文章编号:1001-5078(2020)09-1138-07

光学技术・

真空远紫外波段铝基漫反射板 BRDF 特性研究

李炳强¹,曹佃生¹,林冠宇¹,刘旭堂²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国石油大学(华东) 机电工程学院, 山东, 青岛 266580)

摘 要:利用铝基漫反射板可以实现在真空紫外波段对星载光谱仪器的在轨辐射定标 通过大气 外太阳辐照度与漫反射板的 BRDF 特性可以对探测器进行标定 漫反射板在这个过程中起到标 准传递的作用。为了研究铝基漫反射板在真空远紫外波段的 BDRF 特性 通过对光源进行监测 和补偿 使用相对测量的方式 减少了探测器响应不线性和光源不稳定性带来的误差。使用 BRDF 测量设备对漫反射板在 110 nm、150 nm 和 200 nm 三个波长下以正入射和 30°斜入射的组 合进行 BRDF 测量 实验结果表明 BRDF 值与波长、入射角度和天顶角等因素相关 在正入射时, 110 nm 和 150 nm 波长的 BRDF 峰值比 200 nm 时分别下降 26.10 % 和 11.94 %, 斜入射时, 110 nm和 150 nm 波长的 BRDF 峰值比 200 nm 时分别下降 31.04 %和 16.04 %;在正入射和斜入 射时 BDRF 值均随方位角的增加而减少 但是正入射时漫反板的散射相对比较均匀 斜入射时 的镜面反射现象明显; 随入射角度的增加 BRDF 值随天顶角的增加下降趋势更快。实验结果可 以为铝基漫反射板在远紫外波段的 BRDF 特性提供数据参考,为星上定标提供依据。 关键词: 铝基漫反射板; 双向反射分布函数; 真空远紫外; 辐射定标 中图分类号: TN23 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.09.019

BRDF characteristics research on aluminum-based diffuser in vacuum and far ultraviolet waveband

LI Bing-qiang¹ ,CAO Dian-sheng¹ ,LIN Guan-yu¹ ,LIU Xu-tang²

(1. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences Changchun 130033 China; 2. College of Electromechanic Engineering China University of Petroleum Qingdao 266580 China)

Abstract: The aluminum-based diffuser can be used on the on-orbit radiation calibration of the satellite carried spectrum instrument in vacuum and far ultraviolent waveband. The detector can be calibrated by solar irradiance out of atmosphere and the BRDF characteristic of the diffuser. The diffuser plays the role of the standard transfer. To research the BRDF characteristic in the vacuum and far ultraviolent waveband through the monitor and compensation to the light resource the relative method is been carried which can decrease the non-linearity of the detector response and the instability of the light source. Using the BRDF measurement instrument the BRDF value is been measured at the 110 nm $_{150}$ nm and 200 nm wavelength under 0° normal incidence and 30° oblique incidence. The results show that the value of BRDF is related to wavelength incident angle and zenith angle. When it is at the 0° normal incidence. BRDF peak value of the 110 nm and 150 nm wavelength is reduced to 26. 10 % and 11. 94 % respectively than 200 nm. When it is at the 30° normal incidence JBRDF peak value of the 110 nm and 150 nm wavelength is decreased to 31.04 % and 16.04 % respectively than 200 nm. In the normal incidence and oblique incidence BRDF value decreases with the increase of azimuth angle. But in the normal incidence the scatter of the diffuser is relatively uniform. And in the oblique incidence the mirror reflection is obvious. With the increase of the incidence angle ,BRDF value decreases more rapidly with the increase of zenith Angle. The experimental results can provide reference for the BRDF characteristics of aluminum-based diffuser in far ultraviolet waveband and on-orbit calibration.

