

# 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪定标系统中铝漫反射板实验测量研究\*

赵敏杰 司福祺<sup>†</sup> 陆亦怀 汪世美 江宇 周海金 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

(2013年8月13日收到; 2013年9月16日收到修改稿)

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪采用太阳辐射与漫反射板组合方式进行在轨光谱定标, 以天底推扫方式对地观测, 拥有  $114^\circ$  的大视场. 为保证全视场光谱定标精度, 此星载仪器的在轨光谱定标系统中的铝漫反射板需具有良好的朗伯特特性, 以保证在仪器观测视场内能够提供均匀的光源. 在实验室中利用双向反射分布函数测量仪, 采用相对测量法对研制的铝漫反射板进行了朗伯特特性测量. 分析结果表明, 在波长  $180\text{--}880\text{ nm}$ 、观测角度  $-70^\circ\text{--}+70^\circ$  范围内, 铝漫反射板双向反射分布函数近似成余弦分布, 具有较好的朗伯特特性; 并采用地面模拟在轨定标方法对星载仪器进行了光谱定标, 定标结果表明最大偏差值为  $0.022\text{ nm}$ , 满足定标精度优于  $0.05\text{ nm}$  的要求. 通过对实验测量的分析可知, 研制的铝漫反射板可选作在轨定标系统的定标板.

**关键词:** 在轨光谱定标系统, 铝漫反射板, 双向反射分布函数, 星载差分吸收光谱仪器

**PACS:** 93.85.Pq, 42.15.-i, 06.20.fb

**DOI:** 10.7498/aps.62.249301

## 1 引言

星载大气痕量气体差分吸收光谱 (DOAS) 仪 (以下简称为星载 DOAS 仪器) 通过探测地球大气或地表反射、散射的紫外/可见光, 以测量太阳光谱作为参考谱线, 利用 DOAS<sup>[1-4]</sup> 等算法来反演大气中痕量气体的分布和变化. 由于痕量气体反演算法对仪器光谱定标精度要求较高, 星载 DOAS 仪器采用了太阳辐射与漫反射板组合方式进行在轨光谱定标, 即以太阳作为定标光源, 以漫反射板作为定标板, 利用 Fraunhofer 线进行光谱定标. 此方法的定标光路和太阳参考谱的测量光路相同, 减少了定标过程中的系统误差; 并且在光谱仪测量谱段范围内此方法能提供足够多的定标谱线, 满足定标数据处理过程中对标准谱线的需求. 星载 DOAS 仪器具有  $114^\circ$  的大视场角, 采用面阵电荷耦合器件 (CCD) 作为探测器, 利用太阳辐射与漫反射板组合作为定

标方式, 可以让漫反射板的散射光充满星载 DOAS 仪器的整个视场, 完成对面阵 CCD 全阵列的光谱定标. 这需要保证定标系统中的漫反射板具有良好的朗伯特特性, 从而在仪器的观测视场内能够提供均匀的光源, 使得探测器空间维方向有较高的信噪比, 以对仪器全视场进行高精度的光谱定标. 所以, 本文在实验室中对在轨光谱定标系统中的漫反射板的朗伯特特性进行了实验测量和分析, 并采用此漫反射板作为定标板, 利用地面模拟在轨定标方法对星载仪器进行了光谱定标.

## 2 星载 DOAS 仪器在轨光谱定标系统

星载 DOAS 仪器观测谱段覆盖  $240\text{--}710\text{ nm}$ , 分为紫外第 1 通道、紫外第 2 通道、可见第 1 通道和可见第 2 通道四个光谱通道, 在轨光谱定标精度要求优于  $0.05\text{ nm}$ . 仪器在轨光谱定标系统的光路如图 1 所示. 系统有对地观测模式和定标模式两种

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41275037) 和安徽省杰出青年科学基金 (批准号: 1308085JGD03) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

