

新型宽波段单色输出绝对光谱辐照源

张子辉^{1,2} 王淑荣¹ 黄煜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 随着光学遥感技术的发展, 光谱辐射定标受到越来越多的关注。积分球渐渐成为紫外和可见波段辐射定标的主要工具, 然而积分球存在无法输出单色光、稳定性不够持久等问题。为解决上述问题, 提出一种基于双 Féry 棱镜色散相减结构的光谱辐照源的设计方法。该新型光谱辐照源的光谱范围为 240~2400 nm; 光谱带宽在 350、600、1000 nm 处分别小于 3、9、29 nm。经过光学设计软件 Zemax 设计和仿真, 新型光谱辐照源的均匀度在 $\Phi 50$ mm 范围内小于 1.9%, 在 $\Phi 30$ mm 范围内小于 1.4%, 并且其系统偏振度小于 0.7%。该辐照源可以用来测量探测器和光谱遥感仪器的光谱响应和几何定标。辐照源与起偏器连用可以测量仪器的偏振响应, 具有广泛的实用。

关键词 光谱学; 辐照源; 色散相减; 均匀度; 偏振度

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0514002

New Absolute Spectral Irradiance Source with Wide Band and Monochromatic Light Outputing

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

(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 With the development of optical remote sensing technology, spectral radiometric calibration got more and more attention. Currently, the integrating sphere is the main tool to make radiometric calibration in ultraviolet and visible band. However, the integrating sphere cannot output the monochromatic light, and the stability of the output is not enough. In order to solve these problems, we propose a new method of absolute spectral irradiance source based on double Féry subtraction structure. With the design and simulation of Zemax, the spectral range of the new spectral irradiance source is 240~2400 nm; and the spectral bandwidth at 350, 600, 1000 nm are less than 3, 9, 29 nm respectively; the uniformity of the output is less than 1.9% within $\Phi 50$ mm or 1.4% within $\Phi 30$ mm; the degree of the polarization is less than 0.7% in full aperture. The new irradiance source can be used to measure the spectral response and geometric calibration of the detector or remote sensing instrument in a wide range of spectra. The new radiation source used with polarizers can be used to measure the polarization response of instruments. Which has a wide range of applications.

Key words spectroscopy; radiation source; dispersion subtraction; uniformity; degree of polarization

OCIS codes 120.4640; 220.4830; 120.6200

1 引言

近几十年来, 随着大面积多象元探测器的广泛

应用, 光学遥感技术得到了快速发展。随着遥感技术手段的日益丰富, 大气遥感已进入多载体、宽波段

收稿日期: 2013-10-28; **收到修改稿日期**: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)、中科院碳专题(XDA05040103)

作者简介: 张子辉(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事空间紫外-可见遥感光谱仪设计与辐射定标等方面的研究。

E-mail: zhangzihui123@126.com

导师简介: 王淑荣(1961—), 女, 硕士, 研究员, 主要从事空间紫外光学遥感仪器总体设计及辐射定标等方面的研究。

E-mail: srwang@ciomp.ac.cn(通信联系人)

探测时代。光谱遥感测量仪器起着至关重要的作用,具有代表性的有全球臭氧监测实验装置(GOME)^[1],扫描成像大气吸收光谱仪(SCIAMACHY)^[2]和臭氧监测装置(OMI)等。天基大气遥感发展至今,已完成从低分辨率到高分辨率的转变。为了精确获得全球范围内大气密度、臭氧、气溶胶等的总量和垂直分布信息,不仅要求较高的空间分辨率,也越来越关注辐射分辨率^[3-4]。因此需要对探测器和遥感仪器的光谱响应、辐射响应进行定标来定量分析其光谱分辨率,以便在反演过程中对测量数据进行修正。辐照定标是确定输入和输出之间的联系,所以精确稳定的光源是辐照定标的必备条件之一。在紫外、可见和近红外波段,由于黑体温度要求太高,因此积分球辐射源成为各类光谱辐射测量仪器辐射定标的主要设备。积分球能够提供高稳定性、高均匀性的漫反射光源,但是积分球的反射波段受到反射材料和涂层厚度的影响,并且应用一段时间后会 出现涂层变色、灰尘沉积,在紫外波段出现荧光效应,影响辐照源的稳定性,增加了积分球的使用成本^[5]。同时,光源能量利用率低,光源需要制冷,增加积分球制作成本。本文采用双 F ery 棱镜结构设计新型绝对辐射源,能够输出单色、低偏振、均匀的平行光,可用于测量光谱遥感仪器和探测器的光谱响应、偏振响应^[6]和几何定标。