Keywords: aluminum-based diffuser; BRDF; vacuum and far ultraviolet; radiation calibration

作者简介:李炳强(1992-) 男 硕士 研究实习员 研究方向为光谱仪器结构设计。E-mail: libingqiang@ ciomp.ac.cn 通讯作者:曹佃生(1987-) , 周,博士,副研究员,主要从事空间光学遥感仪器设计方面的研究。

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(No.41527806);吉林省科技厅重点科技攻关项目(No.20170204019SF); 青岛市人才发展专项-2019 青年专项(No.19-6-2-67-cg) 资助。

⁽C)1994-20 Email madanshing 1987 @163 Add ectronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 收稿日期: 2019-10-22

1 引 言

星载遥感仪器在外太空工作时,会受到大量紫 外光照射 高真空、太阳电磁辐射和带电粒子辐射等 外部条件均会导致遥感仪器中的光学元件和探测器 等敏感器件的性能衰减。在轨定标是星载遥感仪器 的重要功能之一 通过有计划的辐射定标 可以对遥 感仪器中光学元件和探测器等组件的性能变化进行 监测和校正 提高遥感仪器的可靠性和寿命^[1-8]。

相对于硫酸钡和聚四氟乙烯等材料,铝基漫反 射板的漫反射特性略差 但是作为合金材料 其抗辐 照能力具有明显优势,通过在漫反射板工作面镀膜 或者对其表面进行化学腐蚀等处理,可以提高其朗 伯特性和半球反射率^[7-11]。因此,基于铝基漫反射 板的在轨定标方法在国内外的遥感仪器中被广泛采 用^[8,12-14]。在轨定标一般通过太阳或者自带的定标 灯作为标准源[2-6],通过漫反射板对标准源的光进 行衰减并引入到光路中,比较标准源照度和漫反射 板 BRDF 确定辐亮度值 从而实现遥感仪器的辐射 定标。

铝基漫反射板可以在紫外到近红外宽波段范围 内工作 用于在轨定标之前 需要对其 BRDF 特性在 实验室中进行精确测量以保证定标数据的可靠性。 在可见和近红外波段对漫反射板的 BRDF 已经有成 熟的测量方法,使用 FEL 灯、氙灯或者卤钨灯等作 为光源[8,13,15] 漫反射板安装在多维调整架上沿方 位轴和俯仰轴间歇转动,可以实现不同角度入射光 的测量。国外在可对可见和近红外漫反射板的测量 精度可以达到 0.5 % [10-11] 国内可以达到 0.5 % ~ 1 %^[4,16-17]。对于远紫外波段,由于缺少稳定的高性 能光源 且光传播过程中的衰减相对明显 造成远紫 外波段的 BRDF 测量困难 因此 国内对于漫反射板 在远紫外波段的 BRDF 研究相对较少^[16]。

考虑到远紫外 BRDF 测量的特点,在基于传统 BRDF 测量方法的基础上,通过对光源进行监测,弥 补了远紫外定标光源稳定性不足的缺点。在真空条 件下 使用单色仪作为光源 对铝基漫反射板在紫外 波段的 BRDF 进行了测量,为铝基漫反射板在光学 遥感仪器中应用提供数据参考。

2 铝基漫反射板 BRDF 相对测量方法

漫反射板的 BRDF 是以反射辐亮度和入射辐照

是确定的,它反映了漫反射板表面的反射特 性^[15-18]。特定漫反射面的 BRDF 几何关系如图 1 所示。



图 1 漫反射面 BRDF 几何关系

Fig.1 BRDF geometry relationship on diffuser reflect surface

根据图 1 的几何关系,漫反射面的 BRDF 可以 表示为[16-18]:

$$f_{r}(\varphi_{i} \ \theta_{i};\varphi_{r} \ \theta_{r};\lambda) = \frac{dL_{r}(\varphi_{i} \ \theta_{i};\varphi_{r} \ \theta_{r};\lambda)}{dE_{i}(\varphi_{i} \ \theta_{i};\lambda)} \quad (1)$$

式中 φ_i 和 θ_i 分别表示入射光的方位角和天顶角; φ_r 和 θ_{i} 分别表示出射光的方位角和天顶角; λ 为波长, dL_i 为特定角度下的反射辐亮度; dE_i 为入射光的辐 照度。

使用绝对测量方法在远紫外波段测量漫反板的 BRDF存在两个显著的缺点。第一,远紫外波段很难 获得稳定的光源 在相邻两次测量间隔内光源的稳定 性对测量结果具有明显的影响; 第二,由于入射光信 号与反射光信号的量级差异有可能达到 104 因此 要 求探测器在极宽的测量范围内可以实现线性测量 这 对探测器的要求很高。针对远紫外 BRDF 测量特点, 为了提高测量的准确性 采用一套光源监测比例补偿 的测量方法 基本原理如图 2 所示。