工作模式. 载荷对地观测时, 太阳光挡板位于太阳光孔处, 阻挡来自太阳的入射光, 同时光路切换反射镜处于图 1 中的实线位置, 此时地球光通过望远镜主镜进入主光路, 进行对地常规测量. 光谱定标模式采用太阳辐射与漫反射板组合方式, 进行在轨光谱定标时首先打开太阳光挡板, 太阳光通过太阳光孔直接照射到铝漫反射体上, 同时旋转光路切换反射镜至太阳光位置, 此位置不仅使来自漫射体的太阳光进入望远镜主光路, 而且阻挡了来自主镜方向的地面辐射. 太阳光照射到漫反射体上后, 经漫反射体反射形成一定角度内的漫射光照亮光路切换反射镜, 从而进入主光路, 再反射到望远镜次镜上, 然后聚焦到探测器的狭缝处, 进而入射到面阵 CCD 上, 最后利用太阳 Fraunhofer 线完成对仪器的光谱标定.

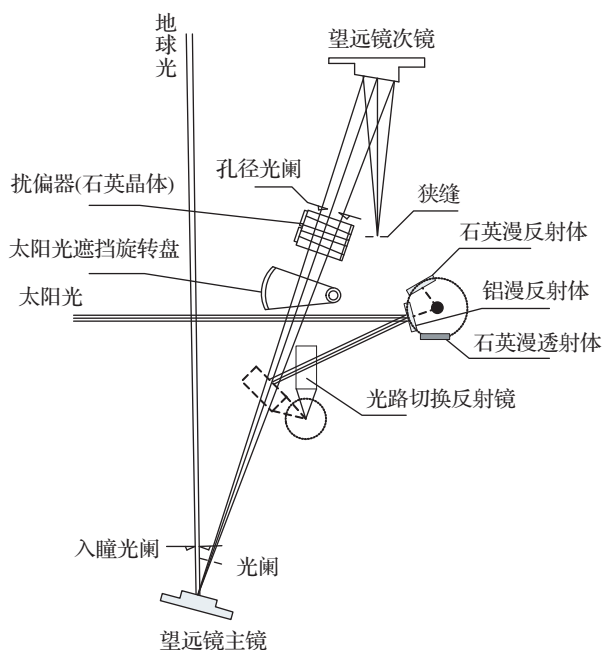


图 1 星载 DOAS 仪器在轨光谱定标系统的光路示意图

星载 DOAS 仪器运行在低地球轨道上. 在轨光谱定标系统中的漫反射板会受到紫外辐照、原子氧侵蚀等环境的影响<sup>[5,6]</sup>, 由于铝基漫反射板性能较为稳定可靠, 并且能够在恶劣环境下使用, 所以铝漫反射板作为一种常见的漫反射板应用于空间遥感仪器上<sup>[7]</sup>. 因此, 需要选择合理的工艺技术路线, 对铝板的外形加工、表面处理、抗衰变等进行严格控制, 并对样品铝板的双向反射分布函数 (BRDF) 进行测量, 通过分析选取具有良好朗伯特

性的铝板作为定标使用的漫反射板.

### 3 铝漫反射板的 BRDF 测量

#### 3.1 BRDF 测量原理

设波长为  $\lambda$  的入射辐射从  $i(\theta', \varphi')$  方向以  $L(\theta', \varphi', \lambda)$  辐亮度投射向点目标, 造成该点目标的辐照度为  $dE = L(\theta', \varphi', \lambda) \cos \theta d\omega$ , 传感器从另一方向  $r(\theta, \varphi)$  观测点目标, 其亮度值为  $dL(\theta, \varphi, \lambda)$ , 由于假定传感器观测视场角为无穷小量  $d\omega$ , 所以用微分符号表达传感器所接收的辐亮度值, 则 BRDF  $f(\theta', \varphi'; \theta, \varphi, \lambda)$  为

$$f(\theta', \varphi'; \theta, \varphi, \lambda) = \frac{dL(\theta, \varphi, \lambda)}{dE_i(\theta', \varphi', \lambda)}. \quad (1)$$

BRDF 的物理意义是来自  $i$  方向的辐照度微增量与它所引起的  $r$  方向上反射辐亮度增量之比<sup>[8]</sup>.