2 F ery 棱镜原理

1911年,C F ery等^[7]将普通棱镜单色仪的分光棱镜的平面改成球面,其中后表面镀反射膜,设计出由单片棱镜组成的单色仪。单个 F ery 棱镜除了分光外,还具有准直和成像功能,这样大大减少了单色仪的体积和重量,并且加工、装校简单。F ery 棱镜的工作原理类似罗兰凹面光栅,设计原理如图1所示。图1中圆为棱镜前表面 S₁ 的罗兰圆,主波长光线从罗兰圆上任意一点 C 发出,以近似相同的入射角 i 照射到 S₁ 的 P 和 Q 两点上。折射率公式为

$$\sin i = n \sin \theta. \quad (1)$$

根据(1)式得到 C 点发出光线 CP 和 CQ 经折射率 n 的材料折射后的折射角 θ。将 P 和 Q 两点的折射光反向延长聚焦到 B 点,根据几何原理,B 点正好位于 S₁ 面的罗兰圆上。以 B 点为曲率中心,画曲面 S₂。S₂ 为反射面,根据光线可逆性,折射光线 PM 和 QN 经 S₂ 反射后又分别回到 P 和 Q 两点,再经过折射,两条光线又汇聚到 C 点。当大于或小于主波长的光线从 C 点出射,由于融石英对应不同的波长的折

射率不同,所以不同波长经过 F ery 棱镜后聚焦到 C 点的两端。在 F ery 棱镜应用过程中,入射光的真实入射角度比图 1 中的 i 角度大,这样使得入射光与出射光能够完全分开,便于采集。

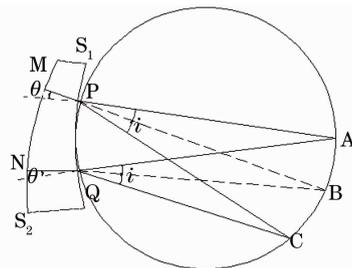


图 1 F ery 棱镜工作原理

Fig. 1 Principle of F ery prism

3 光学系统设计

该新型光谱辐照源为了达到定标实验的要求,其指标要求和解决方法为:输出光要求低偏振,采用棱镜作为分光元件;输出均匀单色光,所以采用色散相减的单色仪结构;单色仪的光谱范围为 240~2400 nm,所用材料均为融石英^[8]。综上所述,考虑到光学系统的简洁性,采用双 F ery 色散相减结构进行设计,其具体要求如下:

光谱范围:240~2400 nm

光谱带宽: $\lambda=350 \text{ nm}$ $\Delta\lambda=3 \text{ nm}$

$\lambda=600 \text{ nm}$ $\Delta\lambda=9 \text{ nm}$

$\lambda=1000 \text{ nm}$ $\Delta\lambda=29 \text{ nm}$

输出光束:口径 $\Phi=50 \text{ mm}$

均匀性:在 $\Phi=30 \text{ mm}$ 时小于 2%

在 $\Phi=50 \text{ mm}$ 时小于 3%

偏振度:小于等于 1%

3.1 聚光系统

该系统物方数值孔径为 0.1,以单片球面镜作为聚光镜。而新型辐照源的光源选用 300 W 氙灯和 250 W 钨灯混合光源,光源本身存在偏振,为了实现偏振度小于 2%,在聚光镜前加上两组石英消偏器^[9-10]。消偏器的消偏效果在平行光中最好,所用消偏器前面加单透镜使光束接近准直。聚光系