Fig. 2 BRDF measurement schematic diagram

光源(氘灯+单色仪) 发出的光 ,经准直系统准 度比值进行衡量的向对于确定的漫反射板其mBRDPublia面后进入分光系统向分光系统是由直流无刷电机驱t 动的反射式调制扇结构,转动频率 80 Hz,稳定性 ±0.5%,占空比 50%,调制扇反射出去的光通过监 测光路进入监测探测器,无遮挡的另一部分光进入 后续测量光路。入射到待测漫反射板的光发生漫反 射,主光路就可以对反射光信号进行测量。考虑到 远紫外波段光谱的传输特性,主测量光路和准直光 路均采用离轴凹面反射镜和平面反射镜的组合形式 设计,反射镜表面镀 Al+MgF₂ 膜以提高反射率。分 光系统具有稳定转速和占空比,因此,主探测光路和 检测光路在同一时刻接收到的能量具有恒定的比例 关系,通过这个比例关系就可以对光源的能量衰减 进行监测,减少对光源稳定性的依赖。

相对测量 BRDF 的方法依赖于 BRDF 值已知的 标准漫反射板数据的可靠性,在对待测样品进行测 量前,需要首先测量标准漫反射板的 BRDF 值作为 参考,根据其已知的数据可以对待测漫反射板的参 数进行求解,从而减少对测量系统结构参数的依赖。 对于半球反射率等于ρ 的反射面,假设其具有朗伯 散射特性,那么其任意角度的 BRDF 值是恒定的,即

$$f_r = f_r \left(\varphi_i \; \theta_i; \varphi_r \; \theta_r; \lambda \right) = \frac{\rho}{\pi} \quad \text{sr}^{-1} \tag{2}$$

根据 BRDF 相对测量方法,使用经过准直的均 匀单色光,分别照射标准漫反射板和待测漫反射板, 获取在相关几何位置下的入射信号和反射信号,就 可以获得 BRDF 的测量结果。对于标准漫反射板和 待测漫反射板,BRDF 测量结果可以表示为式(3)和 式(4):

$$f_{r} (\varphi_{i} | \theta_{i}; \varphi_{r} | \theta_{r}; \lambda) = \frac{S_{r} (\varphi_{i} | \theta_{i}; \varphi_{r} | \theta_{r}; \lambda)}{S_{i} (\lambda)} \cdot \frac{R_{i} (\lambda)}{R_{r} (\lambda)} \cdot \frac{D^{2}}{A_{r} \cos \theta_{r}}$$
(3)
$$f_{r} (\varphi_{i} | \theta_{i}; \varphi_{r} | \theta_{r}; \lambda) = \frac{S_{r} (\varphi_{i} | \theta_{i}; \varphi_{r} | \theta_{r}; \lambda)}{S_{i} (\lambda)} \cdot \frac{R_{i} (\lambda)}{D^{2}}$$

$$\frac{R_{i}(R)}{R_{r}(\lambda)} \cdot \frac{D}{A_{r}\cos\theta_{r}}$$
(4)

式中 $S_i(\lambda)$ 无样品时探测器测量的波长为 λ 的入 射光强度信号值; $S_r(\varphi_i, \theta_i; \varphi_r, \theta_r; \lambda)$ 是波长 λ 的入 射光经反射镜反射后探测器接收到的光强信号值; R_i 和 R_r 分别为探测器对入射辐通量和反射辐通量 的响应; D 为探测器感光面距离光源中心的距离; A_r 为探测器有效光阑面积; θ_r 为样品入射面法线与探 (0)994-2020 China Academic Journal Electronic P 测器感应面法线的夹角。 通过式(3)和式(4)可得:

$$\frac{f_{r}(\varphi_{i} \ \theta_{i}; \varphi_{r} \ \theta_{r}; \lambda)}{f_{r}(\varphi_{i} \ \theta_{i}; \varphi_{r} \ \theta_{r}; \lambda)} = \frac{S_{r}(\theta_{i} \ \varphi_{i}; \theta_{r} \ \varphi_{r}; \lambda)}{S_{r}(\theta_{i} \ \varphi_{i}; \theta_{r} \ \varphi_{r}; \lambda)} \cdot \frac{S_{i}(\lambda)}{S_{i}(\lambda)} \cdot \frac{R_{i}(\lambda)}{R_{i}(\lambda)} \cdot \frac{R_{r}(\lambda)}{R_{r}(\lambda)}$$
(5)

