

改善光纤照射装置均匀性的实验研究

曾珊珊¹ 刘 建² 卢利根¹ 张保洲^{1,3}

(¹ 北京师范大学天文系, 北京 100875; ² 北京师范大学物理系, 北京 100875)

³ 北京师范大学物理系应用光学北京市重点实验室, 北京 100875

摘要 针对目前利用光纤和复眼透镜获得紫外辐照均匀性较差的现象, 提出添加光学积分棒和均匀磨砂石英片改善光纤照射装置均匀性的方法, 实测表明改善效果十分显著。选取紫外辐照中的紫外线 A(UVA)波段作为测量对象, 光纤入射端添加光学积分棒后, 80 mm×80 mm 辐照面均匀性由原来的±8.9%提高到±3.5%, 中心 30 mm×30 mm 区域内均匀性由±3.3%提高到±0.7%。在此基础上, 再在复眼透镜入射端添加磨砂石英片后, 中心 30 mm×30 mm 区域内均匀性可达±0.6%, 且原先偏心分布的紫外辐照呈现出中心轴对称分布。另外还提出了提高紫外辐照度的同时改善辐照均匀性的多光源叠加法, 结果表明, 利用两个光纤照射装置叠加辐照, 80 mm×80 mm 的辐照面上辐照度及均匀性分别约为 30 mW/cm² 和±3.9%; 利用三光源叠加经复眼透镜投射, 直径为 80 mm 的辐照面内辐照度和均匀性分别约为 60 mW/cm² 和±2.4%。

关键词 光纤光学; 强紫外光源; 光纤照射装置; 均匀性; 辐照度

中图分类号 O432.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0422004

Experimental Research on Improving Uniformity of Fiber-Optical Irradiation Device

Zeng Shanshan¹ Liu Jian² Lu Ligen¹ Zhang Baozhou^{1,3}

¹ Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

³ Beijing Key Laboratory of Applied Optics, Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract Considering that the irradiance distribution obtained by using optical fiber and fly-eye lens is of poor uniformity, methods of adding integrator rods and frosted glasses to improve the uniformity of optical fiber irradiation device are proposed. The measurement results indicate that the effect is very remarkable. The ultraviolet A (UVA) band of ultraviolet radiation is measured. The uniformity is raised from ±8.9% to ±3.5% in the irradiated area of 80 mm×80 mm after an integrator rod is added at the input end of the optical fiber. And the uniformity of the central area of 30 mm×30 mm is raised from ±3.3% to ±0.7%. On that basis, after the frosted glass is added at the input end of the fly-eye lens, its uniformity can reach ±0.6% in the central area of 30 mm×30 mm, and the UV irradiance which is eccentrically distributed becomes axially symmetrically distributed. The multiple light sources superposing methods are also put forward to improve uniformity of light source while higher irradiance is obtained at the same time. The results indicate that the irradiance and the uniformity can reach about 30 mW/cm² and ±3.9% respectively in the irradiated area of 80 mm×80 mm by using two optical fiber irradiation devices to superpose irradiation. Using the methods of superposition of three light sources and casted by the fly-eye lens, the irradiance and the uniformity are about 60 mW/cm² and ±2.4% respectively in the irradiated area whose diameter is 80 mm.

Key words fiber optics; strong ultraviolet light source; optical fiber irradiation device; uniformity; irradiance

OCIS codes 220.2945; 120.5240; 120.4570; 150.1488

收稿日期: 2012-10-26; 收到修改稿日期: 2012-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(10973005)资助课题。