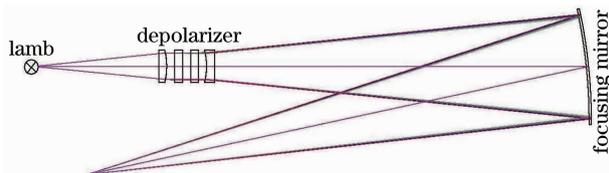


图 2 聚光系统

Fig. 2 Condenser system

统如图 2 所示。

3.2 分光系统

辐照源的分光系统采用单个 F ery 棱镜作为分光元件。聚光系统的像面尺寸为 1.4 mm × 0.014 mm, 将 F ery 单色仪的入射狭缝大小设计为 1.6 mm × 0.02 mm。将初始结构带入 Zemax 软件进行优化, 优化结果如图 3 所示。优化结束后 F ery 单色仪弧矢方向的点列图均方根值(RMS)(如图 4 所示)在各个视场均小于 22 μm。从图 3 可以看出, 会聚光经过 F ery 单色仪分光后, 单色光汇聚到 F ery 单色仪的像面上, 将出射狭缝沿像面移动使不同波长的单色光进入匀光系统, 使得新型辐照源最后输出单色光。

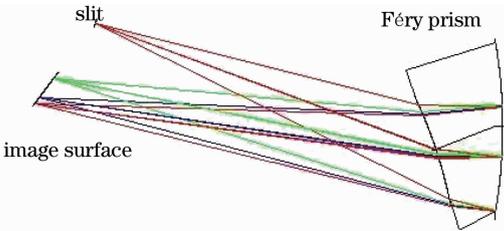


图 3 F ery 单色仪结构

Fig. 3 Structure of F ery monochromator

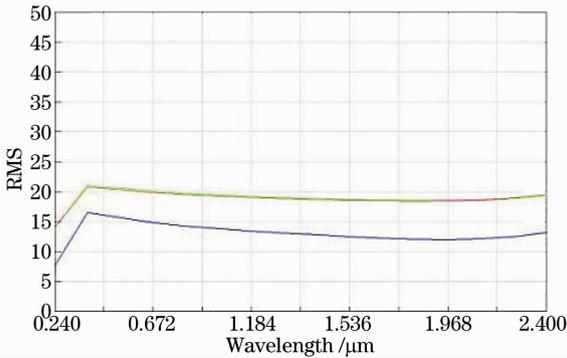


图 4 弧矢方向点列图 RMS 与波长关系

Fig. 4 RMS of spot diagram at sagittal direction versus wavelength

3.3 匀光系统

匀光系统的作用是将单色仪色散的单色光重新汇聚到相同的位置, 且经过第二片 F ery 棱镜后光线的传播轨迹基本相同。系统总线色散率 $dI/d\lambda$ 可表示为

$$\frac{dI}{d\lambda} = f'_1 \left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right)_1 \gamma_2 - f'_2 \left(\frac{d\theta}{d\lambda} \right)_2, \quad (2)$$

式中 f'_1 和 f'_2 分别为两片 F ery 棱镜的像方焦距, $(d\theta/d\lambda)_1$ 和 $(d\theta/d\lambda)_2$ 分别为两片 F ery 棱镜的角分辨率, γ_2 为第二 F ery 棱镜的横向放大率。利用(2)式, 令 $dI/d\lambda = 0$, 计算出 f'_2 和 $(d\theta/d\lambda)_2$ 的值, 即采用色散相减^[11]的方法来消除 F ery 单色仪像面上的色差。如图 5 所示, 以中心视场为例, 同一视场的入射光经第一片色散后, 各个视场的光线是相对发散的, 需要一个正透镜将经过第一片 F ery 棱镜的不同视场的光线重新汇聚。从 A 点发出经 B、C 和 D 三点的光线经过正透镜汇聚到 E 点, 三条光线通过第二片 F ery 棱镜后从新汇聚成一束光线。这就要求 240、1000、2400 nm 三个波长相对第二片 F ery 棱镜前表面的入射角度分别为 i_1 、 i_2 和 i_3 , 经过前表面后的折射角同为 θ 。同时, F ery 单色仪会产生较大的象散, 在其后面加正透镜会使象散进一步增大。将正透镜放在 F ery 单色仪子午方向汇聚的像面(图 5 中正透镜处)上, 这样正透镜对象散的影响减到最小。此时, 正透镜距第一片 F ery 棱镜的距离 $l_{AC} = 264.952$ mm, 与主波长的夹角为 $\alpha = 21.217^\circ$ 。为了减少能量损失, 两片 F ery 棱镜的中心视场入射角都为前表面的布儒斯特角 i' 入射。布儒斯特角 i' 表示为

$$i' = \tan^{-1}(n). \quad (3)$$

当 $\lambda = 1000$ nm 时, 融石英的折射率 $n = 1.4504$, 由(3)式求出对应的布儒斯特角 $i_2 = 55.415^\circ$, 根据(1)式求出 $\theta = 34.584^\circ$ 。当波长等于 240 nm 和 2400 nm 时, 融石英的折射率分别为 1.5133 和 1.4316, 根据

