

空间紫外遥感仪器光谱响应度定标环境的研究

张振铎 王淑荣 李宏壮 卫沛锋 王 亮

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为了减小空间紫外遥感仪器(SURSI)光谱响应度定标不确定度,实现 SURSI 在轨的高精度探测,对 SURSI 定标环境进行了深入的分析研究。利用光学薄膜的电磁场理论数值计算出铝+氟化镁膜在 250~400 nm 波段,真空和大气两种环境下的反射率值并进行比对。通过构建 SURSI 真空/大气响应度比对测试研究系统,对 SURSI 整机光谱响应度在两种环境下的差异进行了实验研究,在 250~400 nm 波段,平均偏差可达 3.8%。理论分析及实验结果表明:受仪器内部光学元件铝+氟化镁膜光学性质的影响,SURSI 光谱响应度在真空和大气不同环境下存在明显差异,且偏差值具有波长相关性,直接说明 SURSI 辐射定标在真空环境下完成的必要性。

关键词 遥感;空间紫外遥感仪器;辐射定标;空间仪器;铝+氟化镁膜;

中图分类号 TP70 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0312001

Study on Calibration Environment of Spectral Responsivity for Space Ultraviolet Remote Sensing Instrument

Zhang Zhenduo Wang Shurong Li Hongzhuang Wei Peifeng Wang Liang

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

Abstract Reducing the radiometric calibration uncertainty of the space ultraviolet remote sensing instrument (SURSI) in laboratory is very important to improve the instrument's detection accuracy in orbit. A deep study on the calibration environment of SURSI is made. The Al + MgF₂ film reflectivity of 250 ~ 400 nm in vacuum/air environment are calculated by the film electromagnetic theory and two results are compared. The experiment is completed, which is study on the discrepancy in the SURSI spectral responsivity when it is at different environments by establishing SURSI responsivity vacuum/air comparison system. The average deviation is about 3.8% from 250 to 400 nm. Theoretical analysis and measurement result show that because they are affected by the optical properties of Al+MgF₂ film which are decided by optical components inside the SURSI, the spectral responsivities of SURSI have distinct difference in vacuum/air environment and the deviation depends on wavelength. It is necessary to make the radiation calibration of SURSI in vacuum environment.

Key words remote sensing; space ultraviolet remote-sensing instrument; radiometric calibration; space instrument; Al+MgF₂ film

OCIS codes 120.0280; 120.3940; 120.5630; 120.6085

1 引 言

近年来,随着科学技术的高速发展,利用星载紫外遥感仪器监测全球大气臭氧含量,因其具有测量信息量大、精度高、仪器结构简单和长期稳定工作等优点

而具有不可替代的作用。国际上具有代表性的仪器有 SBUV/2(NOAA 系列卫星)^[1]、TOMS(Nimbus-7 和 Meteor-3 卫星)^[2]、GOME(ERS-2 卫星)^[3,4]、SCIAMACHY(POEM-1 卫星)^[5,6]、OMI(EOS-Aura

收稿日期: 2011-05-17; 收到修改稿日期: 2011-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(D41074126)资助课题。

作者简介: 张振铎(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事空间紫外遥感技术与辐射定标方面的研究。

E-mail: zhenduo69@163.com

卫星)^[7]以及 OMPS(NPOESS 卫星)^[8,9]等。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所自 2000 年起开始承担风云三号气象卫星空间紫外遥感仪器(SURSI)的研制任务,在轨运行期间它可以探测得到太阳紫外光谱辐照度和大气的太阳后向散射紫外光谱辐亮度,并通过两者的比值来反演大气中臭氧的含量和垂直分布。

星载紫外遥感仪器需要在飞行实验前进行地面辐射定标,以建立进入仪器的辐射量与输出电信号之间的定量关系,定标精度将直接影响仪器在轨探测精度及数据反演精度^[10~18]。辐射定标按光谱范围分为紫外-真空紫外定标(10~250 nm)和紫外定标(250~400 nm)。前者需将标准光源(通常为氙灯)和仪器安装到真空室内在真空环境下进行。对于 250~400 nm 波段,由于:1) 定标标准光源(通常为卤钨灯)辐射可以在大气环境下获得;2) 大气定标装置装调相对简单,精度高;3) 认为仪器自身光谱响应度在真空和大气环境下一致,所以定标通常在大气环境下完成。

