大、工程实现成本高等缺点, 难以满足高精度、快脉冲激光功率-能量测量的工程化需要。针对这种情况, 本文提出了一种基于漫射板反射的单探测器测量方法, 以漫射板的反射探测来替代对入射激光的直接探测, 通过实验室的标定将功率-能量标准传递至漫射板-探测器系统, 进而实现对大直径激光功率-能量的测量。

1 测量原理

漫射板反射探测测量原理如图 1 所示, 激光垂直入射到漫射板, 探测器与光斑中心法线夹角为 θ , 探测器在漫射板上的方位角为 ϕ 。

探测器接收到漫射板反射的激光功率 P_r 可以表示为

$$P_r = \iiint dE(\theta, \phi)_{in} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) d\Omega dA \quad (1)$$

式中: $dE(\theta, \phi)_{in}$ 为光斑 dA 面积上的辐照度; $d\Omega = d\omega \cos\theta$, 其中, $d\omega$ 为光斑 dA 中心与探测器入瞳所成的立体角; $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$ 为漫射板的双向反射分布函数(BRDF)。

选取探测器与漫射板之间合适的几何位置关系, 使得探测器入瞳中心与光斑成的立体角很小, 这样探测立体角与法线间的夹角变化很小, $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$ 由于漫射板良好的朗伯特性, 变化也很小, 都接近于定值, 则式(1)转化为

$$P_r = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \frac{S \cos\theta}{D^2} \iint dE(\theta, \phi)_{in} dA \quad (2)$$

式中: S 为探测器入瞳面积; D 为漫射板-探测器之间的距离。

又因为 $\iint dE(\theta, \phi)_{in} dA = P_{in}$, 所以

$$P_r = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \frac{S \cos\theta}{D^2} P_{in} \quad (3)$$

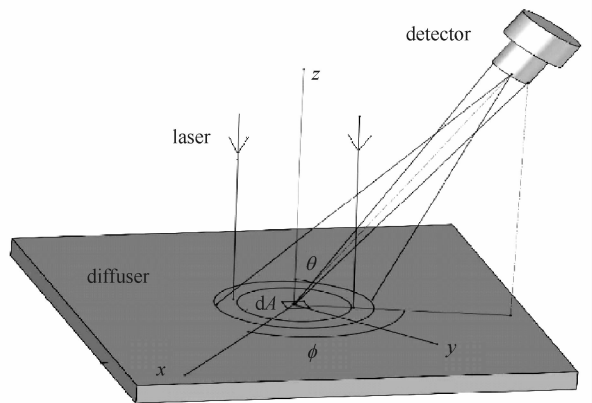


Fig. 1 Principle of measurement

图 1 测量原理示意图

* 收稿日期: 2008-12-09; 修订日期: 2009-05-12

作者简介: 陈洪耀(1980-), 男, 河南漯河人, 博士研究生, 主要从事光学遥感辐射定标研究; hyaochen@mail.ustc.edu.cn.

由式(3)可以得到

$$P_{in} = \frac{D^2 P_r}{f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \text{Scos}\theta} \tag{4}$$

由式(4)可见,入射激光功率-能量与探测器接收的漫射板反射激光功率-能量之间差一个因子 $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \times \text{Scos}\theta/D^2$,因此,通过在实验室对这个因子进行标定,经标准传递即可实现大直径激光束的功率-能量测量。

2 漫射板反射特性测量和漫射板-探测器系统标定

如果对探测器、漫射板分离标定,则需要对探测器的响应、探测器的入瞳面积、漫射板的双向反射分布函数(BRDF)等测量,涉及的因素比较多,标定精度较低。采用将漫射板-探测器系统作为整体进行标定,这样就不需要知道漫射板 BRDF,只需要漫射板满足公式推导过程中,在一定角度范围内 BRDF 为一恒定值的假设,即要求漫射板具有良好的朗伯性,下面分别介绍漫射板反射特性测量和漫射板-探测器系统的标定。