作者简介: 曾珊珊(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光辐射计量和相关仪器方面的研究。

E-mail: zengshan9999@163.com

导师简介: 张保洲(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光辐射探测技术方面的研究。

E-mail: zhangbzh@bnu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

随着科学和工业的发展,人们对紫外光源和紫外辐射测量仪器的需求日益增长,因此对紫外辐射测量仪器的标定精度也提出了更高的要求^[1,2]。在稳定紫外光源辐照下与标准探测器对比来标定紫外辐射测量仪器是实现量值传递的基本方法并被普遍应用于辐射标定工作当中^[1~5]。但是由于诸多原因紫外波段的辐射标定工作中存在较大的不确定度,辐照度的不均匀分布是其中一个重要因素^[6]。当被标探测器与标准探测器的感辐射面积不等或者响应度分布不均匀时,辐照均匀性将很大程度上影响标定精度^[7]。

在紫外球泡灯一定距离处直接获得的辐照度较为均匀分布,但是其强度通常只能达到 $10^2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的量级,而实际的标定工作中经常要求紫外辐照的强度达到毫瓦每平方米的量级,因此采用紫外球泡灯不能够满足实际要求。有时采用聚光的办法来提高标定面的辐照度,但是这样得到的标定面辐照度分布均匀性很差,当待标定探测器与标准探测器的光敏面面积不相等时就会对标定的准确性产生较大的影响。解决这个问题目前最常见的办法是将会聚的紫外辐射通过光纤导入复眼透镜,进而在标定面形成较为均匀地强辐照度。然而利用该方法依然不能达到目前紫外标定时对均匀性的要求。所以需要找到一种方法解决当前对均匀强紫外辐照的迫切需求。

本文在利用光纤和复眼透镜形成强紫外辐照的基础上,提出了在光纤入射端添加光学积分棒和在复眼透镜入射端添加均匀磨砂石英片的单源均匀性改善方法;给出了具有更高紫外辐照强度的均匀辐照的多光源叠加法;将紫外线 A(UVA)波段的紫外辐照度分布作为研究对象对改善结果进行了实验验证。

2 单光源的均匀性改善

利用在光纤入射端添加光学积分棒和在复眼透镜入射端添加均匀磨砂石英片的方法改善光纤照射装置的均匀性,其均匀化的过程主要包括以下几个方面:1)利用光学积分棒来提高光纤入射端光束的均匀性;2)通过随机排列的光纤对入射光束实现再次均匀化;3)利用均匀磨砂石英片对光纤出射的光束进行进一步的均匀性改善;4)最终利用复眼透镜在被测面形成较为均匀的辐照。

实验分为三个部分:1)利用紫外辐射照度计对常规的光纤照射装置形成的紫外辐照面的均匀性进

行测试;2)在石英光纤的入射口处放置光学积分棒后,用同样方式实测光纤照射装置形成的紫外辐照面的均匀性;3)在复眼透镜入射端加一块均匀的磨砂石英片后,用同样方式实测光纤照射装置形成的紫外辐照面的辐照度分布。

测试过程中将紫外辐照计探头安装在光源下方的二维平台上,通过移动紫外辐照计探头测得被测面上的辐照度分布,辐照面上的均匀度为

$$\Delta E = \pm \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \right). \quad (1)$$

实验中利用 MUA-165 紫外光纤辐照装置提供全波段的紫外辐射。由于实际应用中 UVA 波段高强度辐射应用较多,因此在实验中选取辐照面上 UVA 波段的辐照度分布作为测量对象。测量仪器为北京师范大学光电仪器厂生产的单通道 UVA 紫外辐照计,其测量波长范围为 315~400 nm,峰值波长为 365 nm,测量稳定性误差为 0.2%。此外实验中所用光纤均为双包层石英光纤,数值孔径为 0.22,中心通光部分直径为 7.5 mm。

2.1 复眼透镜在光纤辐照装置中的作用

用在辐照系统中的复眼透镜是一种能提高系统辐射利用率及辐照均匀性的光学器件^[8~11]。实验中所用复眼透镜与传统的复眼透镜不同,其内部用来对入射光实现均匀化的光学元件为方形光积分棒,而非微型透镜阵列,因此也称作棒透镜。积分棒光束均匀化主要依靠对光束的分割和叠加来实现^[12]。将复眼透镜置于光源的后方,光线进入其内部的光学积分棒经多次反射后到达出射端面,进行叠加,形成较为均匀的辐照,后经出射透镜组成像在被测面上。