但随着工程任务的深入及认识问题能力的不断提高,我们意识到,受仪器内部光学元件铝+氟化镁膜光学性质的影响^[19~23],SURSI 光谱响应度在不

同环境下可能会发生变化,即以往的 250~400 nm 波段大气定标结果可能存在附加不确定度。为了深入研究这个问题,本文分别从理论分析和工程实验两方面展开讨论,并给出了最后的结论。

2 空间紫外遥感仪器

SURSI 的结构原理如图 1 所示。它由汞灯波长定标光源、前置铝漫反射板、消偏器、艾伯特-法斯梯(Ebert-Fastie)型光栅双单色仪、后置光学系统、光电倍增管探测器及电控系统组成,工作波段 160~400 nm。光栅双单色仪由球面准直聚光镜、平面和屋脊转向镜、光栅以及入射、出射和中间狭缝组成。为使仪器结构紧凑、色散相加,亦为使两个单色仪的光栅可同轴驱动,在两单色仪之间采用了屋脊反射镜和平面镜进行光学传递。仪器在轨观测时,漫反射板移入光路,太阳辐射经过漫反射板、消偏器、调制器和进入 Ebert-Fastie 光栅双单色仪,并在单色仪出射狭缝平面形成谱带。当光栅转动时,不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝、后置光学系统,由探测器-放大器转变为紫外光电光谱,完成太阳连续光谱的辐射测量。

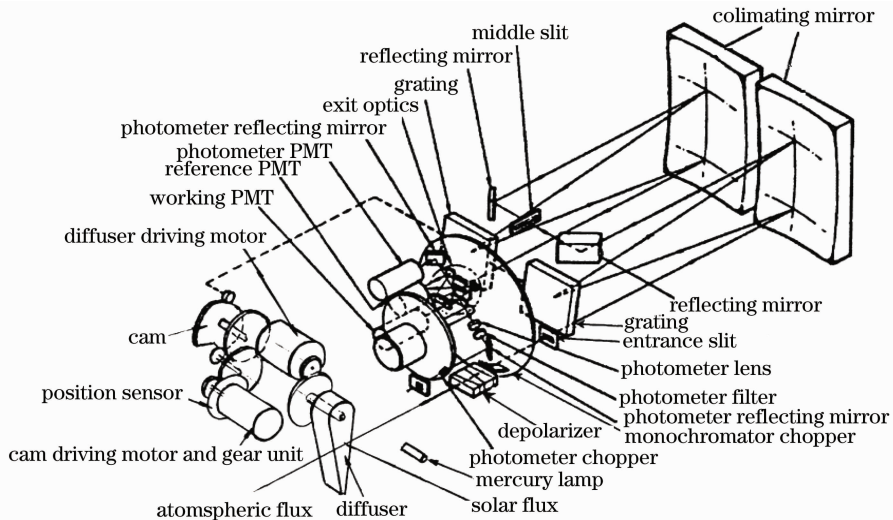


图 1 SURSI 内部光学结构图

Fig. 1 Internal optical structure of SURSI

SURSI 整机共使用 9 个光学反射元件,入射辐射在仪器内部共进行 11 次反射,为了提高仪器的光学传输效率,选用在紫外-真空紫外波段具有较高反射能力的铝+氟化镁膜作为增反膜,其中铝膜厚度选为 100 nm,氟化镁膜厚度 38 nm。

3 铝+氟化镁膜的光谱反射特性研究

3.1 反射率计算公式推导

为了分析铝+氟化镁膜在两种环境下的反射率变化,首先根据光学薄膜的电磁场理论推导出铝+氟化镁膜在任意环境下的反射率计算公式^[24]。设真

空折射率为 n_0 ，氟化镁的复折射率为 $N_1 = n_1 - ik_1$ ，铝的复折射率为 $N_2 = n_2 - ik_2$ ，其中 n_1 和 k_1 代表氟化镁材料的折射率和吸收系数， n_2 和 k_2 代表铝材料的折射率和吸收系数。根据薄膜系统光学特性的矩阵计算方法，可推导出单层氟化镁膜的特征矩阵 \mathbf{M}_1 为

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & -\frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ -i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 h_1 \cos \theta_{11}$ ， h_1 是氟化镁膜的厚度； θ_{11} 是入射波在氟化镁膜界面的折射角，同时也是对铝膜界面的入射角；如果入射波是 s 偏振波， $\eta_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} N_1 \cos \theta_{11}$ ，如果入射波是 p 偏振波， $\eta_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{N_1}{\cos \theta_{11}}$ ； ϵ_0 和 μ_0 分别是真空中的介电常数和磁导率。同理，可根据(1)式计算得到铝膜的特征矩阵 \mathbf{M}_2 为

