

文章编号: 0253-2239(2001)03-0371-05

# 若干材料紫外-真空紫外漫反射特性的研究

刘 颖 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:** 给出了正入射条件下铝漫反射板在紫外-真空紫外波段的漫反射特性及硫酸钡和聚四氟乙烯 (PTFE) 漫反射板在紫外波段的漫反射特性; 以中国计量院提供的已知正入射半球反射比  $\rho(0, d)$  的聚四氟乙烯漫反射板为参考样品, 通过比较测量得到了铝和硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  以及硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  在半年内的衰减情况. 计算了三种漫反射板的双向反射分布函数  $f_{\text{BRDF}}(0, \theta_d)$ 。

**关键词:** 紫外-真空紫外; 漫反射特性; 材料

中图分类号: TN204 文献标识码: A

## 1 引 言

随着紫外-真空紫外波段空间遥感仪器的发展, 紫外-真空紫外漫反射板作为其光谱辐射定标中的重要光学元件越来越受到重视。

国际上许多研究机构开展了紫外-真空紫外波段材料漫反射特性的研究。例如: Young 等人<sup>[1]</sup>专门研究了硫酸钡等漫反射板的制作工艺, 比较了不同入射和接收条件下, 漫反射板双向反射分布函数的变化情况。美国国家标准技术研究所(NIST)辐射物理测试部利用用于反射测量的标准分光光度计测量了特定入射和接收条件下硫酸钡漫反射板的双向反射分布函数, 利用此漫反射板完成了星载空基臭氧监测仪的光谱辐射定标<sup>[2]</sup>。Fegleg 和 Fowler<sup>[3]</sup>研究了太阳后向散射紫外辐射计使用的硫酸钡漫反射板的双向反射分布函数和正入射半球反射比  $\rho(0, d)$  随时间的衰减情况以及由此引入的太阳后向散射紫外辐射计光谱辐射定标的不确定性。Fowler 和 Nelson<sup>[4]</sup>研究了太阳后向散射紫外辐射计光谱辐射定标中使用的三种漫反射板材料(铝、硫酸钡和聚四氟乙烯)的漫反射特性及其稳定性。

我们也开展了紫外-真空紫外波段材料漫反射特性的研究。研究了铝和硫酸钡漫反射板的制作工艺, 在此基础上, 利用建立的两种紫外-真空紫外漫反射特性测试装置, 分别测得正入射条件下铝漫反射板在紫外-真空紫外波段的漫反射特性, 硫酸钡和聚四氟乙烯漫反射板在紫外波段的漫反射特性。利用聚四氟乙烯漫反射板的正入射半球反射比

$\rho(0, d)$ , 通过比较测量, 得到了铝和硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$ 。计算了三种漫反射板的双向反射分布函数  $f_{\text{BRDF}}(0, \theta_d)$ 。

## 2 测试装置

为研究材料紫外-真空紫外波段的漫反射特性, 建立了两种测试装置, 分别是 McPherson2253M5 紫外-真空紫外漫反射特性测试装置和 Seya - Namioka 真空紫外漫反射特性测试装置。

### 2.1 McPherson2253M5 紫外-真空紫外漫反射特性测试装置

该装置由光源、紫外-真空紫外单色仪、反射计和电子学-微机系统组成, 如图 1 所示。可采用的光源包括壁稳氩弧、氙灯、空阴极光源和汞灯等。

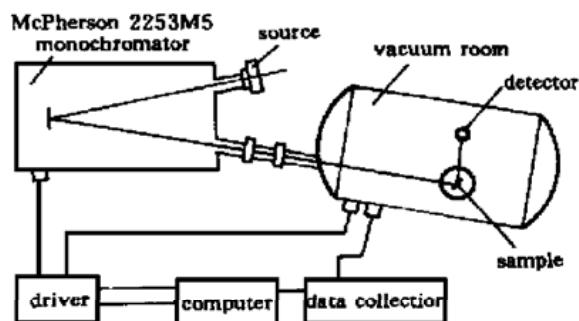


Fig. 1 Schematic diagram of McPherson2253M5 UV-VUV scatterometer

McPherson2253M5 紫外-真空紫外单色仪工作波段为 50 nm ~ 600 nm, 所用凹面光栅的曲率半径为 3000 mm, 刻线密度 1200 l/mm, 刻线面积 65 mm × 104 mm, 150 nm 处的光谱分辨率为 0.002 nm。单色仪工作时真空度能达到  $10^{-4}$  Pa。由计算机控制完成波