2.1 漫射板反射特性测量

用光束垂直照明情况下,漫射板反射辐亮度随观测天顶角和方位角的变化表征其反射特性。测量原理^[7]如图 2 所示,以石英卤素灯为光源的光束垂直入射在漫射板上,天顶弧轨道在方位圆轨道从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上以 30° 为间隔,光谱辐射计在天顶弧轨道上,从 $-65^\circ \sim 65^\circ$ 以 5° 为间隔,在各个位置点分别测量漫射板反射辐亮度。

在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长处,12个方位角下,漫射板反射辐亮度随天顶角、方位角的变化规律如图 3 所示,其中天顶角在方位圆上的投影如图 4 所示。

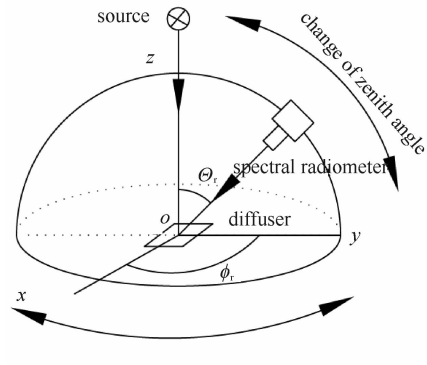


Fig. 2 Measurement of diffuser reflection characteristics
图 2 漫射板反射特性测量

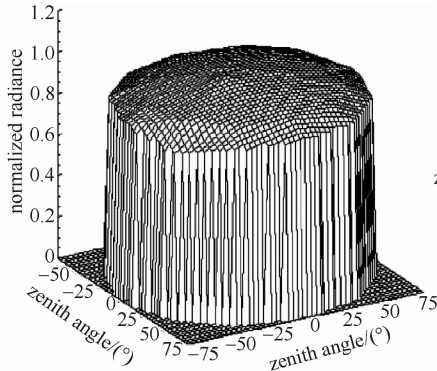


Fig. 3 Variation of reflection radiance of the diffuser with azimuth angle
图 3 漫射板反射辐亮度随方位角变化

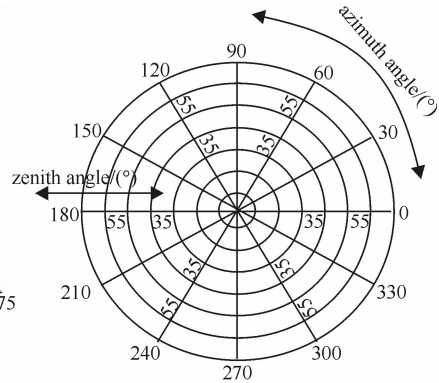


Fig. 4 Projection of zenith angle in the azimuth circle
图 4 天顶角在方位圆上的投影

测量结果表明,在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长处,漫射板反射辐亮度在任一天顶角下,在 12 个方位角下的相对标准偏差小于 0.48% ,这说明漫射板的 BRDF 基本不随方位角变化。

在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长处, 0° 方位角下,漫射板反射辐亮度的变化规律如图 5 所示,结果表明,在任一方位角下,天顶角 5° 间隔的 BRDF 变化小于 1% 。从以上漫射板 BRDF 随天顶角和方位角的变化可以得出,研制的漫射板具有良好的朗伯性。公式推导过程中,假设漫射板 BRDF 在比较小的角度范围内为一恒定值是能够得到保证的。

2.2 漫射板-探测器系统标定

漫射板-探测器系统整体标定的原理示意图如图 6 所示。

为防止标定过程中激光功率-能量的漂移,增加一个监视功率-能量计对激光器的功率进行监视,由式(4)可以得到在实验室,探测器的响应电压为

$$V_{r,cal}(\theta) - V_0 = R f_r S \frac{\text{cos}\theta}{D_{cal}^2} P_{in,cal} \tag{5}$$

式中: $V_{r,cal}(\theta)$ 为探测器的响应电压; V_0 为探测器的暗电压; R 为探测器的响应系数; D_{cal} 为探测器和漫射板之间的距离; $P_{in,cal}$ 为入射激光的功率。