BRDF 绝对测量法<sup>[9]</sup>是直接测量 (1) 式中的反射辐亮度和入射辐照度, 进而得到相应结果. 相对测量法与此不同, 在测量中需要选择具有良好朗伯特特性并且方向 - 半球反射率已知的标准漫反射板, 通过目标板和标准板的对比测量得到目标板的光谱 BRDF 曲线. 引入反射率因子  $R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ ,

$$R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{d\phi_t(\theta_r, \phi_r; \lambda)}{d\phi_s(\theta_r, \phi_r; \lambda)}, \quad (2)$$

式中  $d\phi_t(\theta_r, \phi_r; \lambda)$  为测量方向上目标板对应的辐通量,  $d\phi_s(\theta_r, \phi_r; \lambda)$  为相同测量条件下标准板对应的辐通量. 朗伯特漫反射板 BRDF 为  $\rho/\pi$ , 其中  $\rho$  为半球反射率. 目标板  $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$  与反射率因子  $R$  之间的关系为

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{\rho}{\pi} R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda). \quad (3)$$

记 CCD 光谱仪对观测方向上辐通量的响应输出为  $\phi_{out}$  由 (2), (3) 式可得

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{\rho}{\pi} \frac{\phi_{out,t}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{\phi_{out,s}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}. \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 只要知道标准板的半球反射率  $\rho$ , 就可由光谱仪的输出值得到目标板的 BRDF 值.

#### 3.2 铝板 BRDF 测量装置

本文利用由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 BRDF 测定仪, 该装置如图 2 所示.

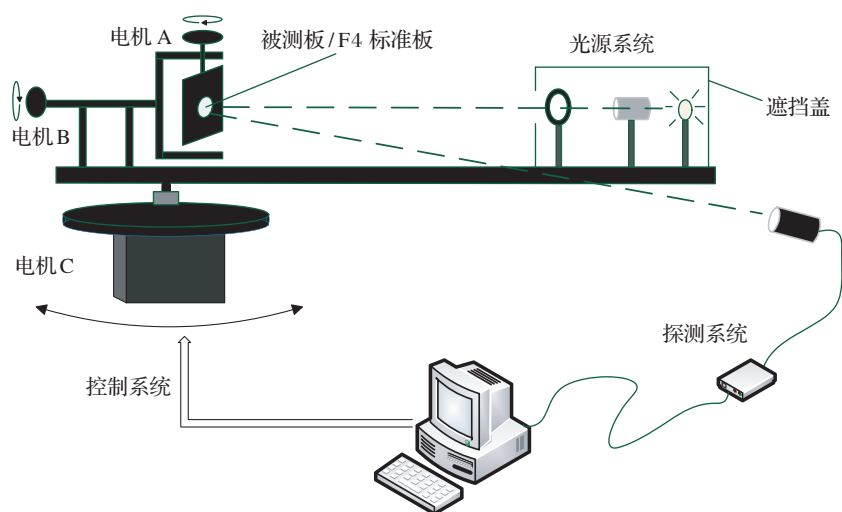


图2 BRDF 测定仪装置示意图

从图2可以看出, BRDF 测定仪系统采用三个电机, 三个电机的轴相交在样品面上; 光源系统固定在旋转臂上并能够在水平面上转动, 其外面装有遮挡盖, 以保证光线照射在样品方向上并防止其他方向的光线对探测器的干扰, 产生的后向遮挡角小于  $2^\circ$ ; 样品放置在样品架上, 通过前后调整样品位置以保证样品面在旋转面上. 测量时探测器放置在固定平面上, 不随电机转动且探测方向不变; 电机C 带动旋转臂在水平方向上转动, 电机B 带动电机A 和样品在垂直面内转动, 电机A 带动样品转动. 在整个测量过程中此系统能够全自动完成.