式(5) 即为相对测量方法的原理,在入射光信 号变化不大的情况下, $S_i(\lambda)/R_i(\lambda)$ 和 $S_i(\lambda)/R_i(\lambda)$ 和 $S_i(\lambda)/R_i(\lambda)$ 分别为测量标准样品和待测样品时的入射光 通量。在真空远紫外波段,紫外标准灯光源漂移明 显,考虑到测量系统自身稳定性和不同测量时间间 隔等因素,需要考虑光源的漂移对测量结果的影响。

根据所采用的测量系统的特性,测量标准漫反 射板时,监测光路辐通量可以表示为:

$$\Phi_{i} = \frac{V_{1}}{\tau R} \tag{6}$$

式中, V_1 、为测量标准漫反射板时的探测器信号值; τ 为监测光路的传输效率;R为监测光路探测器对辐 通量的响应。

同理,对待测漫反射板进行测量时,可以得到监测光路辐通量为:

$$\Phi_{i} = \frac{V_{1}}{\tau R} \tag{7}$$

式中, //, 为测量标准漫反射板时的探测器信号值。

由于分光光路结构固定,主光路和监测光路的 辐通量比值也是固定的,实际测量时应考虑测量系 统暗噪声对测量结果的影响。两次测量的辐通量变 化 y 可以表示为:

$$\gamma = \frac{\Phi_{i}}{\Phi^{i}} = \frac{\Delta V_{1}}{\Delta V_{1}} = \frac{V_{1} - V_{10}}{V_{1} - V_{10}}$$
(8)

采用相对方法测量,其精度与样品的 BRDF 值 有关,样品相关参数可以在计量院进行标定。该方 法避免了对测量系统的相关参数进行测量,避免了 由测量系统本身的结构等因素带来的系统误差,通 过测量一次标准样品,然后更换待测样品即可计算 待测样品的 BRDF 值,该方法实用性好,测量过程程 控化,测量重复性精度高,易于实现批量化测量。

3 BRDF 测量系统

BRDF测量系统主要由准直光路、调制扇组件、 监测光路、样品调整台、探测器调整台和主探测光路 shing House. All rights reserved... http://www.cnki.ne 等部分组成,如图3所示。光源经准直光路进入调 制扇组件 通过调制扇的作用一部分光进入监测光 路,另一部分光入射到待测样品上。待测样品安装 在样品水平位移台上,在样品水平位移台、样品垂直 位移台和样品旋转台的支撑下,样品具有2个平移 自由度和1个旋转自由度,通过控制这3个自由度 可以调整斜入射角度和入射到待测样品的位置。主 光路探测器固定在探测悬臂上,通过探测器俯仰转 台和探测器方位转台带动主光路探测器转动,可以 实现主光路探测器对待测漫反射板在一定半球空间 内反射信号的测量。



Fig.3 BRDF measurement equipment

样品水平位移台和样品垂直位移台承载能力大 于 5 kg 采用步进电机细分驱动 重复定位精度和绝 对定位精度均优于 0.05 mm。样品旋转台和探测器 范围转台采用相同型号转台,转台台面直径 φ100 mm 采用步进电机细分驱动和涡轮蜗杆减速 (减速比 180),转角精度分别优于 0.05°和 0.1°。 探测器俯仰转台采用 $\phi60 \text{ mm}$ 台面转台,采用步进 电机细分驱动和涡轮蜗杆减速(减速比90),转角精 度优于 0.1°。

在 BRDF 测量过程中,主光路探测器随着探测 器俯仰转台和范围转台运动 ,主探测光路的中心应 始终指向待测样品同一区域 由于转台角度误差、装 调误差和结构弹性变形等因素 探测器指向会存在 一定的误差。对主光路探测部分的两位转动部分进