复眼透镜的工作原理如图 1 所示。光线进入积分棒后,由于内壁的反射,入射光束被分隔成若干个小区域,这些小区域可以看作位于积分棒入射端面的若干个虚点光源(如图中的 S_1 、 S_0)。因此积分棒入射端面每一点的光束都被分割成许多细光束,即在同一平面上形成许多虚点光源,这些虚点光源所代表的光束均匀的投射到相同的区域,并进行叠加,实现光积分,形成均匀的辐照^[13,14]。图 2 为复眼透

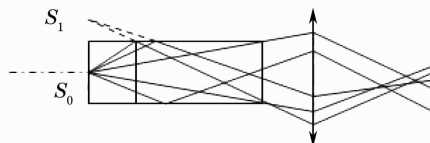


图 1 复眼透镜工作原理

Fig. 1 Working principle of fly-eye lens

镜的设计图,其中(1)为出射透镜组,(2)为方形积分棒,(3)为光纤导入孔。用来实现均匀化的方形积分棒由石英材料做成,截面大小为 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}$,长为 25 mm ,出射透镜组的合成焦距为 35 mm 。

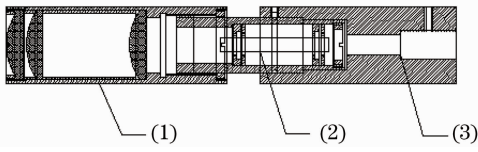


图2 复眼透镜设计图

Fig. 2 Design drawing of fly-eye lens

图3是改善前的实验装置结构图,其中(1)为紫外辐照装置,(2)为石英光纤,(3)为复眼透镜,(4)为紫外辐照度计探头。紫外辐射由一根石英光纤导入复眼透镜,然后经透镜成像于被测面。

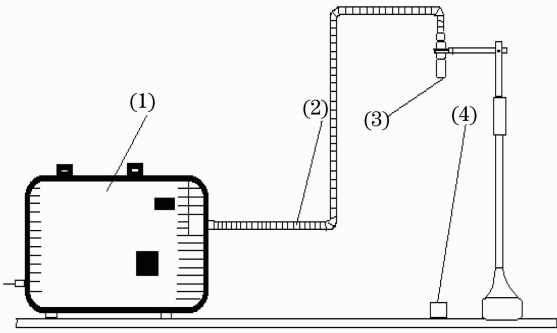


图3 改善前实验装置结构示意图

Fig. 3 Schematic of the unimproved experimental device

2.2 在光纤入射端加光学积分棒

将光学积分棒置于光纤入射端可以提高光纤入射端光源的均匀性,从而达到改善紫外辐照均匀性的目的。这里所用的光学积分棒为实心的圆柱形石英棒。积分棒的长度如果过短将影响均匀化的程度,但积分如果太长,将影响辐射传递效率。实验中所用积分棒长为 20 mm ,截面直径为 8.5 mm 。实验装置图如图4所示,其中(1)为紫外辐照装置,(2)为积分棒,(3)为石英光纤,(4)为复眼透镜,(5)为紫