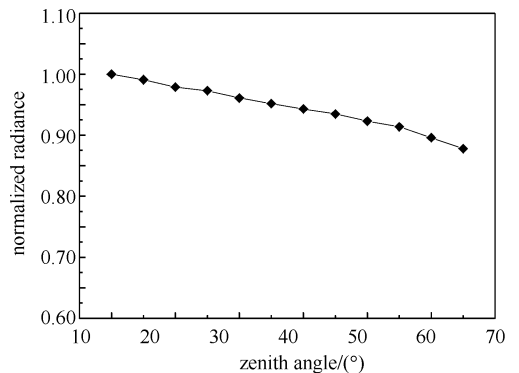


Fig. 5 Variation of reflection radiance with zenith angle at wavelength of $1.06 \mu\text{m}$
图 5 漫射板 $1.06 \mu\text{m}$ 波长处的反射辐亮度随天顶角的变化曲线

当在外场时,保持探测器与漫射板法线夹角不变,则式(5)中 $Rf_r \cdot \text{Scos}\theta = K$ 为一定值,外场探测器的响应可表示为

$$V_r(\theta) - V_0 = \frac{K}{D^2} P_{in} \quad (6)$$

式(5)与式(6)相比,有

$$P_{in} = \frac{[V_r(\theta) - V_0] D^2}{[V_{r,cal}(\theta) - V_0] D_{cal}^2} P_{in,cal} \quad (7)$$

系统标定的方法,把漫射板和探测器做为一个整体进行考虑,有效减少了标定的参数,从而减小了系统不确定度。通过实验室和外场两次距离的调整和测量,可以直接把激光功率-能量标准传递到远场激光光束,能够达到较高的精度。

3 分析讨论

漫射板的特性和探测几何位置是该漫射板反射式大直径激光功率-能量测量方法精度保证的关键,下面分别予以分析讨论。

3.1 漫射板的特性

由于激光的偏振和探测器响应对偏振的敏感性,探测器点阵法和漫射板透射法都不可避免的会因偏振因素带来测量误差。研制的漫射板,采用聚四氟乙烯材料,垂直照明下解偏能力强^[8]。因此可以消除偏振因素带来的测量误差,另外,漫射板的 BRDF 与入射激光偏振态影响也很小,S,P 偏振态垂直入射 45° 观测时变化小于 0.1% ^[9]。所研制的红外漫射板面积大,可达到 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,能满足大尺寸光斑测量的要求,具有高的激光损伤阈值,可承受的激光能量密度不低于 400 mJ/cm^2 ,能适应高功率激光功率-能量测量的需要^[10]。

3.2 探测几何参数的选取

探测几何参数的选取主要受角度余弦变化、探测视场大小、实验室标定功率-能量与外场功率-能量的比值、探测信噪比等因素的制约。因为远场光斑有比较大的尺寸,探测几何位置参数的选取,关系着前面公式推导过程中假设角度余弦基本不变的成立。光斑尺寸大小对探测角度的影响的示意图如图 7 所示,其中光斑中心法线与探测器所成的角度为 θ ,光斑直径两端的法线与探测器所成的角度为 β, γ ,设探测器与漫射板的距离为 D ,光斑的直径为 2 m ,则

$$\tan(\gamma - \beta) = \frac{2}{D(\tan^2\theta + 1) - 1/D} \quad (8)$$

由上式可以看出,随着 D 和 θ 的增大,因光斑尺寸引起的角度差别会变小。但根据式(4)因 θ 变化引起结果相对变化的权重因子(传递系数) $\frac{\partial P_{in}}{\partial \theta} \frac{1}{P_{in}} = \tan\theta$ 可知,因 θ 增大,变化相同的角度,

对测量结果的影响会变大。考虑到探测器对激光束的遮挡以及漫射板的特性,选取入射角度 θ 为 45° 。

由上面的公式推导可知,在测量的过程中,需要探测器与漫射板保持适当的距离,使探测器视场未充满,同时视场又不能过大,以避免杂散辐射的干扰。

由漫射板-探测器系统标定的原理可知,外场的距离和实验室标定时的距离比值的平方,实际是实验室激光功率-能量标准的传递因子,通过调节这个传递因子,使得实验室探测器示数和外场的示数接近,这样可以避免探测器的非线性对测量结果的影响。