行指向精度测试 在测试过程中 指向位置偏离理论 中心位置不超过 1.27 mm,对应的角度误差为 0.66°满足使用要求。

待测漫反射板为氧化铝材质 ,为改善其漫反射 特性、采用物理磨砂和化学磨砂进行处理、反射面尺 特性、采用物理磨砂和化学磨砂进行处理、反射面尺 寸 60 mm×60 mm。

待测样品安装到样品台后,将整个 BRDF 测量 系统放置在直空罐内 通过直空罐外接法兰盘电缆 实现测量系统的控制,试验时真空罐的真空度为7× 10⁻³Pa。单色仪出缝作为点光源的起始点,与准直 光路的起点重合,光以一定的发散角进入准直系统。 测量过程中 使用单色仪输出不同波长的光作为光 源 控制样品转台转动 调节样品平移台使被测漫反 射板的被测区域移入探测光路中心位置 从而入射 光以不同的角度照射待测漫反射板的指定区域 然 后控制探测器方位转台和俯仰转台转动 ,完成不同 方位角和天顶角下的 BRDF 测量。

4 测量结果

4.1 0°入射角时 BRDF 测量结果

控制样品旋转转台角度,使入射角为0°,进行 BRDF 测量 测量过程中 探测器俯仰转台(对应天顶 角) 旋转角度范围分别为 0°~100°、170°~270°, 探测 器方位转台的旋转角度范围为 0°~50°、130°~180° 2 个转台角度分为两个不连续的角度范围,一方面是为 了避免对入射光的遮挡 防止影响测量 ,另一方面可 以避免结构本身带来的运动干涉 保证机构安全运 行。探测器的两个转台转动角度间隔 10°,每个位置 稳定时间3 s 探测器积分时间为1.5 s。

对 200 nm 波长下待测漫反板的 BRDF 进行测 量 结果如图4 和图5 所示。图4 为漫反射板 BRDF 测量值分布图 其中圆周表示探测器方位转台的角 度值 范围为 0°~360° 圆周半径表示探测器俯仰转 台的角度值,图中最大天顶角度值为80°。图5为 BRDF 值的等高线图 ,表示了在一定的方位角和天 顶角下 BRDF 值的分布情况。图 4 和图 5 中,中间 区域为被遮挡区域。



Fig.4 Distribution of the BRDF value when incident angle = 0°



图 5 正入射 BRDF 值等高线示意图

Fig.5 Contour line of the BRDF value when incident angle = 0°

可以看出.在正入射条件下,BRDF 值随天顶角 的增大而减小。BRDF 值与方位角的相关性弱,可 见,正入射时待测漫反射板在真空紫外中的散射相 对比较均匀,但是 BRDF 值随方位角的增加有减小 的趋势,其散射特性与理想朗伯体还有一定的差异。

同理,对 110 nm 和 150 nm 波段漫反射板的 BRDF 值进行了测量,其 BRDF 值的分布及特性与 200 nm 时相似。提取 3 个波段在 90°方位角处的 BRDF 值进行比较,如图 6 所示。





Fig.6 BRDF value at 90° section of three different

4.2 30°入射角 BRDF 测量结果

控制样品旋转转台角度,使入射角为30°,进行 BRDF测量,测量过程中,探测器俯仰转台旋转角度 范围分别为0°~80°、160°~180°,探测器方位转台的 旋转角度范围为0°~100°、170°~270°,两个不连续 的角度范围同样是为了避免对入射光的遮挡和结构 (C)1994-2020 China Academic Journal Electronic F 本身的运动干涉,保证测量正常进行。探测器的两 个转台转动角度间隔 10°,每个位置稳定时间 3 s,探 测器积分时间为 1.5 s。

