

文章编号: 1001-3806(2010)05-0717-04

不同粗糙度表面双向反射分布函数的实验研究

张颖茹, 李恩普*, 任 驹, 赵建林

(西北工业大学 理学院 陕西省光信息重点实验室, 西安 710012)

摘要: 为了研究目标表面的激光散射特性, 利用双向反射分布函数的方法, 采用自行设计的双向反射分布函数测量装置对样品表面双向反射分布函数进行了实验测量研究。以 BaSO₄ 粉压制板作为漫反射标准板, 通过样本比值法进行对比研究, 得到了样品在不同粗糙度和不同入射角下反射光的空间分布。结果表明, 粗糙度越小, 样品表面镜像反射的双向反射分布函数峰值就越大, 镜反射现象越明显; 入射角度越小, 样品表面镜像反射的双向反射分布函数峰值就越小, 呈现出一定的漫反射特征; 反之亦然。反映出不同粗糙度表面对激光散射程度不同。

关键词: 散射; 双向反射分布函数; 粗糙表面; 目标探测

中图分类号: O436.2 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.038

Experimental research of bidirectional reflectance distribution functions of target surfaces with different roughness

ZHANG Ying-ru, LI En-pu, REN Ju, ZHAO Jian-lin

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710012, China)

Abstract: Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) can be used to study the laser scattering properties of target surface. A setup for the measurement of scattering characteristics of the sample's BRDF was designed in the laboratory. The powder pressboard of BaSO₄ was used as the standard reflection board. The spatial distribution of reflected light intensity was obtained at different roughness and incident angles. The sample's BRDF at space was obtained. The results indicate that the lower the roughness of the surface plate, the larger the BRDF in the mirror direction; the larger the incident angle, the larger the BRDF in the mirror direction; tacertain degree of diffusive reflection characteristics appears; and vice versa. Different surface roughness determines corresponding different degrees of laser scattering.

Key words: scattering; bidirectional reflectance distribution function; rough surface; target detection

引 言

20世纪60年代, 激光的问世与应用极大地丰富了目标与环境光辐射特性的研究内容, 使得目标激光散射特性方面的研究迅速兴起。随后, 美国学者NICODEMUS于1970年正式提出了双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)的定义。目前国际上普遍采用BRDF来描述目标的空间反射分布特性和光谱特性。由于BRDF在航天遥感^[1-2]、地理信息、海洋开发、自然灾害检测、气候研究、军工信息等领域均有着广泛的应用, 国内外学者从理论和实验两方面对双向反射分布函数进行了大量的研究, 分析了多种材料表面的双向反射分布函数^[3-5]。其

中, 国内西安电子科技大学设计的激光散射自动测量系统的探测器旋转角度可由 -65° 到 65° ^[6]; 中国科学院安徽光学精密机械研究所WEI等人设计的双向反射分布函数测量仪器可以达到对入射和反射方向4个变量中的3个独立控制, 入射方位角不便于独立控制^[7]; 西北工业大学SUN等人设计的BRDF测量装置探测器的旋围角度范围为 0° 到 90° ^[8]。作者对BRDF测量装置进行了进一步改进, 探测器旋转角度可由 -90° 到 90° , 并且采用步进电机带动探测臂自动旋转, 这样既扩大了测量范围, 又提高了测量精度。

1 原 理

1.1 双向反射分布函数的定义

双向反射分布函数最早是从光辐射角度定义并得到发展的。用反射辐亮度和入射辐照度的比值 f_r 来描述材料表面的反射特性具有唯一性, 即所确定的表面反射特性只取决于材料表面本身的特性, 而和接收

作者简介: 张颖茹(1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事目标的激光散射方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lienpu@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2010-04-01

立体角等测量因素无关。以反射点 O 为原点建立如图 1 所示的坐标系, BRDF 数学定义式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

上式表示不同入射条件下材料表面任意观测角的反射特性。式中, f_r 取值范围为 $(0, \infty)$, 量纲为球面度⁻¹ (sr^{-1})。双向反射分布函数的几何关系如图 1 所示, 其中 θ_i 为入射天顶角, θ_r 为反射天顶角, φ_i 为入射方位角, φ_r 为反射方位角, ω_i 是入射立体角元, ω_r 是反射立体角元, dL_r 为 ω_r 内的反射辐亮度, dE_i 为 ω_i 内的人射辐照度。