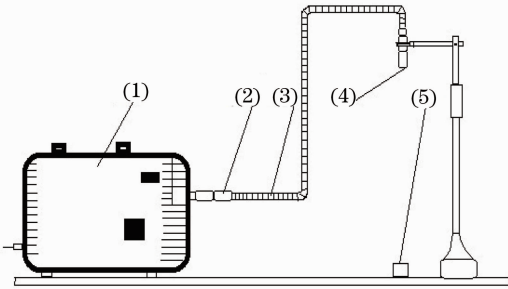


图4 加光学积分棒后实验装置结构示意图

Fig. 4 Schematic of the device with optical integrator rod added

外辐照度计探头。

2.3 在光纤出射端加均匀磨砂石英片

磨砂石英片是用普通平板石英玻璃经机械喷砂、手工研磨或氢氟酸溶蚀等方法将表面处理成均匀毛面制成。由于表面粗糙,当有光线照射到表面时,就会发生漫射现象,当磨砂石英片表面均匀时,光源通过磨砂石英片后呈现朗伯分布。在复眼透镜入射端加入均匀磨砂石英片可以增大进入复眼透镜的入射光线的角度,从而得到更多的虚点光源,在辐照面上实现光积分,得到更好的具有轴对称分布的均匀辐照。图5给出了在复眼透镜入射端加入磨砂石英片之后的实验装置图,其中(1)为紫外辐照装置,(2)为积分棒,(3)为石英光纤,(4)为磨砂石英片,(5)为复眼透镜,(6)为紫外辐照计探头。石英片为双面磨砂,直径为 8.5 mm ,厚为 1 mm 。

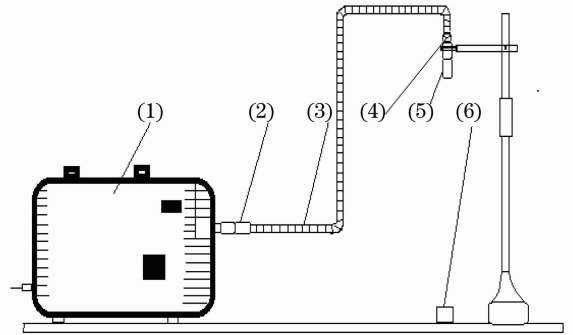


图5 加积分棒及磨砂石英片后实验装置结构示意图

Fig. 5 Schematic of the device with integrator rod and frosted quartz glass added

2.4 测试结果及数据分析

开启紫外辐照装置的电源,充分预热稳定后通过调节透镜物距,使复眼透镜的出射辐照形成 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的辐照面。通过二维移动台移动紫外辐照计探头以 10 mm 的间隔测量各点辐照度。并利用(1)式评价被测面的辐照度分布均匀性。

图6给出了MUA-165紫外光纤辐照装置(光路中仅有石英光纤和复眼透镜)的辐照面均匀性分布曲面图;图7为在石英光纤的入射口加入光学积分棒后的测试结果;图8为进一步在复眼透镜入口处加均匀磨砂石英片后的辐照面均匀性分布曲面图。

由图6~8可以看出,在光纤入射端引入光学积分棒后,辐照面均匀性分布有了很大的改善,但是辐照度峰值区域没有处于辐照面的中心;进一步在复眼透镜入射端放置均匀的磨砂石英片,不但辐照面均匀性较高且分布呈现较好的轴对称性。

通过计算可以得到辐照面的平均辐照度和分布均

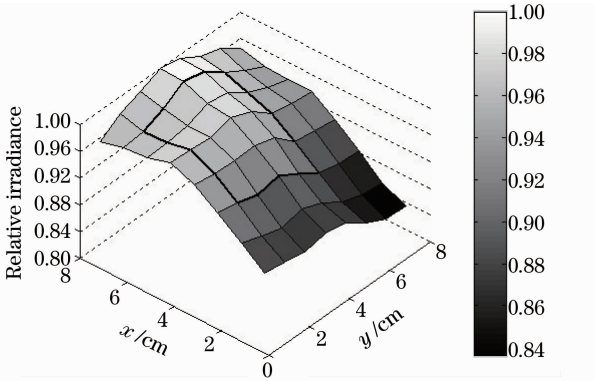


图 6 改善前辐照面均匀性分布曲面图
Fig. 6 Curved surface of spatial uniformity of irradiation before improvement