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & -\frac{i}{\eta_2} \sin \delta_2 \\ -i\eta_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} N_2 h_2 \cos \theta_{21}$ ， h_2 是铝膜的厚度； θ_{21} 是入射波在铝膜界面的折射角，同时也是对基片界面的入射角；如果入射波是 s 偏振波， $\eta_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} N_2 \cos \theta_{21}$ ，如果入射波是 p 偏振波， $\eta_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{N_2}{\cos \theta_{21}}$ 。

根据(1)式和(2)式计算得到整个铝+氟化镁膜层的特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & -\frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ -i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & -\frac{i}{\eta_2} \sin \delta_2 \\ -i\eta_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 A, B, C, D 分别代表对应位置上的矩阵元。

根据薄膜的电磁场理论，有

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ H_{11} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 E_1 和 H_1 是膜系外位于氟化镁膜界面处的场； E_{11} 和 H_{11} 是基片界面处的场。 H_1 可以写为

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{11} - E_{r1}) n_0 \cos \theta_{11} = (E_{11} - E_{r1}) \eta_0, \quad (5)$$

式中 E_{11} 和 E_{r1} 分别为薄膜上入射波的入射场和反射

场； θ_{11} 为入射波在氟化镁膜界面的入射角； $\eta_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0 \cos \theta_{11}$ 。 H_{11} 可以写为

$$H_{11} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_G \cos \theta_{11} E_{11} = \eta_G E_{11}, \quad (6)$$

式中 $\eta_G = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_G \cos \theta_{11}$ ， n_G 为基片的折射率； E_{11} 为基片界面处的透射场。根据电磁场的边值关系，有

$$E_1 = E_{11} + E_{r1}, \quad (7)$$

将(5)~(7)式代入(4)式中，该式化为

$$\begin{bmatrix} E_{11} + E_{r1} \\ (E_{11} - E_{r1}) \eta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{11} \eta_G \end{bmatrix}. \quad (8)$$

把(8)式展开即可以得到铝+氟化镁膜的反射系数：

$$r_{s/p} = \frac{E_{r1}}{E_{11}} = \frac{A\eta_0 + B\eta_0\eta_G - C - D\eta_G}{A\eta_0 + B\eta_0\eta_G + C + D\eta_G}. \quad (9)$$

而反射率为

$$R_{s/p} = r_{s/p} r_{s/p}^*, \quad (10)$$

当自然光入射时，铝+氟化镁膜的反射率由 p 偏振波反射率和 s 偏振波反射率的平均值得到：

$$R = \frac{1}{2} (R_s + R_p). \quad (11)$$

3.2 数值模拟

对于铝及氟化镁材料的复折射率，铝膜作为金属膜，成核过程中，空隙极少，聚集密度接近于 1，可近似认为其在真空和大气环境下具有相同的复折射率，其折射率系数 n_2 和吸收系数 k_2 的取值如表 1 所示。但对于氟化镁这种低折射率介质膜，膜中含有少量空隙，计算介质膜折射率时应综合考虑其内部结构特性，推荐采用 Kinoshita 公式进行等效折射率计算^[25]，表达式为

$$N = pN_1 + (1-p)n_v,$$

式中 p 为薄膜的聚集密度，蒸镀膜层的 p 值一般在 0.75~0.95 之间，计算时，取 $p = 0.8$ ； N_1 为薄膜中柱体的折射率（即氟化镁材料的复折射率），其折射率系数 n_1 和吸收系数 k_1 在不同波长下的取值如表 2 所示； n_v 为薄膜中空隙的折射率，在真空环境下，空隙的折射率是 1.0；大气环境下，空隙被水填充，折射率变为 1.33。膜层的基片材料为石英，折射率为 1.46。

这样，通过以上分析，分别模拟计算出了 250~400 nm 波段，正入射条件下，单次反射的铝+氟化镁膜在大气和真空两种环境下的光谱反射率，结果如图 2 所示，二者的比值结果如图 3 所示。由图可

见,两种环境下,铝+氟化镁膜的光谱反射率存在差异,且差异大小具有波长相关性,该结果将导致SURSI光谱响应度在不同环境下发生变化。

表 1 铝膜的折射率和吸收系数

Table 1 Refractive indexes and absorption coefficients of aluminum film

Wavelength /nm	Refractive index n_2	Absorption coefficient k_2
240	0.16	2.53
260	0.19	2.85
280	0.22	3.13
300	0.25	3.33
320	0.28	3.56
340	0.31	3.80
360	0.34	4.01
380	0.37	4.25
400	0.40	4.45