本文采用相对测量法对铝漫反射板 BRDF 进行测量, 使用的标准板是聚四氟乙烯 (F4) 粉末压制的漫反射板. 根据在轨运行时定标过程中入射角度的变化范围确定测量角度, 在 BRDF 测量装置上完成对铝漫反射板的 BRDF 测量. 实验中光源为氙灯, 其能够发射连续稳定的光谱, 保证在紫外部分有较强的光辐射. 光源发出的光经过准直系统后变成平行光照射在样品上, 调整探测器位置观测样品的漫反射光. 探测器为光纤光谱仪, 光谱范围为  $180\text{--}880\text{ nm}$ . 星载 DOAS 仪器在轨运行时, 太阳光入射角度的标称值为  $10^\circ$ , 对漫反射板的观测角度为  $17^\circ\text{--}37^\circ$ , 测量时设定氙灯入射光线与漫反射板法线夹角为  $10^\circ$  (在测量系统中对应的角度为  $-10^\circ$ ), 电机C 的旋转角度范围为  $-70^\circ\text{--}+70^\circ$ , 与漫反射板的观测角度相一致. 电机C 的初始位置为  $-70^\circ$ , 在此位置处探测系统进行一次测量, 测量完成后向控制系统发出信号, 控制系统将电机C 转动

$5^\circ$ , 电机转动完成后会向测量系统发出信号再进行下一次测量, 直到电机C 的位置转到  $+70^\circ$  时测量结束. 当光谱仪观测角度和光线入射角度相同时, 由于遮挡盖位于样品和探测器之间, 光谱仪接收不到来自样品的漫反射光线. 实验时先对铝板进行测量, 测量完毕后取下铝板, 在同一位置放置 F4 标准板, 然后在相同的测量条件下测量 F4 标准板.

### 3.3 铝板 BRDF 测量分析方法及结果

因 F4 标准板具有良好的朗伯特特性, 对其进行测量时在所有的接收方向上探测系统探测视场都大于样品表面积<sup>[10,11]</sup>. 将 F4 标准板作为理想的漫反射板时, 其半球反射率  $\rho = 1$ , 光谱仪输出值

$$\begin{aligned} \phi_{\text{out},s}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) \\ = \phi_{\text{out},s}(\theta_i, 0; 0, 0; \lambda) \cos \theta_r, \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $\phi_{\text{out},s}(\theta_i, 0; 0, 0; \lambda)$  为光谱仪在天顶方向上 F4 标准板的辐通量测量值, 结合 (4) 式可得到

$$\begin{aligned} f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) \\ = \frac{1}{\pi} \frac{\phi_{\text{out},t}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{\phi_{\text{out},s}(\theta_i, 0; 0, 0; \lambda) \cos \theta_r}. \end{aligned} \quad (6)$$

图3给出了铝板在  $400$  和  $800\text{ nm}$  处光谱仪的  $\phi_{\text{out}}$  值, 测量范围为  $+70^\circ\text{--}-70^\circ$ , 电机C 每转动  $5^\circ$  光谱仪进行一次测量. 从图3可以看出, 在  $-10^\circ$  时 DN 值下降, 其原因是系统在后向方向的遮挡. 由图3可知光谱仪对铝板观测输出的  $\phi_{\text{out}}$  值近似满足 (5) 式, 说明此铝板具有较好的余弦特性.

利用上述分析方法对铝板的测量数据进行处理, 铝板的 BRDF 如图 4 所示. 实验中测量波长范围为 180—880 nm, 观测角度为  $-70^{\circ}$ — $+70^{\circ}$ . 由图 4 可知, 铝板的 BRDF 从中间最大值向两边逐渐减少, 近似成余弦分布, 具有较好的朗伯特特性. 下面将讨论此铝板在光谱定标系统中的具体应用, 以检测其是否满足星载 DOAS 仪器的定标要求.