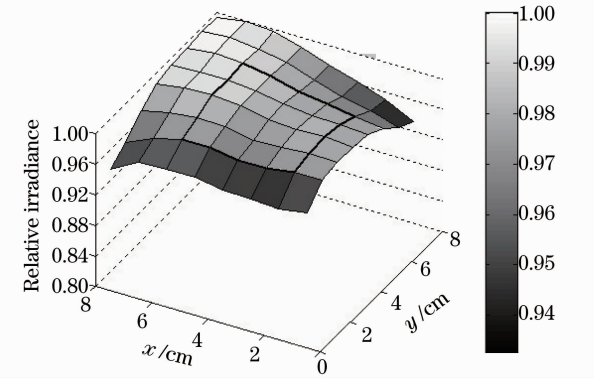


图 7 加积分棒后辐照面均匀性分布曲面图
Fig. 7 Curved surface of spatial uniformity of irradiation after integrator rod is added

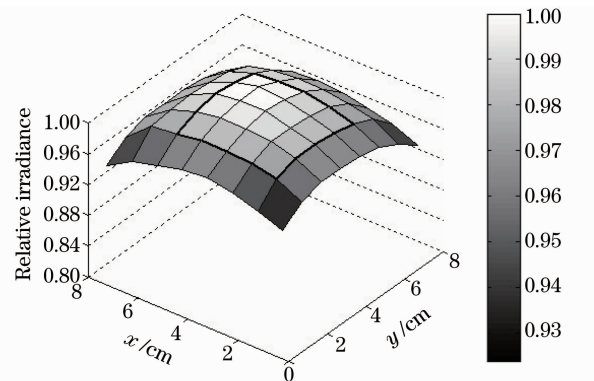


图 8 加入积分棒及磨砂石英片后的辐照面均匀性分布曲面图
Fig. 8 Curved surface of spatial uniformity of irradiation with integrator rod and frosted quartz glass are added

UVA 波段的平均辐照度以及分布均匀性,如表 1 所示。

可以看出,利用在光纤的入射端引入光学积分棒及在复眼透镜入射端引入均匀磨砂石英片均可显著改善紫外光源辐射的均匀性。待测辐照面上的均匀性均可控制在 $\pm 4\%$ 以内,而且在中间一定区域内可达 $\pm 1\%$ 。采用均匀磨砂石英片以后还可以将辐照峰值区域调在辐照面的中心,并且辐照度的分布呈现出轴对称性。尽管由于磨砂石英片对光的散射和吸收作用,辐照度约衰减为原来的 30%,但依然可以达到 3 mW/cm^2 以上,可以满足紫外常规标定对辐照强度的要求。

表 1 紫外辐照面的平均辐照度和分布均匀性
Table 1 Average irradiance and distribution uniformity of ultraviolet irradiance

Experimental conditions	Exposure area /mm ²	Average irradiance / (mW/cm ²)	Uniformity / %
Unimproved	30×30	14.69	±3.3
	50×50	14.53	±5.6
	80×80	14.18	±8.9
Integrator rod added	30×30	13.12	±0.7
	50×50	13.10	±1.4
	80×80	13.03	±3.5
	Integrator rod and frosted glass added	30×30	3.53
	50×50	3.51	±1.3
	80×80	3.44	±3.9

3 多光源叠加法改善紫外光源辐照均匀性

由表 1 可以看出,光路中引入光学积分棒和磨砂石英片都会对辐照度造成一定程度的衰减,当需要特别强的紫外辐照度时,为减少光学元件对辐照度的衰减,又考虑了利用多源相互补偿的方式来改善紫外辐照度均匀性的方法。

3.1 双光源叠加法

双光源叠加法是利用同结构具有大体相当辐照分布的两套光纤照射装置,将其中一束投射出的辐照束旋转 180° 后与另外一束投射出的辐照束叠加形成更均匀的辐照面。利用实验中测得的第一组数据进行数据模拟叠加,图 9 给出了待测辐照面上的叠加辐照度分布。辐照面的 UVA 波段的平均紫外辐照度和分布均匀性如表 2 所示。