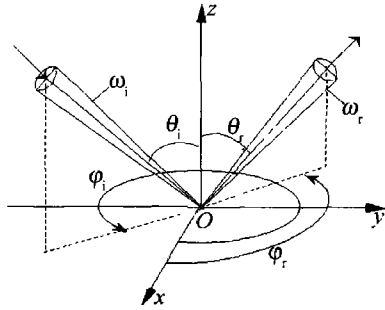


Fig. 1 Geometrical relationship of every quantity in BRDF

1.2 实验原理

BRDF 的测量分为绝对测量^[9]和相对测量, 绝对测量是指在不使用任何参考标准的情况下, 直接对目标表面的 BRDF 进行测量, 这种方法虽然简单, 但是容易引入较大的测量误差。比较常用的是相对测量, 相对测量又可以分为样本比值法和单一参考标准测试法^[10]。本文中采用的样本比值法是指待测样品和理想的标准板在相同的入射和观测条件下, 分别测量其对入射激光的反射分布, 再根据标准板的 BRDF 求出待测样品的 BRDF。其表达式为^[8]:

$$\frac{f_{r,s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{f_{r,ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)} = \frac{dL_{r,s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dL_{r,ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)} = \frac{V_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{V_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)} \quad (2)$$

式中, $dL_{r,s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是样品在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射辐亮度, $dL_{r,ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是标准板在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射辐亮度, $f_{r,s}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是待测样品的 BRDF 值, $f_{r,ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是标准板的 BRDF 值, $V_s(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是光电探测器对样品反射光测量所得到的电压值, $V_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是光电探测器对标准板反射光测量所得到的电压值。

实验中, 首先采用单一参考标准测试法得到标准板的 BRDF 值。将硫酸钡粉压制板作为标准板, 用其在 $\theta_i = \theta_r = 30^\circ, \varphi_i = 0^\circ, \varphi_r = 180^\circ$ 时的测量数据作为参考, 标准板在此状态下的 BRDF 值为 ρ/π , ρ 为标准板的半球反射率, 可用分光光度计获得。由(1)式可得:

$$f_r(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ) = \frac{dL_r(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)}{dE_i(30^\circ, 0^\circ)} = \frac{\rho}{\pi} \quad (3)$$

设光源发出的光为平行光, 辐射出射度为 M , 则当入射光从不同的天顶角 θ_i 入射时, 入射辐照度为 $dE_i = M \cos \theta_i$ ^[9]。由(1)式、(2)式和(3)式可得:

$$\begin{aligned} \frac{f_{r,ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{f_r(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)} &= \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \cdot \frac{dE_i(30^\circ, 0^\circ)}{dL_r(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)} = \\ &= \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dL_r(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)} \frac{\cos 30^\circ}{\cos \theta_i} = \\ &= \frac{V(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{V(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)} \frac{\cos 30^\circ}{\cos \theta_i} \end{aligned} \quad (4)$$

于是标准板的 BRDF 可表示为:

$$f_{r,ref}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{V(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{V(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)} \cdot \frac{\cos 30^\circ}{\cos \theta_i} \cdot \frac{\rho}{\pi} \quad (5)$$

式中, $V(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 是对标准板反射光测量的电压值, $V(30^\circ, 0^\circ; 30^\circ, 180^\circ)$ 是对标准板在 $\theta_i = \theta_r = 30^\circ, \varphi_i = 0^\circ, \varphi_r = 180^\circ$ 时反射光测量的电压值。将(5)式求得的各值带入(2)式便求出样品的 BRDF 值。