探测器的信噪比直接影响着探测精度。在满足上面 3 个条件的基础上,应减小漫射板到探测器的距离,提高探测立体角;减小探测器与光斑中心的夹角,利用漫射板高的反射率,从而提高探测信噪比。

3.3 不确定度分析

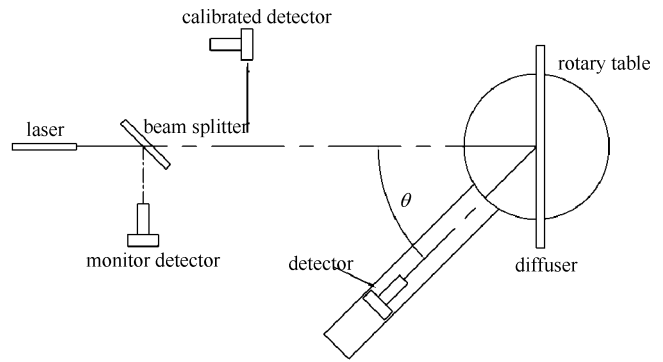


Fig. 6 Diffuser-detector system calibration

图 6 漫射板-探测器系统整体标定原理图

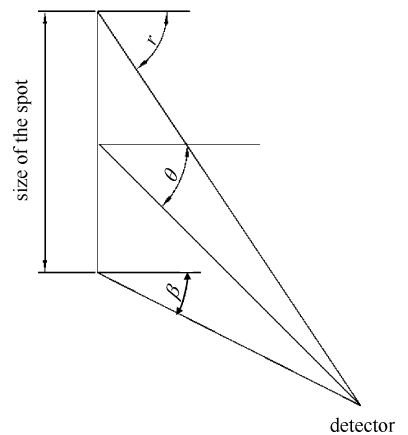


Fig. 7 Effect of spot size on detecting angle

图 7 光斑尺寸对探测角度的影响示意图

由前面的分析可知,影响测量结果的不确定度因素主要有:外场和实验室信号的探测、外场和实验室距离的测量、实验室激光功率-能量的标准、探测立体角内角度余弦和漫射板 BRDF 的变化等,其中,如果 θ 取 45° ,探测器与漫射板的距离为 29 m,探测角度变化小于 1° ,角度余弦对测量结果影响小于 2%,BRDF 的影响小于 1%,由于外场试验条件的复杂性,外场和实验室信号的探测引起的不确定度按 5%估算,距离的测量引起的不确定度小于 2%,实验室激光功率-能量标准的不确定度小于 2%,合成的相对不确定度为 6.2%。

4 结 论

由于出射激光模式不同、传输过程中的大气吸收、散射、湍流等因素的影响,远场光斑的功率-能量分布十分复杂^[11]。目前采用的探测器点阵法和漫射板透射法都是采用抽样的方式,利用拟合的方法求出开口处光斑的功率-能量。由于光斑分布的随机性和复杂性,空间抽样带来的能量损失很大。在漫射板反射式测量公式的推导过程中,没有对光斑的功率-能量分布做任何假设,而是通过对微小面元积分的方式,利用漫射板良好的朗伯性的优势,对漫射板-探测器系统整体标定,采用标准传递的方法,准确地得到了大直径激光束的总功率-能量。

漫射板面积大、朗伯性好、解偏振能力强和激光损伤阈值高的特性以及探测几何位置的选取是保证该反射式大直径激光功率-能量测量精度的关键因素。对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光波长的反射率方向特性进行了研究,结果表明,所研制的漫射板具有良好的朗伯性,在任一方位角下,相邻 5° 间隔的 BRDF 变化小于 1%,并且基本不随方位角变化。对 $10.6 \mu\text{m}$ 激光波长也进行了尝试,漫射板的双向反射比因子变化趋势和 $1.06 \mu\text{m}$ 处相似,但朗伯性稍差,初步结果表明在该波长也能满足漫射板反射式大直径激光功率-能量测量方法的要求。