均匀性,由于探测器光敏面的直径通常远小于 30 mm,因此我们还给出了三种状态下 80 mm×80 mm 的辐照面中心 30 mm×30 mm 以及 50 mm×50 mm 区域内

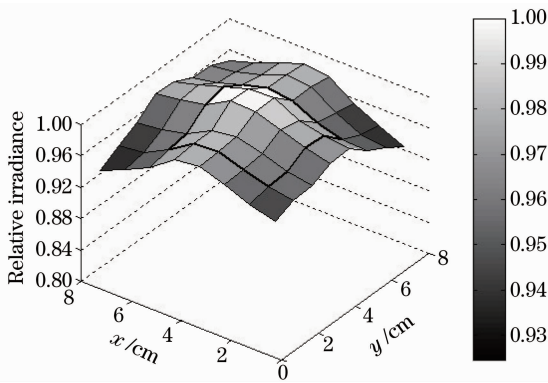


图9 双光源叠加法所得辐照面均匀性分布曲面图

Fig. 9 Curved surface of spatial uniformity of irradiation using superposition of method two light sources

表2 双光源叠加法得到紫外辐照面平均辐照度和分布均匀性

Table 2 Average irradiance and uniformity of ultraviolet irradiance using superposition method of two light sources

Experimental conditions	Exposure area /mm ²	Average irradiance/(mW/cm ²)	Uniformity / %
Superposition of two light source	30×30	28.91	±1.3
	50×50	28.60	±2.3
	80×80	28.25	±3.9

3.2 三光源叠加法

三光源叠加法是利用一根三合一异型石英光纤,将三个光源射入的紫外辐射合到一束光纤内,然后经复眼透镜成像为直径为80 mm的辐照面,获得均匀的强紫外辐照。该异型光纤同样为双包层的石英光纤,是将三根光纤电缆内的光纤丝混合均匀排布后导入同一包覆层内形成出射端。其数值孔径为0.22,出射端口中心通光部分的直径为12 mm,三个入射端口中心通光部分的面积总和与出射端口通光面积相等。三光源叠加法中所用复眼透镜内部方形积分棒截面大小为12 mm×12 mm,长为50 mm,出射透镜组的合成焦距为70 mm。为获得圆形辐照在方形积分棒截后端设置了孔径为11.8 mm的光阑。实验装置如图10所示,其中(1)为紫外辐照装置A,(2)为紫外辐照装置B,(3)为紫外辐照装置C,(4)为复眼透镜,(5)为紫外辐照计探头。

仍然选取辐照面上UVA波段的辐照度分布作为测量对象,对直径为80 mm的辐照面上辐照度分布进行实测:移动紫外辐照计探头以5 mm的间隔测量各点辐照度并记录各个位置的辐照度值,经过计算可知该辐照面上的平均辐照度约为62 mW/cm²。并且利用(1)式计算可以得到该被测面的辐照度均匀性

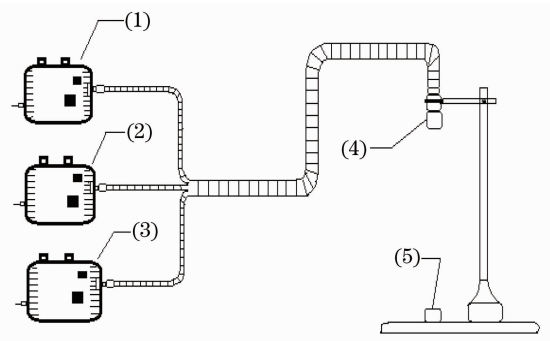


图10 三光源叠加法的实验装置结构示意图

Fig. 10 Schematic of the experimental device of three light sources superposition method

