

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0134-03

从可见光到红外线双向反射率测量技术

齐超, 杨茂华, 戴景民

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 介绍了双向反射分布函数(BRDF)的概念及其测量原理。研制了一套基于微机控制的 BRDF 测量系统, 激光波长覆盖了可见光到红外线的 0.6328 μm , 1.34 μm , 3.39 μm 和 10.6 μm 波段。用该装置对金刚砂纸进行了正入射情况下的半球空间反射特性测量, 结果显示它具有相对较好的朗漫特性。

关键词 激光技术; 双向反射分布函数; 微机控制; 锁相放大器

中图分类号 TN247

文献标识码 A

Technique for Bi-Directional Reflectance Distribution Function (BRDF) Measurements from Visible to Infrared

QI Chao, YANG Mao-hua, DAI Jing-min

(Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The concept and the measuring theory of BRDF (bi-directional reflectance distribution function) were discussed. A set of system based on personal computer for BRDF measurement was developed, whose laser wavelengths cover 0.6328 μm , 1.34 μm , 3.39 μm and 10.6 μm from visible to infrared. The experimental results of the hemispherical reflectance measurements on silicon carbide paper at normal incidence show better Lambertian diffusion.

Key words laser technique; BRDF; computer controlling; phaselocked amplifiers

1 引言

1970年, Nicodemus 第一次正式引入双向反射率分布函数(BRDF), 它很好地将材料表面的反射和散射统一于同一概念中, 在杂光分析领域取得巨大成功。对它的测量研究涉及国防军事、环保商贸、国民经济、科学研究等各个领域, 如目标精确跟踪、瞄准、定位、地表植被长势遥感、环境监测与保护、地球资源勘测、大气结构分析、水下探测与通讯等各方面, 另外测量物体材料的红外反射率也是取得许多不透明材料(尤其在 800 K 以下)发射率和吸收率的重要方法。

各国学者对 BRDF 进行了大量研究, 早在 1980 年, 美国亚利桑那州立大学光技术中心 Bartell 等对 BRDF 进行了测试, 但由于辐射探测、转角精度、信号测量水平、光干涉程度等诸多因素的影响, 测量精

度要达到 $\pm 20\%$ 都很困难^[1]。1990年, 加拿大 Howard 等设计了用于研究空间光学表面污染情况的 BRDF 测量装置, 用 0.633 μm 和 10.6 μm 两个波长激光在线测量了低温制冷反射镜表面分子污染下的双向反射率, 实验结果显示, 即使污染 10 μm 厚, 要得到 10.6 μm 波长的 BRDF 测量值也很难^[2]。1999年, 日本地质勘测中心 Satoshi 等应用光谱辐射计和 CCD 数码相机, 设计了在线测量大地表面 BRDF 装置, 该装置对 BRDF 的空间不稳定性进行了矫正^[3]。

我国对 BRDF 的研究始于 20 世纪 80 年代末期, 中国科学院安徽光学精密机械研究所、西安电子科技大学、中国科学院长春光学精密机械研究所等单位在 BRDF 测量方面都有所研究, 但对光学材料, 尤其航天热控材料从可见光到红外线的 BRDF 测量仪器还没研制。随着国防建设、经济发展、社会

基金项目: 哈尔滨工业大学基金(HIT.MD.2001.17)资助课题。

作者简介: 齐超(1970.12-), 女, 哈尔滨工业大学在职博士研究生, 现主要从事目标材料空间反射特性的研究及电路基础的教学与科研工作。E-mail: qichao@up369.com

进步、电磁波(光波)遥测遥感的应用, BRDF 测量技术也就成为当今高新技术领域的重要技术群之一。

2 BRDF 及测量原理

2.1 BRDF 概念

设一束光均匀投射到足够大的均匀且各向同性材料表面上, 如图 1 所示, 描述材料表面空间反射特性的辐射量是双向反射分布函数 f_r ,

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

式中, θ 和 φ 分别为球坐标下的天顶角和方位角, 下标 i 和 r 分别代表入射量和反射量, $dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 为 (θ_r, φ_r) 方向的反射亮度, $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射照度, $dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 为 (θ_i, φ_i) 方向上的入射亮度, $d\omega_i$ 为 $dL_i(\theta_i, \varphi_i)$ 的辐射立体角。 f_r 的值可在 $0 \sim \infty$ 之间变化, 其量纲为 sr^{-1} 。

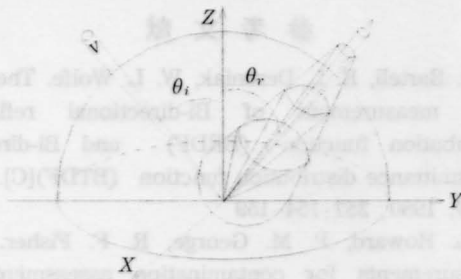


图 1 双向反射分布函数原理图

Fig.1 Coordinate system for bi-directional reflectance distribution function

假设在一个小的入射源立体角 $d\omega_i$ 内,

$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 在非零区域近似为常数, 可得^[4]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (2)$$