对 200 nm 波长下待测漫反板的 BRDF 进行测量 结果如图 7 和图 8 所示。图中坐标含义与图 4 和图 5 相同。



图 7 30°入射漫反射板 BRDF 测量值分布图



Fig.7 Distribution of the BRDF value when incident angle = 30°

图 8 30°入射 BRDF 值等高线示意图

Fig.8 Contour line of the BRDF value when incident angle = 30°

可以看出,入射角为 30°时,数据具有近似的对称性,对称面为入射光线光轴与被测漫反射板表面的法线所构成的平面。沿光线反射方向的 BRDF 值比被测量面法线另外一侧的 BRDF 值明显偏大,漫反射板表现出明显的镜面反射特性。可见,在远紫外波段漫反射板的朗伯特性随着斜入射的角度增加而变差。

同理,对110 nm 和150 nm 波段漫反射板30° 斜入射的BRDF值进行了测量,其BRDF值的分布 及特性与200 nm 时相似。提取3个波长下0°方 位角切面处的BRDF值进行比较,如图9所示。可 shing House, All rights reserved. http://www.enki.ne 以看出,在探测器天顶角与斜入射角度相同时,被

wavelength when incident angle = 0°

测漫反射板的 BRDF 值最大。3 个波长下的 BRDF 值也均与波长相关,波长越长 BRDF 值越大,在最 大 BRDF 值处,110 nm 和 150 nm 比 200 nm 处 BRDF 值分别下降了 31.04 %和 16.04 %。且随 着天顶角偏离入射角的角度增加,BRDF 值下降明 显,110 nm、150 nm和 200 nm 波长下,测量方位角 为 50°时的 BRDF 比-30°分别下降 23.57 %、 22.12 %和 21.09 %。





5 结 论

在真空条件下,使用 BRDF 测量装置,在 110 nm、150 nm 和 200 nm 三个波段对铝基漫反射板进 行了 BRDF 值测量实验,通过测量数据对其分布规 律和变化趋势进行研究。使用对光源进行监测的方 法,提高了相对测量方法的测量精度,减少测量方法 对测量装置结构参数的依赖性。通过数据分析,漫 反射板的 BRDF 与波长、入射角度、天顶角等因素相 关 随着波长的增加 BRDF 值呈现降低的趋势,且随 波长的减小,下降趋势更明显;当入射角度增加时, 漫反射板会表现出显著的镜面反射现象,并且相同 波长下随天顶角的增加,BRDF 值下降更快。对真 空远紫外波段铝基漫反射板的 BRDF 特性研究可以 为光学遥感仪器的辐射定标等工作提供参考。

参考文献:

Qi Chao. Measurement and application research of BRDF
 [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology ,2005. (in Chinese)

齐超.双向反射分布函数测量技术与应用研究 [D].哈 尔滨:哈尔滨工业大学 2005. 1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing

ance evaluation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China 2017.(in Chinese)

李孟凡.星上比辐射定标器及性能评估方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学 2017.

- [3] Han Guan. Measurement of far-ultraviolet BRDF for diffuser and design of the system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences) 2018.(in Chinese)
 韩官.漫反射板远紫外 BRDF 测量方法研究与系统设 计[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学 精密机械与物理研究所) 2018.
- [4] Chen Hongyao Zhang Liming Shi Jiading et al. High accuracy gonioreflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics 2014 9(1):72-80.(in Chinese) 陈洪耀 张黎明 施家定 等.高精度星上定标漫射板双向反射分布函数绝对测量系统研究[J].大气与环境光 学学报 2014 9(1):72-80.
- [5] Shi Jiading Zhang Liming ,Cao Xingjia ,et al. Design and research of diffuser panel used for on-board calibration [J].Acta Optica Sinica 2015 ,35(8): 339-347.(in Chinese)

施家定 涨黎明 .曹兴家 ,等.星上定标漫反射板设计研究[J].光学学报 2015 35(8):339-347.

[6] Li Bicen ,Li Ming ,Xu Pengmei. High precision on-board calibration for spaceborne atmospheric monitoring spectrometer [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing , 2018 ,39(3):60-69.(in Chinese)
李碧岑 李明 徐彭梅.星载大气监测光谱仪高精度星

上定标技术[J].航天返回与遥感 2018 39(3):60-69.