为±2.4%。

由数据模拟和实验结果可以看出,利用多光源叠加法改善紫外光源辐照度均匀性是可行的。利用两套光纤照射装置叠加形成辐照面的辐照均匀性在±3.9%以内;将三光源叠加后再经复眼透镜投射到被测面上可以使整体辐照度均匀性得到进一步的提高,这在紫外辐射的标定工作中更为适用。并且多光源叠加可以得到更强的辐照度,当然利用这种方法需要的成本较高。

4 结 论

针对现有的强紫外光源分布不均匀的情况提出的利用积分棒及磨砂石英片来改善紫外辐照均匀性的设计方法,具有结构简单、辐照度均匀性好的特点,可以达到紫外标定时对辐照强度和均匀性的要求。提出的利用多光源叠加的方式来改善光源均匀性的方法,适于提供特别强的均匀紫外辐照。事实上不仅在紫外波段,应用于其他波段的光纤照射装置同样可以采用上述方法来改善其辐照均匀性,从而得到更为均匀地强辐照分布,满足实际应用中的需求。

参 考 文 献

- 1 Wang Rui, Wang Shurong, Guo Jin *et al.*. High-accuracy ultraviolet standard radiometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0404001
王锐,王淑荣,郭劲等.高精度紫外标准辐射计[J].*光学学报*, 2011, **31**(4): 0404001
- 2 T. C. Larason, C. L. Cromer. Sources of error in UV radiation measurements[J]. *J. Res. NIST*, 2001, **106**(4): 649~656
- 3 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. 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
- 4 Shao Xiumei, Chen Yu, Chen Xinyu. High-accuracy calibration

- of UV detectors [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(2): 169~172
- 邵秀梅, 陈郁, 陈新禹. 高精度紫外探测器定标测试方法[J]. *航天器环境工程*, 2010, **27**(2): 169~172
- 5 Wang Rui, Song Kefei. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 470~474
- 王锐, 宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 470~474
- 6 Tang Haohao, Wang Yong, Li Mengchao *et al.*. Stable power light source system in accurate UV radiation calibration [J]. *Modern Electronics Technique*, 2005, **28**(20): 61~63
- 汤昊昊, 王勇, 李孟超等. 精确紫外辐射定标中的稳功率光源系统[J]. *现代电子技术*, 2005, **28**(20): 61~63
- 7 Shi Liping, Sun Wei, He Changfu *et al.*. Sources of error in ultraviolet irradiance measurements[J]. *China Metrology*, 2011, (1): 113~114
- 石丽平, 孙威, 何长伏等. 影响紫外辐射照度计测量结果的若干因素[J]. *中国计量*, 2011, (1): 113~114
- 8 Kuang Lijuan, Zhai Jinhui, Ruan Yu *et al.*. Characteristics of fly-eye lens in uniform illumination system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(6): 29~31
- 匡丽娟, 翟金会, 阮玉等. 复眼透镜阵列应用于照明系统的特性研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(6): 29~31
- 9 Li Yiyu, Wang Wei, Chen Jiaojie *et al.*. Beam shaping and homogenization system with lens array for ophthalmic excimer laser refractive surgery[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081403
- 厉以宇, 王伟, 陈娇洁等. 基于透镜阵列的眼科准分子激光光束整形与匀光系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(8): 081403
- 10 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Jia Wenwu *et al.*. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702007
- 尹智勇, 汪岳峰, 贾文武等. 基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702007
- 11 Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng *et al.*. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202008
- 贾文武, 汪岳峰, 黄峰等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202008
- 12 Bart Van Giel, Youri Meuret, H ugo Thienpont. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light emitting diode light sources [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(4): 043001
- 13 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Study of integrator rod in step-and-scan lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 981~985
- 郭丽萍, 黄惠杰, 王向朝. 积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 981~985
- 14 Lü Yong, Zheng Zhenrong. Analysis for optical extend in light pipe illumination system [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, **30**(6): 569~571
- 吕勇, 郑臻荣. 方棒照明系统的光学扩展量传递分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, **30**(6): 569~571

栏目编辑: 何卓铭