表 2 氟化镁膜中柱体的折射率和吸收系数

Table 2 Refractive indexes and absorption coefficients of cylinder in magnesium fluoride

Wavelength /nm	Refractive index n_1	Absorption coefficient k_1
240	1.41	5×10^{-4}
260	1.40	2×10^{-4}
280	1.40	9×10^{-5}
300	1.39	5×10^{-5}
320	1.39	3×10^{-5}
340	1.39	2×10^{-5}
360	1.39	1×10^{-5}
380	1.39	6×10^{-6}
400	1.38	1×10^{-6}

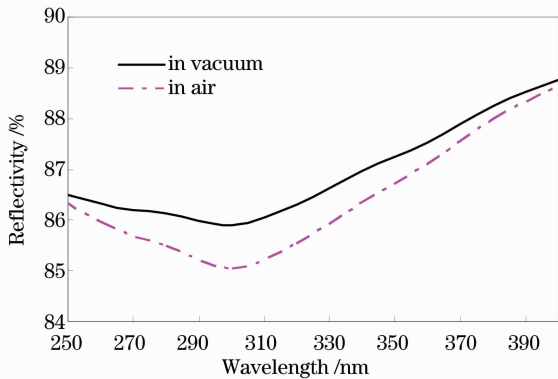


图 2 大气和真空环境下铝+氟化镁膜反射率数值计算结果

Fig. 2 Simulated result of reflectivity of the Al+MgF₂ film in air and vacuum environment

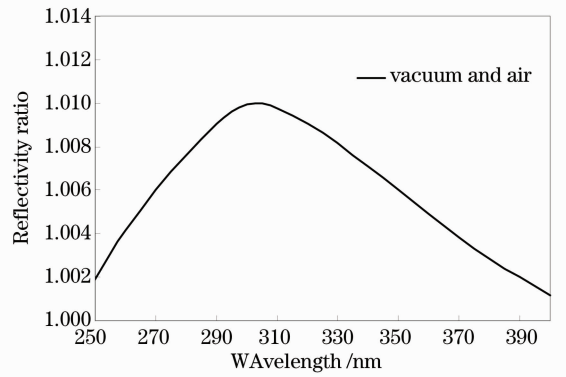


图 3 大气和真空环境下铝+氟化镁膜反射率比值

Fig. 3 Reflectivity ratio of Al+MgF₂ film in air and vacuum environment

4 仪器光谱响应度在两种环境下的实验研究

4.1 实验装置

以上通过对铝+氟化镁膜反射特性的研究可知,其反射率值在真空和大气两种环境下存在差异。但由于入射辐射在 SURSI 内部光学元件之间的反射情况较为复杂,以上分析得到的反射率差异主要针对正入射单次反射的铝+氟化镁膜,并不能直接反应仪器整机光谱响应度的差异变化。为了解决这一问题,构建了如图 4 所示的仪器真空和大气响应度比对测试研究系统,该系统主要由真空测试室、无油高真空机组、高稳定辐射光源、熔石英窗口、SURSI 及计算机等辅助设备组成。

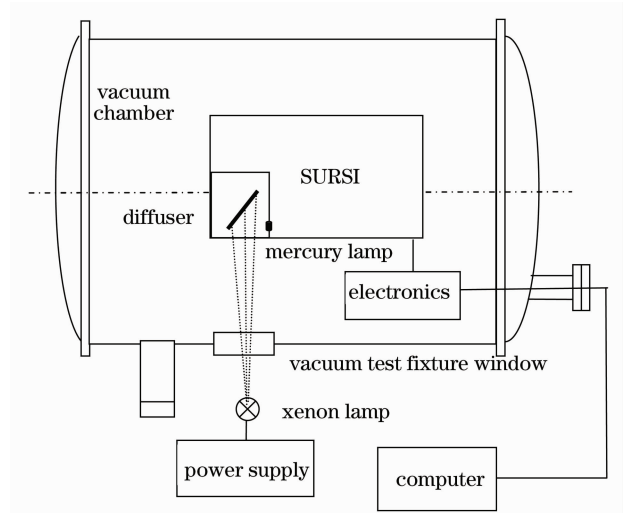


图 4 仪器真空和大气响应度比对测试研究系统

Fig. 4 Air and vacuum responsivity measurement system of SURSI

真空室采用卧室结构,由真空室本体、热沉、阀门、支架、温度和真空度测量传感器组成。内空间净尺寸 $\Phi 900 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 。选用法国 ALCTEL 公司 11 L ACP40 干式泵和美 APD 公司 4000 L M16 低温泵,极限真空度可达 10^{-5} Pa 。辐射光源选用日本滨松公司的 300 W 高稳定氙灯。