长扫描。

反射计由主真空室、五自由度转台和探测器组成。主真空室直径为 800 mm, 长为 1200 mm, 真空度达  $10^{-4}$  Pa。样品可进行  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向平移和  $\theta$  角转动及俯仰调节,  $z$  方向平移将样品移出光路,  $x$  和  $y$  方向平动以选择样品的测试点,  $\theta$  角转动用来选择入射角,  $2\theta$  角转动用来将探测器移动到直接接收入射光的位置和不同的漫反射方向。探测器和样品在计算机的控制下完成各种移动和转动; 探测器为 R928 型光电倍增管。探测器输出经直流放大器放大, 送入 7060 型数字电压表, 并由计算机处理数据并输出测试结果。

## 2.2 Seya-Namioka 真空紫外漫反射特性测试装置

Seya-Namioka 真空紫外漫反射特性测试装置如图 2 所示。

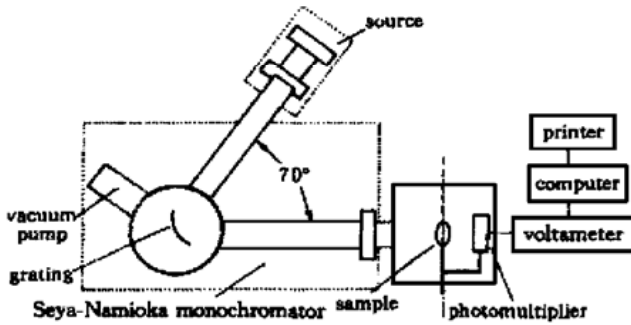


Fig. 2 Schematic diagram of Seya-Namioka VUV scatterometer

此装置采用空阴极光源。空阴极光源的工作气体是纯度为 99.999% 的氮气, 工作气压为 1.33 Pa ~  $1.33 \times 10^3$  Pa, 工作电流为 350 mA。所用的放电发射的特征波长为 149.2 nm、174.2 nm 和 252.0 nm。空阴极光源光谱辐射稳定性优于  $\pm 1\%/h$ 。以流动方式为光源提供氮气, 通过一级差分抽运单元将空阴极光源与单色仪的入射狭缝连接起来。

Seya-Namioka 真空紫外单色仪的工作波段为 50 nm ~ 500 nm, 凹面光栅曲率半径为 1000 mm, 刻线密度 1200 l/mm, 刻划面积 30 mm  $\times$  50 mm, 闪耀波长 150 nm。单色仪最高光谱分辨率为 0.04 nm。波长重复性和精度均为  $\pm 0.05$  nm。单色仪工作的真空度最低可达 1.33 Pa。由计算机控制步进电机通过正弦机构转动光栅以完成波长扫描。

反射计由真空室、样品架和探测器组成。由单色仪出射的真空紫外辐射经漫反射板表面反射到探测器上。放在样品架上的漫反射板和探测器可绕共同的旋转轴旋转。样品架的调节机构可以使漫反射板处于所要求的任意入射角, 其转动范围为  $-90^\circ \sim$

$+90^\circ$ 。入射角读数精度为  $\pm 0.2^\circ$ 。探测器调整机构使探测器绕它与漫反射板共同的旋转轴在  $25^\circ \sim 170^\circ$  之间任意位置读取反射光强。探测器回转半径为 125 mm。所用探测器为 R928 型光电倍增管。在光电倍增管前装有水杨酸钠荧光屏, 可将真空紫外辐射转化为可见辐射以便接收。

反射计中的真空度为 1.33 Pa, 在真空室外通过真空密封转轴完成样品和探测器的转动以及样品的移入/移出光路。探测器的输出通过真空电极引线送至反射计外的放大器放大, 然后送入 7150 型数字电压表。最终由计算机处理数据并输出测试结果。