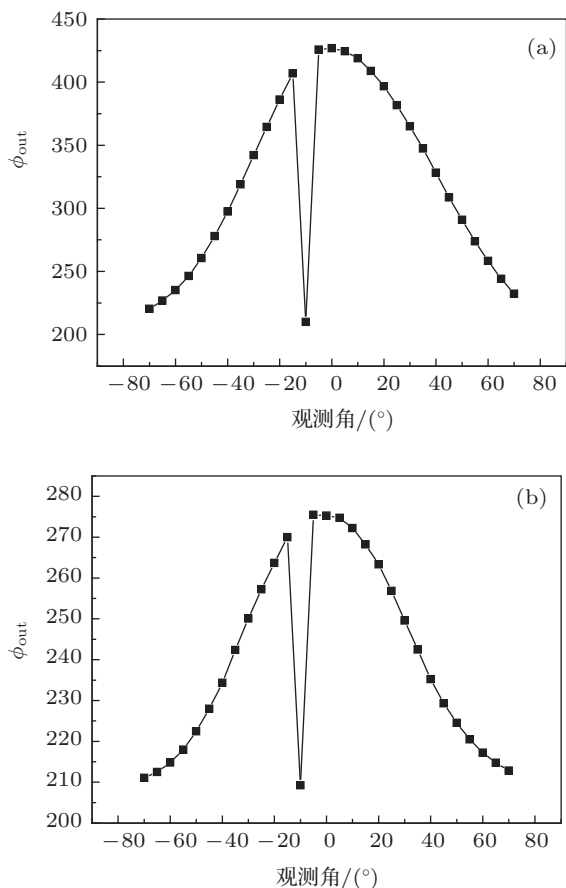


图 3 铝板在 400 和 800 nm 处光谱仪的  $\phi_{out}$  值 (a) 400 nm 处; (b) 800 nm 处

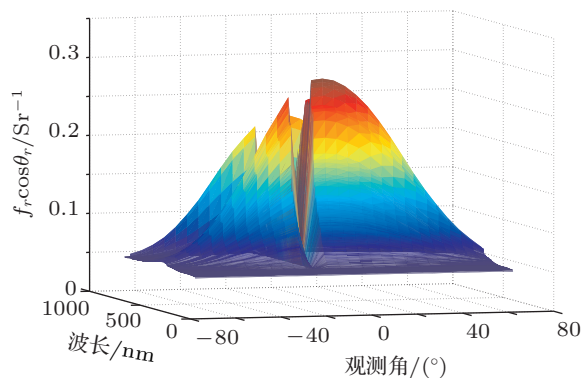


图 4 铝板的 BRDF

### 4 地面测试

对于星载 DOAS 仪器在轨光谱定标系统, 选取上述具有良好朗伯特特性的铝板作为光谱定标板, 利用太阳光辐射作为定标源, 采用地面模拟在轨定标方法对载荷进行光谱定标. 定标时载荷设置为定标模式, 太阳光孔打开, 同时使光路切换反射镜处于图 1 的中虚线位置, 太阳光入射到铝漫反射板上, 载荷对其观测图像如图 5 所示. 图 5 中水平方向为光谱维, 垂直方向为空间维, 面阵 CCD 空间维长度为 13 mm, 实际使用的成像长度为 10 mm. 由图 5 可知, 观测图像充满了仪器的整个视场, 在观测的视场内具有较好朗伯特特性的铝板能够均匀照亮面阵 CCD 探测器, 使得探测器空间维方向有较高的信噪比, 这保证了对仪器全视场高精度的光谱定标.

选取紫外第 2 通道和可见第 1 通道为例, 星载 DOAS 仪器测量得到的太阳谱线如图 6 和图 7 所示. 由于太阳辐射比较稳定, Fraunhofer 线的位置固定, 对仪器进行光谱定标时可采用太阳 Fraunhofer 线作为标准谱线, 通过相应的光谱定标算法 [12] 完成仪器的光谱定标.