4.2 实验方法及结果

实验共分大气和真空两个阶段进行。第一阶段:大气实验。按图 4 所示将实验系统装调后,使真空测试室保持在大气状态,并按如下步骤完成第一阶段实验:1) SURSI 自带漫反射板移入光路;2) 开仪器自带汞灯,预热约 15 min 后,汞灯辐射经漫反射板进入仪器,SURSI 对汞灯 253.652,296.728 和 365.016 nm 三条特征谱的光谱读出值进行扫描测量,每条特征谱线扫描 10 次;3) 关汞灯,开氙灯并预热 40 min 后,氙灯辐射经熔石英窗口、漫反射板进入仪器,SURSI 对氙灯光谱的读出值进行扫描测量,扫描波段范围为 250~400 nm,连续测量 10 次。

第二阶段:真空实验。保持第一阶段研究系统的状态不变,只改变测试环境。对真空室抽真空达 10^{-5} Pa ,重复进行第一阶段的测试步骤。其中,第二步用以监测仪器波长机构在两种环境下的变化情况,第三步用以考察仪器在两种环境下自身光谱响应度的变化情况。

由于大气-真空介质折射率的变化会使光源辐

射波长产生漂移,所以需对两种环境下汞灯自身的辐射波长变化进行计算。设单色波在真空中的波长为 λ_0 ,在大气中的波长为 λ ,根据电磁波理论可推导出从真空环境到大气环境,光源的波长漂移量

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda = \lambda_0 - \frac{\lambda_0}{n} = \lambda_0(1 - 1/n), \quad (12)$$

式中 $\lambda = \lambda_0/n$, n 是空气介质的折射率,可采用 Sellmeier 型空气折射率计算公式^[26]:

$$n = 1 + \left(80.6051 + \frac{24809.9}{132.274 - \lambda_0^{-2}} + \frac{174.557}{39.32957 - \lambda_0^{-2}} \right) \times 10^{-6}. \quad (13)$$

计算出标准大气条件下的折射率值(气压为 $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$,温度为 288.15 K,水汽压为 0 和 CO_2 含量为 300×10^{-6})。(13)式在 230~1695 nm 波长范围内,具有 2.3×10^{-9} 的精度。根据(12)式和(13)式计算,对应汞灯在大气环境下的三条特征谱线 253.652,296.728 和 365.016 nm,真空环境下,三波长分别向长波方向漂移 0.069,0.081 和 0.099 nm,漂移后的理论峰值分别为 253.721,296.809 和 365.115 nm。表 3 列出了两个阶段 SURSI 对汞灯光源光谱读出值及重复性测量结果。由表 3 可见,在两种环境下,仪器的波长重复性均优于 $\pm 0.02 \text{ nm}$,波长精度均优于 $\pm 0.04 \text{ nm}$,说明仪器波长机构在不同工作环境下具有良好的稳定性,波长位置未发生改变。

表 3 汞灯波长重复性、波长精度测量结果

Table 3 Measured results of SURSI wavelength repeatability and accuracy with mercury lamp

Measurement environment		In air			In vacuum		
Standard wavelength /nm		253.652	296.728	365.016	253.721	296.809	365.115
Measured wavelength /nm	1	253.634	296.695	364.970	253.721	296.793	365.090
	2	253.634	296.695	364.982	253.732	296.805	365.090
	3	253.646	296.695	364.982	253.721	296.793	365.090
	4	253.634	296.695	364.982	253.721	296.793	365.090
	5	253.634	296.695	364.982	253.721	296.805	365.090
	6	253.634	296.695	364.982	253.721	296.793	365.102
	7	253.634	296.695	364.982	253.721	296.805	365.102
	8	253.634	296.695	364.982	253.721	296.793	365.090
	9	253.634	296.695	364.970	253.721	296.793	365.102
	10	253.634	296.695	364.982	253.721	296.793	365.102
Average value /nm		253.635	296.695	364.980	253.722	296.797	365.095
Wavelength repeatability	The maximal uncertainty	-0.011	0.000	0.010	-0.010	-0.008	-0.007
	Standard deviation	0.004	0.000	0.005	0.003	0.005	0.006
Wavelength accuracy		-0.017	-0.033	-0.036	0.001	-0.012	-0.020