## 3 测试结果

实验中所用的聚四氟乙烯漫反射板由中国计量院提供, 铝和硫酸钡漫反射板是自制的。

铝漫反射板用研磨和光学镀膜的方法制成。将表面光滑、洁净的铝板用粒度大小适当的金刚砂研磨, 研磨后用高压去离子水将铝板上的磨料冲洗掉, 再经光学镀膜即可使用。通过光学镀膜可提高铝漫反射板在紫外-真空紫外波段的反射能力。

硫酸钡漫反射板用喷涂的方法制成。加一定量的粘合剂将硫酸钡粉剂制成半糊状均匀地喷涂在光滑的铝板表面, 干燥后即可使用。

### 3.1 正入射条件下三种材料在紫外波段的漫反射特性

在 McPherson 2253M5 紫外-真空紫外漫反射特性测试装置上测量了铝、硫酸钡和聚四氟乙烯三种材料紫外波段的漫反射特性。光源为常用的汞灯, 入射波长分别为 253.7 nm、296.7 nm 和 365.0 nm。入射辐射正入射至漫反射板表面(认为漫反射板各向同性, 忽略方位角对材料漫反射特性的影响), 测量了漫反射角为  $5^\circ \sim 65^\circ$  范围内材料的漫反射特性, 漫反射角的测量间隔为  $10^\circ$ 。

图 3(a) ~ 图 3(c) 分别为在上述测试条件下铝、硫酸钡和聚四氟乙烯漫反射板在上述三个波长下的漫反射特性测试结果。

图 4 是三种材料的漫反射特性的比较(取入射波长为 253.7 nm)。图 3(a) ~ 图 3(c) 和图 4 的纵坐标标记为  $R_1$ ,

$$R_1 = \frac{V_0 / \cos \theta}{V_{15} / \cos 15^\circ},$$

这里  $V_0$ 、 $V_{15}$  为漫反射角为  $\theta$  度、 $15^\circ$  时探测器接收到的信号读数值。

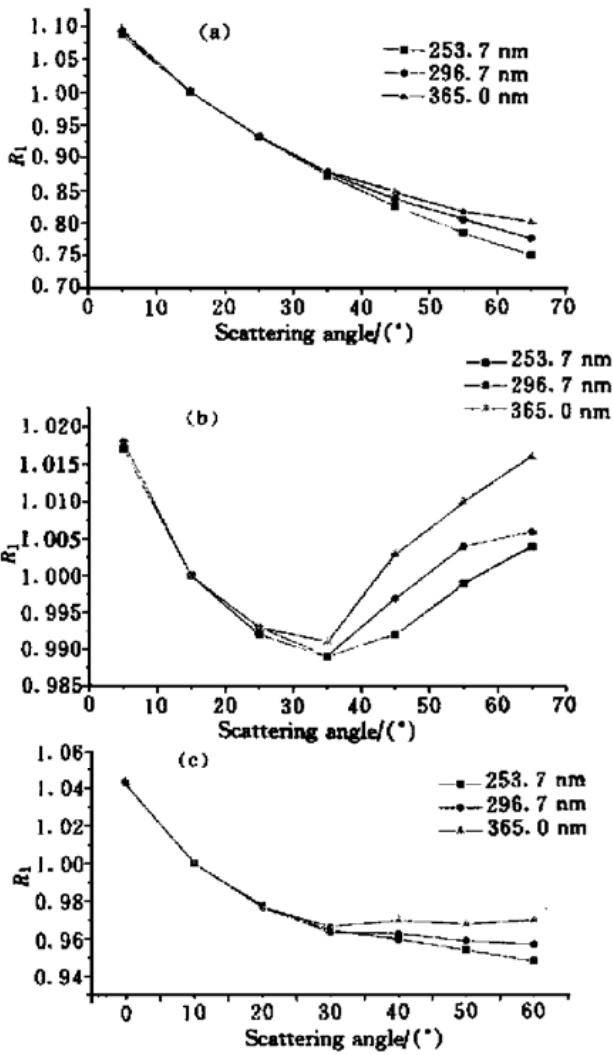


Fig. 3 (a) Characteristic of the ground aluminium at normal incidence; (b) Characteristic of  $BaSO_4$  at normal incidence; (c) Characteristic of PTFE at normal incidence

