

# 紫外-真空紫外漫反射板的研究

唐玉国 齐文宗 李福田

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘 要** 选用在紫外-真空紫外波段反射率较高的铝作基底材料, 通过光学研磨加工和光学镀膜处理制成漫反射板; 建立了紫外-真空紫外波段漫反射特性测试研究装置, 利用该系统进行漫反射板余弦特性、双向反射比分布函数的测试。结果表明, 该漫反射板反射比  $\rho(o/d)$  在 315 nm 处为 49%; 在正入射情况下, 双向反射比分布函数在  $15^\circ \sim 40^\circ$  范围内偏差优于 11%。

**关键词** 紫外-真空紫外, 漫反射板, 双向反射比分布函数。

## 1 引 言

漫反射板在光谱辐射测试中具有特别重要的作用。在可见和近红外波段, 漫反射板的研究是比较成熟的, 国际上众多的研究机构如美国国家技术研究所、英国国家物理实验室、中国计量科学院都建有相应的变角测试装置, 用于漫反射特性的研究<sup>[1, 2]</sup>。在可见和近红外波段用的漫反射材料有硫酸钡、氧化镁、聚四氟乙烯(海纶)及陶瓷等<sup>[3-5]</sup>。表面抛光的陶瓷板不具有余弦特性, 它的镜反射成分大, 但材料的稳定性好, 因此其反射率非常稳定, 并且表面清洁方便, 它主要用于测量半球接收的反射比因数。对于硫酸钡、氧化镁、聚四氟乙烯等, 它们具有良好的余弦特性, 反射比接近于 1, 在可见和近红外波段光谱反射比较平坦。以上这些材料制成的漫反射板, 足以满足该波段的测试需要。

在紫外-真空紫外波段, 由于工作环境和材料的限制, 尚未有合适的漫射板可利用, 从文献资料看, 最近只有美国国家技术研究所有这方面的报道<sup>[6]</sup>, 他们研制了用于紫外-真空紫外波段的漫反射板, 在正入射情况下,  $17^\circ \sim 40^\circ$  之间双向反射比分布函数相差 18% (理想情况任何方向都相等)。近年来在同步辐射光谱辐射标准的建立和短波空间光学遥感的推动下, 本文作者开展了这方面的研究工作, 这里给出了所取得的初步结果。

## 2 基本方法

用反射辐亮度和入射辐照度的比值来描述材料表面的反射特性具有唯一性的特点, 该比值所确定的反射特性只取决于材料表面本身的特性, 把它定义为双向反射比分布函数 (BRDF)<sup>[3]</sup>:

$$f_{\text{brdf}}(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \frac{L'(\theta', \varphi')}{E(\theta, \varphi)}, \quad (1)$$

它表示不同入射条件下物体表面在任意观测角的反射特性。其中  $\theta$ 、 $\varphi$  为入射方位角,  $\theta'$ 、 $\varphi'$  为反射方位角,  $L'(\theta', \varphi')$  为反射辐亮度,  $E(\theta, \varphi)$  为入射辐照度。反射因数  $R(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$  和双向反射比分布函数之间有如下关系:

$$R(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = \pi f_{\text{brdf}}(\theta, \varphi, \theta', \varphi'). \quad (2)$$

反射因数  $R(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$  在半球空间积分后有

$$R(\theta, \varphi, d) = \rho(\theta, \varphi, d), \quad (3)$$

$\rho(\theta, \varphi, d)$  为定向一半球反射比, 上式表示在半球观测时, 定向一半球反射比和定向一半球反射因数相等。

由双向反射比分布函数的定义可知, 直接测定  $f_{\text{brdf}}$  的方法是分别用照度计和亮度计测出入射光谱辐照度和反射光谱辐亮度, 两者之比即为  $f_{\text{brdf}}$ 。这种方法实现起来比较麻烦, 这里采用一种间接测量方法。由(2)式可知, 如果测定了反射因数  $R(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$ , 就可以计算双向反射比分布函数。定向反射因数的测量用比对的方法来实现, 即在同一个变角测试装置上对于待测样品和标准样品, 光束入射和出射方式均相同, 从而有

$$R_y(\theta, \theta') = \frac{V_y(\theta, \theta')}{V_B(\theta, \theta')} R_B(\theta, \theta'), \quad (4)$$

其中  $V_y$ 、 $V_B$  分别为测试样品和标准样品时由探测器得到的输出电压, 如果知道标准样品的反射因数  $R_B(\theta, \theta')$ , 待测样品的反射因数  $R_y(\theta, \theta')$  可以计算出来。标准样品的反射因数可从它的反射比  $\rho(0/d)$  推得, 这里一个基本要求是标准反射样品有较好的朗伯漫射特性。