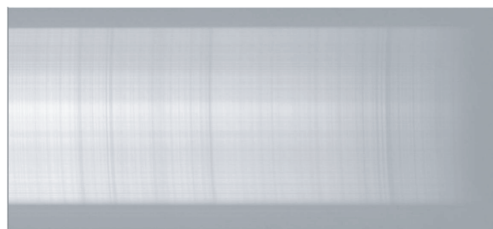


图 5 星载成像光谱仪对铝板的观测图像

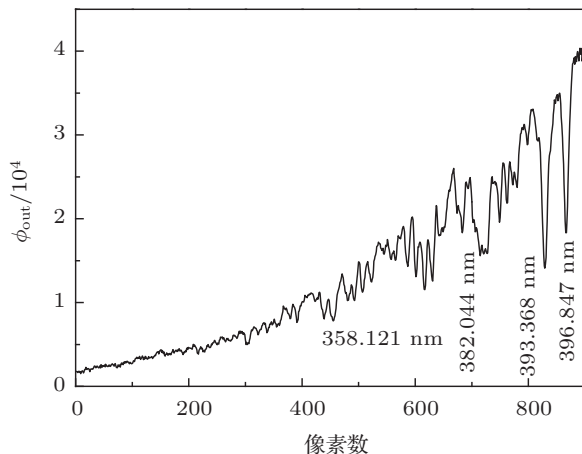


图 6 在紫外第 2 通道上星载 DOAS 仪器测得的太阳光谱

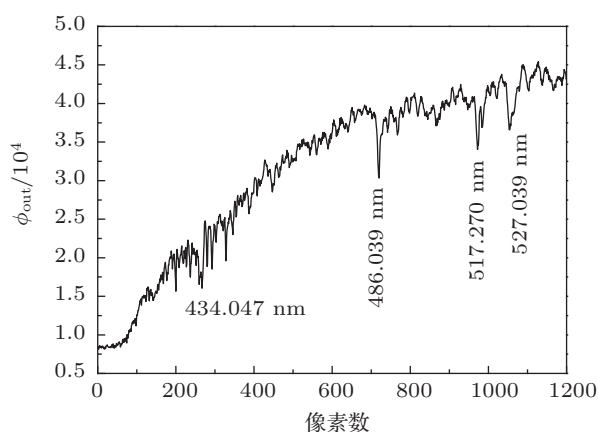


图7 在可见第1通道上星载DOAS仪器测得的太阳光谱

为分析仪器光谱定标精度,以紫外第2通道和可见第1通道边缘视场为例进行光谱定标.以汞灯的特性谱线作为标准谱线,此仪器直接通过主光路观测汞灯的谱线,比较汞灯特征谱线值和仪器按上述定标方式得出的定标波长值,取两者之差可得出定标精度.两种方式的定标结果列于表1和表2中.从表1和表2可知,星载DOAS仪器光谱定标的结果与汞灯特征波长之间的偏差最大值为0.022 nm,

满足光谱定标精度小于0.05 nm的要求.

表1 在紫外第2通道上星载DOAS仪器的光谱定标精度

汞灯标准波长/nm	仪器定标波长/nm	偏差绝对值/nm
334.148	334.168	0.02
365.015	365.028	0.13
366.330	366.335	0.005

表2 在可见第1通道上星载DOAS仪器的光谱定标精度

汞灯标准波长/nm	仪器定标波长/nm	偏差绝对值/nm
404.656	44.643	0.13
407.783	407.761	0.22
435.833	435.812	0.21

## 5 结论

本文介绍了星载DOAS仪器在轨光谱定标系统,并对系统采用的铝板进行了BRDF测试和光谱定标实验,结果表明定标系统中的铝板具有良好的朗伯特特性,满足定标系统对漫反射板的要求.选择良好朗伯特特性的铝板作为定标板,光谱定标结果偏差较小,定标精度较高,满足星载DOAS仪器定标要求,这为后续的数据处理提供了保证.