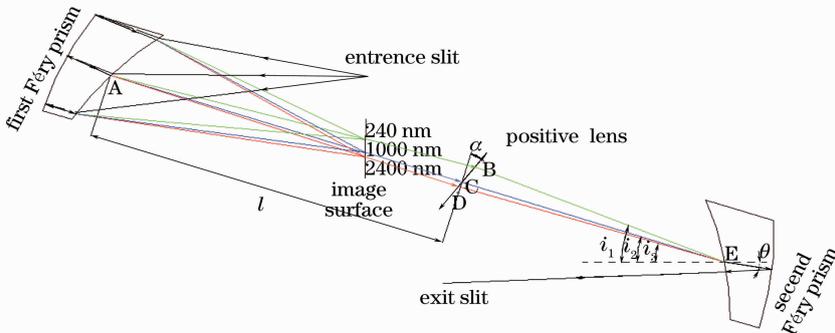


图 5 消色差原理图

Fig. 5 Schematic diagram of achromatic

(3)式可以得到 $i_1 = 59.2033^\circ$ 、 $i_3 = 54.3503^\circ$ 。由图 5 可知, B 和 C 两点间的距离为 11.69 mm, 根据几何关系计算出 C 到 E 两点间的距离为 168.83 mm。高斯公式表示为

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (4)$$

根据高斯公式(4)式计算出正透镜的焦距为 436.94 mm。应用上述方法, 光线经过第二片 Féry 棱镜

棱镜后, 系统的色差基本消除^[12]。

新型辐射源的结构不是对称的, 存在较大的象散, 在第二片 Féry 棱镜后面放置一片柱面透镜来消象散。同时, 将柱面透镜旋转一定角度, 校正球差。最后, 在第二片 Féry 棱镜的出射狭缝后面加上球面反射镜, 使系统出射平行光。经过优化后得到新型光谱辐照源的结构图如图 6 所示。

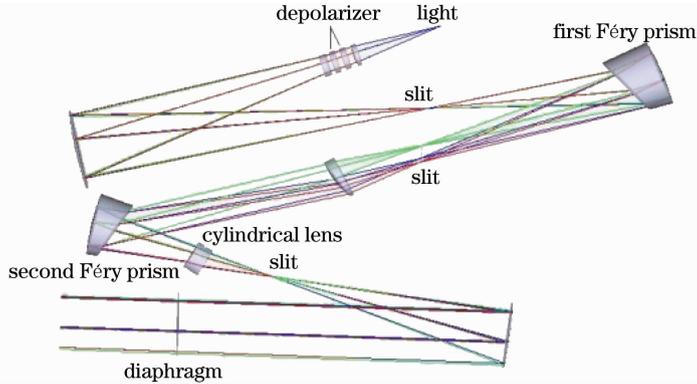


图 6 双 Féry 棱镜光谱辐照源结构图

Fig. 6 Structure of spectral irradiation source based on two Féry prisms

4 结果分析

对于新型辐照源而言, 辐照均匀性和偏振度是非常重要的指标。为了满足实际定标实验的要求, 均匀度应该小于 3%, 偏振度小于 1%。如图 7 所示, 在不考虑出射光阑的情况下, 应用 Zemax 软件计算光学系统的相对亮度。在距离准直镜 300 mm 处的均匀度如图 7(a)所示, 在 $\Phi 50$ mm 范围内相对亮度的最大偏差为 1.9%, 在 $\Phi 30$ mm 范围内相对

