

空间紫外遥感光谱仪器偏振特性研究

李寒霜^{1,2}, 李博^{1*}, 王淑荣¹

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高仪器整机性能及遥感数据反演质量, 分析了仪器光学系统膜系对偏振的影响, 利用氙灯、准直系统、布儒斯特起偏器和紫外光谱仪构建了一套偏振响应测试系统, 测量了仪器在 200~320 nm 紫外波段范围内的 P 光与 S 光的偏振响应。测试结果表明, 仪器在 P 偏振光与 S 偏振光照射下呈现出不同的偏振响应, 偏振态由 S 变化到 P, 紫外光谱仪响应峰值波长位置由 290 nm 变化到 275 nm, 双片漫透射板相比单片漫透射板, 紫外光谱仪能量减少 40%~75%; 增加单片与双片漫透射板后, 紫外光谱仪的偏振响应值均在 265 nm 波长处达到最大, 其中双片漫透射板使紫外光谱仪偏振响应更接近单位值 1, 缩小了不同偏振态光的偏振响应差异, 更适用于同步辐射光源定标需求。

关键词 测量; 空间紫外遥感; 偏振响应; 漫透射板; 同步辐射

中图分类号 TP73

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0112006

Polarization Performance in Space Ultraviolet Remote Sensing Spectral Instruments

Li Hanshuang^{1,2}, Li Bo¹, Wang Shurong¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To improve the performance of instrument and the inversion of remote sensing data, we analyze the influence of instrument optical system films on polarization. The xenon lamp, collimation system, Brewster polarizer and ultraviolet spectrometer are used to build a set of polarization response testing system. P polarized light and S polarized light polarization response characteristics of the instrument are measured in the range from 200 nm to 320 nm ultraviolet wavelength band. The test result indicates that the instrument shows different polarization responses under P polarized and S polarized light irradiation. When the polarization is changing from S to P, the peak wavelength of ultraviolet spectrometer response changes from 290 nm to 275 nm. Meanwhile, the energy of ultraviolet spectrometer under double pieces diffuser reduces by 40%~75% in comparison with single piece diffuser; under single piece diffuser and double pieces diffuser, spectrometer polarization response values both get maximum at 265 nm wavelength, while under double pieces diffuser, the polarization response of spectrometer is closer to unit value, and the variation of response to different polarization states is reduced, which is more suitable for the calibration requirement of the synchrotron radiation source.

Key words measurement; space ultraviolet remote sensing; polarization response; diffuser; synchrotron radiation

OCIS codes 120.0280; 120.4640; 120.7000

收稿日期: 2017-07-03; 收到修改稿日期: 2017-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(11573025)

作者简介: 李寒霜(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事紫外-真空紫外遥感仪器光学系统方面的研究。

E-mail: lihanshuang06@163.com

导师简介: 王淑荣(1961—), 女, 硕士, 研究员, 主要从事空间紫外遥感方面的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

*通信联系人。E-mail: libo0008429@163.com

0112006-1

1 引 言

空间紫外遥感光谱仪器可以监测太阳紫外波段的光谱辐照度,用于太阳物理学、大气物理学和气候物理学研究和业务应用,为地球系统的气候变化研究提供高精度的太阳光谱数据^[1]。通过选取高精度的辐射源来提高遥感仪器的定标精度,进而获取高精度的太阳光谱信息。同步辐射源属于一级标准,可直接对紫外光谱仪器辐照度进行定标,能够最大限度地提高仪器的定标精度。

