

文章编号: 0253-2239(2004)02-230-5

# 铝漫反射板 200~300 nm 相对双向反射分布函数的 实验研究

贾 辉 李福田

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

**摘要:** 选择了合适的测量方式,建立了铝漫反射板的相对双向反射分布函数的测量装置。通过实验研究铝漫反射板的相对双向反射分布函数在不同情况下的性质表明:不同表面粗糙度的铝漫反射板相对双向反射分布函数随入射角度的变化趋势有所不同;表面镀 Al+MgF<sub>2</sub> 膜反射率可增大约 1.5 到 3 倍;相对双向反射分布函数在 200~280 nm 之间不随波长改变,波长大于 280 nm 时,随波长略有增加,最大 13%。根据实验数据绘出的二维等值线图反映了光辐射以不同角度入射、观测角度固定情况下的铝漫反射板的相对双向反射分布函数的变化,对实验数据拟合得到在该情况下的铝漫反射板的相对双向反射分布函数的较精确的数学表达式。

**关键词:** 物理光学; 辐射传输; 铝漫反射板; 双向反射分布函数; 紫外; 辐射

中图分类号: O433.1; TB96 文献标识码: A

## Bidirectional Reflectance Distribution Function of Aluminium Diffuser at UV Spectral Band

Jia Hui Li Futian

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

(Received 26 August 2002; revised 25 December 2003)

**Abstract:** The experimental setup for the measurement of aluminium diffuser's bidirectional reflectance distribution function has been established by choosing a proper illuminating and viewing method. Characteristics of aluminium diffuser's bidirectional reflectance distribution function under different situation are studied in experiment. The change trends of bidirectional reflectance distribution function with wavelength of different surfaces roughness of Al diffusers are different; after coated with Al+MgF<sub>2</sub>, the reflectance increase approximately from 1.5 to 3 times; from 200 to 280 nm, the relative bidirectional reflectance distribution function of Al diffuser does not change with wavelength, but it increases up to 13 percent while wavelength is longer than 280 nm. Contour plots resulting from experimental data show the change of aluminium diffuser's bidirectional reflectance distribution function with different illuminating angles while viewing angles are fixed, a fitted empiristic formula in such case is given, its relative accuracy is 2.4 percent.

**Key words:** physical optics; radiation transmission; aluminium diffuse plate; bidirectional reflectance distribution function (BRDF); ultraviolet; radiation

## 1 引 言

相对双向反射分布函数(BRDF)<sup>[1]</sup>是描述材料漫反射特性的重要函数,它是光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值,是描述材料漫反射特性的具

E-mail: jiahuijiah@mail.china.com

收稿日期:2002-08-26;收到修改稿日期:2002-12-25

有唯一确定性的函数。在遥感领域,人们通过对不同材料的相对双向反射分布函数的测量对比,寻找一种理想的漫反射材料作为辐射定标中的朗伯光源,如 Young 等<sup>[2]</sup>专门研究了硫酸钡漫反射板的制作工艺,应用三维变角仪测量了硫酸钡漫反射板的相对双向反射分布函数,比较了不同入射和接收条件下,漫反射板相对双向反射分布函数的变化情况,并给出相对双向反射分布函数的经验公式。后来漫反射板被应用于遥感仪器上,人们又从遥感元件的要求出发来研究各种漫反射材料的性能。Fowler 和 Nelson<sup>[3]</sup>比较研究了硫酸钡、聚四氟乙烯和铝漫反射板在正入射时的半球反射率以及正入射时的相对双向反射分布函数;Fegley 和 Fowler<sup>[4]</sup>测量了铝漫反射板相对双向反射分布函数,研究了铝漫反射板相对双向反射分布函数的稳定性。铝漫反射板虽然其漫反射朗伯特特性稍差,但它能在真空中使用,可经受恶劣的条件,而且性能稳定可靠,所以遥感仪器上的漫反射板多采用铝漫反射板。随着我国航天遥感事业的发展,使得对太阳紫外光谱的星上测量成为可能,在测量中,需要知道太阳光辐射在测量范围内以任意角度入射到漫反射板后,在固定方向上观测其反射光辐射的变化情况,这一需要解决的问题就是本文的研究内容。