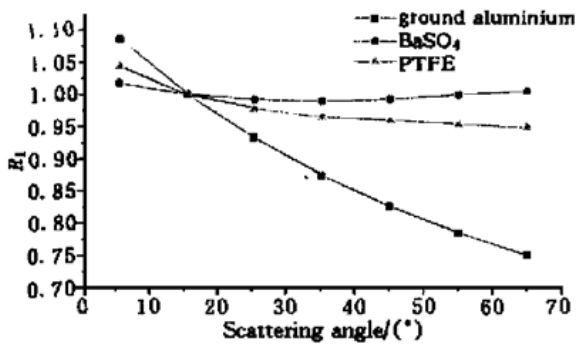


Fig. 4 Comparison of the characteristic of the three diffuse materials at normal incidence

### 3.2 正入射条件下铝漫反射板在真空紫外波段的漫反射特性

在 Seya-Namioka 真空紫外漫反射特性测试装置上, 忽略方位角对材料漫反射特性的影响, 测量了铝漫反射板正入射条件下的真空紫外波段漫反射特性。选用空阴极光源, 入射波长分别为 149.2 nm、174.2 nm 和 252.0 nm。漫反射角的范围为 25°~65°, 间隔为 10°。测试结果如图 5 所示。图 5 的纵坐

标记为  $R_2$ ,  $R_2 = (V_0 / \cos \theta) / (V_{35} / \cos 35^\circ)$ ,  $V_{35}$  是漫反射角为 35° 时探测器接收到的信号读出值。

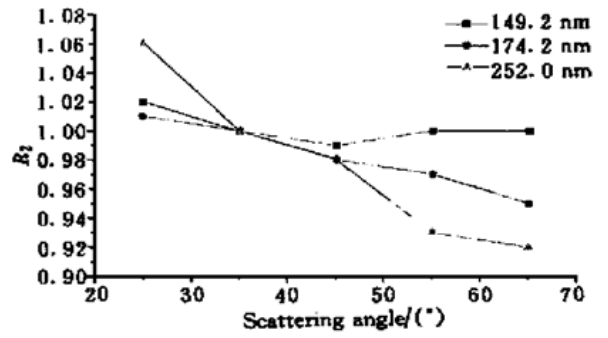


Fig. 5 Characteristic of the ground aluminium at normal incidence

### 3.3 铝和硫酸钡漫反射板在紫外波段的正入射半球反射比 $\rho(0, d)$

以中国计量院提供的已知  $\rho(0, d)$  的聚四氟乙烯漫反射板为参考样品, 用比对测量的方法在 LAMBDA-9 紫外-可见-近红外分光光度计上测量了铝和硫酸钡漫反射板在紫外波段的  $\rho(0, d)$ 。图 6 为三种材料在 250 nm~400 nm 范围内  $\rho(0, d)$  的比较, 图 7 为硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  在半年内的衰减情况。

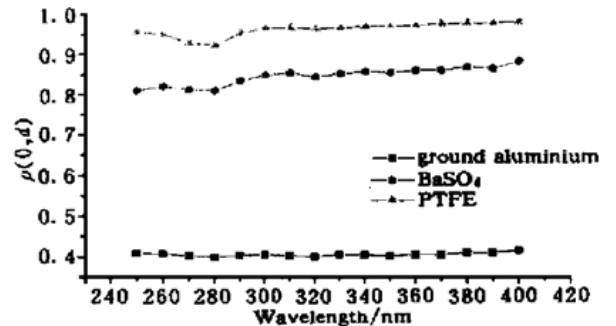


Fig. 6 Comparison of the  $\rho(0, d)$  of the three diffuse materials

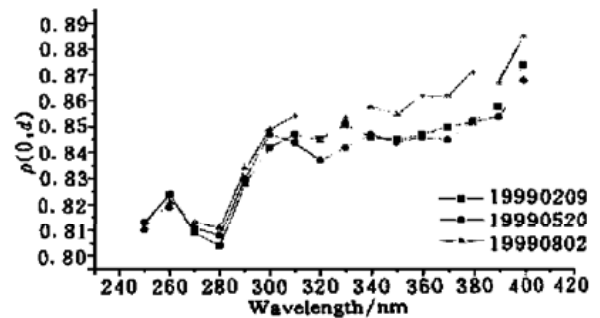


Fig. 7 Stability of the  $\rho(0, d)$  for the  $BaSO_4$  diffuser

### 3.4 三种材料的双向反射分布函数 $f_{BRDF}(0, \theta_d)$

根据参考文献[5]提供的方法, 并利用 3.1 节中三种材料漫反射特性的测试结果以及中国计量院提供的聚四氟乙烯的  $\rho(0, d)$ , 计算了三种材料的