2.2 BRDF 测量原理

对 BRDF 的测量可分为定义测量法、相对测量法及单一参考测量法。定义测量法由于误差大, 很少被采纳。选一个近似朗伯面的试样做参考标准, 对未知试样的 BRDF 做相对测量是比较普遍的方法, 理论上要在每一方位对参考试样和待测试样进行两次测量, 实际上对参考试样很少逐点测量, 而采用单一参考测试法, 只要在某一特定角度(如 45°)对参考试样测量一次即可。

(2)式中待测试样的辐射亮度可通过探测器的电压输出得

$$V_s = \tau_s \mathfrak{R}_s L_s A_s \cos \theta_s A_d \cos \theta_d / d^2 \quad (3)$$

式中 τ 为光透射率, \mathfrak{R} 为探测器响应率, A_s 为被照试样面积, A_d 为探测器面积, θ_s 为入射天顶角, θ_d 为探测天顶角, d 为探测器到试样距离。

在相同的人射、接收条件下, 参考标准探测器的输出电压可表示为

$$V_r = \tau_r \mathfrak{R}_r f_r E_r A_r \cos \theta_r A_d \cos \theta_d / d_r^2 \quad (4)$$

式中 f_r 为已知参考标准的 BRDF, E_r 为光入射辐照度, 由此可得待测试样的 BRDF(f_s)

$$f_s = f_r \cdot \frac{V_s}{V_r} \cdot \frac{\tau_r \mathfrak{R}_r E_r A_r \cos \theta_r A_d \cos \theta_d / d_r^2}{\tau_s \mathfrak{R}_s E_s A_s \cos \theta_s A_d \cos \theta_d / d_s^2} \quad (5)$$

(5)式中, 选择合理, $A_d \cos \theta_d / d_r^2, E_r A_r \cos \theta_r, \tau, \mathfrak{R}$ 均为常量, 得

$$\rho_s = \rho_r \frac{V_s}{V_r} \cdot \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_s} \quad (6)$$

此单一参考测量法是我们进行 BRDF 测量实验的

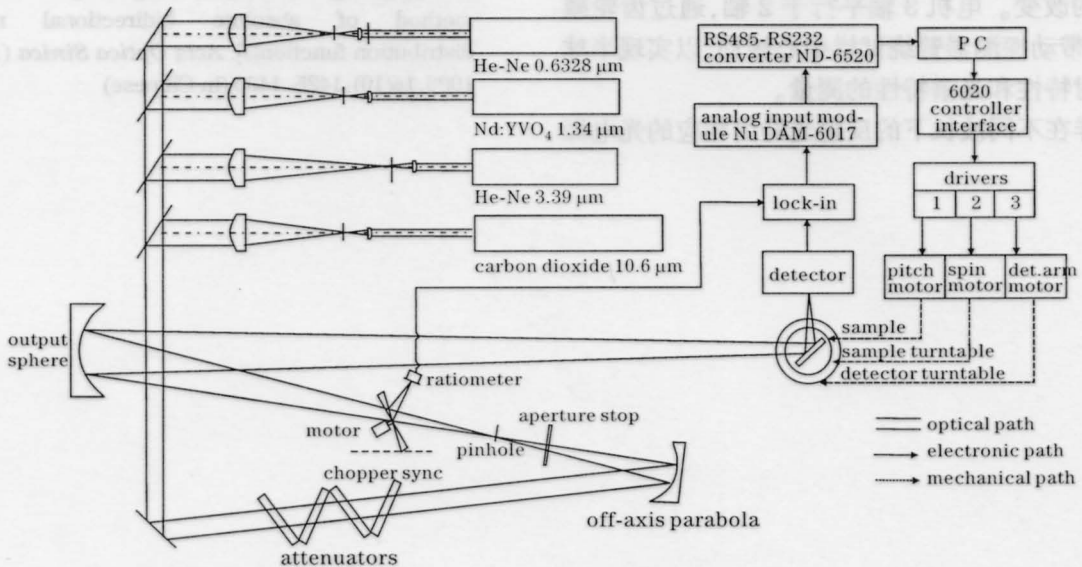


图 2 BRDF 测量装置框图

Fig.2 Block diagram of BRDF measuring system

理论依据,它无论对摆放试样还是记录数据都省时省力,且有对标准试样所需信息少的优点。

3 BRDF 测量装置

BRDF 测量装置如图 2 所示。它包括光学系统、电路控制系统和机械转角系统三部分。

选用的激光器和相应的探测器如表 1 所示。每种激光经各自的扩束准直系统统一成直径为 20 mm 的光束,首先经过衰减器,为了避免来回反射,每个衰减器模型由两片成 60°角的光学镜片组成,这样反射光直接被引出,消除网状光楔的影响,同时阻止了改变角度的光回射向衰减器。随后依次经离轴抛物镜、小孔光阑、同步斩光器,最后经球面镜会聚光束反射照向试样。在试样上的光斑直径范围为 1~3 cm,使探测器在一个可调区间,探测器光敏面处于无试样时的焦点位置上,光斑直径近似为爱里圆。