两种环境下,仪器对氙灯光源的读出值重复性测量结果如表 4 和表 5 所示;仪器对氙灯光源的读出值扫描结果如图 5 所示;比对结果如图 6 所示(由

于在 250~400 nm 波段,氙灯相对光谱曲线较平坦,无特征谱,忽略光源辐射波长漂移对测试结果的影响)。由图 5 及图 6 可见,在 250~300 nm 波段,测

量结果吻合得较好,相对偏差约为 0.8%;在 300~400 nm 波段,测试结果呈现明显差异,且差异值具有波长相关性,最大偏差出现在 340 nm 和 400 nm 附

近,偏差值高于 10%;在 250~400 nm 整个波段,相对偏差约为 3.8%。

表 4 250~400 nm 仪器真空读出值测量重复性

Table 4 Results of SURSI measurement repeatability in vacuum from 250 nm to 400 nm

Wavelength /nm	250	270	290	310	330	350	370	390	
Measured signal	1	1.258	2.092	2.380	2.740	2.342	5.016	5.116	2.730
	2	1.272	2.072	2.358	2.766	2.362	5.000	5.068	2.756
	3	1.252	2.092	2.386	2.738	2.354	5.020	5.048	2.768
	4	1.276	2.071	2.368	2.741	2.373	5.024	5.058	2.748
	5	1.255	2.096	2.388	2.767	2.369	5.013	5.069	2.746
	6	1.283	2.081	2.391	2.757	2.354	5.040	5.069	2.721
	7	1.279	2.096	2.369	2.750	2.375	5.026	5.064	2.734
	8	1.253	2.079	2.391	2.731	2.365	5.045	5.069	2.739
	9	1.255	2.090	2.371	2.750	2.379	5.033	5.062	2.736
	10	1.281	2.099	2.384	2.755	2.354	5.039	5.059	2.735
Average value	1.266	2.087	2.379	2.750	2.363	5.026	5.068	2.741	
Standard deviation	0.012	0.010	0.011	0.011	0.011	0.013	0.017	0.013	
Relative deviation /%	0.963	0.466	0.454	0.415	0.468	0.264	0.338	0.470	

表 4 250~400 nm 仪器真空读出值测量重复性

Table 4 Results of SURSI measurement repeatability in vacuum from 250 nm to 400 nm

Wavelength /nm	250	270	290	310	330	350	370	390	
Measured signal	1	1.276	2.068	2.372	2.752	2.356	4.638	5.042	2.614
	2	1.246	2.066	2.374	2.806	2.342	4.684	5.102	2.566
	3	1.253	2.083	2.382	2.764	2.330	4.679	5.083	2.597
	4	1.268	2.080	2.385	2.762	2.358	4.670	5.058	2.586
	5	1.265	2.095	2.379	2.772	2.345	4.665	5.059	2.595
	6	1.245	2.074	2.379	2.761	2.335	4.673	5.085	2.598
	7	1.275	2.076	2.365	2.757	2.339	4.667	5.080	2.586
	8	1.269	2.073	2.390	2.760	2.357	4.660	5.069	2.581
	9	1.244	2.097	2.362	2.768	2.355	4.641	5.095	2.589
	10	1.254	2.098	2.375	2.765	2.343	4.676	5.052	2.582
Average value	1.260	2.081	2.376	2.767	2.346	4.665	5.073	2.589	
Standard deviation	0.012	0.011	0.008	0.014	0.009	0.014	0.019	0.012	
Relative deviation /%	0.943	0.543	0.344	0.510	0.404	0.311	0.366	0.467	

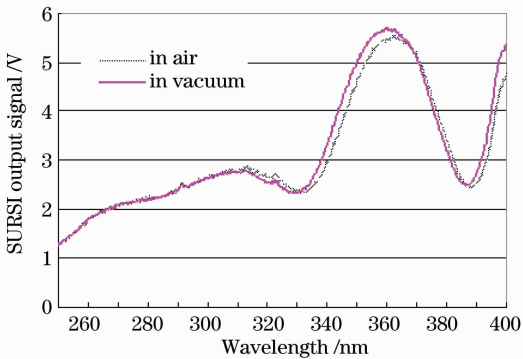


图 5 大气和真空两种环境下仪器对氙灯光源的测试结果
Fig. 5 Measured results of SURSI in air and vacuum environment with xenon lamp

