

光学学报

日盲型光电管探测系统响应非线性间接法标校

曹韩晖^{1,2}, 陈洪耀^{2*}, 黄文薪², 李佳伟²

¹中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院合肥物质科学研究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

摘要 基于间接法对一种日盲型光电管探测系统进行了非线性测量,将线性度已知的硅光电二极管探测器作为参考标准,以外置氙灯光源积分球作为线性定标辐射源,通过大动态范围电动光阑来调节辐射输出,将待测探测器与参考探测器在同一条件下进行同步测量,以消除光源波动的影响。实验结果表明,该日盲型光电管探测系统的线性误差最大可达 5.2%,有必要通过非线性修正因子对测量值进行修正,其数值范围为 0.948~1.006。分析了系统合成测量不确定度,在光电管响应光电流为 $2.97 \times 10^{-10} \sim 6.61 \times 10^{-8}$ A 范围内,扩展不确定度为 3.59% ($k=2$)。

关键词 探测器; 日盲型探测器; 非线性测量; 间接法; 辐射标准传递

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231501

1 引言

紫外探测技术可应用于军事和民用领域,如导弹预警、紫外/红外复合制导、太阳紫外辐射强度探测、臭氧检测、生物医药等^[1-4]。近年来,随着紫外光学遥感探测技术的发展,紫外波段辐射信息量化研究显得尤为重要。国内高分五号搭载的大气痕量气体差分吸收光谱仪紫外遥感载荷能够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障^[5-8],而高精度辐射定标是遥感数据量化应用的基础和前提^[9]。日盲型光电管可减小紫外波段辐射测量时带外泄漏的影响,从而提高紫外波段探测精度,常被应用于各种大型军事装备导弹逼近告警系统,也常用于电晕检测以有效、快速检测故障位置。欧美国家将日盲型光电管作为标准的电力检测手段,其已经实现大量装备应用^[10]。目前,国内在日盲型光电管制备方面已逐步展开研究,其辐射量化研究是面向应用的关键环节之一。因此,面对紫外波段高精度辐射定标和日盲型光电管的应用探索需求,对于其响应非线性研究显得十分必要。

探测器响应非线性测量可分为直接法和间接法^[11]。其中,光通量叠加法就是一种典型的直接测量法,这种方法对光源的稳定性要求较高,光路设计相对于间接法来说较为复杂。Mielenz等^[12]用双孔径法来测量光谱光度计的线性度;Wu等^[13]对双孔径法和光通量叠加法均进行了研究,两种方法展现了很好的一

致性;Shin等^[14]基于双LED光源积分球光通量叠加的方法来测量探测器的线性度;Wu等^[15]基于此方法采用激光设备对光电探测器的非线性展开了研究;Tanabe^[16]基于此方法对6种硅光电二极管在紫外波段的非线性进行了评估,研究结果显示,硅光电二极管在紫外波段的非线性基本不受波长影响。间接法最为显著的优点就是光路简单,传统方法可依据照度反比定律、通过改变探测距离的方式实现非线性测量,但这种方法需要很大的空间来保障测量动态范围^[13],实用性较差。因此,研究人员在标准探测器法的基础上将标准探测器的响应度标准传递到待定标探测器。Boivin^[17]对此展开了研究,发现间接法和直接法具有很好的一致性。Yang等^[18-19]以此对待测探测器进行了非线性测量研究。Kübarssepp等^[20]也采用这种方法对硅光电探测器进行了非线性测量,分别研究了偏振、光束尺寸以及感光尺寸对实验的影响,同时发现硅光电二极管在可见光波段的响应非线性与波长几乎没有关系。

本文以外置氙灯积分球作为辐射光源,采用间接法同步测量的方式,相对于其他方法和测量方式来说,本文方法的光路设计简单,降低了对于光源稳定程度的要求,可以消除测量过程中非同步引入的误差和漂移,可以降低对环境 and 干扰因素的敏感度,提高测量的重复性和准确性,从而得到更加可靠和准确的测量结果。本文采用的同步测量方法适用于各种需要高精度测量的领域,可以根据实际测量环境自适应调整同步频率和相位,提高测量的适应性和鲁棒性。本文以响应线

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2023-10-10; 录用日期: 2023-11-10; 网络首发日期: 2023-11-17

通信作者: *hychen@aiofm.ac.cn

性度经过标校的硅光电二极管 S2281 为参考标准,该探测器可以用作紫外-可见-近红外传递标准^[21],对日盲型光电管探测系统(光电管型号:R6800U-11)的响应非线性进行了标校,分析了影响标校的因素,给出了响应非线性标校的不确定度。

2 基本原理

2.1 待测探测器线性测量基本原理

间接法的测量原理是以线性度已知的探测器作为参考标准,将待测探测器与参考探测器在同一条件下进行测量,传统方式一般通过在光路中加入单个或组合中性滤光片的方式实现光源的能级扩展。为了保障测量光源的均匀性,通常采取光学透镜组合实现光束的整形^[18,22]。本文以外置氙灯积分球作为辐射光源,通过可调节光阑来控制外置氙灯进入积分球内的光通量,实现积分球出射辐亮度的调节,调节过程中光谱保持不变^[23],线性测量装置示意图如图 1 所示。本课题组已经对该积分球面均匀性和角度均匀性进行了检测,得到的结果分别为 0.8% 和 1.5%^[24],利用紫外光谱仪监测光谱稳定性。