1.3 装置与样品制备

BRDF 实验测量装置由激光器、探测器、步进电机、示波器和计算机组成。如图 2 所示, 旋转台由 3 部

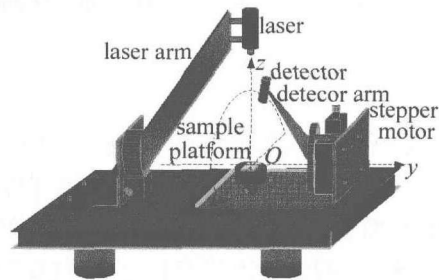


Fig. 2 Diagram of the setup for measuring BRDF

分组成, 分别控制光源的天顶角、探测器的天顶角及方位角。实验中选用波长为 650nm 的半导体激光器作为光源, 光源臂(臂长 30cm)固定在带有角度刻度、可以旋转的竖直底座上, 使得入射光的角度在 $x-z$ 平面内 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 可调。探测器固定在探测臂(臂长 23cm)上, 其光敏面法线始终过 O 点, 改进后的装置中探测器可以在 $x-z$ 平面内 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 自由旋转, 也可以在 $y-z$ 平面内 $(-90^\circ \sim 90^\circ)$ 自由旋转, 这样可以实现对样品在整个半球空间内的反射分布进行测量。探测器选用硅 PIN 光电二极管, 其光敏面面积为 1mm^2 , 光谱响应范围为 400nm ~ 1100nm, 具有接收效

果好、暗电流小等特点,探测信号经放大后输入示波器,以电压值形式输出。其中,探测臂由步进电机带动,角分辨率可达 0.1° ,设定步长为144000,转速为200r/s, $-90^\circ \sim 90^\circ$ 平面内总共可采集2400个数据,和以前的每一度采集一个数据总共180个数据相比更加精确,使测量的反射峰值部分更加明显。步进电机由计算机控制,在转动的过程中,计算机能自动记录由示波器采集到的样品的反射辐射亮度,实现了测量自动化,加快了实验进度。

待测样品为铝板,标准板为硫酸钡粉末压制板。其中铝板是将3块表面平整的普通机加工裸板分别采用200目、320目和600目3种不同目数的砂纸研磨而成,然后再用表面轮廓测量仪测得表面粗糙度的算术平均偏差值,它们分别为 $R_a = 0.52\mu\text{m}$, $R_a = 0.35\mu\text{m}$ 和 $R_a = 0.15\mu\text{m}$ 。标准板是用HY-3型恒压粉体压样器将硫酸钡粉末压制而成,厚度为6mm,直径为40mm,

表面平整,其光谱反射率在95%以上,可以作为理想的完全漫反射板,并能反复使用。在实验中,首先对标准板的BRDF进行测量,然后再对3种不同粗糙度的铝板表面BRDF进行测量。另外,为了尽量减小环境杂散光的影响,实验都在暗室完成。

2 结果及分析

实验共测量了 $R_a = 0.52\mu\text{m}$, $R_a = 0.35\mu\text{m}$ 和 $R_a = 0.15\mu\text{m}$ 3种铝板分别在 $5^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 4个不同的人射天顶角下的双向反射分布函数值。图3中是同一粗糙度的铝板在不同入射角下的双向反射分布函数值比较,图4中是同一个入射角下,不同粗糙度铝板的双向反射分布函数值比较。实验中采用步进电机带动探测臂,实验测量系统的后向遮挡约为 1° ,由于电机在转动的过程中可连续采集大量的数据,这样后向遮挡部分在图上表现的并不明显。

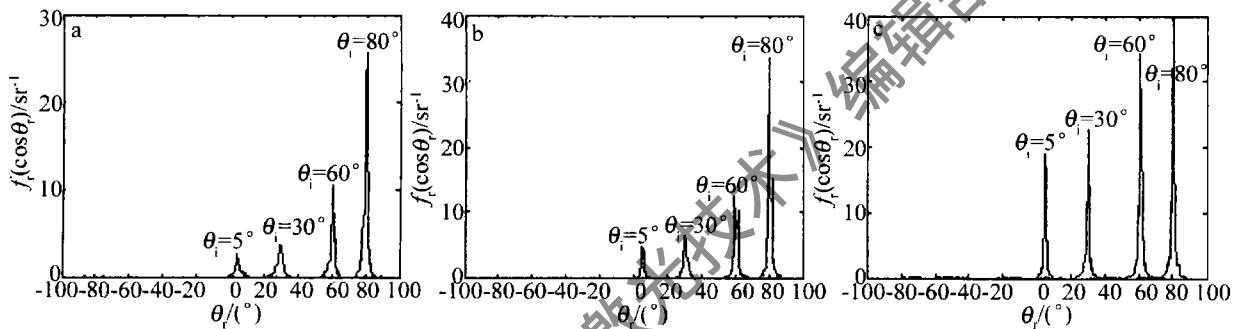


Fig. 3 BRDF of different roughness sample at four incident angles
a— $R_a = 0.52\mu\text{m}$ b— $R_a = 0.35\mu\text{m}$ c— $R_a = 0.15\mu\text{m}$