目前,国内同步辐射源有3个,北京同步辐射源、合肥同步辐射源和上海同步辐射源(第3代),三者都不具备真空紫外辐射定标的需求。国外同步辐射源,美国国家计量院(NIST)的SURF-III(Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility)与德国国家标准技术研究院(PTB)的同步辐射基准源(BESSY)均具备紫外光学计量能力^[2-3]。SURF-III已经为多台空间遥感仪器定标,其中包括太阳动力学天文台(SDO),通过探测太阳极紫外波段获得丰富的图像资料;太阳恒星辐照度比较实验仪器(SOLSTICE),其在115~320 nm波长范围内测量太阳光谱辐照度,相对精度为0.5%/年。BESSY具备对真空紫外遥感仪器进行辐射定标的能力,已为欧空局十几台仪器进行了辐射定标,其中包括太阳和日球天文台(SOHO)搭载的太阳紫外辐射测量仪(SUMER),它具有极高的光谱分辨率^[4-5];SOL-ACES(Solar Auto-Calibrating EUV/UV Spectrometers),其探测太阳极紫外辐射的波长范围为16~150 nm,光谱分辨率为0.3~0.6 nm^[6];SOLSPEC(Solar Spectrum),其探测工作波段范围为165~3080 nm,由3台双光栅谱仪构成,分别是紫外谱仪、可见谱仪和红外谱仪,这3台谱仪可分别获取不同的光谱分辨率^[7-8]。可见,同步辐射作为偏振辐射标准源,已经成为高精度辐射定标的趋势。

紫外光谱仪观测太阳,其定标精度要求较高,优于3%。氙灯光源不能满足仪器的定标需求,需考虑利用同步辐射源标定^[9],同步辐射属于线偏振光,因此,研究紫外光谱仪的偏振特性具有重要意义。影响仪器偏振特性的主要因素有漫透射板与光学系统的膜系,本文通过理论分析Al+MgF₂膜层对仪器偏振的影响,并构建一套偏振响应测试系统,研究漫透射板对仪器偏振响应特性的影响,为后续开展同步辐射源标定紫外谱仪提供技术支持。

2 机理分析

光波横波特性即传播方向与振动方向垂直,而沿着光波传播方向的垂直面内,光振动矢量不断变化,表现为光波的偏振特性^[10]。偏振作为光波的重要特性,与物质特性密切相关,是遥感主要获取的信息参数。由于空间遥感光谱仪器由反射镜、光栅这类对偏振敏感的元件组成,仪器的响应不仅与入射光的辐射量有关,而且随入射光偏振态的变化而变化,即输入的S偏振光与P偏振光导致仪器的响应不同。同时,太阳紫外谱段能量较弱,因此,在反射镜表面增镀Al+MgF₂膜层来提高太阳紫外波段的能量。增镀膜层后S偏振光与P偏振光的反射率分别为

$$R_s = \frac{(n_0 \cos \theta_0 - n)^2 + k^2}{(n_0 \cos \theta_0 + n)^2 + k^2}, \quad (1)$$

$$R_p = \frac{(n_0 / \cos \theta_0 - n)^2 + k^2}{(n_0 / \cos \theta_0 + n)^2 + k^2}, \quad (2)$$

式中 R_s 为S偏振光的反射率, R_p 为P偏振光的反射率, n_0 为光在真空中的折射率, n 为介质膜折射率, θ_0 为折射角, k 为金属铝的消光系数。分别选取入射光以0°,30°,60°角度入射(由折射定律计算出 θ_0)时,S偏振光与P偏振光反射率变化趋势如图1所示。从图中可以看出,相同的角度入射,经过反射镜后,出射的S与P偏振光的变化不一致。

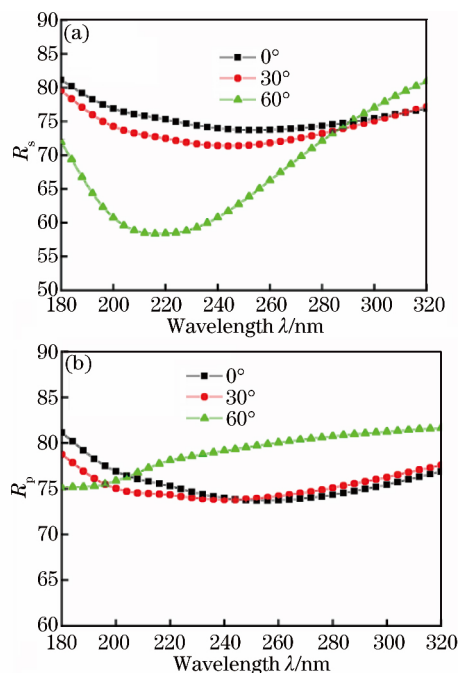


图1 (a) S偏振光反射率;(b) P偏振光反射率

Fig. 1 (a) S polarized light reflectivity;
(b) P polarized light reflectivity

3 实验方法

3.1 紫外光谱仪

紫外光谱仪可用于测量太阳光谱辐照度,其工作波段为 165~320 nm,光谱分辨率为 1 nm,波长定标精度优于 0.05 nm,绝对辐射定标精度优于 3%。紫外光谱仪的主光学系统采用光栅双单色仪与反射镜组成,在反射镜的表面增镀对紫外波段具有较高反射能力的 $\text{Al}+\text{MgF}_2$ 膜层,来提高紫外光谱仪的光学传输效率。