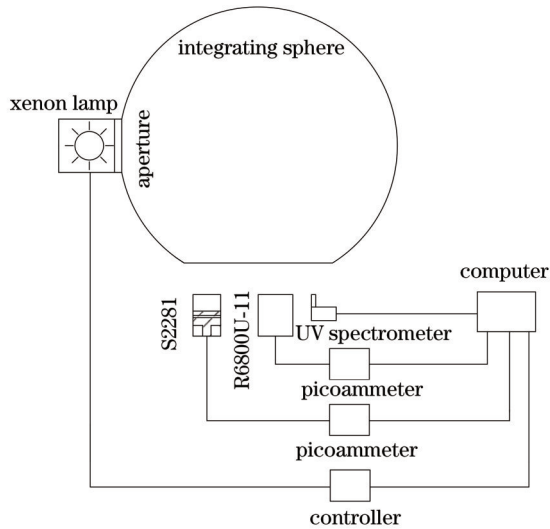


图 1 日盲型光电管探测系统的线性测量装置

Fig. 1 Linear measurement device of solar blind phototube detection system

本文以硅光电二极管 S2281 作为参考探测器,在 340 nm 波段且响应光电流大于 1.239×10^{-9} A 时,其线性误差在 0.69% 以内,可作为紫外波段响应为线性的标准探测器。选取日盲型光电管 R6800U-11 作为待测探测器(DUT),其光谱响应波段为 160~350 nm,因此在标准探测器光敏面前端放置了一个中心波长为 340 nm 且带宽为 10 nm 的滤光片。待测探测器相对于标准探测器的响应度^[17]为

$$R = \frac{I_{\text{Dut}} - I_{\text{Dut_dark}}}{I_{\text{Std}} - I_{\text{Std_dark}}}, \quad (1)$$

式中: I_{Dut} 、 $I_{\text{Dut_dark}}$ 分别为待测探测器的光照响应电流值

和暗背景值; I_{Std} 、 $I_{\text{Std_dark}}$ 分别为标准探测器的光照响应电流值和暗背景值。

实际测量中,由于各种探测器之间的性能差异,响应非线性会有一定差别,这必然导致测量得到的相对响应度值并非固定值。而间接法正是基于这一区别,用线性动态范围相对较大的探测器作为参考标准来标校待测探测器。因此,当相对响应度值不随光源辐射强度的变化而发生变化时,待测探测器和标准探测器的线性度便完全一致。因此,可以此响应度值作为参考响应度,第 i 个测量点的非线性修正因子^[18]为

$$\xi_i = \frac{R_{\text{mes}}(i)}{R_{\text{ref}}} = \frac{I_{\text{Dut_mes}}(i) - I_{\text{Dut_dark}}(i)}{I_{\text{Std_mes}}(i) - I_{\text{Std_dark}}(i)} \frac{1}{R_{\text{ref}}}, \quad (2)$$

式中: $I_{\text{Dut_mes}}(i)$ 、 $I_{\text{Dut_dark}}(i)$ 分别为第 i 个测量点待测探测器测量得到的电流值和暗背景值; $I_{\text{Std_mes}}(i)$ 、 $I_{\text{Std_dark}}(i)$ 分别为标准探测器测量得到的电流值和暗背景值。

在选取参考响应度时,可以先通过最小二乘法进行线性拟合,将获取到的斜率值作为标准来计算得出待测探测器的理论响应值,并计算出其相对误差。然后以相对误差最小的数据点处的响应度作为参考响应度。实际计算中已经扣除暗背景值,所以线性拟合时可设定截距为 0。斜率值 a 为

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n [I_{\text{Dut_mes}}(i) - I_{\text{Dut_dark}}(i)] [I_{\text{Std_mes}}(i) - I_{\text{Std_dark}}(i)]}{\sum_{i=1}^n [I_{\text{Dut_mes}}(i) - I_{\text{Dut_dark}}(i)]^2}, \quad (3)$$

则其线性误差^[11]为

$$\Delta_i = (\xi_i - 1) \times 100\%. \quad (4)$$

实际上,系统响应非线性由各测量点的非线性因子反映,参考探测器本身的响应非线性是整体测量不确定度的主要贡献者。将待测探测器的每一次输出与参考探测器的相应输出值进行比较,参考探测器的噪声会影响每一个数据点的质量,其线性程度会直接并一直影响整个测量结果^[18]。

2.2 参考探测器线性测量基本原理

在积分球同一辐射输出下,当参考探测器光敏前端放置中性密度滤光片[吸光度(OD)为 0.3,透过率约为 50%]时,测量一组数据,当不放置中性密度滤光片时,再测量一组数据,依据其透过率与辐射输出无关的原理,在多能级下对参考探测器进行线性测量。则在第 i 个测量点计算得到的滤光片透过率为

$$T_{\text{filter}}(i) = \frac{I_{\text{Std_atten}}(i) - I_{\text{Std_atten_dark}}(i)}{I_{\text{Std}}(i) - I_{\text{Std_dark}}(i)}, \quad (5)$$

式中: $I_{\text{Std_atten}}(i)$ 、 $I_{\text{Std_atten_dark}}(i)$ 分别为放置中性密度滤光片时,第 i 个测量点参考探测器测量得到的电流值和暗背景值。