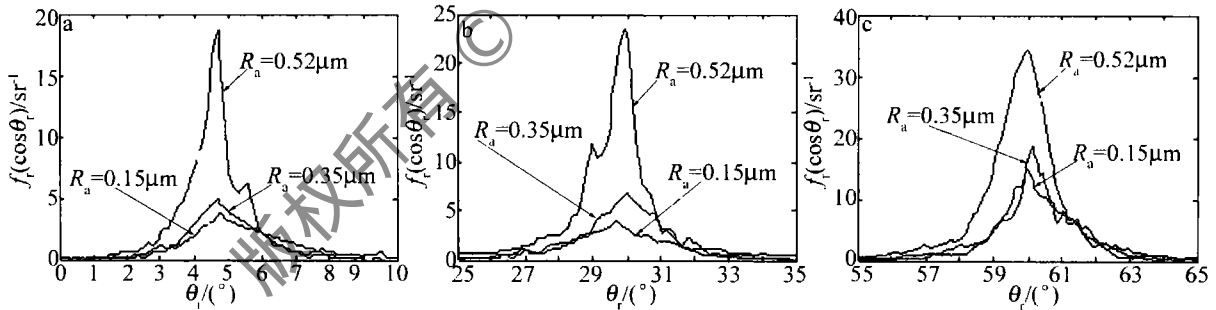


Fig. 4 BRDF of different incident angles, three roughness samples
a— 5° b— 30° c— 60°

双向反射分布函数值由镜反射分量和漫反射分量组成,其大小随反射角的变化主要由样品表面的粗糙度决定^[11]。从图3中的曲线比较可以看出:同一粗糙度的铝板,随着入射角的增大,其双向反射分布函数值增大,说明镜向反射越强烈,漫反射越小;反之亦然。其中,图3a中 $R_a = 0.52\mu\text{m}$ 的铝板表面比较粗糙,其漫反射分量比较明显;图3c中 $R_a = 0.15\mu\text{m}$ 的铝板表面相对比较光滑,所以镜向反射分量比较明显。

从图4中可以看出:同一入射角时,随着铝板表面粗糙度的减小,其双向反射分布函数值越大,说明镜向

反射越强烈,漫反射越小;反之亦然。其中,图4a和图4b中入射角比较小, $R_a = 0.15\mu\text{m}$ 的铝板表面镜向反射分量明显高于 $R_a = 0.52\mu\text{m}$ 的铝板表面镜向反射分量,而图4c中大角度入射时, $R_a = 0.15\mu\text{m}$ 和 $R_a = 0.35\mu\text{m}$ 目砂纸抛光的铝板表面镜向反射分量明显增大。

3 测量精度分析

测量误差影响着测量精度。改进的双向反射分布函数测量装置中,总测量误差可以表示为:

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 \quad (6)$$

式中, ε_1 是由光源臂转动产生的误差, ε_2 是光电探测器响应速度和步进电机带动探测臂转动时共同引起的误差, ε_3 是激光器的稳定性引起的误差, ε_4 是多次测量求平均值的误差, 其中光源臂转动的最大误差可取为 0.5° (光源臂在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 内转动时); 硅 PIN 光电二极管的响应速度误差约为 0.35% , 步进电机的角分辨率为 0.1° , 可以将其作为探测臂转动的最大误差; 半导体激光器的波动小于 5% ; 根据多次实验测量求得操作误差为 4.5% 。将以上参量带入(6)式, 可得:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{0.5\pi}{180}\right)^2 + 0.0035^2 + \left(\frac{0.1\pi}{180}\right)^2 + 0.05^2 + 0.045^2} \approx 0.0679 \quad (7)$$