$f_{BRDF}(0, \theta_d)$ ,  $\theta_d$  为漫反射角。图 8 为 253.7 nm 处三种材料  $f_{BRDF}(0, \theta_d)$  的计算结果。

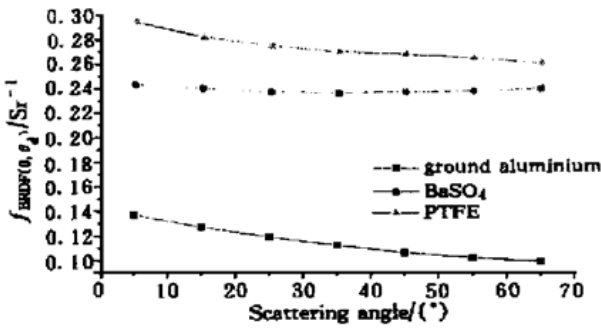


Fig. 8 Comparison of the  $f_{BRDF}$  of the three diffuse materials at 253.7 nm

## 4 讨 论

### 4.1 三种材料漫反射特性与朗伯漫反射体余弦特性(朗伯特性)的偏差

正入射条件下, 设入射辐射被漫反射板反射后, 探测器在漫反射角  $\alpha$ 、 $\beta$  处接收到的信号读出值为  $V_\alpha$ 、 $V_\beta$ , 对于朗伯漫反射体有  $(V_\alpha / \cos \alpha) / (V_\beta / \cos \beta) = 1$ ; 对于实际的漫反射材料, 例如所比较的三种材料, 在图 3 和图 4 中, 将各角度下的  $(V_\theta / \cos \theta)$  与各自的  $(V_{15} / \cos 15^\circ)$  相除, 在图 5 中, 将各角度下的  $(V_\theta / \cos \theta)$  与各自的  $(V_{35} / \cos 35^\circ)$  相除, 所得比值与 1 的偏差即为三种材料漫反射特性与朗伯漫反射体余弦特性(朗伯特性)的偏差。

1) 图 3 和图 5 表明, 材料漫反射特性与波长的关系较小, 三种材料的漫反射特性随波长的变化趋势基本相同。图 3 还表明在正入射条件下, 漫反射角在  $5^\circ \sim 35^\circ$  的范围内, 材料在不同波长下的漫反射特性几乎不变; 波长越短, 各材料在较大漫反射角处的漫反射特性与余弦特性的偏差越大。

2) 图 4 表明, 硫酸钡的漫反射特性与余弦特性的偏差最小, 铝漫反射板的漫反射特性与余弦特性的偏差最大。

硫酸钡漫反射板的漫反射特性不但与硫酸钡本身的颗粒大小有关, 还与添加粘合剂的多少有关。粘合剂虽然使硫酸钡与基底粘接得较牢, 但如果使用过量, 易使制成的硫酸钡漫反射板产生镜反射, 且容易变黄老化。制作好的硫酸钡漫反射板应尽量减少紫外辐射等的污染。

铝漫反射板的漫反射特性与选用磨料的粒度有关, 粒度大小接近的磨料也能磨出漫反射特性非常接近的铝漫反射板。铝漫反射板的漫反射特性与研

磨过程中表面受力是否均匀、铝表面的清洁等因素有关。

### 4.2 三种材料的正入射半球反射比 $\rho(0, d)$

1) 由图 6 可知, 三种材料中聚四氟乙烯漫反射板的  $\rho(0, d)$  最高, 铝漫反射板的  $\rho(0, d)$  最低, 两者相差约 40%; 硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  比聚四氟乙烯漫反射板的低约 10%。三种材料的  $\rho(0, d)$  随波长的变化主要集中在 250 nm ~ 300 nm 波段, 随波长向长波方向的移动, 且均略呈上升趋势。在 250 nm ~ 400 nm 之间, 聚四氟乙烯漫反射板的  $\rho(0, d)$  变化约为 6%, 硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  变化约为 9%, 铝漫反射板的  $\rho(0, d)$  变化约为 4%。