紫外光谱仪测量太阳光谱时,太阳光先入射到漫透射板,漫透射板出射光通过单色仪的入射狭缝后由二次光栅扫描,经出射狭缝输出不同波长的单色辐射由探测器接收,光信号转化成电子信号,利用电子系统进行数据采集和处理,最终实现太阳光谱紫外谱段的扫描探测及信号处理功能。

3.2 实验装置构建

由于同步辐射源为线偏振光,为了仿效同步辐

射源的偏振特性,实验室利用氙灯(无偏振)加布儒斯特起偏器构造一个类似于同步辐射源偏振态的光源。

测试装置主要由氙灯、聚光镜、布儒斯特起偏器、漫透射板以及紫外光谱仪构成。氙灯选用 Hamamatsu 公司 Fused Silica 窗口的 L11033,可在波长范围 200~2500 nm 内输出光谱,电源采用高稳定直流源 C8849,波动典型值为 0.2%,漂移典型值为 $\pm 0.5\%/h$ 。由于工作波段在紫外波段且输出光束口径较大,所以选用由融石英平板组成的布儒斯特起偏器^[11]。当非偏振的入射光波以布儒斯特角入射到融石英平板表面时,由菲涅耳公式可知,反射光中只有垂直 S 分量,透射光波为平行分量 P 波占优势的部分偏振光,随着平板片数增多,透射光波变为 P 分量的完全线偏振光。漫透射板的制备过程主要采用物理研磨法,基底材料采用高等级抗辐照的熔石英^[12],实验装置实物图如图 2 所示。

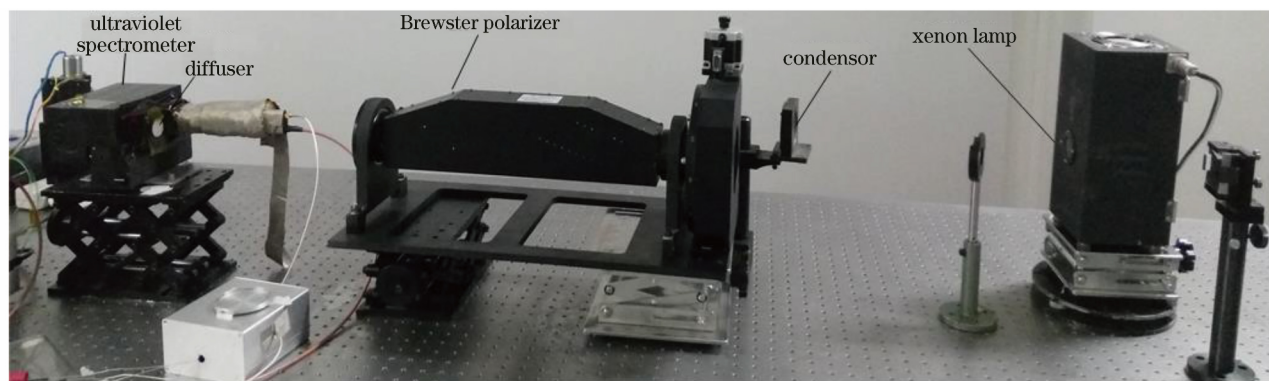


图 2 偏振性能测试装置实物图

Fig. 2 Experimental setup of polarization performance testing

3.3 偏振响应测试

初始片堆偏振器位于 0° 偏振(P 偏振),氙灯灯光经聚光镜后平行入射到片堆偏振器,出射光的线偏振光通过单片漫透射板射入仪器,经仪器的入缝后由二次光栅扫描,经出射狭缝输出不同波长的单色辐射,由探测器接收,紫外光谱仪采用光子计数模式。测试波段为 200~320 nm,波长扫描间隔为 1 nm。

