

基于日盲型滤光片辐射计的 232~400 nm 波段 辐射标准传递研究

李佳伟^{1,2*}, 陈洪耀^{1**}, 张黎明¹, 黄文薪¹, 司孝龙¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 传统滤光片辐射计在测量紫外(UV)波段时带外泄漏影响严重。将日盲型光电管作为 UV 滤光片辐射计的探测单元,采用搭建的比对测量装置对日盲型 UV 滤光片辐射计各通道进行系统级相对光谱辐射功率响应度测量,再利用溯源至中国计量科学研究院(NIM)的光谱辐射照度标准灯对 UV 滤光片辐射计进行绝对光谱辐射照度响应度定标。采用单色仪系统完成 UV 滤光片辐射计与溯源至美国国家标准与技术研究院(NIST)的标准探测器的对比,两者结果最大相差 2.09%,验证了辐射标准传递的准确性。最后,通过立体角构建,将 232~400 nm 辐射标准传递到了大口径大动态范围 UV 积分球辐射源中。

关键词 测量; 带外泄漏; 紫外滤光片辐射计; 相对光谱辐射功率响应度; 绝对光谱辐射照度响应度; 辐射标准传递

中图分类号 O432.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1012002

Radiation Standard Transfer in 232–400 nm Band Based on Solar Blind Filter Radiometer

Li Jiawei^{1,2*}, Chen Hongyao^{1**}, Zhang Liming¹, Huang Wenxin¹, Si Xiaolong¹

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract The influence of out-of-band leakage on the measurement of ultraviolet (UV) band by traditional filter radiometer is serious. The solar blind phototube is used as the detection unit of the UV filter radiometer, the system-level relative spectral flux responsivity of each channel of the solar blind UV filter radiometer is measured by the built comparison measurement device, and then the absolute spectral irradiance responsivity of the UV filter radiometer is calibrated by using the irradiance standard lamp traced to the Nation Institute of Metrology, China (NIM). The monochromator system is used to complete the comparison between the UV filter radiometer and the standard detector traced to National Institute of Standards and Technology (NIST), and the maximum difference between the two results is 2.09%, which verifies the accuracy of radiation standard transfer. Finally, through the construction of solid angle, the 232–400 nm radiation standard is transferred to the UV integrating sphere radiation source with large aperture and large dynamic range.

Key words measurement; out-of-band leakage; ultraviolet filter radiometer; relative spectral flux responsivity; absolute spectral irradiance responsivity; radiation standard transfer

收稿日期: 2021-10-20; 修回日期: 2021-12-08; 录用日期: 2021-12-14

通信作者: *jiawei19@mail.ustc.edu.cn; **hychen@aiofm.ac.cn

1 引言

随着高分五号的成功发射,我国具备了大气痕量气体探测的能力。高分五号搭载的大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)紫外遥感载荷能够精确定量分析痕量污染气体成分(NO_2 、 SO_2 和 O_3 等)的分布和变化,为全球关键大气成分和各种痕量污染组分的监测提供了技术保证^[1-3],而紫外遥感定量化的前提是高精度紫外标准传递。COVID-19 疫情的出现加快了用于消毒的紫外辐射源的产品研发推广^[4],紫外辐射消毒时所使用的辐射照度是杀灭目标微生物的关键指标,而紫外波段辐射照度测量的前提与基础同样是紫外波段辐射标准传递。此外,紫外标准传递在国防安全、刑事侦查等领域中也有重要的应用价值^[5-7],因此高精度紫外波段辐射标准传递的应用需求越来越迫切。

目前基于探测器和基于辐射源是两种重要的辐射标准传递方式,基于标准探测器的传递方式具有传递链路短、动态范围大和精度高的特点,但是该方式不够便捷。基于高温黑体、卤钨灯和氙灯等光谱辐射照度标准灯的传递方式存在传递链路长、不确定度高等缺点。常见的光谱辐射照度标准灯与漫射板组成的灯板系统存在紫外波段辐射弱,其辐射亮度等级与应用辐射亮度等级相差大等局限性。

滤光片辐射计作为光谱辐射照度和光谱辐射亮度测量的重要手段,在光谱辐射定标中应用非常广

泛,传统滤光片辐射计大多直接采用单片 Si 探测器^[8]或利用多个 Si 探测器制成陷阱探测器作为辐射计的探测单元^[9]。然而,当测量卤钨灯光源紫外波段时发现,紫外波段能量比可见近红外低两个数量级以上,国内外滤光片带外抑制水平在 10^{-5} 量级,这会造成滤光片辐射计在测量紫外波段时存在严重的带外泄漏,影响测量结果。

本文将日盲型光电管作为紫外滤光片辐射计探测单元,可有效抑制紫外测量时的带外泄漏,进而提高测量精度。搭建比对测量装置对紫外滤光片辐射计相对光谱辐射功率响应函数进行测量,利用溯源到中国计量科学研究院(NIM)的光谱辐射照度标准灯对紫外滤光片辐射计进行绝对光谱辐射照度响应度定标,并和基于标准探测器的传递进行了比较验证。最后,通过辐射亮度立体角构建将辐射标准传递至研制的大口径大动态范围紫外积分球辐射源中。

2 测量原理

紫外滤光片辐射计由日盲型光电管、滤光片支架、滤光片、支座和高精度孔径光阑组成,如图 1 所示。滤光片支架在支座上拆装方便,这样有利于更换滤光片。当测量卤钨灯照度时,每更换一个窄带滤光片后,记录相应通道的输出信号值。紫外滤光片辐射计的标准传递流程如图 2 所示,其中 NIST 为美国国家标准与技术研究院。

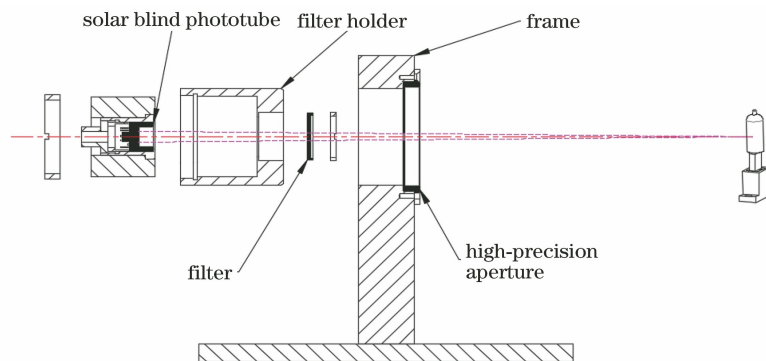


图 1 紫外辐射计测量原理

Fig. 1 Measurement principle of ultraviolet radiometer

2.1 测量方程

入射光经过高精度孔径光阑,穿过滤光片,被日盲型光电管的光敏面接收。光电管输出的电流值为

$$I_{B_i} = A_{\text{det}} \int E(\lambda) R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中: I_{B_i} 为通道 i 的电流; A_{det} 为辐射计孔径光阑面积; $E(\lambda)$ 为光谱辐射照度; λ 为波长; $R(\lambda)$ 为辐射

计光谱辐射功率响应度; $B_i(\lambda)$ 为通道 i 的滤光片光谱透射比。若测试光源的光谱辐射照度曲线是连续且各阶可导的,则该光谱辐射照度曲线可由多项式无限逼近,光源光谱辐射照度 $E(\lambda)$ 可表示为

$$E(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda + \cdots + a_m \lambda^m, \quad (2)$$

式中: a_0, a_1, \cdots, a_m 为多项式系数; m 为多项式次数。

将式(2)代入式(1)中,则

$$I_{B_i} = A_{\text{det}} \int E(\lambda) R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda = A_{\text{det}} \int (a_0 + a_1\lambda + \dots + a_m\lambda^m) R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda = A_{\text{det}} \left[\int a_0 R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda + a_1 \int \lambda R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda + \dots + a_m \int \lambda^m R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda \right], \quad (3)$$

将式(3)用矩阵形式来表示,即

$$I_{B_i} = A_{\text{det}} \left[\int R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda \quad \int \lambda R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda \quad \dots \quad \int \lambda^m R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda \right] \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}. \quad (4)$$

若紫外滤光片辐射计有 n 个通道,则其测量方程为

$$\begin{bmatrix} I_{B_1} \\ I_{B_2} \\ \vdots \\ I_{B_n} \end{bmatrix} = A_{\text{det}} \begin{bmatrix} \int R(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda & \lambda \int R(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda & \dots & \lambda^m \int R(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda \\ \int R(\lambda) B_2(\lambda) d\lambda & \lambda \int R(\lambda) B_2(\lambda) d\lambda & \dots & \lambda^m \int R(\lambda) B_2(\lambda) d\lambda \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \int R(\lambda) B_n(\lambda) d\lambda & \lambda \int R(\lambda) B_n(\lambda) d\lambda & \dots & \lambda^m \int R(\lambda) B_n(\lambda) d\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \int R(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda & \lambda \int R(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda & \dots & \lambda^m \int R(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda \\ \int R(\lambda) B_2(\lambda) d\lambda & \lambda \int R(\lambda) B_2(\lambda) d\lambda & \dots & \lambda^m \int R(\lambda) B_2(\lambda) d\lambda \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \int R(\lambda) B_n(\lambda) d\lambda & \lambda \int R(\lambda) B_n(\lambda) d\lambda & \dots & \lambda^m \int R(\lambda) B_n(\lambda) d\lambda \end{bmatrix}. \quad (6)$$

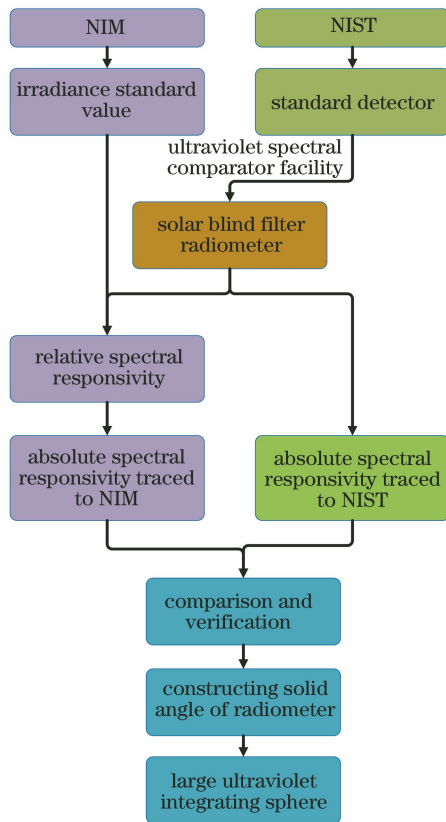


图 2 紫外标准传递链路图

Fig. 2 Flow chart of ultraviolet standard transmission

可解得

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \frac{1}{A_{\text{det}}} (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \begin{bmatrix} I_{B_1} \\ I_{B_2} \\ \vdots \\ I_{B_n} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

为保证方程有唯一解,需满足 $m \leq n$ 。

2.2 带外泄漏的抑制

在短波方向上,光源紫外波段能量下降较快,故所选滤光片的中心波长间隔应该尽量小,滤光片数量应尽量多,这样滤光片辐射计才能更加精确地拟合目标光源的光谱辐射照度。本文在 250~400 nm 波段之间选择了 7 个滤光片,包含 6 个带宽为 10 nm 的窄带滤光片和 1 个带宽为 40 nm 的宽带滤光片。

滤光片辐射计的探测器常选用 Si 探测器,这主要是因为 Si 探测器稳定性好、可靠性高、动态范围大、线性优异且制造技术成熟,进而 Si 探测器常被国内外计量部门用作标准探测器。当测量紫外波段时常选用紫外增强型 Si 探测器作为滤光片辐射计的探测单元,波长范围为 200~1100 nm。

然而,用 Si 探测器作为探测单元的紫外辐射

计在测量光源紫外波段时存在带外泄漏,这主要是因为常用的光源紫外能量较弱,可见近红外能量过高,紫外滤光片因制造工艺限制使得带外抑制不能达到 10^{-8} 水平。若带外泄漏电流不能精确求出或带外泄漏电流占比较大甚至逼近有效电流,则会给光谱辐射照度的求解带来较大偏差。

国内外现有滤光片的光谱透射比的抑制水平在 10^{-5} 左右^[10]。当测量卤钨灯光源时,卤钨灯在可见光波段的能量比 250 nm 波段处的能量高两个数量级。这两个因素叠加致使测量卤钨灯时滤光片辐射计带外泄漏较为严重。图 3 所示为采用紫外增强型 Si 探测器的紫外辐射计在 280 nm 通道测量卤钨灯光源时的带外泄露情况,由已知的标准灯光谱辐射照度值与滤光片辐射计光谱辐射功率响应度值进行卷积得到。

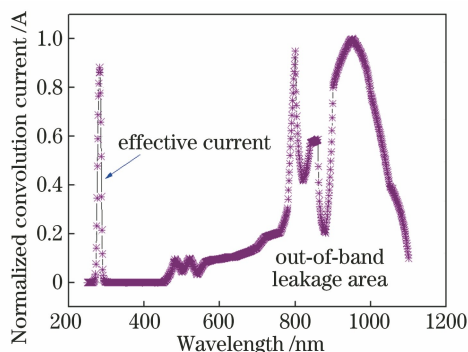


图 3 280 nm 通道测量卤钨灯光源带外泄漏

Fig. 3 Measurement of out-of-band leakage of tungsten halogen lamp light source by using 280 nm channel

解决通道带外泄漏有三种方式:1)采用组合滤光片;2)探测器在可见近红外无响应;3)已知探测器和滤光片在全波段的响应度和光谱透射比。

采用组合滤光片方式会产生滤光片之间的相互反射影响,以及组合滤光片的参数测量与实际使用状态不一致引入的其他测量误差。然而,探测器和滤光片在全波段的光谱响应度和光谱透射比精确已知不具有可操作性。

本文采用 R6800U-11 型光电管作为紫外辐射计的探测器,具体参数见表 1。当在低电压状态下使用该型号光电管时,其在可见近红外波段中无响应,可有效解决紫外波段测量带外泄漏问题。

图 4 为日盲型光电管紫外辐射计 280 nm 通道测量卤钨灯光源的结果。可以看出,可见近红外波段的带外泄漏被有效抑制。

表 1 R6800U-11 型光电管参数

Table 1 Parameters of R6800U-11 phototube

Parameter	Description
Spectral range /nm	160–350
Photocathode	Cs-Te
Ambient temperature /°C	–80–50
Diameter of photocathode area /mm	8
Radiant sensitivity /($A \cdot W^{-1}$)	20 mA@250 nm and 25 °C
Dark current /pA	1
Recommended operating voltage /V	15

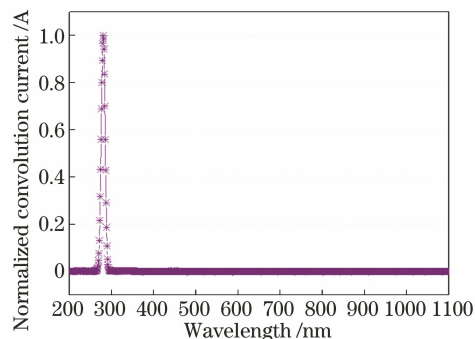


图 4 日盲型光电管紫外辐射计 280 nm 通道测量卤钨灯光源

Fig. 4 Measurement of halogen tungsten lamp light source of using 280 nm channel by solar blind phototube ultraviolet radiometer

3 紫外滤光片辐射计标准传递

3.1 基于标准探测器的相对光谱辐射功率响应度测量

3.1.1 替代法测量原理

日盲型光电管相对光谱辐射功率响应度的测量采用替代法。光源为功率为 450 W 的氙灯,从单色仪狭缝出射的单色光经球面镜、平面反射镜入射到探测器的光敏面。球面镜和平面反射镜表面均采用紫外反射比较高的增强铝反射涂层。单色仪出射光经后光路近似 1:1 成像,在探测器光敏面处形成大小为 $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的近似椭圆形均匀光斑,并被光电管的光敏面全部接收。

替代法是指使用已知响应度的标准探测器将其响应度(输出/输入)传递给待测探测器。光电探测器通常以电压值或电流值为输出信号,当探测器输出信号为电压值 U ,输入信号为光通量 Φ 时,若探测器线性响应范围内探测器(系统)的输出信号为 U ,则可求解待测探测器响应度,即

$$R_x = \frac{U_x}{U_s} R_s, \quad (8)$$

式中: U_x 为探测器的输出信号; U_s 为标准探测器的输出信号; R_x 为被测探测器的光谱响应度, 单位为 A/W; R_s 为标准探测器的光谱响应度, 单位为 A/W。

从式(8)中可以看出, 若已知标准探测器的光谱辐射功率响应度, 则再测得两个输出信号即可计算出待测探测器的光谱辐射功率响应度。

3.1.2 光谱辐射功率响应度测量方程

氙灯是常用的紫外弧光灯, 为消除氙灯光源功率波动的影响, 引入了分束器和监视探测器。将从光源进入单色仪的辐射通量定义为 Φ_s , 单色仪输出

的光谱辐射通量为 Φ_λ , τ 为单色仪和探测器之间光学器件(大气)的透射比。分束器的透射比和反射比分别为 τ_{bs} 和 ρ_{bs} 。定义 $\Phi_{D,\lambda} = \tau_{bs} \tau \Phi_\lambda$ 为探测器接收到的通量, $\Phi_{M,\lambda} = \rho_{bs} \tau \Phi_\lambda$ 为监视探测器接收到的通量。监视探测器和分束器被认为在测量时间内状态是稳定的。因此, 监视器可记录辐射源功率波动, 且探测器与监视器信号的比率也是恒定的。

日盲型光电管和标准探测器经放大电路输出的是电压信号, 用 V 来表示。由于监视探测器的加入, 故替代法测量方程中还应该考虑分束器组件的透射比 τ_{bs} 和分束器组件的反射比 ρ_{bs} , 如图 5 所示。系统需要同时对探测器和监视器进行数据采集。

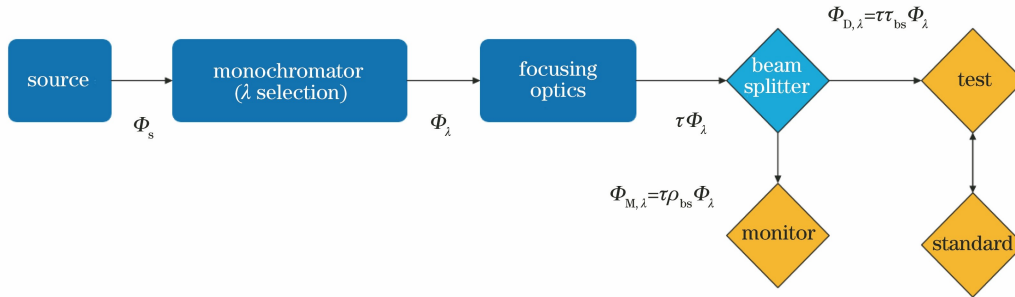


图 5 带监视器的光电探测器替代法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of photodetector substitution method with monitor

将标准探测器与日盲型光电管交替切入光路中, 若分束器的光谱透射比和光谱反射比在比较时间内是稳定的, 监视探测器的响应度和放大器增益在比较时间内也是稳定的, 则有

$$\frac{r_x}{r_s} = \frac{R_x G_x}{R_s G_s}, \quad (9)$$

式中: r_x 为光电管和监视探测器信号的比值; r_s 为标准探测器和监视探测器信号的比值; G_x 和 G_s 分别为光电探测器和标准探测器的跨阻放大器的增益, 单位为 V/A。将信号测量值代入比值, 则有

$$R_x = \frac{r_x}{r_s} \cdot \frac{G_s}{G_x} R_s = \frac{\frac{V_x - V_{d,x}}{V_{mx} - V_{d,mx}}}{\frac{V_s - V_{d,s}}{V_{ms} - V_{d,ms}}} \cdot \frac{G_s}{G_x} R_s, \quad (10)$$

式中: V_x 为光电管输出值; $V_{d,x}$ 为光电管暗电流; V_{mx} 为测量光电管时监视探测器的输出值; $V_{d,mx}$ 为测量光电管时监视探测器的暗电流; V_s 为标准探测器输出值; $V_{d,s}$ 为标准探测器暗电流; V_{ms} 为测量标准探测器时监视探测器的输出值; $V_{d,ms}$ 为测量标准探测器时监视探测器的暗电流。

当比对的标准探测器是光功率计时, 令

$$W_{\text{meter}} = \frac{V_s - V_{d,s}}{G_s R_s}, \quad (11)$$

式中: W_{meter} 为光功率计输出的光功率值。将式(11)代入式(10)中, 则有

$$R_x = \frac{\frac{V_x - V_{d,x}}{G_x (V_{mx} - V_{d,mx})}}{\frac{V_{ms} - V_{d,ms}}{W_{\text{meter}}}}. \quad (12)$$

3.1.3 测量装置

1) 标准探测器

日盲型光电管的紫外波段光谱辐射功率响应度测量装置是基于单色仪系统的比对装置, 如图 6 所示。

该比对装置采用的标准探测器为 Newport-918D Si 探测器, 其标准溯源至 NIST, 具体参数见表 2, 通过电控滑台将光电管与标准探测器交替切入光路。紫外光源采用常用的短弧氙灯, 将后光路整体置于消光暗箱中。

2) 光源和单色仪

比对测量装置采用的是功率为 450 W 的短弧氙灯光源, 氙灯光源在紫外波段能量高, 是常用的紫外辐射源。单色仪是与氙灯集成的光栅单色仪, 由 Newport 公司生产, 出光口狭缝 F 数为 4, 且出光口处设有直径为 2 mm 的光阑。测试时将单色仪狭缝调整至 0.8 mm, 对应 4.8 nm 带宽, 进出口狭缝宽度应相等。

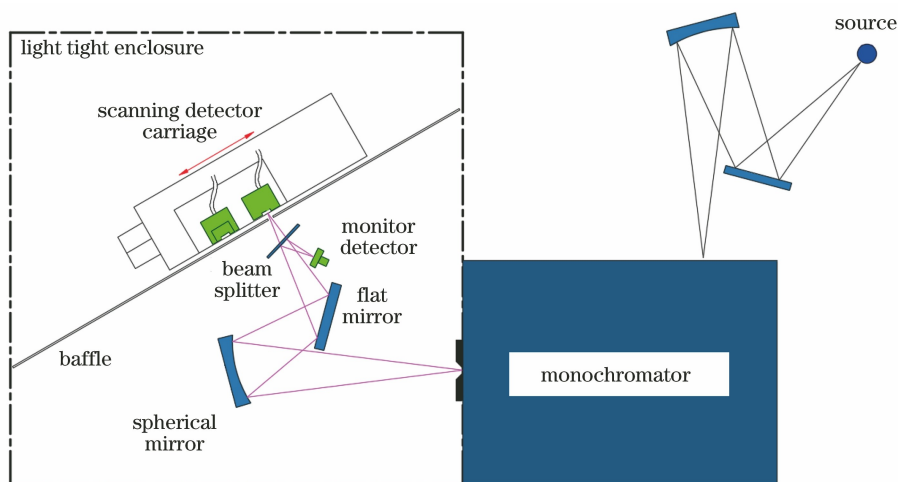


图 6 光谱辐射功率响应度测量装置

Fig. 6 Measuring devices for spectral flux responsivity

表 2 Newport-918D 标准探测器参数

Table 2 Parameters of Newport-918D standard detector

Parameter	Description
Spectral range / μm	0.2–1.1
Calibration uncertainty	4% @ 200–219 nm
	2% @ 220–349 nm
	1% @ 350–949 nm
	4% @ 950–1100 nm
Linearity / %	± 0.5
Material	Silicon-ultraviolet enhanced
Active area / cm^2	1
Active diameter / cm	1.13
Shape	Cylinder

3) 测试装置后光路

从单色仪狭缝出射的单色光经球面镜、平面反射镜后穿过分束镜入射到探测器的光敏面上。球面镜和平面反射镜的表面均采用紫外光谱反射比较高的增强铝反射涂层,该涂层在 250 nm 处反射比达到 90%。在单色仪出射狭缝处安装直径为 2 mm 的光阑,经后光路近似 1:1 成像,在探测器光敏面处形成光斑,并被光电管或标准探测器全部接收。球面镜焦距为 $f = 150 \text{ mm}$,直径为 75 mm。图 7 为紫外后光路实物图。

将整个后光路放置在暗箱内,暗箱内壁贴有反射比为 1.5% 的消光布,可有效防止杂散光对测试产生影响。

紫外光电管和标准探测器安装在滑台上,滑台在控制器的驱动下可精准地将紫外光电管和标准探测器交替切入光路中,如图 8 所示。

由于紫外波段能量低、系统中各部件安装关系

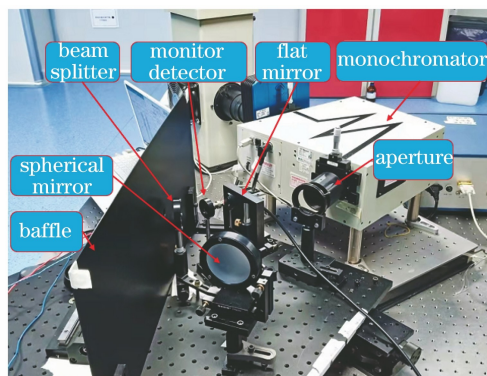


图 7 紫外后光路实物图

Fig. 7 Physical drawing of ultraviolet optical path

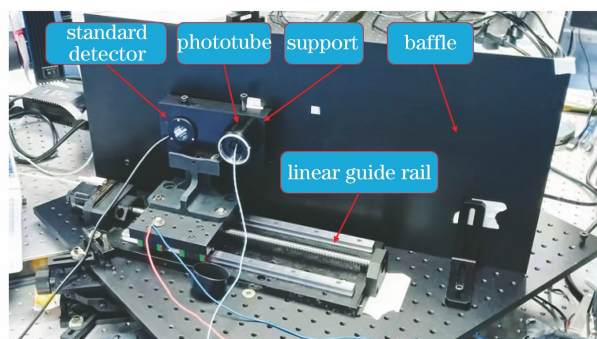


图 8 标准探测器与光电管组件实物图

Fig. 8 Physical drawings of standard detector and phototube assembly

影响复杂,故探测器与滤光片相互反射的影响相对较大,进而宜采用系统级定标的方式对紫外滤光片辐射计进行光谱响应度标定^[1]。此外,将光电管与滤光片集成设计成为一个整体并安装在滤光片支架内部。

采用系统级光谱辐射功率响应度标定的方式可

以保证在整个测量过程中,光电管与各个通道的滤光片安装方式相同。由于光电管与滤光片相互反射的影响已经考虑在光谱辐射功率响应度测量中,因此最大限度地保持了辐射计标定状态与测量状态的一致性,减小了测试误差。各通道的相对光谱辐射功率响应度测量结果如图 9 所示。

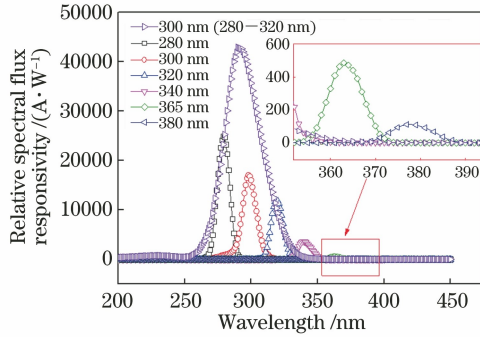


图 9 各通道相对光谱辐射功率响应度

Fig. 9 Relative spectral flux responsivity of each channel

3.2 基于光谱辐射照度标准灯的绝对响应度定标

3.2.1 基于光谱辐射照度标准灯的定标原理

经孔径光阑、紫外滤光片入射到日盲型光电管光敏面上的光通量 Φ 可表示为

$$\Phi = A \int E_s(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda, \quad (13)$$

式中: A 为孔径光阑面积; $E_s(\lambda)$ 为标准灯的光谱辐射照度。

日盲型光电管阴极与阳极之间需要施加偏压,接入放大电路后输出信号为电压值 V , $R(\lambda)$ 为光通量响应度,对于响应线性探测器,二者的关系为

$$V = \Phi R(\lambda). \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)中可得

$$V_i = A \int E_s(\lambda) B_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (15)$$

式中: V_i 为光电管各通道输出值。将光谱响应函数以相对形式表达,即

$$V_i = A \int B_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda \frac{\int E_s(\lambda) B_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int B_i(\lambda) R(\lambda) d\lambda}. \quad (16)$$

相对将滤光片透射比 $B_i(\lambda)$ 与探测器响应度 $R(\lambda)$ 分立测量的部件级测量方式,本文采用的是将滤光片透射比与日盲型光电管的响应度作为整体考虑的系统级响应度测量方法。若设 $R_{r,i}(\lambda)$ 为各通道的系统级光谱辐射功率响应度,则有

$$R_{r,i}(\lambda) = B_i(\lambda) R(\lambda), \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)中可得

$$V_i = A \int R_{r,i}(\lambda) d\lambda \frac{\int E_s(\lambda) R_{r,i}(\lambda) d\lambda}{\int R_{r,i}(\lambda) d\lambda}, \quad (18)$$

各通道接收的光谱辐射照度 $E_{s,i}$ 为

$$E_{s,i} = \frac{\int E_s(\lambda) R_{r,i}(\lambda) d\lambda}{\int R_{r,i}(\lambda) d\lambda}, \quad (19)$$

各通道光谱辐射照度响应度 $R_{E,i}$ 为

$$R_{E,i} = A \int R_{r,i}(\lambda) d\lambda, \quad (20)$$

将式(19)、(20)代入式(18)中可得

$$V_i = R_{E,i} E_{s,i}. \quad (21)$$

用滤光片辐射计观测照度标准灯可得到探测器响应值 V_i , 将标准灯光谱辐射照度 $E_s(\lambda)$ 与各通道相对光谱辐射功率响应度相结合可计算输入的光谱辐射照度 $E_{s,i}$, 探测器的光谱辐射照度响应度为

$$R_{E,i} = \frac{V_i}{E_{s,i}}, \quad (22)$$

这样就完成了紫外滤光片辐射计的绝对光谱辐射照度响应度定标。

3.2.2 定标流程

在紫外滤光片辐射计相对光谱响应函数测量完成后,需要进行绝对光谱响应函数的定标。本文采用光谱辐射照度标准灯进行响应度定标,由式(22)可知,已知标准灯的光谱辐射照度值和各通道的相对光谱辐射功率响应度就可以得到绝对光谱辐射照度响应度。所采用的标准灯 201101 可溯源至中国计量科学研究院高温黑体辐射源,为副基准级,在 250 nm 处光谱辐射照度不确定度为 2.10%,具体见表 3,其中 k 为亮度等级。

测量时紫外滤光片辐射计的高精度孔径光阑距离标准灯 500 mm,测试环境温度保持在 $(25.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$,标准灯在恒流模式下工作,电流值为 8.1 A,由中国计量科学研究院给出,电压为 109.2 V。

紫外滤光片辐射计、光谱辐射照度标准灯和杂散光光阑安装在光学导轨上,并通过激光器调整三者一条水平线上。紫外滤光片辐射计输出电流通过电流-电压转换放大器转换成电压信号,由电压采集器采集。测试过程中需避免各通道长时间接受辐照,以防止滤光片因紫外光长时间照射老化和红外导致的辐射计温升所带来的测量误差的出现。图 10 为 300 nm 通道光谱辐射照度响应度定标结果。

表 3 标准灯的光谱辐射照度值($k=2$)Table 3 Spectral irradiance values of standard lamp ($k=2$)

Wavelength /nm	Spectral irradiance / ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)	Measurement uncertainty /%
250	0.0150	2.10
260	0.0254	1.80
270	0.0427	1.70
280	0.0679	1.60
290	0.1030	1.40
300	0.1500	1.30
310	0.2140	1.30
320	0.2960	1.30
330	0.3970	1.20
340	0.5260	1.20
350	0.6750	1.20
360	0.8590	1.10
370	10.7000	1.10
380	13.1000	1.10
390	15.8000	1.10
400	19.1000	1.10
450	39.3000	0.99

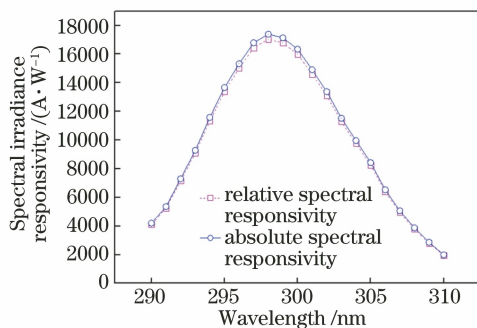


图 10 300 nm 通道光谱辐射照度响应度定标

Fig. 10 Calibration of spectral irradiance responsivity by using 300 nm channel

4 与标准探测器的比对验证

将基于光谱辐射照度标准灯定标的紫外滤光片辐射计与溯源至 NIST 的标准探测器进行比对,分别将紫外滤光片辐射计与标准探测器切入单色仪后光路中。分别选择 280, 290, 300, 320, 340, 365, 380 nm 滤光片辐射计 7 个通道进行对比。为保证紫外滤光片辐射计与标准探测器的输入光通量一致,在单色仪出射狭缝处安装直径为 2 mm 的光阑,经后光路近似 1:1 成像,在探测器光敏面处形成光斑,并被探测器全部接收。此外,将滤光片辐射计的测量结果与对应监视探测器的测量结果进行比值处理得到 R_1 ,将标准探测器的测量值与对应监视探测器的测量值进行比值处理得到 R_2 ,再将两个比值进行对比,以此来消除单色仪光源功率波动的影响,结

果如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,基于光谱辐射照度标准灯的紫外滤光片辐射计测量结果与基于低温辐射计的标准探测器测量结果非常接近,两者最大相差 2.09%,在 300 nm 波长处。该结果证明了溯源至 NIST 的 Newport-918D 标准探测器的准确性,也表明了基于高温黑体的紫外滤光片辐射计标准传递的可行性。

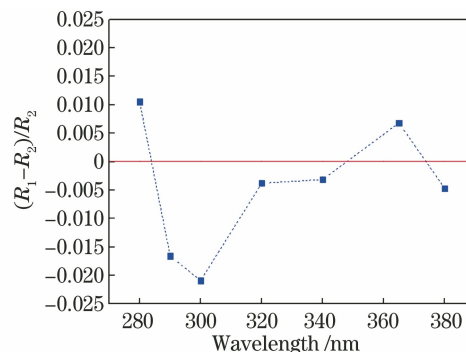


图 11 紫外滤光片辐射计与标准探测器对比结果

Fig. 11 Comparison result between ultraviolet filter radiometer and standard detector

5 不确定度评估

紫外滤光片辐射计进行绝对光谱辐射照度测量时的不确定度主要包含光谱辐射功率响应度测量不确定度、杂散光引入的不确定度、插值引入的不确定度和孔径光阑面积测量不确定度等。光谱辐射功率响应度测量不确定度包括单色仪的波长重复性不确定度(0.500%),电流放大和采集的不确定度(0.100%~0.200%)和标准灯光谱辐射照度标准的不确定度(由中国计量科学研究院给出)。紫外滤光片辐射计与标准灯放置在带刻度的线性导轨上引起的距离测量误差为 0.200%,重复性不确定度为 0.400%。环境温度波动保持在 ± 0.5 °C,引起的测量不确定度为 0.030%。整个测量过程均在暗室中进行,杂散光引入的不确定度为 0.500%。此外,标准灯照度值插值采用三次样条插值,同样会引入不确定度,高精度孔径光阑引起的测量不确定度为 0.010%。各通道扩展不确定度见表 4。

6 紫外波段标准传递至紫外积分球

为将紫外波段的标准传递到最新研制的 2 m 内径大口径紫外积分球辐射源中^[12],将紫外滤光片辐射计光谱范围向短波延伸,增加了 232 nm 通道和 254 nm 通道。第 4 节中的对比实验已经验证了溯源

至 NIST 的标准探测器的准确性,该探测器的响应度可延伸到 250 nm,故基于标准探测器法对紫外滤光片标准可延伸到 200 nm,照度标准灯的标准短波方向片辐射计进行系统级绝对光谱辐射照度响应度定标。

表 4 基于辐射照度标准灯的绝对光谱响应函数测量不确定度

Table 4 Measurement uncertainty of absolute spectral responsivity based on irradiance standard lamp

Influence factor	Uncertainty	Uncertainty	Uncertainty	Uncertainty	Uncertainty	Uncertainty	Uncertainty at 300 nm (280- 320 nm) / %
	at 280 nm / %	at 300 nm / %	at 320 nm / %	at 340 nm / %	at 365 nm / %	at 380 nm / %	
Responsivity of each channel of radiometer	2.210	2.210	2.210	2.210	1.200	1.190	2.210
Wavelength uncertainty of monochromator	0.500	0.500	0.500	0.500	0.140	0.110	0.500
Current measurement	0.200	0.200	0.100	0.100	0.100	0.030	0.200
Standard lamp of spectral irradiance	2.100	2.100	1.100	1.100	1.100	1.100	2.100
Distance measurement (500 mm)	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Repeatability	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
Temperature	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
Stray light	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
Non-linearity	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Wavelength uncertainty	0.240	0.210	0.190	0.160	0.140	0.110	0.210
Bandwidth effect	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Spatial uniformity	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Interpolation	0.570	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270
Aperture area	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Combined standard uncertainty	2.350	2.300	1.420	1.420	1.340	1.330	2.300
Expanded uncertainty ($k=2$)	4.700	4.600	2.800	2.800	2.700	2.700	4.600

利用具有绝对光谱响应函数标准的紫外滤光片辐射计对大口径紫外积分球辐射源进行光谱辐射亮度拟合,需要注意的是积分球辐射源为朗伯面光源,故辐射计中需加入立体角 Ω_{det} 。氙灯光源光谱在紫外波段是连续且无吸收峰的,可用多项式对氙灯物理模型进行近似拟合。在式(1)中引入立体角后,测量方程可写为

$$I_{B_i} = \Omega_{det} A_{det} \int L(\lambda) R(\lambda) B_i(\lambda) d\lambda, \quad (23)$$

式中: $L(\lambda)$ 为待测光源光谱辐射亮度。

对大口径积分球进行等色温调节,使得紫外滤光片辐射计接收的光通量大小与标准灯测量时处于同一水平,以降低滤光片辐射计的非线性影响^[12],即

$$L_{sphere,k}(\lambda) = kL_{sphere,1}(\lambda), \quad (24)$$

式中: $L_{sphere,k}(\lambda)$ 为亮度等级为 k 时的积分球辐射亮度。

通过采集辐射计各通道电流值,运用优化迭代算法,运算过程与滤光片辐射计测量光谱辐射照度的流程一致,参考式(7)可拟合出紫外积分球辐射亮度曲线。

大口径紫外积分球在 232~340 nm 波段内的光谱辐射亮度测试结果如图 12 所示。此处用大气外太阳光谱辐射照度转换到地表朗伯反射辐射亮度的结果与测量结果进行比对,积分球在 250 nm 处的辐射亮度达到 $9.89 \mu W / (cm^2 \cdot nm \cdot sr)$,达到了太阳常数的 5 倍,表明新研制的紫外积分球可为紫外遥感载荷实验室辐射定标提供大面积高亮度紫外辐射源。

对大口径紫外积分球辐射源的标准传递进行了不确定度评估,不确定度来源主要包括紫外滤光片

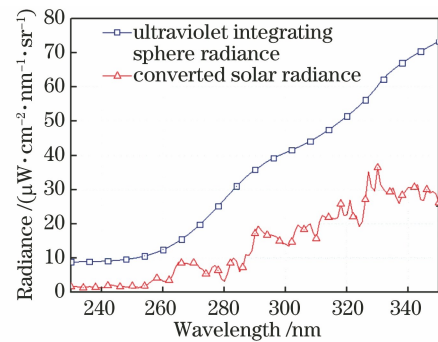


图 12 紫外积分球辐射亮度结果

Fig. 12 Radiance result of ultraviolet integrating sphere

辐射计各通道响应度测量和积分球自身测量,表 5 已经详细列出了各测量不确定度来源,发现不确定

度接近 5.000%,这与紫外积分球辐射源自身的稳定性和均匀性等有关。

表 5 紫外积分球辐射源测量不确定度

Table 5 Measurement uncertainty of ultraviolet integrating sphere radiation source

Influence factor	Uncertainty at 280 nm / %	Uncertainty at 300 nm / %	Uncertainty at 320 nm / %	Uncertainty at 340 nm / %	Uncertainty at 365 nm / %	Uncertainty at 380 nm / %	Uncertainty at 300 nm (280– 320 nm) / %
Responsivity of each channel of radiometer	2.170	2.170	2.170	2.170	2.100	2.100	2.170
Standard detector	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Wavelength uncertainty of monochromator	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
Current measurement	0.200	0.200	0.200	0.200	0.100	0.100	0.200
Repeatability	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
Integrating sphere system	0.960	0.890	0.810	0.780	0.680	0.670	0.780
Surface nonuniformity	0.810	0.810	0.720	0.690	0.680	0.670	0.690
Angle nonuniformity	0.460	0.250	0.300	0.270	0.260	0.240	0.270
Xenon lamp stability	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230
Stray light	0.500	0.500	0.50	0.50	0.500	0.500	0.500
Non-linearity	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Wavelength uncertainty	0.240	0.240	0.240	0.210	0.190	0.160	0.210
Bandwidth effect	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Spatial uniformity	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Interpolation	0.570	0.570	0.570	0.270	0.270	0.270	0.570
Aperture area	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Combined standard uncertainty	2.500	2.480	2.450	2.380	2.350	2.350	2.380
Expanded uncertainty ($k=2$)	5.000	5.000	4.900	4.800	4.700	4.700	4.800

7 结 论

采用日盲型光电管作为探测单元,研制的紫外滤光片辐射计有效地解决了带外泄漏问题,从而提高了紫外波段探测精度。首先,采用替代法,利用搭建的光谱辐射功率响应度测量装置对紫外滤光片辐射计进行系统级相对光谱辐射功率响应度测量,得到各通道的相对光谱辐射功率响应度。然后,利用溯源至中国计量科学研究所的光谱辐射照度标准灯为紫外滤光片辐射计提供已知输入,完成辐射计的绝对光谱辐射照度响应度定标。将定标后的紫外滤光片辐射计与溯源至 NIST 的标准探测器进行测量比对,结果表明,标准灯的标准已被准确地传递到紫外滤光片辐射计中。一方面,验证了 Newport-918D 标准探测器的准确性。另一方面,验证了该标准传递方法的可行性。

通常人们采用灯板系统将标准灯的光谱辐射照度标准转换成光谱辐射亮度标准进行传递。然而,在紫外波段中,灯板系统的能量低,探测器信噪比低

甚至无响应,漫反射板的使用会引入测量不确定度,故紫外波段标准传递极为困难。采用紫外滤光片辐射计直接观测辐射照度标准灯,进而完成标准灯光谱辐射照度的测量,实现了光谱辐射照度标准向紫外滤光片辐射计的传递,为紫外滤光片辐射计的实际工程应用扫清障碍。

此外,利用定标后的紫外滤光片辐射计对新研制的大口径紫外积分球输出辐射亮度进行了测量,结果表明,积分球在 250 nm 处的辐射亮度达到 $9.89 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$,是太阳常数的 5 倍,为紫外遥感载荷提供了高亮度紫外辐射源。

参 考 文 献

- [1] 周海金, 赵敏杰, 江宇, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪设计及标定技术[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 154-160.
Zhou H J, Zhao M J, Jiang Y, et al. Design and in-orbit performance of the Chinese environmental trace gases monitoring instrument [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 154-160.

- [2] 陈斐楠, 樊依哲, 洪津, 等. 高分五号多角度偏振探测仪可见光波段在轨辐射定标研究[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2328001.
Chen F N, Fan Y Z, Hong J, et al. In-flight radiation calibration of a directional polarimetric camera at visible bands onboard GF-5 [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2328001.
- [3] 杨太平, 司福祺, Ping Wang, 等. 大气痕量气体差分吸收光谱仪云量反演算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0901001.
Yang T P, Si F Q, Ping W, et al. Research on cloud fraction inversion algorithm of environmental trace gas monitoring instrument [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0901001.
- [4] 刘慧, 赵伟强, 闫劲云, 等. 紫外 LED 与计量技术[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 6-10.
Liu H, Zhao W Q, Yan J Y, et al. UV LED measurement and prospect [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(2): 6-10.
- [5] 王江, 罗林保. 基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1100001.
Wang J, Luo L B. Advances in Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1100001.
- [6] 刘涛, 贾遂民. 基于无线紫外线通信的无人机集群防撞定位算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 212805.
Liu T, Jia S M. Collision avoidance algorithm for unmanned aerial vehicle group based on wireless ultraviolet communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 212805.
- [7] 贾镛, 王峰, 刘晓. 分时型紫外偏振成像探测系统设计与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021105.
Jia R, Wang F, Liu X. Design and experiment of time-sharing ultraviolet polarization imaging detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021105.
- [8] 王锐, 王淑荣, 李福田, 等. 真空紫外探测器辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1026-1030.
Wang R, Wang S R, Li F T, et al. Investigation on radiation calibration system of vacuum ultraviolet detector [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1026-1030.
- [9] 刘长明, 史学舜, 陈海东, 等. 溯源至低温辐射计的硅陷阱探测器紫外波段绝对光谱响应度测量[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0912002.
Liu C M, Shi X S, Chen H D, et al. Ultraviolet spectral responsivity of silicon trap detectors traceable to a cryogenic radiometer [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0912002.
- [10] Klein R, Taubert D, Thornagel R, et al. Radiometric comparison of the primary synchrotron radiation source standard metrology light source with calibrated filter radiometers in the visible and NIR spectral range [J]. Metrologia, 2009, 46(3): 359-366.
- [11] 陈洪耀, 张黎明, 邹鹏, 等. 系统级定标方法实现基于低温辐射计的标准灯 400~900 nm 波段光谱辐照度[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3349-3353.
Chen H Y, Zhang L M, Zou P, et al. 400-900 nm spectral irradiance of cryogenic radiometer-based irradiance standard lamp using system level calibration method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3349-3353.
- [12] 李佳伟, 陈洪耀, 张黎明, 等. 紫外波段大口径积分球辐射源研制[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2012005.
Li J W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Development of large aperture integrating sphere radiation source in ultraviolet band [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2012005.