由关系式

$$R_B(0, d) = \frac{\int_0^{2\pi/2} \int_0^{2\pi/2} R_B(0, \theta') \sin \theta' \cos \theta' d\theta' d\varphi'}{\int_0^{2\pi/2} \int_0^{2\pi/2} \sin \theta' \cos \theta' d\theta' d\varphi'}, \quad (5)$$

$R_B(0, d)$  为标准样品  $0^\circ$  入射时的漫反射因数, 两边除以  $R(0, 45^\circ)$ , 最后有

$$\frac{R_B(0, d)}{R_B(0, 45^\circ)} = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{R_B(0, \theta')}{R_B(0, 45^\circ)} \sin \theta' \cos \theta' d\theta', \quad (6)$$

令  $B_B(0, \theta') = R_B(0, \theta')/R_B(0, 45^\circ)$ , 即  $B_B(0, \theta')$  是  $R_B(0, \theta')$  的归一化值。 $B(0, \theta')$  的测量方法可以这样实现: 光源垂直照射标准样品, 在包括  $\theta' = 45^\circ$  在内的 7 个不同的  $\theta'$ , 辐射计读数为  $V_B(0, \theta')$ , 考虑到余弦定律, 则

$$B_B(0, \theta') = \frac{V_B(0, \theta') \cos 45^\circ}{V_B(0, 45^\circ) \cos \theta'}, \quad (7)$$

现用一多项式逼近  $B_B(0, \theta')$ , 令

$$B_B(0, \theta') = \sum_{i=0}^5 b_i (\theta')^i, \quad (8)$$

其中  $b_i$  是待定常数。将(7)式、(8)式代入(6)式, 则有

$$\frac{R_B(0, d)}{R_B(0, 45^\circ)} = 2 \sum_{i=0}^5 b_i I_i, \quad (9)$$

式中  $I_i = \int_0^{\pi/2} (\theta')^i \sin \theta' \cos \theta' d\theta'$ 。

在(9)式中, 对于  $i = 0 \sim 5$ , 对应的  $I_i$  均可计算; 这样由求得的 6 个  $B_B(0, \theta')$  值, 利用(8)式可以求解系数  $b_i (i = 0 \sim 5)$ , 再由(9)式和已知的  $b_i, I_i$ , 求得  $R_B(0, d)/R_B(0, 45^\circ)$ ; 由于  $R_B(0, d) = \rho_B(0, d)$  是已知的, 则  $R_B(0, 45^\circ)$  可以计算出来。再由

$$R_B(0, \theta') = B_B(0, \theta') R_B(0, 45^\circ) \tag{10}$$

求得反射比因数  $R_B(0, \theta')$ 。对于不同的入射角求法相同。这样标准样品的反射比因数就成为已知, 再由(4)式求得待测样品的反射比因数, 于是待测样品的双向反射率分布函数就是

$$f_{(\text{brdf})_y} = R_y(0, \theta')/\pi. \tag{11}$$

### 3 测试装置

根据上面阐述的双向反射比分布函数测试原理, 建立了紫外-真空紫外变角测试系统, 如图 1 所示。该系统由紫外-真空紫外光源、光谱仪、反射率计及电子学-计算机系统组成。

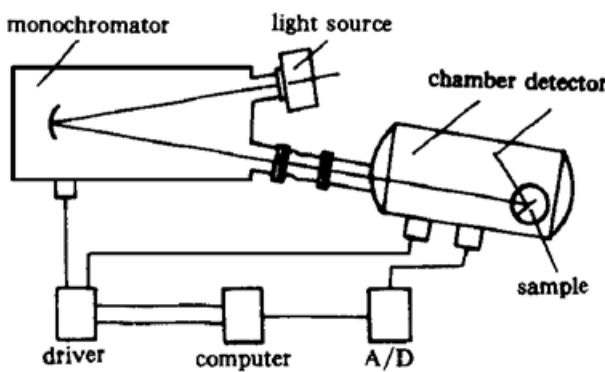


Fig. 1 The experimental setup for investigation of diffuser

该系统由紫外-真空紫外光源、光谱仪、反射率计及电子学-计算机系统组成。

紫外-真空紫外波段可利用的光源有氘灯、壁稳氩弧光源, 它们是连续谱, 另外还有汞灯和空阴极光源等线谱光源。单色仪为 M cpherson2253M 5 型紫外-真空紫外光谱仪, 空阴极光源经差分泵单元直接与单色仪相连。变角反射率计由主真空室、五自由度样品台和探测器组成。主真空室直径为 800 mm, 长为 1200 mm, 由一台 1500 升的涡轮分子泵抽空, 真空度可达  $10^{-4}$  Pa。样品可以进行 X、Y、Z 方向平移和  $\theta$  角转动及俯仰调节, Z 方向平动可将样品移入移出光路, X 和 Y 方向平动用来选择样品的测试点,  $\theta$  角转动用来选择光束的入射角,  $2\theta$  角转动用来将探测器移动到直接光方向和反射方向, 探测器和样品可单独旋转, 样品和探测器的旋转, 均在计算机控制下完成; 探测器为 R928 型光电倍增管, 倍增管的输出经放大、A/D 变换后由计算机采集处理。