- [1] Si F Q, Xie P H, Heue K P, Liu C, Peng F M, Liu W Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6018 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, Heue K P, 刘诚, 彭夫敏, 刘文清 2008 物理学报 **57** 6018]
- [2] Xu J, Xie P H, Si F Q, Li A, Liu W Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024204 (in Chinese) [徐晋, 谢品华, 司福祺, 李昂, 刘文清 2012 物理学报 **61** 024204]
- [3] Si F Q, Xie P H, Dou K, Zhan K, Liu Y, Xu J, Liu W Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2867 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, 窦科, 詹铠, 刘宇, 徐晋, 刘文清 2010 物理学报 **59** 2867]
- [4] Liu C, Bai W G, Zhang P, Sun Y W, Si F Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 030704 (in Chinese) [刘诚, 白文广, 张鹏, 孙友文, 司福祺 2013 物理学报 **62** 030704]
- [5] Sun J L, Zhang Q Y, Liu J H, Hou Y G 2010 *Corros. Protect.* **31** 631 (in Chinese) [孙九立, 张秋禹, 刘金华, 侯永刚 2010 腐蚀与防护 **31** 631]
- [6] Liu Y M 2007 *Spacecraft Environ. Eng.* **24** 359 (in Chinese) [刘宇明 2007 航天器环境工程 **24** 359]
- [7] Jia H, Li F T 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** 230 (in Chinese) [贾辉, 李福田 2004 光学学报 **24** 230]
- [8] Xu X R 2005 *Remote Sensing Physics* (Beijing: Peking University Press) p22 (in Chinese) [徐希孺 2005 遥感物理 (北京: 北京大学出版社) 第22页]
- [9] Yuan Y, Sun C M, Zhang X B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2097 (in Chinese) [袁艳, 孙成明, 张修宝 2010 物理学报 **59** 2097]
- [10] Zhang B S, Liu W Q, Wei Q N, Wu Z S, Zhao J F 2006 *Chin. J. Quant. Electron.* **23** 533 (in Chinese) [张百顺, 刘文清, 魏庆农, 吴振森, 赵剑锋 2006 量子电子学报 **23** 533]
- [11] Cao Y H, Wu Z S, Zhang H L, Wei Q N, Wang S M 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 792 (in Chinese) [曹运华, 吴振森, 张涵璐, 魏庆农, 汪世美 2008 光学学报 **28** 792]
- [12] Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, Zhao M J, Jiang Y, Xue H 2012 *Spectrosc. Spect. Anal.* **32** 2881 (in Chinese) [周海金, 刘文清, 司福祺, 赵敏杰, 江宇, 薛辉 2012 光谱学与光谱分析 **32** 2881]

# Experimental measurement of aluminium diffuser applied to calibration system of space-borne differential optical absorption spectrometer\*

Zhao Min-Jie Si Fu-Qi<sup>†</sup> Lu Yi-Huai Wang Shi-Mei Jiang Yu

Zhou Hai-Jin Liu Wen-Qing

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 13 August 2013; revised manuscript received 16 September 2013)

## Abstract

In a space-borne differential optical absorption spectrometer, which has a large field in nadir push-broom mode the “Sun+Diffuser” method is adopted for onboard spectral calibration. Therefore the aluminium diffuser used in the space-borne spectral calibration system is required to have a good Lambert feature to ensure the full field spectral calibration accuracy of the space-borne differential optical absorption spectrometer. And it can provide a uniform source in the observing view-field of the instrument. Using bidirectional reflectance distribution function measurement instrument, bidirectional reflectance distribution function of aluminium diffuser is measured by the relative measurement method. Experimental results show that in a wavelength range of 180–880 nm and an observing view range from  $-70^\circ$  to  $+70^\circ$ , the bidirectional reflectance distribution function declines from middle to both sides and approximates the cosine distribution, showing that the aluminium diffuser has a good Lambert feature. The spectral calibration of the space-borne instrument is also presented with the system: high calibration accuracy is reached by the calibration system, with the maximum deviation being 0.022 nm, which meets the requirements for the accuracy better than 0.05 nm. The aluminium diffuser measured in laboratory can be chosen for the spectral calibration system.

**Keywords:** space-borne spectral calibration system, aluminium diffuser, bidirectional reflectance distribution function, space-borne differential optical absorption spectrometry instrument

**PACS:** 93.85.Pq, 42.15.-i, 06.20.fb

**DOI:** 10.7498/aps.62.249301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41275037) and the Science Fundation for Distinguished Young Scholars of Anhui Province, China (Grant No. 1308085JGD03).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn