

漫反射板光谱定标波长差异研究

张子辉^{1,2} 王淑荣¹ 黄煜¹ 林冠宇¹

(¹ 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, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 在高精度光谱定标实验中, 倾斜漫反射板光谱定标和直接照射光谱定标两种方法得到的定标结果存在微小差异。对光谱定标的能量传输过程进行分析, 发现光通过倾斜的漫反射板照射到仪器的入射狭缝时, 入射狭缝表面的辐射通量分布出现不对称现象, 引起波长差异。以光栅双单色仪为例, 将出射狭缝处不同波长偏差所对应的辐射通量曲线进行叠加, 得到应用 45° 倾斜的漫反射板进行光谱定标时的波长差异为 -0.0283 nm。最后以汞灯为光源, 以 296.7283 nm 和 365.0157 nm 两个波长为定标波长, 采用漫透射板垂直照射和 45° 倾斜的漫反射板照射两种方法对光栅双单色仪进行光谱定标, 两种定标方法结果偏差分别为 -0.029 nm 和 -0.0286 nm。证明倾斜漫反射板是引起波长差异的主要原因, 并为漫反射板光谱定标提供数据。

关键词 物理光学; 单色仪; 漫反射板; 辐射通量; 光谱定标

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1212001

Wavelength Difference Studies of Wavelength Calibration Based on Diffuse Reflector

Zhang Zihui^{1,2} Wang Shurong¹ Huang Yu¹ Lin Guanyu¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In the experiment of high-precision spectral calibration, the results of spectral calibration, when using the tilt diffuse reflector as dodging device, are different from vertical exposure. Through analysing the process of energy transfer, we find that the radiant flux on the entrance slit is uneven when using the tilt diffuse reflector, which causes the wavelength difference. We use the double grating monochromator as the instance, and put all of the radiant flux of different wavelengths on the entrance slit. And then we can know that wavelength difference is -0.0283 nm, when using the 45° tilt diffuse reflector to wavelength calibration. Finally, making the mercury as light source, by scanning the 296.7283 nm and 365.0157 nm wavelengths with two methods of using the diffuse transmittance plate to vertical irradiation and using the 45° tilt diffuse reflector plate irradiation, the wavelength difference are -0.029 nm and -0.0286 nm. The results of the experiment can certify that the tilt reflect diffuser is the main factor to cause the wavelength difference in the spectral calibration experiment.

Key words physical optics; monochromator; diffuse reflector; radiant flux; wavelength calibration

OCIS codes 120.3930; 050.1950; 260.1960

1 引言

遥感光谱仪器在轨运行时, 会出现波长漂移和探测器衰减现象, 需要对光谱仪器进行在轨光谱定标和辐射定标^[1]。在轨定标主要以自带光源或太阳

加漫反射板或漫透射板为辐照源, 对光谱仪器进行定标。当入射角较大时漫透射板的朗伯特特性变差, 所以采用漫反射板作为遥感光谱仪在轨定标的匀光器。在轨光谱定标多以仪器自带的谱线灯加漫反射

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)、中科院碳专项子课题(XDA05040103)

作者简介: 张子辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事空间遥感光学设计方面的研究。E-mail: zhangzihui123@126.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

板为光源进行光谱定标,例如风云三号臭氧垂直探测仪^[2]。风云三号臭氧垂直探测仪是以自带汞灯为光源,光线经漫反射板漫反射后进入探测仪,进行光谱定标。但是在实验中发现,用自带汞灯加漫反射板照射和用外置汞灯垂直照射两种光谱定标方法得到的结果存在波长差异现象。本文对汞灯加漫反射板光谱定标的能量传输过程进行理论分析,找出引起波长差异的原因,并以光栅双单色仪为例进行了原理验证。

2 理论分析

光谱仪通过自带谱线灯进行光谱定标时,漫反射板与光谱仪入射光线的光轴有一定的夹角,如图1所示。谱线灯为点光源,光源亮度为 I ,光源发出的光线与漫反射板法线的夹角为 α ,漫反射板上的点到光源的距离为 l 。经过检测,漫反射板的朗伯特特性与理想朗伯体很接近,为简化计算,认为漫反射板双向反射分布函数(BRDF) $\rho = 1$ ^[3-4]。以漫反射板中心为原点,以图1中垂直纸面方向为 Y 轴,以光谱仪入射狭缝光轴方向为 Z 轴,与 Y 轴和 Z 轴垂直的方向为 X 轴,在点光源的照射下漫反射板上任意一点 (x, y) 的出射辐亮度为^[5]

$$L = \rho \frac{E}{\pi} = \rho \frac{I \cos \alpha}{\pi l^2} = \rho \frac{IR}{\pi l^3}, \quad (1)$$

式中 R 为光源到漫反射板的距离, l 为漫反射板上点到光源的距离。漫反射板出射辐亮度示意图如图2所示。

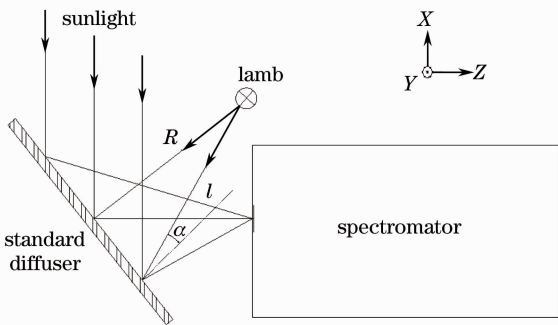


图1 倾斜漫反射板光谱定标示意图

Fig. 1 Sketch map of wavelength calibration by tilt reflect diffuser

光经过漫反射板散射到狭缝上任意一点的辐照度为^[6]

$$E = \int \frac{L \cos \alpha' \cos \beta'}{l'^2} dA, \quad (2)$$

式中 α' 为漫反射板出射光线与狭缝表面法线的夹角, β' 为漫反射板出射光线与漫反射板法线的夹角,

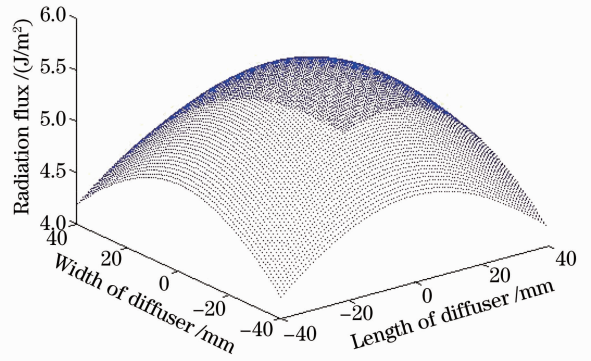


图2 点光源垂直照射漫反射板辐亮度分布

Fig. 2 Radiance of standard diffuser with spot light vertical irradiation

l' 为光线两端点间的距离,如图3所示, A 为漫反射板上某一微元的面积。

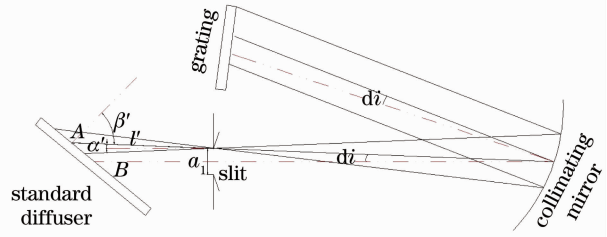


图3 狭缝宽度引起波长增宽示意图

Fig. 3 Sketch map of wavelength broadened by slit

如图4所示, H 点和 L 点是在光谱仪入射狭缝上 Y 坐标相同的两个点。光谱仪准直镜经过 H 和 L 两点在漫反射板上的投影分别为梯形 $A_1 B_1 C_1 D_1$ 和梯形 $A_2 B_2 C_2 D_2$ 。根据光传播的可逆性,漫反射板上 $A_1 B_1 C_1 D_1$ 区域内的点散射的光会经过 H 点照射到准直镜上($A_2 B_2 C_2 D_2$ 区域同理可知)。可以将(2)式改为

$$E = \sum_{\delta A' \in A'} \frac{L \cos \alpha' \cos \beta'}{l'^2} \delta A', \quad (3)$$

式中 A' 为准直镜在漫反射板上的投影面积。狭缝表面辐射通量分布

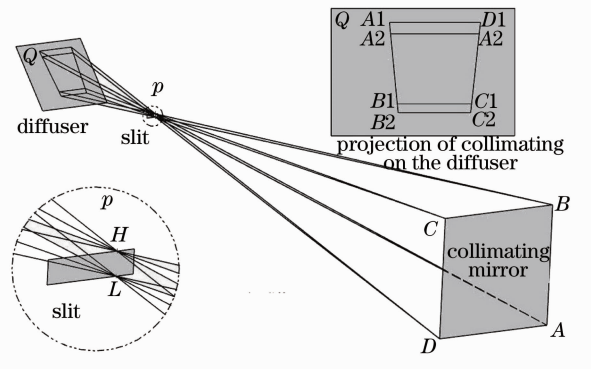


图4 准直镜在漫反射板上的投影

Fig. 4 Projection of collimating lens on reflect diffuser

$$\phi = \iint E dx dy. \quad (4)$$

从图 4 中可以看出, 梯形 $A_1B_1C_1D_1$ 的面积比梯形 $A_2B_2C_2D_2$ 的面积大, 光谱仪入射狭缝上端 H 点的辐照度比狭缝下端 L 点的辐照度高。如图 3 所示, 在入射狭缝上 A 点入射的光线与光轴(虚线)有一个小的夹角 di , 当光线经过准直镜准直后得到的准直光束与光轴的夹角仍是 di 。

对光栅衍射方程(5)式两端进行求导得到(6)式:

$$D(\sin i + \sin \theta) = m\lambda, \quad (5)$$

$$\cos i di = \frac{m}{D} d\lambda, \quad (6)$$

式中 i 为光栅入射角, θ 为衍射角, D 为光栅常数。通过(6)式可知, 当光栅入射角度变化时, 同一衍射角对应的波长也变化。而在光谱仪入射狭缝上不同位置的点发出的光线经准直镜准直后的平行光线与光栅法线夹角不同。即在狭缝上不同高度的点, 在同一衍射角上对应的波长不同。而不同的狭缝宽度对应不同的光谱增宽, 即

$$\delta\lambda = \frac{a_1\gamma + a_2}{f'(d\theta/d\lambda)}, \quad (7)$$

式中 a_1 和 a_2 分别为光谱仪入缝和出缝宽度, γ 为光谱仪的横向放大率。将入射狭缝沿 Y 轴方向平均分成 N 条, 每一条对应的光谱增宽半峰全宽为^[7-8]

$$\delta\lambda_i = \frac{a_1\gamma/N + a_2}{f'(d\theta/d\lambda)}. \quad (8)$$

狭缝上不同高度的衍射波长由(6)式求出, 不同高度对应的辐射通量由(4)式求出。出射狭缝处的光谱带宽的辐射通量分布则由入射狭缝不同高度上的辐射通量相加得到。而谱线经过光谱仪会产生增宽, 其波形符合高斯分布^[9]

$$G_i = \phi_i \exp[-(\lambda - \lambda_i)^2 / C^2], \quad (9)$$

式中 ϕ_i [由(4)式求出] 为入射狭缝上第 i 条对应的辐射通量。当 $\lambda - \lambda_i = \delta\lambda_i$ 时, $G_i = \phi_i/2$ 。光谱仪出射狭缝处的辐射通量曲线为

$$G = \sum_{i=1}^N G_i, \quad (10)$$

对出缝处辐射通量曲线进行高斯拟合得到对应波长。

3 计算过程

下面以 $f=250$ mm 的光栅双单色仪为例, 该单色仪的波长重复性为 0.005 nm。以 296.7283 nm 为例应用上述方法进行计算。

在图 5 中, 漫反射板中心到单色仪入射狭缝的

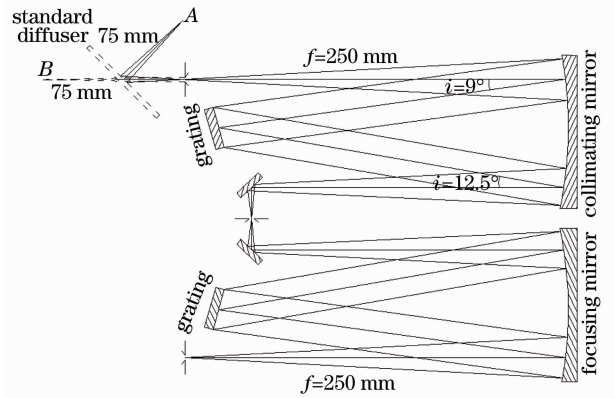


图 5 光栅双单色仪结构

Fig. 5 Structure of double grating monochromator

距离为 66 mm, 入射狭缝大小为 $1.3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 光源距漫反射板的距离为 $R=75$ mm。将漫反射板打开, 将汞灯点光源放置在 A 点处, 将漫反射板分成 $N \times N$ 等份, 其出射辐亮度由(1)式得到:

$$L_{ij} = \frac{IR}{\pi l_{ij}^3}, \quad (11)$$

式中 L_{ij} 为漫反射板第 i 行第 j 列的辐亮度, l_{ij} 为漫反射板第 i 行第 j 列的微元到光源的距离。通过(11)式可以求出整个漫反射板的辐亮度分布情况。

再将入射狭缝分为 m 行 n 列, 通过(4)式得到狭缝上第 ii 行第 jj 列位置的辐射通量为

$$\phi_{ij} = \frac{A_f}{mn} \sum \frac{L'_{ij} \cos \alpha'_{ij} \cos \beta'_{ij}}{l'^2_{ij}}, \quad (12)$$

式中 α'_{ij} 和 β'_{ij} 为狭缝上第 ii 行第 jj 列中心位置与漫反射板上第 i 行第 j 列中心位置的连线分别与狭缝表面法线和漫反射板表面法线的夹角, l'_{ij} 为连线的距离, A_f 为狭缝面积。

$$L'_{ij} = \begin{cases} L_{ij}, & (i, j) \in A_i B_i C_i D_i \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式中 $A_i B_i C_i D_i$ 为经准直镜入射在狭缝上第 i 行第 j 列的微元在漫反射板上的投影区域(如图 3 所示)。利用(11)式计算出狭缝上每个微面元的辐射通量, 然后将每行的辐射通量求和, 得到在狭缝上不同高度的辐射通量 ϕ_n 。为了减少计算量, 把入射狭缝平均分为 65 份, 可以计算出狭缝上不同高度的辐射通量如图 6 所示。

由于实验使用的光栅双单色仪是完全对称的色散相减系统^[10], 所以横向放大率 $\gamma=1$, 入缝和出缝宽度都为 1.3 mm。由(8)~(10)式可以计算出该光栅双单色仪的带宽为 1.04 nm。由(8)式可以算出 $\delta\lambda_i = 0.528$ nm。根据(9)式计算得到 $C=0.6342$, 再应用(10)式求出光谱仪出缝上的辐射通量曲线(如图 7 所

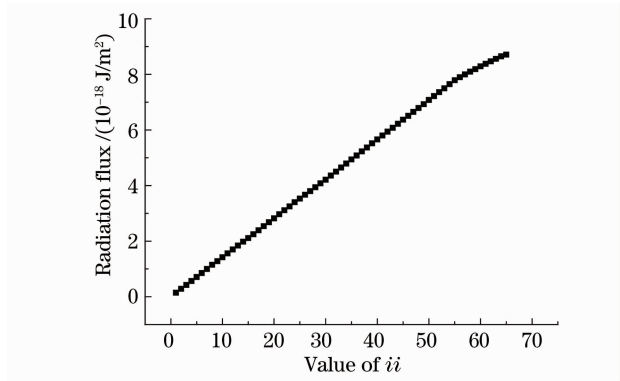


图 6 入射狭缝上不同高度的辐射通量
Fig. 6 Value of radiation flux in different places of entrance slit