### 4 紫外-真空紫外漫反射特性分析

由于紫外-真空紫外没有可利用的漫反射板, 因此, 首先要探索漫反射板的制作工艺。这里选用在紫外-真空紫外波段反射率较高的铝作基底材料, 通过不同粒度的散粒磨料光学研磨加工, 制成表面粗糙的反射表面。经多次反复探索研究, 最后确定某一特殊粒度的磨料研磨加工后形成的表面具有较好的漫反射特性。漫反射板的制作工艺为: 铝材经机械加工制成多种形状的光滑表面, 通过研磨后清砂处理, 这时的表面实际是氧化了的; 为提高反射率, 表面镀 Al+ MgF<sub>2</sub> 膜, 便得到紫外-真空紫外波段用的漫反射板。

#### 4.1 定向半球反射比 $\rho(0/d)$

定向半球反射比  $\rho(0/d)$  的测试方法有多种, 本文采用比对方法, 即用一已知  $\rho(0/d)$  的标准漫反射

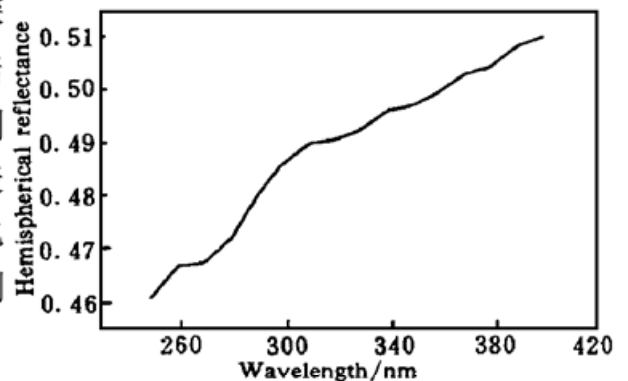


Fig. 2 The Hemispherical reflectance of aluminum diffuser

板, 通过比较测试得到未知漫反射板的  $\rho(0/d)$ 。测试在 Lamda9 型紫外-可见-红外分光光度计上完成。使用的标准漫反射板为中国计量科学院标定的聚四氟乙烯漫反射板, 工作波段 250~ 2500 nm, 该漫反射板的特性与朗伯体逼近。图 2 给出测得的所研制的铝漫反射板的  $\rho(0/d)$ , 由测试结果可以看出, 315 nm 处的  $\rho(0/d)$  为 49%。

#### 4.2 双向反射率分布函数(BRDF)

由上所述, 要想测量铝漫反射板的双向反射分布函数应首先测它的反射因数  $R(0, \theta')$ , 即由聚四氟乙烯漫反射板的  $\rho(0/d)$  测得  $R(0, \theta')$ 。为与美国国家技术研究所报道的结果比较, 这里测试了正入射情况下, 15°~ 45°范围铝漫反射板的双向反射分布函数。测试在图 1 所示装置上完成, 对于聚四氟乙烯标准漫反射板, 取入射角 0°, 单色仪波长定在 312.5 nm 处, 探测器绕样品旋转, 分别在出射角 15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°等七处测得  $V(0, 15^\circ)$ 、 $V(0, 20^\circ)$ ...、 $V(0, 45^\circ)$ , 求解由(8)式建立的方程组, 得到  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$ , 由(9)式得

$$\frac{R(0/d)}{V(0, 45^\circ)} = 2(0.5b_0 + 0.3927b_1 + \dots + 0.4913b_5), \quad (12)$$