如果参考探测器是严格线性的,计算得到的透过率应为常数。因此,可以用中性密度滤光片标校出参考探测器的线性误差,测量方法采用间接法交替的测

量方式,不可忽略光源波动对测量的影响,但其基本原理与待测探测器的线性测量一样。标校过程中,光敏面前端一直放置一个中心波长为 340 nm 且带宽为 10 nm 的滤光片。

3 实验装置

依据间接法同步测量基本原理,搭建了如图 1 所示的线性测量装置,参考探测器 S2281 和待测探测器 R6800U-11 的具体参数如表 1 所示。将参考探测器与待测探测器并排放置于积分球口同一位置处,两光敏

面基本处于同一平面,两探测器中心轴分布在球开口中心两侧,以使两探测器尽可能处于同一辐照度下。待测探测器阴极串联 Keithley, Model2400 源表提供稳定的负偏压,阳极接入 6485 皮安表(Keithley,具体参数如表 2 所示)反向输入端,构成日盲型光电管探测系统,采用屏蔽线连线,以减少外部电磁干扰;采用 Labview 编写测量软件,同时给两个皮安表发送采集电流指令,实现同步测量和两路测量信号一致性的实时观测。整个实验完全在暗室恒温恒湿条件下进行,这样可减少杂散光、温湿度等环境因素对实验的干扰。

表 1 硅光电二极管 S2281 和光电管 R6800U-11 的参数^[25-26]
Table 1 Parameters of Si photodiode S2281 and phototube R6800U-11^[25-26]

Parameter	S2281	R6800U-11
Spectral response range /nm	190 to 1100	160 to 350
Photocathode material	Si	Cs-Te
Dark current /pA	50@ $V_R=10$ mV and 25 °C	1
Recommended operating voltage /V	—	15
Ambient temperature /°C	-10 to 60	-80 to 50
Radiant sensitivity /(A/W)	0.12@200 nm and 25 °C	0.02@254 nm and 25 °C
Input window material	Quartz	Quartz
Active area size /mm	11.3	8

Note: V_R represents reverse voltage.

表 2 6485 皮安表(Keithley)的特性参数^[27]
Table 2 Characteristic parameters of 6485 picoammeter (Keithley)^[27]

Range	5 ^{1/2} digit default resolution	Accuracy (1YR) \pm (% RDG. + offset) 18-28 °C, 0-70% RH	Typical RMS noise	Analog rise time (10% to 90%)
2 nA	10 fA	0.4%+400 fA	20 fA	8 ms
20 nA	100 fA	0.4%+1 pA	100 fA	8 ms
200 nA	1 pA	0.2%+10 pA	1 pA	500 μ s
2 μ A	10 pA	0.15%+100 pA	10 pA	500 μ s
20 μ A	100 pA	0.1%+1 nA	100 pA	500 μ s
200 μ A	1 nA	0.1%+10 nA	1 nA	500 μ s
2 mA	10 nA	0.1%+100 nA	10 nA	500 μ s
20 mA	100 nA	0.1%+1 μ A	100 nA	500 μ s

4 实验结果

依据式(2)和(4)分别计算得到待测探测系统的非线性修正因子和线性误差,如图 2 所示。结果表明,在待测探测器的响应电流在 $2.97 \times 10^{-10} \sim 6.61 \times 10^{-8}$ A 内时,其线性误差数值变化较大,最大线性误差可达 -5.2%。因此,该探测器在实际应用时,需要通过非线性修正因子进行修正,一般测量点数越多,定标精度越高。另外,依据当前实验测量的数据进行预估,认为待测探测器的响应电流大于 3.93×10^{-8} A 时,其线性度较好,而受制于目前的实验条件,暂无法标校出其具体响应线性动态范围。

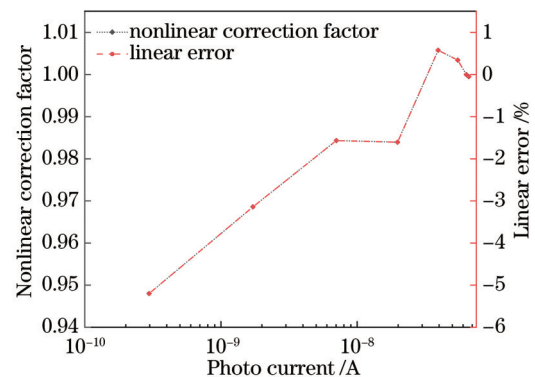


图 2 日盲型光电管探测系统的响应非线性标校结果
Fig. 2 Response nonlinear calibration results of solar blind phototube detection system

5 分析与讨论

5.1 光源光谱稳定性分析

光源光谱漂移会对非线性测量产生一定的影响,因此,在同一辐亮度下,用光谱仪对准积分球球口,每隔 10 min 测量一次氙灯光源的光谱。为了避免光谱仪测量电路本身的噪声以及光源波动的干扰,将电动光阑孔径大小设为最大,此时光谱仪能获得最好信噪比,设置光谱仪的扫描次数为 10 次,取其平均光谱,并将所获取的光谱曲线进行归一化处理,绘制光源光谱随时间的变化曲线,归一化公式为

$$\delta_i = \frac{L(\lambda_i) - L(\lambda_i)_{\text{dark}}}{\text{Max}\{L(\lambda) - L(\lambda)_{\text{dark}}\}}, \quad (6)$$

式中: $L(\lambda_i)$ 为光照背景下波长 λ_i 处的仪器响应值; $L(\lambda_i)_{\text{dark}}$ 为暗背景下波长 λ_i 处的仪器响应值; $\text{Max}\{L(\lambda) - L(\lambda)_{\text{dark}}\}$ 为所测量波长范围内扣除暗背景后的仪器最大响应值。

在光源预热约 2 h 后,用光谱仪对着积分球口开始测量,光谱仪采用的是美国海洋光学公司型号为 FLAME-T-UV-VIS-ES 的光谱仪,可测量波长范围为 179.655~886.409 nm,波长间隔小于 0.22 nm。实际测试过程中主要关注 179.655~350.097 nm 波段。为了尽可能地提高信噪比,通过调整仪器参数,使得波长大于 350 nm 时仪器响应值接近饱和。图 3 绘制了光源相对光谱辐亮度随时间的变化曲线,插图中标线处

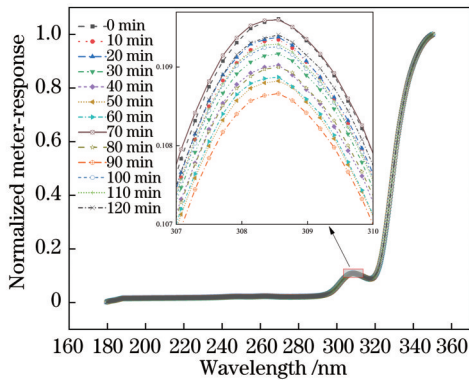


图 3 氙灯光源相对光谱辐亮度随时间的变化

Fig. 3 Change of relative spectral radiance of xenon lamp light source with time

的峰值(峰值波长为 308.558 nm)并没有随着测量时间发生漂移,相对标准差为 0.254%,可见光谱曲线波动较小。而电动光阑在调节过程中,积分球辐射输出为等色温调节,可认为光源光谱基本未发生变化,因此光谱漂移对非线性测量的影响可忽略。

5.2 参考点的选取

本文测量了 8 组数据,每组数据包含 11 个测量点,每个测量点共测量了 799 个数据,待测探测器的偏置电压设置为 15 V。因此,在对每个测量点的数据求取平均后,扣除暗背景,可降低内外各种因素的干扰,待测探测器与参考探测器的响应光电流线性拟合结果如图 4 所示。

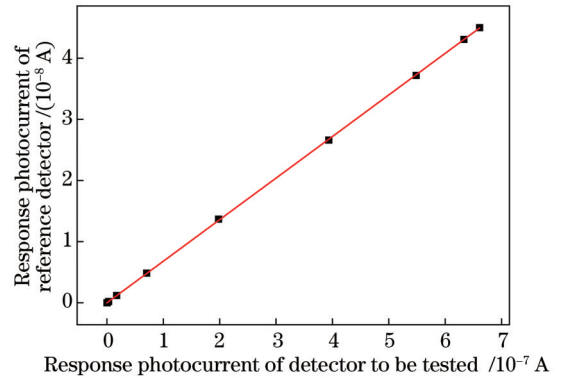


图 4 参考探测器与待测探测器的响应光电流线性拟合结果
Fig. 4 Linear fitting results of response photocurrents of reference detector and detector to be tested

前文所述的方法得到的相对误差结果如表 3 所示,选取第 10 个测量点的相对响应度作为参考响应度,按照式(1)计算得到各组相对响应度值并求取平均后,得到参考响应度的值约为 0.147。

5.3 间接法同步测量方式影响因素分析

相关系数是反映测量数据之间是否相关联的重要参量,待测探测器与参考探测器测量数据的相关程度直接反映了待测探测器的响应线性程度。图 5(a)绘制了相关系数随待测探测器响应光电流的变化,可发现待测探测器与参考探测器直到第 4 个测量点才呈现出一定的相关性。因此,为了保障实验结果的可靠性,只以第 4~11 个测量点的实验数据作为依据来研究待探测器的线性误差。相关系数的计算公式为

$$r = \frac{\sum_j^{799} [I_{\text{Std_meas}}(j) - \bar{I}_{\text{Std_meas}}] [I_{\text{Dut_meas}}(j) - \bar{I}_{\text{Dut_meas}}]}{\sqrt{\sum_j^{799} [I_{\text{Std_meas}}(j) - \bar{I}_{\text{Std_meas}}]^2} \sqrt{\sum_j^{799} [I_{\text{Dut_meas}}(j) - \bar{I}_{\text{Dut_meas}}]^2}}, \quad (7)$$

式中: $I_{\text{Std_meas}}(j)$ 、 $I_{\text{Dut_meas}}(j)$ 分别为参考探测器、待测探测器第 j 次采样的响应电流值; $\bar{I}_{\text{Std_meas}}$ 、 $\bar{I}_{\text{Dut_meas}}$ 分别为参考探测器、待测探测器 799 次采样的电流平均值。

随着信噪比的增大,待测探测器和参考探测器的

响应电流值的相关性增强。然而,在图 5(a)中箭头所标注的测量点处的相关系数反而明显小于前一个测量点。分析发现此时待探测器的输出电流接近皮安表量程切换位置的数值,这可能是由皮安表自身的非线性

表 3 各测量点的相对响应度和相对误差

Table 3 Relative response values and relative error at each measurement point

Measurement point	Response photocurrent of S2281 /A	Response photocurrent of R6800U-11 /A	Relative responsivity	Relative error / %
1	9.314×10^{-12}	1.384×10^{-12}	0.149	-1.056
2	4.641×10^{-11}	6.374×10^{-12}	0.137	6.591
3	2.053×10^{-10}	2.806×10^{-11}	0.137	7.062
4	2.128×10^{-9}	2.965×10^{-10}	0.139	5.268
5	1.207×10^{-8}	1.718×10^{-9}	0.142	3.210
6	4.863×10^{-8}	7.034×10^{-9}	0.145	1.639
7	1.369×10^{-7}	1.979×10^{-8}	0.145	1.676
8	2.662×10^{-7}	3.934×10^{-8}	0.148	-0.505
9	3.719×10^{-7}	5.484×10^{-8}	0.147	-0.270
10	4.308×10^{-7}	6.330×10^{-8}	0.147	0.073
11	4.500×10^{-7}	6.610×10^{-8}	0.147	0.122

性所导致。本文以第 8 组该测量点的数据为例进行说明,为了方便进行数据分析,将待测探测器 R6800U-11 的响应光电流值以参考探测器 S2281 的响应光电流值进行归一化,则归一化后待测探测器第 j 次采样到的响应电流值为

$$\hat{I}_{Dut_meas}(j) = \frac{\sum_j^{799} I_{Std_meas}(j)}{\sum_j^{799} I_{Dut_meas}(j)} I_{Dut_meas}(j) \quad (8)$$

在第 j 个采样数据点处,待测探测器与参考探测器的响应光电流的相对误差为

$$E_{rel}(j) = \left[1 - \frac{\hat{I}_{Dut_meas}(j)}{I_{Std_meas}(j)} \right] \times 100\% \quad (9)$$

图 5(b) 为归一化后的原始采样数据,横坐标为待测探测器的响应光电流值,纵坐标为参考探测器的响

应光电流值,两组数据的相关系数约为 0.851,分布较为弥散。

按照式(9)计算该测量点两组数据的相对误差,如图 5(c) 所示,发现其相对误差基本位于 $\pm 0.4\%$ 范围内;而皮安表在该测量点所处量程范围内的测量准确度为 $\pm 0.4\%$,因此其最大可能是由皮安表的非线性所致。为了研究该测量点处测量电路的非线性是否会对实验装置的线性测量结果造成影响,可将相对误差在 $\pm 0.08\%$ 范围内的数据保留,此时两组数据的相关系数约为 0.986,正好处于前一个测量点和后一个测量点的相关系数之间,符合基本规律。按照式(2)和(4)计算得到原来该测量点处的线性误差为 -1.604% ,筛选后可得该测量点处的线性误差为 -1.605% 。

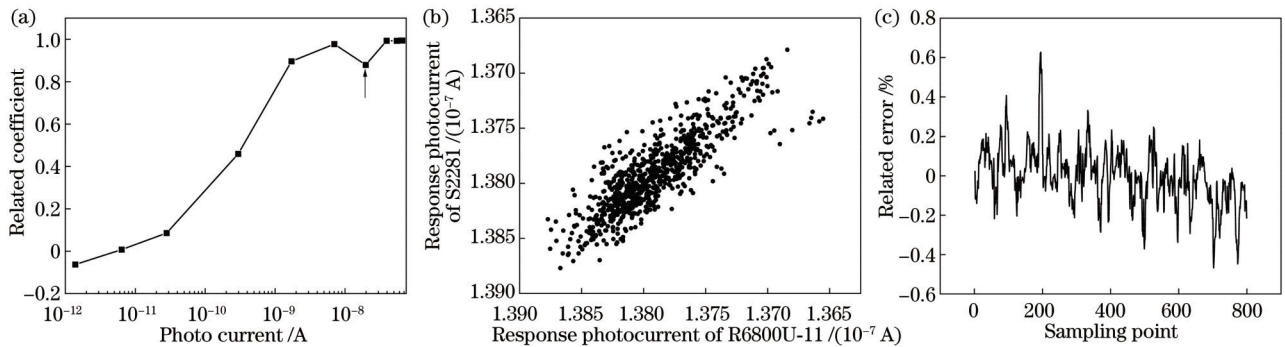


图 5 待测探测器与参考探测器的响应光电流相关系数、原始响应光电流值与相对误差。(a) 相关系数; (b) 原始响应光电流值; (c) 相对误差

Fig. 5 Correlated coefficient, original response photocurrent, and relative error of response photocurrents of detector to be tested and reference detector. (a) Correlated coefficient; (b) original response photocurrent values; (c) relative error

待测探测器与参考探测器的相关性除了受测量电路的非线性影响之外,自身噪声及其线性响应动态范围也是关键影响因素。自身噪声对测量值的影响可由暗背景噪声来说明,表 4 列出了各测量点的测量值受暗背景噪声的影响,由暗背景值的绝对标准差与各测