表 1 激光器和探测器

Table 1 Laser and detection

Wavelength / μm	Laser	Detector
0.6328	He-Ne laser	Si photodiode
1.34	Nd:YVO ₄	PbS
3.39	He-Ne laser	PbS
10.6	Carbon dioxide	HgCdTe(77 K)

试样位于三个电机控制的转台上。电机 1 轴平行于台面,垂直于试样平面法线,带动试样倾斜绕动;电机 2 轴垂直于台面,带动电机 1 和试样共同旋转;电机 1,2 结合完成照到试样上入射光天顶角和方位角的改变。电机 3 轴平行于 2 轴,通过齿轮减速结构,带动探测器臂绕试样中心转动,以实现半球空间反射特性和光谱特性的测量。

试样在不同波长下的反射光经由相应的光电探

测器、前置放大器进入锁相放大器的信号输入端,锁相器的参考信号是由斩光器(调制盘)的光电对管输出提供。锁相器输出直流电压信号由多路模拟数据采集模块 Nu DAM-6017 接收,再经 RS485-RS232 数据转换模块 ND-6520 进入计算机进行数据处理。

利用该双向反射率测量装置,在正入射情况下,对 1500 CCR/R C.S.G 电镀防水研磨金刚砂纸进行了半球空间反射特性测量显示,当出射天顶角在 15°~60°范围内时,它具有相对较好的朗漫特性。

4 结 论

结合计算机测控理论和光电新技术,研制了集光、机、电于一体的 BRDF 测量装置,可实现光学材料空间反射特性和光谱特性的测试。用该装置对金刚砂纸进行的半球空间反射特性测量结果显示,它具有相对较好的朗漫特性。

参 考 文 献

- 1 F. O. Bartell, E. L. Dereniak, W. L. Wolfe. The theory and measurement of Bi-directional reflectance distribution function (BRDF) and Bi-directional transmittance distribution function (BTDF)[C]. *Proc. SPIE*, 1980, **257**:154~159
- 2 T. L. Howard, P. M. George, R. F. Fisher. BRDF measurements for contamination assessment in a spacecraft environment [C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1329**:266~271
- 3 Satoshi Tsuchida, Isao Sato, Shuhei Okada. Measurement of land surface BRDF with spatial instability for vicarious calibration[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3870**:254~258
- 4 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function[J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(10):1425~1430 (in Chinese)

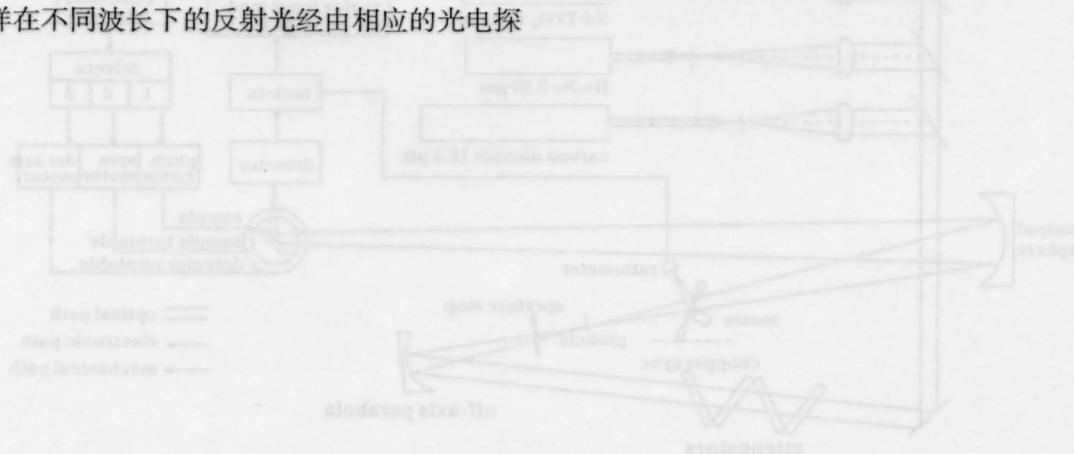


图 2 BRDF 测量装置框图

Fig. 2 Block diagram of BRDF measuring system