由于  $R(0/d) = \rho(0/d)$ , 于是聚四氟乙烯标准漫反射板的  $R(0, 45^\circ)$  也可得到。由(10)式、(4)式、(11)式, 测得铝漫反射板双向反射分布函数值。图 3 给出了测试结果, 表明在正入射情况下, 15°~ 40°范围的双向反射分布函数偏差优于 11%。另外, 在图 1 所示装置上测试了正入射情况下 15°~ 45°范围 150 nm 处的  $B(0, \theta')$  值, 对于铝漫反射板, 取入射角 0°, 单色仪波长定在 150 nm 处, 光源用空阴极光源, 使用  $N_2$  气体为工作气体, 探测器为 R928 型光电倍增管前加水杨酸钠荧光屏, 同样地, 探测器绕样品旋转, 分别在出射角 15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°等七处测得  $V(0, 15^\circ)$ 、 $V(0, 20^\circ)$ ...、 $V(0, 45^\circ)$ , 结果如图 4 所示, 150 nm 与 312.5 nm 处的  $B(0, \theta')$  值具有较好的一致性。

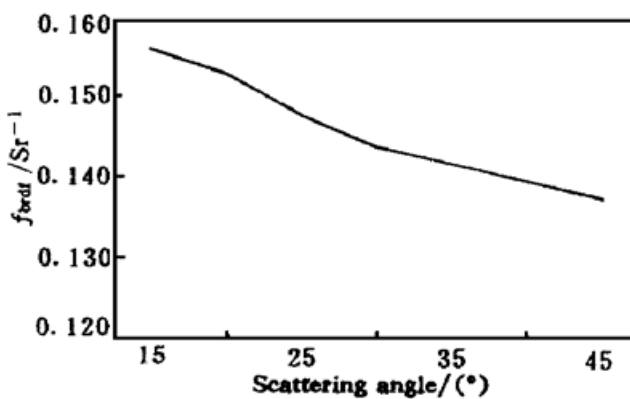


Fig. 3 The BRDF of aluminum diffuser

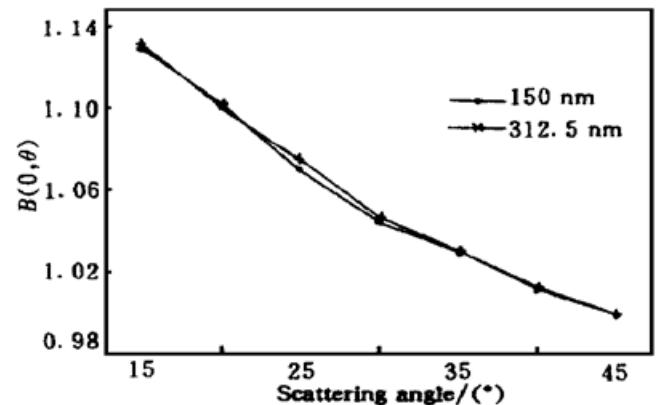


Fig. 4 The  $B(0, \theta)$  of aluminum diffuser

**结 论** 选用在紫外-真空紫外波段反射比较高的铝作基底材料, 通过光学研磨加工和光学镀膜处理制成漫反射板; 建立了紫外-真空紫外波段漫反射特性测试研究装置, 利用该系统进行漫射板余弦特性、双向反射比分布函数的测试。结果表明, 该漫反射板反射比  $\rho(o/d)$  在 315 nm 处为 49%; 在正入射情况下, 双向反射比分布函数在 15°~ 40°范围内偏差优于 11%。

## 参 考 文 献

- [1] Weidner V R, Hsia J J. NBS specular reflectometer spectrophotometer. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(8) : 1268~ 1273
- [2] Hsia J J, Richmond J C. Bidirectional reflectometer Part 1. *Journal of Research of National Bureau of Standards*, 1976, **80A**(2) : 189~ 205
- [3] 车念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 35~ 72
- [4] Young E R, Clark K C, Bennett R B *et al.*. Measurements and parameterization of the bidirectional reflectance factor of BaSO<sub>4</sub> paint. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20) : 3500~ 3505
- [5] Barnes P Y, Hsia J J. UV Bidirectional reflectance distribution function measurements for diffuser. *Proc. SPIE*, 1992, **1764** : 285~ 289
- [6] Fowler W K, Nelson V W. Performance of various diffuser materials in the absolute radiometric calibration of the SBUV-2. *Metrologia*, 1993, **30** : 255~ 257

**Study of Diffuser in UV and VUV Range**

Tang Yuguo      Qi Wenzong      Li Futian

(State Key Laboratory of Applied Optics,

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 28 June 1998; revised 16 November 1998)

**Abstract** An aluminium diffuser was developed by grinding the aluminium plates with free abrasive, and using a vacuum-deposited layer of pure aluminium. The instruments used for bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurements were established. The BRDF and hemispherical reflectance of the aluminium diffuser was measured. The total hemispherical reflectance of the aluminium diffusing plate is 49% at 315 nm. At normal incidence, the BRDF of the ground aluminium changes about 11% over 15°~ 40° scattering angle range.

**Key words** UV and VUV, diffuser, bidirectional reflectance distribution function.