[7] Zhao Minjie Si Fuqi Lu Yihuai et al.Bidirectional reflectance distribution function of space-borne quartz volume diffuser [J].Spectroscopy and Spectral Analysis 2016 36 (5):1565-1570.(in Chinese)

赵敏杰,司福祺,陆亦怀,等.星载石英漫反射板双向反 射分布函数实验测量研究[J].光谱学与光谱分析, 2016,36(5):1565-1570.

[8] Wang Long Zheng Yuquan.Fabrication and experiment of aluminum diffuser for CO₂ detecter calibration on orbit [J].Chinese Optics 2013 A(6):591-599.(in Chinese) 王龙, 蔺超,郑玉权.CO₂ 探测仪星上定标铝漫反射板的制备与试验[J].中国光学 2013 A(6):591-599.

Zhang Yujun ,Xie Pinhua ,Song Bingchao ,et al. Angular House. All rights reserved. http://www.cnki.net distribution properties of polytetrafluoroethylene diffuse

^[2] Li Mengfan.On-board ratio-radiant calibrator and perform-

reflectance plate under multiwavelength illumination [J].

Chinese Journal of Lasers ,2000 ,27 (7) : 633 - 637. (in Chinese)

张玉钧,谢品华,宋炳超,等.多波长照射下聚四氟乙烯 漫反射板的角散射分布特性[J].中国激光,2000,27 (7):633-637.

- [10] NING L ,XIAO X X.Impacts of the angular dependence of the solar diffuser BRDF degradation factor on SNPP VIIRS reflective slolar band on orbit radiometric calibration [J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2017 55(3): 1537-1543.
- [11] JON F ,NING L ,BORYANA E ,et al. SuomiNPP VIIRS solar diffuser stability monitor performance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2016 54 (2):631-639.
- [12] Li Bo ,Lin Guanyu Zhang Mingyu et al.Fabrication of diffuser in UV-VUV space remote sensing instrument [J]. Optics and Precision Engineering ,2009 ,17 (3): 475 481.(in Chinese)

李博 林冠宇 涨明宇 /等.紫外-真空紫外空间遥感仪 器漫反射板的制备 [J].光学 精密工程 ,2009 ,17(3): 475-481.

[13] Wang Long ,Lin Chao Ji Zhenhua et al.Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of TanSat [J]. Optics and Precision Engineering ,2018 ,26 (8): 1967 – 1976. (in Chinese)

王龙 .蔺超 .纪振华 .等.碳卫星 CO₂ 探测仪发射前的漫 反射板 定标 [J]. 光学 精密工程,2018,26(8): 1967-1976. [14] Lin Chao, Li Chengliang, Wang Long, et al. Preflight spectral calibration of hyperspectral carbon dioxide spectrometer of TanSat[J].Optics and Precision Engineering, 2017 8(25): 2064-2075.(in Chinese)

蔺超 李诚良,王龙 等.碳卫星高光谱 CO₂ 探测仪发射 前光谱 定标 [J]. 光学 精密工程,2017,8(25): 2064-2075.

- [15] Li Ming Zong Xiaoying. In-lab system-level BRDF measurement method of calibration diffuser [J]. Infrared and Laser Engineering 2017 A6(1):176-182.(in Chinese)
 李明 宗肖颖.定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量 方法[J].红外与激光工程 2017 A6(1):176-182.
- [16] Han Guan, Lin Guanyu, Li Bo, et al. Measurement of farultraviolet BRDF for solar diffuser [J]. Acta Photonica Sinica 2017 46(9):165-172.(in Chinese)
 韩官 林冠宇 李博 等.星上定标漫射板远紫外 BRDF 测量方法[J].光子学报 2017 46(9):165-172.
- [17] Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, et al. Development of BRDF absolute measuring device [J]. Acta Optica Sinica 2014 34(5):1-8.(in Chinese)
 李俊麟 涨黎明 陈洪耀 等.双向反射分布函数绝对测 量装置研制 [J].光学学报 2014 34(5):1-8.
- [18] Liu Ruofan Zhang Xuanliang ,Su Hongyu ,et al. Study of setup for measuring optical bidirectional reflectance distribution function [J]. Infrared ,2014 ,35 (1): 14-17. (in Chinese)

刘若凡 张宪亮 苏红雨 ,等.光学双向反射分布函数的 测量装置研究[J].红外 2014.35(1):14-17.