参考文献:

- [1] 黄宗升,秦石乔,王省书. 探测器点阵法测量激光光斑参数的仿真[J]. 强激光与粒子束,2005,17(3):329-334. (Huang Zongshen, Qin Shiqiao, Wang Xingshu. Simulation of laser spot parameters measured with detector array. *High Power Laser and Particle Beams*,2005,17(3):329-334)
- [2] 胡渝,许昌武. 激光通过大气随机信道远场二维强度分布实时测试系统[J]. 激光与红外,2001,31(6):330-331. (Hu Yu, Xu Changwu. The real time two-dimensional testing system for the far laser beam through atmosphere. *Laser and Infrared*,2001,31(6):330-331)
- [3] 侯再红,吴毅,汪超. 旋转式激光光斑测试仪[J]. 强激光与粒子束,2002,14(3):334-336. (Hou Zaihong, Wu Yi, Wang Chao. Device of rotational array detector for laser facula. *High Power Laser and Particle Beams*,2002,14(3):334-336)
- [4] 王云萍. 探测器阵列法测量激光光斑参数关键技术分析[J]. 激光杂志,2007,28(4):22-23. (Wang Yunping. Laser facula measurement technology using detector array. *Laser Journal*,2007,28(4):22-23)
- [5] 田海雷,汪岳峰,张伟. 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. (Tian Hailei, Wang Yuefeng, Zhang Wei. Design of laser far field power density test system. *Electro-optic Technology Application*,2007,22(6):24-26)
- [6] 孙小卫,杨杰,于意仲,等. 可用于高功率脉冲激光的面阵 CCD 模式测量装置[J]. 中国激光,1994,21(2):96-101. (Sun Xiaowei, Yang Jie, Yu Yizhong, et al. High power pulsed laser mode measuring system using planer CCD camera. *Chinese Journal of Lasers*,1994,21(2):96-101)
- [7] 李新,郑小兵,寻丽娜,等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. 光电工程,2008,35(1):66-70. (Li Xin, Zheng Xiaobing, Xun Lina, et al. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system. *Opto-Electronic Engineering*,2008,35(1):66-70)
- [8] David A H, Brendan T M, Carol J B. Polarization characteristics of Spectralon illuminated by coherent light[J]. *J Appl Opt*,1999,38,6350-6357.
- [9] Williams D C. Establishment of absolute diffuse reflectance scales using the NPL reference reflectometer[J]. *Anal Chim Acta*,1999, 380: 165-172.
- [10] Chang B Y, Ronald M H, Christina C, et al. Optimization of spectralon through numerical modeling and improved processes and designs [C]//Proc of SPIE. 2007:666605.
- [11] 杜祥琬. 实际强激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. 中国激光,1997,24(4):327-332. (Du Xiangwan. Factors for evaluating beam quality of a real high power laser on the target surface in far field. *Chinese Journal of Lasers*,1997,24(4):327-332.

Diffuser reflection method for measuring power/energy of far-field laser spot

Chen Hongyao^{1,2}, Zhang Liming^{1,2}, Yang Benyong^{1,2}, Xu Weiwei^{1,2}

(1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,*

P. O. Box 1125, Hefei 230031, China;

2. *Key Laboratory of Optical General Calibration and Characterization Techniques,*

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: A diffuser reflection method for laser beam power/energy measurement is proposed. Using the Lambert character of the diffuser, according to the definition of BRDF, through the reflect signal measurement, the power/energy of the laser incident on the diffuser can be achieved. In practice, on the basis of laboratory calibration, the power/energy standard is transferred into the diffuser-detector system, then the calibrated system is utilized to realized laser power/energy measurement in the field. The uncertainty analysis shows that uncertainty of the measurement is less than 10%, the method can greatly improve the accuracy of far-field spot power/energy measurement.

Key words: laser power/energy; infrared diffuser; bidirectional reflectance distribution function; calibration; far-field laser spot