量点的测量值的比值表示。结果表明,在第 1~3 个测量点处,待测探测器的响应光电流值受到暗背景噪声的影响较为严重,参考探测器受到的干扰较小,这可能与待测探测系统的阻抗匹配程度相关,致使噪声增益频率特性变差,信噪比下降,详情见文献[28];在第 4~

11 个测量点处,待测探测器与参考探测器的响应光电流受暗背景噪声的影响分别为 0.845% 和 0.007%。

表 4 暗背景噪声对各测量点测量值的影响

Table 4 Influence of dark background noise on measured values of each measurement point

Measurement point	Measured value of R6800U-11 / %	Measured value of S2281 / %
1	180.9796	1.7538
2	39.2955	0.3520
3	8.9255	0.0795
4	0.8448	0.0070
5	0.1458	0.0012
6	0.0328	0.0012
7	0.0117	0.0004
8	0.0067	0.0002
9	0.0048	0.0002
10	0.0042	0.0001
11	0.0040	0.0001

表 5 描述了各测量点的测量值受噪声的影响,由测量值相对标准差来表示,此时噪声包含光源波动干扰和探测器暗背景噪声。对比表 4 与表 5 的数据可发现:从第 3 个测量点开始,暗背景噪声引起参考探测器响应光电流的波动相对光源来说可忽略;在第 1~4 个测量点处,待测探测器的暗背景噪声干扰较大;从第 5 个测量点开始,噪声对参考探测器和待测探测器的影响基本趋于一致,这时可忽略光源波动的影响。

表 6 描述了待测探测器和参考探测器在各测量点的均方根噪声,由响应值绝对标准差表示。探测器噪声一般包括散弹噪声和热噪声,其中散弹噪声与探测

表 5 噪声对各测量点测量值的影响

Table 5 Influence of noise on measured values of each measurement point

Measurement point	Measured value of R6800U-11 / %	Measured value of S2281 / %
1	146.804	1.850
2	20.055	0.700
3	5.131	0.573
4	1.073	0.473
5	0.464	0.418
6	0.360	0.361
7	0.313	0.285
8	0.208	0.205
9	0.170	0.165
10	0.162	0.158
11	0.157	0.152

器的光电流和暗电流紧密关联,可由下述公式表述^[29]:

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_p + I_D)\Delta f}, \quad (10)$$

式中: $q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$; I_p 为光生电流; I_D 为暗电流; Δf 为噪声测量带宽。

散弹噪声随着光照强度的增大而增大,致使均方根噪声也随着光照强度的增大而增大。而待测探测器的暗背景噪声约为 $2.505 \times 10^{-12} \text{A}$ 。表 6 中第 1 至第 3 个测量点的均方根噪声均小于该值,并没有呈现出同样的性质,这可能源于两探测器不同的工作机理。参考探测器的工作机理为内光电效应,待测探测器的工作机理为外光电效应,这就是表 4 中前 3 个测量点待测探测器的数据大于表 5 中相应数据的原因。

表 6 各测量点的噪声均方根值

Table 6 Root mean square values of noise at each measuring point

Measurement point	Root mean square value of R6800U-11 / A	Root mean square value of S2281 / A
1	2.032×10^{-12}	1.723×10^{-13}
2	1.278×10^{-12}	3.246×10^{-13}
3	1.440×10^{-12}	1.176×10^{-12}
4	3.181×10^{-12}	1.006×10^{-11}
5	7.967×10^{-12}	5.043×10^{-11}
6	2.534×10^{-11}	1.754×10^{-10}
7	6.184×10^{-11}	3.896×10^{-10}
8	8.168×10^{-11}	5.457×10^{-10}
9	9.301×10^{-11}	6.147×10^{-10}
10	1.027×10^{-10}	6.812×10^{-10}
11	1.036×10^{-10}	6.853×10^{-10}

日本国家先进工业科学技术研究所研究人员认为内部量子效率会对探测器的响应非线性产生一定的影响^[16],这可能就是待测探测器的线性误差较大的原因之一。另外,探测器性能还与材料能级结构、材料缺

陷、器件结构等因素有关^[30]。

从上述的分析可知,第 4 个测量点是两组测量数据是否相关的临界点:在该点之前,待测探测器受暗背景噪声的强烈干扰,这破坏了两者的相关性;在该点之

后,待测探测器受暗背景的干扰小于光源波动的干扰,待测探测器能够与参考探测器同步反映光源波动的情况。另外,在该测量点处,待测探测器的响应光电流受暗背景噪声的影响小于 1%,满足工程应用需求。因此,从该测量点对待测探测器的响应非线性进行研究是具备较强可靠性和研究依据的,对间接法的同步测量方式影响较小。

5.4 参考探测器响应非线性

与待测探测器的响应非线性标校过程一样,通过线性拟合可得到参考透过率,从而依据参考透过率计算得到参考探测器的非线性修正因子和线性误差。图 6(a)为参考探测器的线性拟合结果,横坐标为光敏面前端放置中性密度滤光片时的响应光电流值,纵坐标