示),从而可以得到峰值的半峰全宽中心对应波长为 296.7 nm,比理论波长小 0.0283 nm。

4 实验验证

采用如图 5 所示的波长重复性达到 0.005 nm 的光栅双单色仪进行实验验证。由于受硬件限制,漫反射板位置变化角度只能为 0°和 45°,即移入和移出两种状态。以汞灯 296.7283 nm 和 365.0157 nm 两个特征谱线为例进行光谱定标实验。首先将漫反射板移

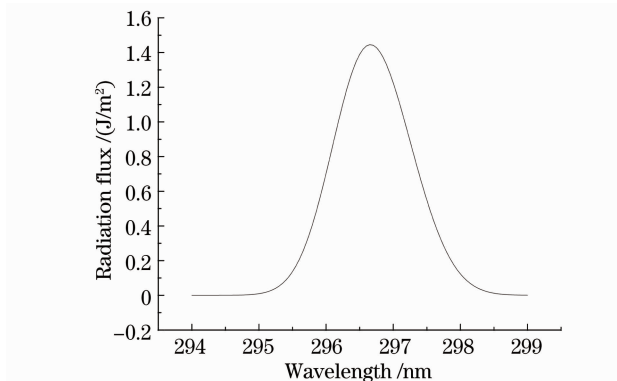
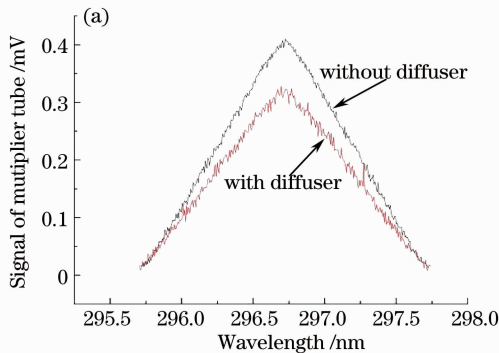


图 7 出缝辐射通量分布曲线

Fig. 7 Distributing curve of radiation flux on exit slit

出,将汞灯放在距漫反射板中心 75 mm 的 B 点直接照射入缝,为了消除角度偏差,在入缝处加一个漫透射板,分别对两个波长进行波长扫描并记录结果。然后将漫反射板移入,将汞灯放在距漫反射板 75 mm 的 A 点,在相同的环境下测量两个谱线。如图 8(a)所示,两种光谱定标方法对于汞灯 296.7283 nm 谱线的测量结果分别为 296.7251 nm(黑线,无漫反射板)和 296.6961 nm(红线,有漫反射板),两次偏差 -0.0290 nm。同理,两种定标方法对 365.0157 nm 谱线得到的测量结果的偏差为 -0.0286 nm。

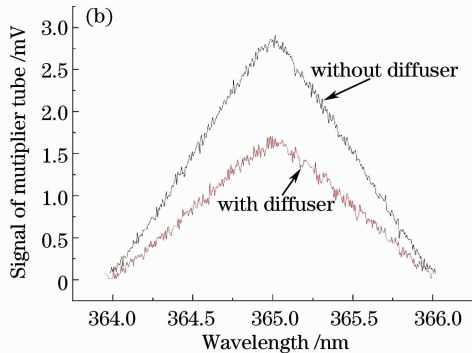


图 8 两种光谱定标方法测量结果。(a) 296.7283 nm; (b) 365.0157 nm

Fig. 8 Results of two ways of wavelength calibration. (a) 296.7283 nm; (b) 365.0157 nm