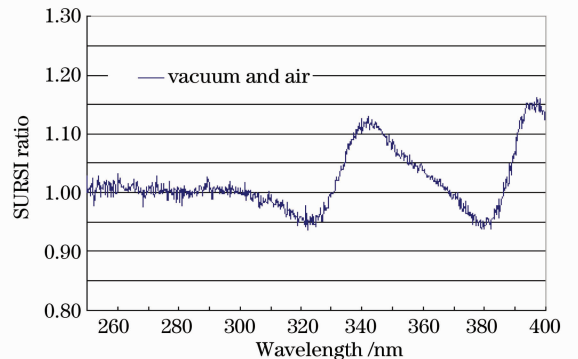


图 6 大气和真空两种环境下 SURSI 读出值比值结果
Fig. 6 SURSI measured result ratio in air and vacuum environment

4.3 比较结果初步分析

对比较结果进行了简单的分析。由图 5 可见, SURSI 读出值曲线出现的波长漂移现象是偏差产生的主要原因。从真空到大气, 波长向长波方向漂移。该漂移方向与辐射光源由于空气折射率变化所引起的波长漂移方向相反, 即可确定不是光源的影响, 这就说明 SURSI 自身的光谱响应度在真空和大气环境下发生了变化, 说明仪器全波段定标在真空环境下完成的必要性。

为了证实 SURSI 响应度的变化原因, 我们利用扫描电镜对 SURSI 实际光学元件的铝+氟化镁膜进行了观测, 其表面的微观形貌如图 7 所示, 所使用的观测仪器为日本日立公司的 S-4800 场发射扫描电子显微镜, 放大倍率为 2.2×10^5 。形貌图中的黑色位置对应氟化镁介质膜蒸镀后所留下的少量空隙(真空环境下)。分析认为, 从真空到大气, 氟化镁膜层中的少量空隙被水填充, 使膜系的平均折射率提高; 同时, 因为膜系的光学厚度增加, 根据光学薄膜的干涉原理, 会导致分光特性曲线向长波方向移动, 进而导致膜层的光谱反射率发生变化。分析结果与实验结果相吻合, 初步验证了铝+氟化镁膜光学特性的变化对 SURSI 自身光谱响应度的影响。

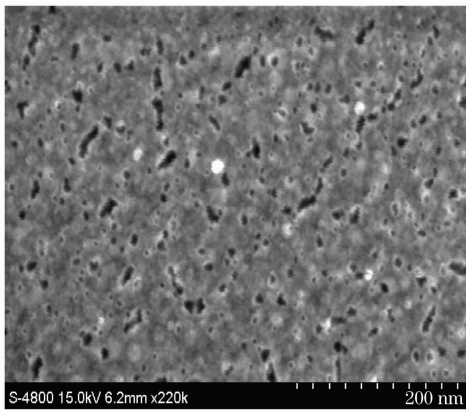


图 7 氟化镁膜层微观形貌图

Fig. 7 Microscopic morphological image of the MgF_2 film

5 结 论

为了减小空间紫外遥感仪器地面光谱响应度定标的不确定度, 对其定标环境进行了深入的分析研究。首先, 在真空和大气两种环境下, 对可能引起仪器响应度变化的影响因素进行了理论分析, 利用光学薄膜的电磁场理论推导出铝+氟化镁膜光谱反射率计算公式, 数值计算出该膜系在 250~400 nm 波

段, 两种环境下的反射率值并进行比对, 结果表明: 两种环境下, 铝+氟化镁膜的光谱反射率存在较大差异。然后, 通过构建仪器真空/大气响应度比对测试研究系统, 对 SURSI 整机光谱响应度在两种环境下的差异进行了实验研究, 结果表明, 仪器光谱响应度在真空和大气环境下存在明显差异, 且偏差值具有波长相关性, 在 250~400 nm 波段, 平均偏差可达 3.8%, 说明 SURSI 全波段定标在真空环境下完成的必要性。初步分析认为, 仪器内部光学元件表面蒸镀的铝+氟化镁膜在不同环境下光学特性的不稳定性, 是造成仪器自身响应度在真空和大气两种环境下存在差异的主要原因, 其他影响因素有待进一步研究。该结论对于国际同类仪器的标定工作具有很好的借鉴作用。