为去掉中性密度滤光片时的响应光电流值;图 6(b)为响应非线性标校结果,在响应光电流大于 $1.239 \times 10^{-9} \text{ A}$ 时,线性误差在 0.69% 范围内,响应非线性如可见光波段,本研究室已采用光通量叠加法标校出其在 632 nm 波段且响应光电流在 $3.92 \times 10^{-11} \sim 0.01 \text{ A}$ 内,该探测器的线性误差在 0.23% 以内^[11],这可能与内部量子效率存在一定关系,随着入射波长变短,硅光电二极管的吸收长度会减小,详情见文献[16,31]。图 6(c)显示了光源随时间的变化,每隔 5 min 测量一次,结果表明,在 90 min 内,光源波动为 0.316%,这可由测量数值的相对标准差表示。表 7 列出了参考探测器各响应光电流下的非线性修正因子,其不确定度变化不大,主要受光源波动的影响。

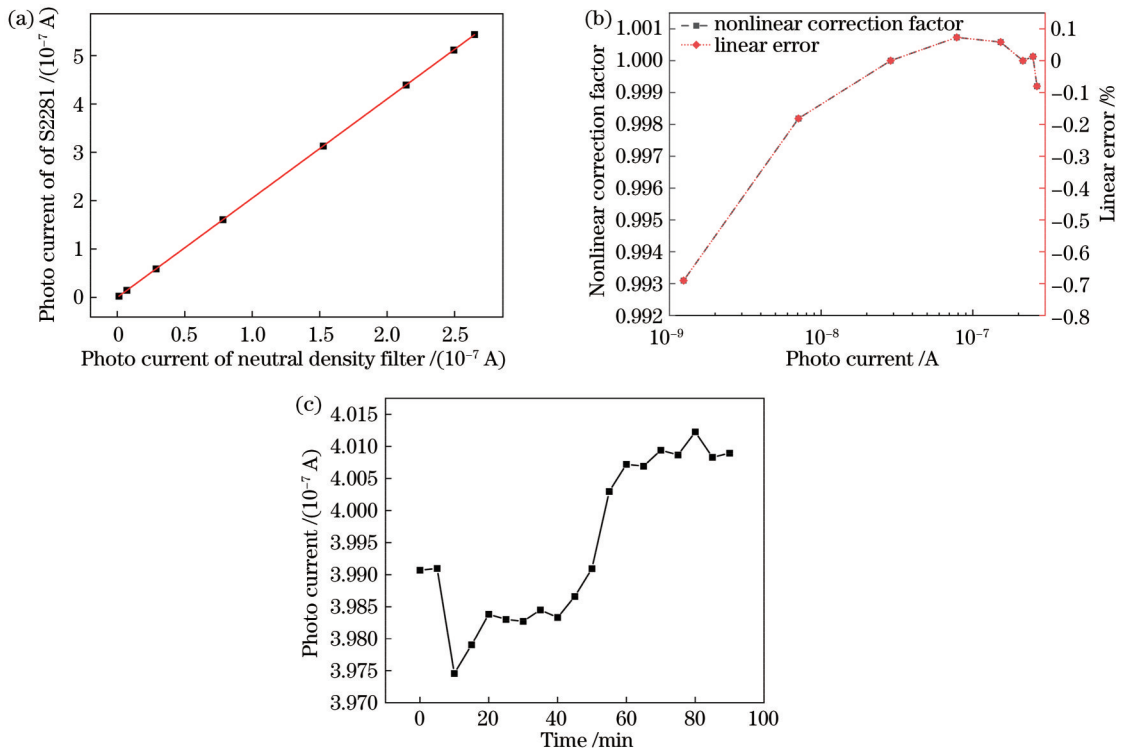


图 6 参考探测器的实验结果与光源电流变化。(a)线性拟合结果;(b)响应非线性标校结果;(c)光源电流随时间的变化
Fig. 6 Experimental results of reference detector and light source current changes. (a) Linear fitting result; (b) response nonlinear calibration results; (c) current change of light source over time

表 7 各响应光电流下非线性修正因子数据

Table 7 Data of nonlinear correction factor for various response photo current

Photo current / A	Nonlinear correction factor								Relative standard deviation / %
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	
1.239×10^{-9}	0.993	0.993	0.990	0.997	0.993	0.994	0.990	0.995	0.222
7.087×10^{-9}	1.000	0.997	0.995	0.998	0.997	1.008	0.994	0.997	0.422
2.873×10^{-8}	1.001	0.998	1.002	0.998	1.000	1.001	1.005	0.995	0.296
7.833×10^{-8}	1.001	1.000	1.002	0.998	1.000	1.003	1.003	1.001	0.158
1.527×10^{-7}	1.003	1.001	1.001	1.001	1.003	1.001	1.000	1.001	0.108
2.140×10^{-7}	0.998	1.000	1.002	1.000	1.002	0.999	0.999	1.001	0.151
2.494×10^{-7}	1.001	0.998	1.001	0.999	1.001	1.002	1.000	1.000	0.127
2.647×10^{-7}	0.997	1.001	0.999	0.999	0.999	1.001	1.003	0.997	0.212

5.5 非线性修正因子测量不确定度

表 8 列出了各组各测量点处的非线性修正因子。在第 1 个至第 3 个测量点处, 不确定度较大, 这主要是由于待测探测器相对于参考探测器的辐亮度响应度低很多, 容易受暗背景噪声的干扰。从上文分析

可得, 光源辐亮度越低, 待测探测器的响应光电流值越容易受到噪声的干扰, 进而破坏两探测器的相关性, 这违背了间接法同步测量的基本定律, 因此不能忽略光源波动、背景噪声等因素对线性测量装置的干扰。