亮度的最大偏差为 1.4%。同时, 对实验室积分均匀性进行检测^[13]。当积分球同时开启钨灯和氙灯时, 得到积分球开口处 22 个点的采样亮度, 对得到数据进行归一化处理[如图 7(b)所示], 得到积分球开口处的亮度的最大偏差为 3.1%。通过与积分球相对亮度对比, 新型辐照源的均匀性优于积分球, 满足辐射定标的要求。

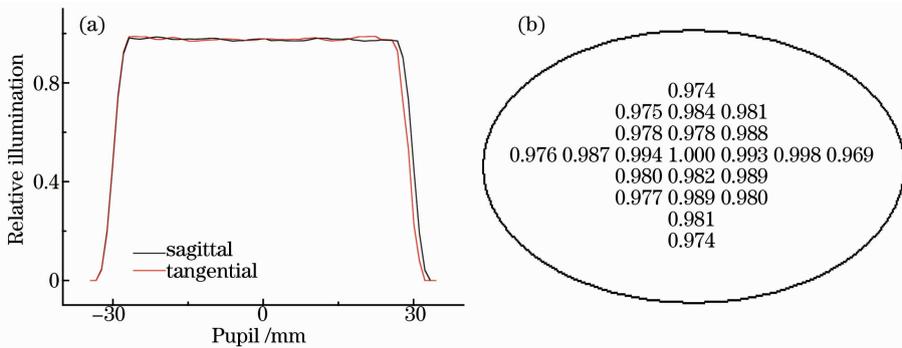


图 7 光谱辐照源相对亮度分布。(a) 新型辐射源; (b) 积分球

Fig. 7 Relative illumination distribution of spectral irradiation source. (a) New irradiance source; (b) integrating sphere

在图 6 中, 聚焦系统前面有两组石英消偏器, 消除了光源对光学系统偏振的影响, 系统的偏振度 P 表示为

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{I \cdot (t_{\max} - t_{\min})}{I \cdot (t_{\max} + t_{\min})} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} + t_{\min}} \quad (5)$$

式中 I 为光源消偏后的光强, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为像面上最大和最小光强, t_{\max} 和 t_{\min} 分别为光学系统最大和最小透过率, 即子午方向和弧矢方向系统透过率。通过 Zemax 软件计算出整个光学系统在子午方向和弧矢方向两个方向的透过率, 如图 8 所示。