参 考 文 献

- 1 H. Weiss, R. P. Cebula, K. Laamann *et al.*. Evaluation of the NOAA-11 solar backscatter ultraviolet radiometer, Mod 2 (SBUV/2): inflight calibration [C]. *SPIE*, 1991, **1493**: 80~90
- 2 J. R. Herman, P. K. Bhartia, O. Torres *et al.*. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/Toms data [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 16911~16922
- 3 K. Bramstedt, J. Gleason, D. Loyola *et al.*. Comparison of total ozone from the satellite instruments GOME and TOMS with measurements from the Dobson network 1996~2000[J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2003, **3**(5): 1131~1157
- 4 Gary K. Corlett, Paul S. Monks. A comparison of total column ozone values derived from the global ozone monitoring experiment (GOME), the Tiros operational vertical sounder (TOVS), and the total ozone mapping spectrometer (TOMS)[J]. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**(9): 1103~1116
- 5 S. Noël, H. Bovensmann, J. P. Burrows *et al.*. The SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1 [C]. *SPIE*, 1998, **3498**: 94~104
- 6 H. Bovensmann, M. Buchwitz, J. Frerick *et al.*. SCIAMACHY on ENVISAT: in-flight optical performance and first results [C]. *SPIE*, 2004, **5235**: 160~173
- 7 P. F. Levelt, E. Hilsenrath, G. W. Leppelmeier *et al.*. Science objectives of the ozone monitoring instrument [J]. *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, 2006, **44**(5): 1199~1208
- 8 J. W. Leitch, J. V. Rodriguez, M. Dittman. Limb scatter ozone profiling sensor for the NPOESS ozone mapping and profiler suite (OMPS)[C]. *SPIE*, 2003, **4891**: 13~21
- 9 Brian K. McComas, Colin Seftor, Quinn Remund. End-to-end modeling of the ozone mapping and profiler suite [C]. *SPIE*, 2004, **5420**: 106~117
- 10 Marcel Dobber, Ruud Dirksen, Pieternel Levelt *et al.*. EOS-aura ozone monitoring instrument in-flight performance and calibration [C]. *SPIE*, 2006, **6296**: 62960R-1
- 11 Erik Zoutman, Carina Olij. Calibration approach for sciamachy [C]. *SPIE*, 1997, **3117**: 306~317
- 12 Donald F. Heath. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments [C]. *SPIE*, 2003, **4891**: 335~342
- 13 D. F. Heath, Zhongying Wei, W. K. Fowler *et al.*. Comparison of spectral radiance calibration of SBUV/2 satellite ozone monitoring instruments using integrating sphere and flat-plate

- diffuser techniques [J]. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 259~264
- 14 A. Hahne, J. Callies, A. Lefebvre *et al.*. Calibration of the GOME instrument for ERS-2[J]. *ESA Journal*, 1994, **18**(20): 119~128
- 15 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian. Study on calibration method of spectral irradiance responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1816~1821
张振铎, 王淑荣, 李福田等. 空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1816~1821
- 16 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian. Spectral irradiance responsivity calibration of space ultraviolet remote sensing instrument by diverging light illuminating method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(11): 51~56
张振铎, 王淑荣, 李福田等. 发散光照射方法标定空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度[J]. *光电工程*, 2008, **35**(11): 51~56
- 17 Wang Shurong, Song Kefei, Li Futian. Radiometric calibration on ground of satellite-borne solar ultraviolet spectral monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2256~2261
王淑荣, 宋克非, 李福田. 星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2256~2261
- 18 Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2006, **14**(2): 185~190
邢进, 王淑荣, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 185~190
- 19 G. Hass, W. R. Hunter, R. Tousey. Reflectance of evaporated aluminum in the vacuum ultraviolet [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1956, **46**(12): 1009~1012
- 20 G. Hass, R. Tousey. Reflecting coatings for the extreme ultraviolet [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(6): 593~602
- 21 L. R. Canfield, G. Hass, J. E. Waylonis. Further studies on MgF₂ overcoated aluminum mirrors with highest reflectance in the vacuum ultraviolet [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **5**(1): 45~50
- 22 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian. Study on radiation degradation characteristics of MgF₂ windowed deuterium lamp in vacuum environment [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2009, **17**(3): 482~487
张振铎, 王淑荣, 李福田等. 氟化镁窗口氘灯真空辐射衰减特性研究[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 482~487
- 23 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 371~375
刘颖, 李福田. 若干材料紫外-真空紫外漫反射特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(3): 371~375
- 24 Liang Quanting. *Physical Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 145~149
梁铨廷. *物理光学* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 145~149
- 25 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. *Morden Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. 115~120
唐晋发, 顾培夫, 刘旭等. *现代光学薄膜技术* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007. 115~120
- 26 Wan Guoxian, Han Zhijie. A calculating way for refractive index of air [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 1994, **2**(3): 27~30
万国贤, 韩之杰. 空气折射率的一种计算方法[J]. *光学精密工程*, 1994, **2**(3): 27~30

栏目编辑: 谢 婧