5 结 论

当点光源垂直照射到狭缝表面上时,狭缝上的辐射通量分布是关于狭缝中心对称的,入射狭缝中心位置的辐射通量最大,两边对称减少。由(6)式可知,上述情况只存在带宽增宽,而不会出现波长差异。因为定标光源是经过倾斜的漫反射板后照射到入射狭缝上,引起入射狭缝表面上的辐射通量分布不均匀,狭缝上靠近光源的一侧辐射通量比另一侧辐射通量大。如图 3 所示,入射狭缝上端的点通过准直镜以后,使光栅入射角减小,对应的波长比实际

波长短,引起波长差异。本实验对点光源照射倾斜漫反射板进行光谱仪器光谱定标的过程做了理论分析,计算得到应用倾斜 45°漫反射板光谱定标引起的波长差异为 -0.0283 nm。最后,以汞灯为光源,通过漫透射板垂直透射和倾斜 45°漫反射板散射两种方式分别对 296.7283 nm 和 365.0157 nm 两个本征谱进行扫描,得到两种方法的实验结果偏差分别为 -0.0290 nm 和 -0.0286 nm。由于漫反射板是按照理想朗伯辐射体进行计算的,所以理论结果与实验结果有差异,需要进一步研究计算,但两者差异不大,基

本吻合。由于光谱仪是一个较为复杂的机构,还存在其他的原因引起波长差异,但通过对理论计算结果和实验结果进行对比,得知倾斜漫反射板是引起波长差异的主要因素。实验结果充分说明了本实验所述理论的正确性,所以在应用漫反射板定标过程中应充分考虑到漫反射板对光谱定标结果的影响。此方法亦可以对漫反射板光谱定标提供修正数据。

参 考 文 献

- 1 Chen Fuchun, Chen Guilin. Characteristics analysis of a PTFE diffuser for onboard calibration of geostationary sensors [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 2(8): 371-375.
陈福春, 陈桂林. 用于地球同步轨道遥感仪器星上定标的漫反射板特性分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 2(8): 371-375.
- 2 Yang Xiaohu, Wang Surong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0101004.
杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0101004.
- 3 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.
李博, 林冠宇, 张明宇, 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.
- 4 Yang Xiaohu, Wang Surong, Huang Yu, *et al.*. Wavelength dependence of the spectral irradiance of standard lamp and bi-reflection distribution function of diffuser based on standard detectors [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 31(6): 0612008.
杨小虎, 王淑荣, 黄煜, 等. 基于标准探测器研究标准灯光谱辐照度和漫反射板双向反射分布函数随波长的变化[J]. 光学学报, 2012, 31(6): 0612008.
- 5 Jia Hui, Li Futian. Application of BaSO₄ diffuser plate in 250~400 nm spectral radiance calibration [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(1): 4-8.
贾辉, 李福田. 硫酸钡漫反射板在 250~400 nm 光谱辐射亮度标定中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(1): 4-8.
- 6 Jin Weiqi, Hu Weijie. The Measurement of Radiation Luminosity and Chrominance [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 6-33.
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 6-33.
- 7 Li Quanchen, Jiang Yuejuan. The Principle of Spectrum Instrument [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999. 190-221.
李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999. 190-221.
- 8 Kou Jieting, Bayanheshig, Tang Yuguo, *et al.*. Optical system design of plane grating double monochromator [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 830-833.
寇婕婷, 巴音贺希格, 唐玉国, 等. 平面光栅双单色仪的光学系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 830-833.
- 9 Li Xin, Zhang Guowei, Xun Lina, *et al.*. Wavelength calibration of shortwave infrared flat spectroradiometer [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 902-905.
李新, 张国伟, 寻丽娜, 等. 短波红外平场光谱仪的光谱定标[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 902-905.
- 10 Wu Guoan. Spectral Instrument Design [M]. Beijing: Science Press, 1978. 399-416.
吴国安. 光谱仪器设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1978. 399-416.

栏目编辑: 何卓铭