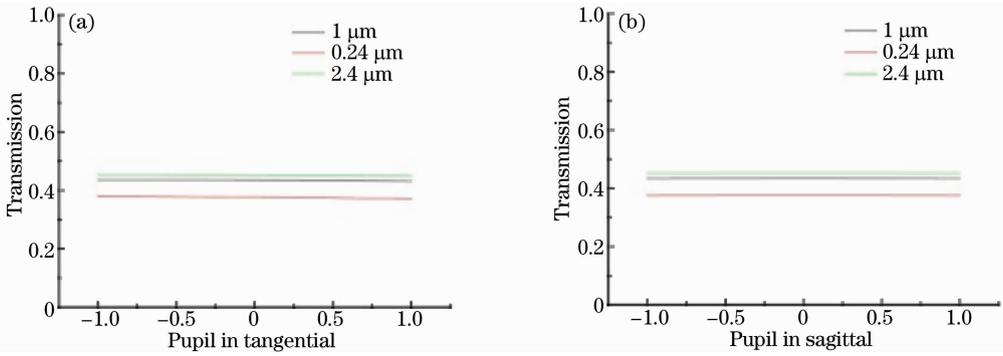


图8 光学系统透过率。(a) 子午方向；(b) 弧矢方向

Fig. 8 Transmission of optical system. (a) Tangential; (b) sagittal

通过(5)式可以计算出新型光谱辐照源光学系统的偏振度如图9所示。从图中可知,光学系统的偏振度均小于0.7%。

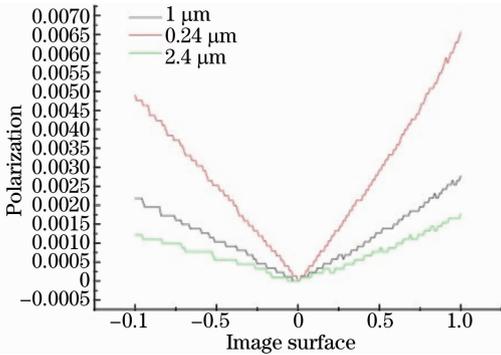


图9 光学系统偏振度

Fig. 9 Polarization of optical system

5 结 论

设计了一种光谱范围为240~2400 nm的新型绝对光谱辐照源。系统通过Féry棱镜进行分光,光谱分辨率分别小于3 nm($\lambda=350$ nm)、9 nm($\lambda=600$ nm)和29 nm($\lambda=1000$ nm),移动第一片Féry棱镜后的出射狭缝使不同的单色光进入匀光系统。采用色散相减的设计方法,利用第二个Féry棱镜和一个正透镜消除分光系统的色差,应用柱面镜消除系统象散,并且将柱面镜倾斜使像面光线均匀。最后通过一个球面镜准直,得到平行光。经过Zemax软件计算,可知新型光谱辐照源的均匀度在 $\Phi 50$ mm范围内相小于1.9%;在 $\Phi 30$ mm范围内小于1.4%;光学系统偏振度小于0.7%。上述可知,新型光谱辐照源的各项指标满足设计要求,可以输出均匀、低偏振的平行单色光,满足指标和实际应用要求。并且,该新型辐照源设计除一个柱面镜外,全是球面,具有加工方便、结构简单、装校容易、价格低廉等优点,具有广泛的应用前景。同时,积分

球具有较好的郎伯特性和低偏振特性,这是很多光源无法比拟的。新型光谱辐照源的单色性、均匀性和稳点性又是积分球无法达到的。同时,新型辐照源出射光几乎是准直光线,对于有视场要求的光学遥感器的辐射定标有一定局限性。将新型辐照源与积分球联合应用,使得定标实验更为方便,实验结果更为精确。

参 考 文 献

- 1 T M Kamperman, A P H Goede, C J T Günsing, *et al.*. GOME instrument simulation[C]. SPIE, 1992, 1715: 562-572.
- 2 R Mager, W Fricke, J Burrows, *et al.*. SCIAMACHY: a new generation of hyperspectral remote sensing instrument[C]. SPIE, 1999, 3106: 84-94.
- 3 Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1186-1190.
任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.
- 4 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Hongzhuang, *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.
- 5 Zhang Fang, Gao Jiaobo, Wang Jun, *et al.*. Model and analysis of spectral irradiance of integration sphere[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 709-713.
张芳, 高教波, 王军, 等. 积分球光谱辐射度建模与实验分析[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 709-713.
- 6 Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828003.
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828003.
- 7 C Féry. A prism with curved faces for spectrograph or spectroscope[J]. Astrophysical Journal, 1911, 34: 79-87.
- 8 Shan Yaoying, Zhao Jiangshan, Li Hui, *et al.*. Application study on fused silica prism in excimer laser spectrum control[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402008.
单耀莹, 赵江山, 李慧, 等. 熔石英棱镜在准分子激光光谱控制系统中的应用研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402008.
- 9 Wang Rui, Wang Shurong, Li Futian, *et al.*. Research on the depolarizer performance of the space-borne grating spectrometer

- [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(1): 89-92.
- 王 锐, 王淑荣, 李福田, 等. 星载光栅光谱仪消偏器性能研究[J]. *光学技术*, 2009, 35(1): 89-92.
- 10 Yin Yafang. Study on Crystal-Type Depolarizer and Polarization Mode Dispersion Emulator[D]. Beijing: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- 阴亚芳. 晶体型消偏器及偏振模色散模拟器研究[D]. 北京: 中国科学院国家授时中心, 2006.
- 11 Wu Guoan. Spectrum Instrument[M]. Beijing: Science Press, 1978. 218-221.
- 吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京: 科学出版社, 1978. 218-221.
- 12 C Smorenburg, A L G Van Valkenburg, H G C Werij. Absolute radiometric calibration facility[C]. *SPIE*, 1947, 2583: 166-177.
- 13 Xu Xiaofeng, Wang Ji, Zhang Liming, *et al.*. Study on uniformity measurement of space integrating sphere[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(5): 817-820.
- 徐晓峰, 王 冀, 张黎明, 等. 航天积分球面均匀性检测的研究[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(5): 817-820.

栏目编辑: 韩 峰