旋转片堆偏振器,使偏振器处于 90° 偏振(S 偏振),其他条件与 0° 偏振相同。定义紫外光谱仪的偏振响应为同一个波长条件下 0° 偏振光入射时紫外光谱仪输出值与 90° 偏振光入射时紫外光谱仪输出值的比值^[13]。测试结果如表 1 所示,其中只选取部分波长。

表 1 单片漫透射板偏振响应

Table 1 Polarization response of single-piece diffuser

Wavelength	0°	90°	Polarization
λ/nm	polarization	polarization	response
240	212	393	0.5394
260	2460	474	5.1899
280	2678	5861	0.4569
300	1133	4810	0.2356
320	81	445	0.1820

实验将漫透射板叠加在仪器的入射狭缝前,基于漫透射板的散射特性,理想状态下 0° 偏振光与 90° 偏振光透过漫透射板时紫外光谱仪响应一致。但实验结果显示响应存在差异。

为了验证漫透射板抑制偏振特性的能力,紫外光谱仪的入射狭缝前端增加漫透射板数量(双片漫

透射板),其他实验条件相同,重复上述实验,测试结果如表 2 所示。

表 2 双片漫透射板偏振响应

Table 2 Polarization response of two-pieces diffuser

Wavelength	0°	90°	Polarization
λ/nm	polarization	polarization	response
240	50	85	0.5882
260	661	242	2.7314
280	1042	1797	0.5799
300	577	1506	0.3831
320	50	146	0.3425

表 2 与表 1 数据结果表明:200~320 nm 波段范围内,相同偏振态光透过双片漫透射板时的紫外光谱仪能量,相比单片漫透射板时紫外光谱仪能量减少 40%~75%,因此,漫透射板削弱了射入紫外光谱仪的入射光能量。

0°偏振光与 90°偏振光分别透过单片与双片漫透射板时,紫外光谱仪响应如图 3 所示。由图 3 可见,0°偏振光入射单片与双片漫透射板后,紫外光谱仪的偏振响应值均在 275 nm 波长附近达到最大。90°偏振光入射单片与双片漫透射板后紫外光谱仪的偏振响应值均在 290 nm 波长附近达到最大。相同光源氙灯、相同偏振态光透过单片与双片漫透射板以后,紫外光谱仪响应趋势一致。故漫透射板减小了入射光的能量,但并不改变光源的光谱分布。

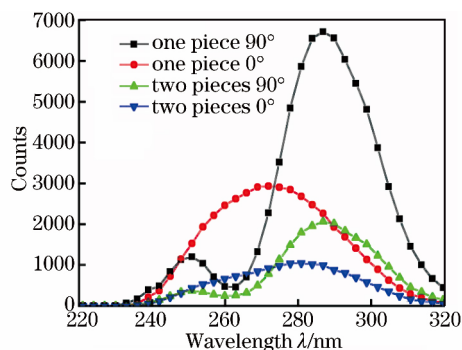


图 3 不同片漫透射板不同偏振方向的响应

Fig. 3 Polarization response for different pieces diffusers and different polarization directions

相同光源氙灯、相同偏振态光透过单片与双片漫透射板后,紫外光谱仪偏振响应曲线如图 4 所示。由图 4 可得,单片与双片漫透射板下,光谱仪均在 265 nm 波长位置附近获得最大的偏振响应,同时,在 200~320 nm 整个紫外波段范围,双片漫透射板下光谱仪偏振响应相比单片漫透射板下的偏振响应值更接近单位数值 1,即漫透射板缩小了 S 与 P 偏振光的响应差异,可见,漫透射板具有一定的消偏振

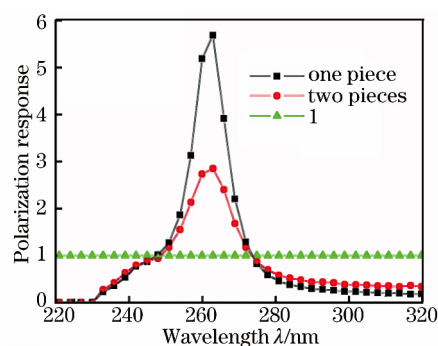


图 4 单片与双片漫透射板偏振响应

Fig. 4 Polarization response for single-piece diffuser and two-pieces of diffuser