4 结论

作者改进后的测量装置中探测器旋转角度可由 -90° 到 90° , 并且采用步进电机带动探测臂转动以实现自动测量, 既扩大了探测范围, 又提高了测量精度和效率。采用改进的 BRDF 测量装置实验测量了几种不同粗糙度铝板表面的 BRDF, 分析了不同粗糙度铝板表面的散射特性。结果表明: 铝板表面的粗糙度越小, 双向反射分布函数的镜向值峰值就越大, 镜向反射现象越明显; 粗糙度大则主要呈现出一定的漫反射特征; 入射角度越小, 铝板表面双向反射分布函数的镜向峰值就越小, 呈现出漫反射增强的现象。反映出不同粗糙度表面对激光散射程度不同, 对目标与环境光辐射特性^[12]的研究有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] GIROLAMO L D. Generalizing the definition of the bi-directional reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3): 479-482.
- [2] ANDERSEN M, RUBIN M, POWLES R, *et al.* Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations[J]. *Solar Energy*, 2005, 78(2): 187-198.
- [3] RENHORN G E I, BOREMAN D G. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 12892-12898.
- [4] McGUIRE A F, HAPKE B W. An experimental study of light scattering by large, irregular particles[J]. *Icarus*, 1995, 113(1): 134-155.
- [5] WANG A X, FENG J. Genetic simulated annealing algorithm in the parameter retrieval of light scattering model[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 32-35 (in Chinese).
- [6] HAN X G, WU Zh S, ZHANG X D. Experiments study of laser scattering from very rough surfaces[J]. *Laser Technology*, 1997, 21(3): 151-155 (in Chinese).
- [7] ZHANG B Sh, LIU W Q, WEI Q N, *et al.* Analysis of scattering characteristic of the sample based on BRDF experiment measurements [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 180-182 (in Chinese).
- [8] SUN L M, ZHAO J L, REN J, *et al.* 3-D measurement of bidirectional reflectance distribution functions of target surface with different coats[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2529-2533 (in Chinese).
- [9] WEI Q N, LIU J G, JIANG R X. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(10): 1425-1430 (in Chinese).
- [10] JIA H, LI F T. Bidirectional reflectance distribution function of aluminium diffuser at UV spectral band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 230-234 (in Chinese).
- [11] ZHENG G. Reflection characteristics and detection system of laser target[D]. Nanjing: Nanjing University of Science, 1999: 24-35 (in Chinese).
- [12] YAO L, QIU W L, WANG F H. The optical properties of the object and the environment[M]. Beijing: Astronautics Press, 1995: 128-144 (in Chinese).

(上接第 681 页)

参 考 文 献

- [1] CUI Y M, LI T, LENG J, *et al.* Adjustment method and device of the laser velocimeter[J]. *China Metrology*, 2008(4): 75-76 (in Chinese).
- [2] CUI Y M, LI T, LENG J, *et al.* Calibration research of laser speedometer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2007, 27(4): 26-28 (in Chinese).
- [3] CAI Ch Q, SUN Q, ZHANG Y, *et al.* Study on lidar calibration technique for vehicle speed-measuring device[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(4): 329-343 (in Chinese).
- [4] DU X Y, ZHANG H, FENG R B. The laser velocimeter; China, 200820168055.3[P]. 2009-08-12 (in Chinese).
- [5] WANG B Ch, ZHANG X D, HAN X G. Study of driver circuit in laser velocimetry system[J]. *Electronic Science and Technology*, 2007(3): 21-25 (in Chinese).
- [6] LI J S, ZHU J L. Design and realization of intelligent velometer based on SCC[J]. *Instrumentation Technology*, 2007(1): 44-45 (in Chinese).
- [7] ZHAO Y Sh, ZHAO D E, ZHAO H. A novel system of laser screens for velocity measurement based on MCU[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2008, 28(4): 283-285 (in Chinese).
- [8] GAO F. Single-chip microcomputer principle[M]. Beijing: Science Press, 2003: 23-25 (in Chinese).
- [9] WANG X Q, DONG Y Q, YUAN Sh A, *et al.* Study on simulation of micro-doppler effect in lidar[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 117-119 (in Chinese).
- [10] HU H C. Principle of single-chip computers & interface technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 60 (in Chinese).
- [11] CHEN Sh S, LEI J, GUO Q, *et al.* Electronic measurement and apparatus[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 48 (in Chinese).
- [12] HE Y H, WEI W, ZHANG Q M. Reflecting laser velocimetry[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(11): 981-983 (in Chinese).