## 2 相对双向反射分布函数的测量

### 2.1 测量方式

如图 1 所示  $E(\theta, \varphi; \lambda)$  为入射在漫反射表面面元  $dA$  上的辐照度,  $L'(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda)$  为待测材料的反射辐亮度,其中  $\theta$  和  $\theta'$  为俯仰角,  $\varphi$  和  $\varphi'$  为方位角,则相对双向反射分布函数为

$$B(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda) = \frac{L'(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda)}{E(\theta, \varphi; \lambda)}$$

根据光辐射的入射方式和观测方式的不同以

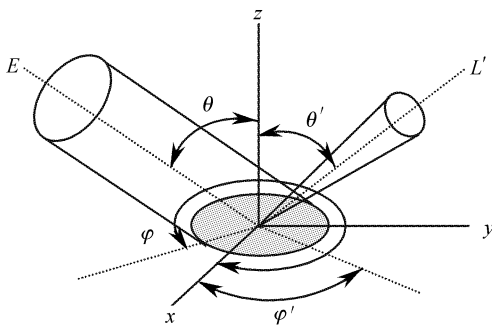


Fig. 1 Definition of bidirectional reflectance distribution function

及光辐射投射区域和观测视场的相互关系,有各种不同的测量方式,其相对双向反射分布函数的计算也不同。本文根据铝漫反射板的工作状态选择测量方式。实验中,辐照度为  $E(\lambda)$  的入射光为平行光,投射到整个铝漫反射板上,观测仪器相对于铝漫反射板固定,观测视场在铝漫反射板内,大小不变,观测俯仰角为  $\theta' = 45^\circ$ ,取观测方位角为  $\varphi' = 180^\circ$ ,当入射平行光辐射从不同的俯仰角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  入射时,漫反射板上的反射辐亮度与入射辐照度  $E(\lambda) \cdot \cos \theta$  的比值为

$$B(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda) = \frac{L(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}{E(\lambda) \cdot \cos \theta}$$

取  $\theta = 45^\circ, \varphi = 0^\circ$  时为参考值,则相对双向反射分布函数为

$$B_{\text{rel}}(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda) = \frac{B(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}{B(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)} = \frac{L(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda) \cdot \cos(45^\circ)}{L(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ; \lambda) \cdot \cos \theta}$$

其中

$$\frac{L(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}{L(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)} = \frac{V(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}{V(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}$$

后者为仪器读出值之比,则相对双向反射分布函数可表示为

$$B_{\text{rel}} = \frac{\cos(45^\circ)}{\cos \theta} \frac{V(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}{V(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)} \quad (1)$$

### 2.2 实验装置

结合铝漫反射板的实际应用建立如图 2 所示的实验装置,主要由光源、前置光学系统、铝漫反射板、变角转动装置、光谱仪、计算机等组成。装置采用氘灯作为光源,前置光学系统由一凹面镜和一平面镜组成,光源经前置光学系统后以平行光照射到铝漫反射板上。转动变角转动装置的水平转动机构和俯仰转动机构,带动光谱仪及固定在光谱仪前的铝漫反射板在水平和俯仰方向转动,从而实现光辐射以不同的角度入射到铝漫反射板表面。视场内的漫反射光进入光谱仪的入射狭缝,光谱仪的输出信号经放大采样送入计算机,即可获得铝漫反射板不同入

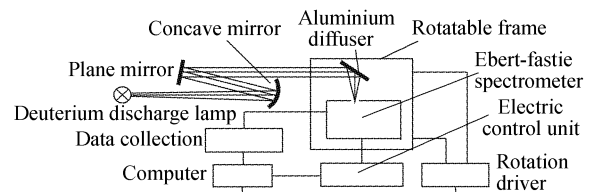


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup for BRDF measurement

射角的漫反射光谱。

铝漫反射板采用研磨和光学镀膜的方法制成。选用在紫外-真空紫外波段具有较强反射能力的铝做基底材料,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。镀膜采用高真空镀膜机蒸镀 Al 金属反射膜,为防止空气中 Al 膜表面氧化形成  $Al_2O_3$  氧化层导致对紫外光辐射的严重吸收,并在膜层表面覆盖了一层  $MgF_2$  膜阻止氧化层的形成,可增强反射膜性能的稳定性,通过镀膜可以提高铝漫反射板在紫外波段的反射能力。铝漫反射板大小为  $40\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ 。

### 3 实验结果

#### 3.1 不同表面粗糙度的铝漫反射板的相对双向反射分布函数

制作的不同表面粗糙度的铝漫反射板(图 3),相对双向反射分布函数随入射角  $\theta$  的变化情况如图 4 所示。曲线 Z3、Z4、Z5 为同批制作的表面较粗糙的铝漫反射板的相对双向反射分布函数,相同粗糙度的铝漫反射板的相对双向反射分布函数一致性较好。F-1 为表面较光滑的铝漫反射板的相对双向反射分布函数。在应用中理想的相对双向反射分布函数是使光辐射以任意角度  $\theta$  入射到铝漫反射板,反射光谱辐亮度不变,即

$$\frac{L(\theta, \varphi; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)}{L(45^\circ, 0^\circ; 45^\circ, 180^\circ; \lambda)} = 1,$$

由公式(1)得此时  $B_{\text{rel}} = \cos 45^\circ / \cos \theta$ , 如图 4 中“Ideal”曲线。可见,粗糙的铝漫反射板在入射角  $\theta$  小于  $45^\circ$  时与理想值较接近,在大于  $45^\circ$  时与理想值相差较多;光滑的铝漫反射板在小于  $45^\circ$  时与理想值相差较多,在大于  $45^\circ$  时与理想值相对接近。理论上,可把铝漫反射板表面作为具有一定粗糙度的二维随机表面,光辐射作为电磁波,从量子场论的观点来分析铝漫反射板的漫反射<sup>[5]</sup>。结合理论分析和实验研究,可以获得满足或接近实际需要的铝漫反

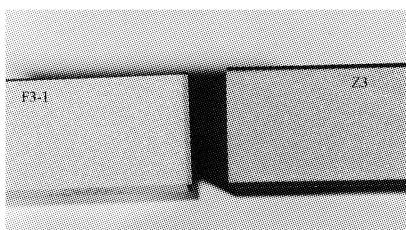


Fig. 3 Aluminium diffusers' surfaces of different roughness

射板,这方面还有待进一步研究。

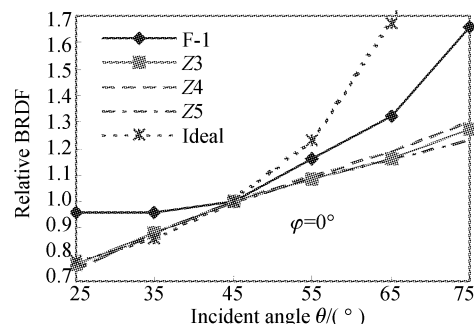


Fig. 4 Aluminium diffusers' BRDF of different surfaces roughness

#### 3.2 镀膜后铝漫反射板反射率的增大

镀  $Al+MgF_2$  可增强铝漫反射板对紫外波段光辐射的反射能力,如图 5 所示,曲线 F3-1 为同一块铝漫反射板镀膜后和镀膜前的反射率比值,镀膜后,铝漫反射板的光谱反射率明显增强,但各波长的光谱反射率增加倍数不尽相同,从  $200\text{ nm}$  的 2.29 倍到  $300\text{ nm}$  的 1.65 倍。曲线 Z4、Z5 为另两块同批制作的铝漫反射板镀膜后和镀膜前的反射率比值,镀膜后,铝漫反射板的光谱反射率增大 1.88~2.74 倍。可以看出,同批镀膜的两块铝漫反射板,其光谱反射率增大倍数基本一致,不同批镀膜的铝漫反射板的反射率增大倍数不同,受镀膜工艺影响。

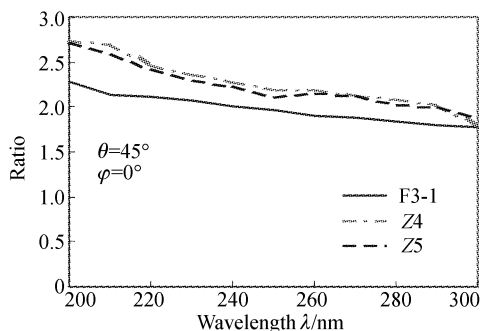


Fig. 5 Increase of BRDF of coated ( $Al+MgF_2$ ) aluminium diffusers

#### 3.3 铝漫反射板的漫反射光谱特性

图 6 是铝漫反射板的相对双向反射分布函数随波长和入射角  $\theta$  的变化情况,在波长  $200\sim 280\text{ nm}$  之间相对双向反射分布函数不随波长的变化而改变,表现为在恒定值上下波动,波动幅度为  $\theta=25^\circ$  时为 1%,  $\theta=75^\circ$  时为 3%;在波长大于  $280\text{ nm}$  时,相对双向反射分布函数波动性略有增大,在  $\theta$  小于  $55^\circ$  时为 2%,  $\theta$  大于  $55^\circ$  时为 7%,而且相对双向反射分布函数值随波长和入射角增大而继续增大,最大可达 13%。

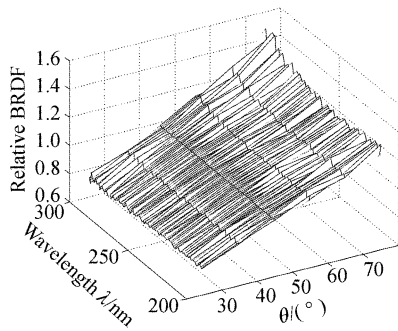


Fig. 6 Change of relative BRDF with wavelength and incident angle  $\theta, \varphi=0^\circ$

### 3.4 铝漫反射板的相对双向反射分布函数随入射角 $\theta, \varphi$ 的变化

图 7 为铝漫反射板在波长 280 nm 处的相对双向反射分布函数二维等值线图。铝漫反射板的相对双向反射分布函数在观测角度为  $45^\circ$  不变时,  $\theta$  从  $30^\circ$  到  $70^\circ$ ,  $\varphi$  从  $-30^\circ$  到  $30^\circ$  之间变化了约 30%。铝漫反射板的相对双向反射分布函数相对于方位角  $\varphi=0^\circ$  对称, 两侧随着  $\varphi$  角的绝对值增大而减小, 俯仰角  $\theta$  较小时, 变化缓慢,  $\theta$  角较大时, 变化较快。方位角  $\varphi=0^\circ$  时为入射光辐射与反射光辐射在同一平面内, 随着俯仰角  $\theta$  逐渐变大, 铝漫反射板的相对双向反射分布函数逐渐变大,  $\theta=45^\circ$  时刚好是镜向方向, 可以看出在镜向方向上, 铝漫反射板的相对双向反射分布函数并不是最大, 而是在掠入射时达到最大。图 8 为同批制作的另一块铝漫反射板在波长

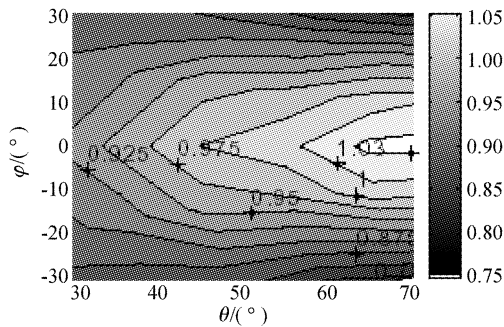


Fig. 7 Relative BRDF of aluminium diffuser

280 nm 时的相对双向反射分布函数的二维等值线图, 可以看出与图 7 十分相似。两块漫反射板的相对双向反射分布函数变化情况接近。

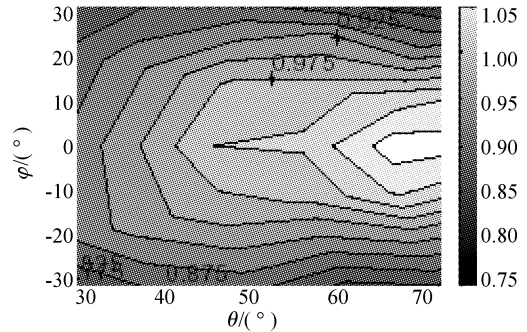


Fig. 8 Relative BRDF of aluminium diffuser (another sample)

对入射光俯仰角和方位角都在改变的相对双向反射分布函数的数据拟合, 是二元非线性拟合问题。数学模型的构造没有一般规律可循, 选用多项式拟合是一个办法, 只要项数足够多, 就可以达到很高的精度。根据铝漫反射板的相对双向反射分布函数的二维等值线图, 选如下公式作为拟合公式:

$$B(\theta, \varphi) = a + b\cos \varphi + c\sin \theta + d\cos^2 \varphi + e\sin \theta \cos \varphi + f\sin^2 \theta + \dots$$

不同的铝漫反射板的拟合系数不同, 表 1 列出了图 7 所示铝漫反射板的拟合结果。图 9 是由拟合公式计算获得的相对双向反射分布函数的二维等值线图。

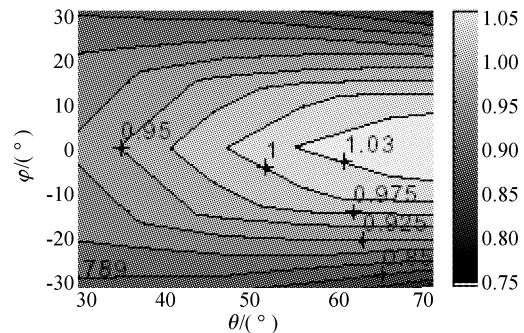


Fig. 9 Relative BRDF of aluminium diffuser calculated from fitted formula

Table 1 The fitted result of Al's relative B

Basic function	1	$\cos \varphi$	$\sin \theta$	$\cos^2 \varphi$	$\sin \theta \cos \varphi$	$\sin^2 \theta$	$\cos^3 \varphi$	$\sin \theta \cos^2 \varphi$	$\sin^2 \theta \cos \varphi$	$\sin^3 \theta$	Precision
Coefficient	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	$h$	$i$	$j$	
3 terms	0.350	0.610	0.013								12%
6 terms	2.209	-2.495	-1.646	0.928	2.421	-0.386					5%
10 terms	-2.188	9.690	3.359	-9.279	-9.760	0.086	2.786	5.611	1.610	-0.860	2.4%

结论 本文实验研究了铝漫反射板在紫外波段的相

对双向反射分布函数。同批制作的铝漫反射板的相对双向反射分布函数具有较好的一致性; 铝漫反射

板的表面粗糙度不同,其相对双向反射分布函数随入射角的变化也不同,实际应用中可选择性能符合要求的铝漫反射板。镀膜( $\text{Al}+\text{MgF}_2$ )后反射率明显增大,增大倍数与波长有关,从 200~300 nm 随波长增加缓慢减小,增大倍数还受镀膜工艺影响;铝漫反射板的相对双向反射分布函数在 200~280 nm 之间不随波长变化,在 280~300 nm 之间入射俯仰角  $\theta$  小于  $55^\circ$  时不随波长变化, $\theta$  大于  $55^\circ$  时随波长增大而增大;拟合的相对双向反射分布函数的经验公式与实验结果的相对差值在 2.4% 以内,该经验公式描述了入射光辐射在测量区间内以任意俯仰角和方位角入射时的漫反射辐亮度的变化情况。

感谢王立朋高级工程师在实验过程中给予的热情帮助。

### 参 考 文 献

- 1 Li Nianzeng, Yan Dayuan. *Radiometry and Photometry* (辐射度学和光度学). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 18~25 (in Chinese)
- 2 Young E R, Clark K C, Bennett R B *et al.*. Measurements and parameterization of the bi-directional reflectance factor of  $\text{BaSO}_4$  paint. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20):3500~3505
- 3 Flower 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
- 4 Fegley A A, Flower V K. Radiometric calibration of SBUV/2 instruments: Retrospective improvements. *Metrologia*, 1991, **28**(3):297~300
- 5 Qi Wenzong. The study of UV, VUV or soft X-ray electromagnetic waves scattering from random or period rough surfaces(短波段电磁波在随机粗糙表面散射特性及光栅表面衍射特性的研究) [DR dissertation]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1997. 9~32 (in Chinese)
- 6 Renotte E, Novi A, Labate D *et al.*. Solar diffuser pre-flight calibration set-up. *Proc. SPIE*, 1996, **2957**:355~373
- 7 Barnes P Y, Hsia J. JUV bi-directional reflectance distribution function measurements for diffusers. *Proc SPIE*, 1992, **1764**:285~288
- 8 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(3):371~375 (in Chinese)
- 9 Barnes P Y, Hsia J J. UV bi-directional reflectance distribution function measurements for diffusers. *Proc. SPIE*, 1992, **1764**:285~288
- 10 Jaross G, Cebula R, Deland M *et al.*. Backscatter ultraviolet instrument solar diffuser degradation. *Proc. SPIE*, 1998, **3427**:432~444
- 11 Guzman C T, Palmer J M, Bruegge C J *et al.*. Requirements for a solar diffuser and measurements of some candidate materials. *Proc. SPIE*, 1991, **1493**:120~131
- 12 Bruegge C J, Stiegman A E, Coulter D R *et al.*. Reflectance stability analysis of Spectralon diffuse calibration panels. *Proc. SPIE*, 1991, **1493**:132~142
- 13 Stiegman A E, Bruegge C J, Springsteen A W. Ultraviolet stability and contamination analysis of Spectralon diffuse reflectance material. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(4):799~804
- 14 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance-distribution function. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(10):1425~1430 (in Chinese)