作用。

仪器若要获得更高的定标精度,减小仪器的偏振响应,可通过在仪器入射狭缝前端加多片漫透射板来实现,但漫透射板会削弱入射光的能量,使得原本微弱的紫外波段信号很难在光谱仪中获取。因此,综合多方面因素,本次实验根据指标要求加入双片漫透射板。

4 结 论

为提高遥感仪器的定标精度,减小仪器的偏振响应,研究了漫透射板对遥感仪器偏振性能的影响。首先,分析了反射镜表面膜层的影响,P 与 S 不同偏振态光以相同角度入射 $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 膜,出射光具有不同的反射率分布;其次,构建一套偏振响应测试系统,测试结果表明:1)漫透射板减小入射光的能量,但不改变入射光的光谱分布;2)不同偏振态光射入光谱仪,光谱仪的峰值波长位置不同,偏振态由 P 偏振光到 S 偏振光,紫外光谱仪峰值波长位置变化 15 nm;3)入射光入射单/双片漫透射板后光谱仪偏振响应在 265 nm 波长位置均达到最大值,且单片漫透射板下的谱仪偏振响应是双片漫透射板下的 2 倍;在紫外波段范围内,双片漫透射板下光谱仪对不同偏振态的偏振响应差异更小,证明了漫透射板具有一定的抑制偏振响应特性的能力。这为同步辐射源定标空间紫外遥感仪器,提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Zhang Z D, Wang S R, Li H Z, *et al.* Study on calibration environment of spectral responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0312001.
张振铎,王淑荣,李宏壮,等.空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究[J].光学学报,2012,32

- (3): 0312001.
- [2] Arp U, Friedman R, Furst M L, *et al.* SURFIII-an improved storage ring for radiometry[J]. *Metrologia*, 2000, 37: 357-360.
- [3] Klein R, Gottwald A, Kolbe M, *et al.* UV and VUV calibration capabilities at the metrology light source for solar and atmospheric research [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2013, 1531(1): 879-882.
- [4] Schühle U, Brekke P, Curdt W, *et al.* Radiometric calibration tracking of the vacuum-ultraviolet spectrometer SUMER during the first year of the SOHO mission[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2646-2651.
- [5] Hollandt J, Schühle U, Paustian W. Radiometric calibration of the telescope and ultraviolet spectrometer SUMER on SOHO[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(25): 5125-5133.
- [6] Schmidtke G, Nikutowski B, Jacobi C, *et al.* Solar EUV irradiance measurements by the auto-calibrating EUV spectrometers (SolACES) aboard the international space station (ISS)[J]. *Solar Physics*, 2014, 289(5): 1863-1883.
- [7] Thuillier G, Foujols T, Bolsée D, *et al.* SOLAR/SOLSPEC: scientific objectives, instrument performance and its absolute calibration using a blackbody as primary standard source[J]. *Solar Physics*, 2009, 257(1): 185-213.
- [8] Thuillier G, Bolsée D, Schmidtke G, *et al.* The solar irradiance spectrum at solar activity minimum between solar cycles 23 and 24[J]. *Solar Physics*, 2014, 289(6): 1931-1958.
- [9] Thornagel R, Klein R, Kroth S, *et al.* Validation of a new facility at the metrology light source for the calibration of radiation sources in the wavelength range from 116 nm to 400 nm[J]. *Metrologia*, 2014, 51(5): 528.
- [10] Shi S X, Zhang H X, Liu J S. *Physical optics and applied optics*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000: 22-27.
石顺祥, 张海兴, 刘劲松. *物理光学与应用光学*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 22-27.
- [11] Li Z F. Study on on-orbit calibration of ultraviolet hyperspectral ozone spectrometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 14-17.
李占峰. 紫外高光谱臭氧探测仪在轨定标方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014: 14-17.
- [12] Li B. Vacuum ultraviolet radiation characteristics of diffuser in space borne remote sensing instruments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0912002.
李博. 星载遥感仪器太阳漫透射板紫外辐照特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0912002.
- [13] Wang H B, Hu X Q, Zhang L, *et al.* Polarization correction for grating dispersive imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812004.
王宏博, 胡秀清, 张璐, 等. 光栅色散型成像光谱仪的偏振校正方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812004.