2) 图 7 给出了硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  随着时间的衰减情况。在硫酸钡漫反射板制备后的半个月、四个月和七个月间监测了其  $\rho(0, d)$  的老化情况, 测试结果表明硫酸钡漫反射板的  $\rho(0, d)$  在半年内未有显著的衰减趋势。

### 4.3 三种材料的双向反射分布函数 $f_{BRDF}(0, \theta_d)$ 的比较

图 8 是三种材料  $f_{BRDF}(0, \theta_d)$  的计算结果。材料的  $f_{BRDF}$  值综合反映了材料的漫反射特性及其反射能力的强弱。对这三种材料, 硫酸钡的漫反射特性优于铝和聚四氟乙烯的漫反射特性, 且其反射能力与聚四氟乙烯的反射能力接近。

表 1 列出了上述三种材料的  $f_{BRDF}(0, \theta_d)$  随漫反射角的变化与 Fowler 等人<sup>[4]</sup> 结果的比较。结果显示, 自制的硫酸钡、铝漫反射板和中国计量院提供的聚四氟乙烯漫反射板的漫反射特性与相应的 Fowler 等的三种漫反射板的漫反射特性相似。

Table 1. Comparison of the variation of  $f_{BRDF} / (\%)$  of three materials of our own with that of Fowler *et al.* .

range of scatter angle / (°)	19~ 37 <sup>[4]</sup>	5~ 45 <sup>[1]</sup>
ground aluminium	2.7	2.1
BaSO <sub>4</sub>	0.7	0.4
PTFE <sup>[2]</sup>	1.0	1.4

1) Experiment results of our own;

2) Provided by National Institute of Metrology

**结论** 讨论了用于太阳紫外光谱监视器光谱辐射定标的铝漫反射板在紫外-真空紫外波段及硫酸钡和聚四氟乙烯漫反射板在紫外波段的漫反射特性。硫酸钡漫反射板的漫反射特性与余弦特性相近, 且其反射能力较强; 铝漫反射板的漫反射特性与余弦特性的偏差较大, 且其反射能力较弱, 但它能用于真空

紫外波段。对硫酸钡漫反射板的正入射半球反射比  $\rho(0, d)$  随时间的衰减情况有待进一步研究。

作者衷心感谢王立朋老师在实验中给予的热情帮助。

### 参 考 文 献

[1] 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

[2] Barnes P Y, Hsia J J. UV bidirectional reference distribution function measurements for diffusers. *Proc. SPIE*, 1992, **1764**: 285~ 288

[3] Fegley A A, Fowler W K. Radiometric calibration of SBUV/2 instruments: Retrospective improvements. *Metrologia*, 1991, **28**(3): 297~ 300

[4] Fowler W K, Nelson V W. Performance of various diffuser materials in the absolute radiometric calibration of the SBUV/2. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 255~ 257

[5] 李念曾, 闫达远. 辐射度学和光度学. 北京: 北京理工大学出版社. 1990. 399~ 402

## Characteristics of Various Diffuser Materials at UV-VUV Spectral Range

Liu Ying Li Futian

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 1 November 1999; revised 6 January 2000)

**Abstract:** Characteristics of a ground aluminium diffuse plate at ultraviolet-vacuum ultraviolet (UV-VUV) and that of a BaSO<sub>4</sub> and a polytetrafluoroethylene (PTFE) diffuse plate at UV are described. The  $\rho(0, d)$  of the BaSO<sub>4</sub> and the ground aluminium diffuse plate in 250 nm ~ 400 nm is measured by comparing with the PTFE diffuse plate whose  $\rho(0, d)$  is known. Also, the aging of the  $\rho(0, d)$  of the BaSO<sub>4</sub> diffuse plate is presented. The  $f_{\text{BRDF}}(0, \theta_d)$  of the three diffuse materials is calculated.

**Key words:** ultraviolet-vacuum ultraviolet; diffuse characteristic; material