表 8 各测量点处的非线性修正因子数据
Table 8 Data of nonlinear correction factor for each measurement point

Measurement point	Nonlinear correction factor								Relative standard deviation / %
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	
1	1.180	0.934	0.752	1.148	0.670	1.425	0.928	1.049	24.107
2	0.978	0.913	0.898	0.971	0.933	—	0.901	0.949	3.471
3	0.930	0.927	0.927	0.934	0.920	0.946	0.927	0.929	0.826
4	0.949	0.946	0.946	0.949	0.948	0.949	0.948	0.948	0.139
5	0.968	0.967	0.968	0.970	0.969	0.969	0.969	0.968	0.098
6	0.982	0.983	0.984	0.986	0.985	0.985	0.985	0.984	0.123
7	0.981	0.984	0.985	0.985	0.984	0.985	0.984	0.984	0.129
8	1.001	1.004	1.006	1.007	1.007	1.008	1.007	1.007	0.242
9	0.998	1.001	1.003	1.004	1.005	1.005	1.005	1.005	0.256
10	0.995	0.998	1.000	1.001	1.002	1.002	1.002	1.001	0.259
11	0.994	0.998	0.999	1.000	1.001	1.001	1.001	1.001	0.241

表 9 列出了测量系统不确定度来源, 在第 4~11 个测量点处, 因采取间接法同步测量方式, 可忽略光源波动对测量系统的影响, 每组测量时间小于 2 h, 认为光源光谱不随时间产生漂移。参考探测器的测量不确定度由其非线性修正因子相对标准差决定; 暗背景的测量不确定度由暗背景噪声对系统测量值的影响决定;

标准传递过程的不确定度由参考探测器响应光电流值起伏决定; 待测探测系统的测量不确定度由其响应光电流值起伏决定^[32]。由于待测探测器与参考探测器的光敏面与积分球出口面几乎平行, 预估其角度非均匀性不确定度为 0.5%。

表 9 测量系统的合成不确定度
Table 9 Combined uncertainty of measurement system

Influence factor	Uncertainty / %
Surface nonuniformity (integrating sphere)	0.800
Angle nonuniformity (integrating sphere)	0.500
Standard detector	0.422
Repeatability	0.259
Dark background	0.845
Standard transfer process	0.473
Detection system to be tested (phototube, picoammeter, source meter)	1.073
Combined uncertainty	1.795
Expanded uncertainty (confidence factor $k=2$)	3.591

6 结 论

本文采用间接法建立了基于探测器的标准传递链, 该方法相对于典型的光通量叠加法来说, 减少了繁琐的测量程序, 降低了对光源稳定性的要求。实验将外置氙灯光源积分球作为辐射源, 其光照均匀性好, 相对于典型的双光路测量方式来说, 本文方法降低了光路的复杂性。

研究结果表明, 日盲型光电管探测系统的响应光

电流在 $2.97 \times 10^{-10} \sim 6.61 \times 10^{-8}$ A 内, 线性误差在 5.2% 以内, 非线性修正因子数值范围为 0.948~1.006, 影响非线性修正因子的主要因素为待测探测器暗背景噪声, 测量系统的不确定度为 3.59%。

参 考 文 献

- [1] 贾梦涵, 唐利斌, 左文彬, 等. 氧化物基紫外探测器的研究进展[J]. 红外技术, 2020, 42(12): 1121-1133.
Jia M H, Tang L B, Zuo W B, et al. Progress in oxide-based ultraviolet detectors[J]. Infrared Technology, 2020, 42(12):

- 1121-1133.
- [2] Li Z Q, Yan T T, Fang X S. Low-dimensional wide-bandgap semiconductors for UV photodetectors[J]. *Nature Reviews Materials*, 2023, 8(9): 587-603.
- [3] 周祥燕, 项文斌, 陈坤耀, 等. ZnCdS:Mn/ZnS 量子点在硅基紫外探测器中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 1704001.
Zhou X Y, Xiang W B, Chen Y J, et al. Application of ZnCdS:Mn/ZnS quantum dots in silicon-based ultraviolet detectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 1704001.
- [4] 张翔宇, 陈雨田, 曾值, 等. 自供能 Bi₂O₂Se/TiO₂ 异质结紫外探测器的制备与光电探测性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1104001.
Zhang X Y, Chen Y T, Zeng Z, et al. Preparation and photodetection performance of self-powered Bi₂O₂Se/TiO₂ heterojunction ultraviolet detectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1104001.
- [5] 李佳伟, 陈洪耀, 张黎明, 等. 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[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1012002.
Li J W, Chen H Y, Zhang L M, et al. Radiation standard transfer in 232-400 nm band based on solar blind filter radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1012002.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 石晶晶, 李孟凡, 胡亚东, 等. 紫外可见偏振成像光谱仪的光谱定标与匹配方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0930002.
Shi J J, Li M F, Hu Y D, et al. Spectral calibration and matching method for ultraviolet-visible polarization imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0930002.
- [10] 唐光华, 宋晓峰, 汪述猛, 等. 日盲型紫外像增强管的应用及研制进展[J]. *光电子技术*, 2016, 36(3): 164-167.
Tang G H, Song X F, Wang S M, et al. Application and development of ultraviolet solar-blind image intensifiers[J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(3): 164-167.
- [11] 刘辉, 陈洪耀, 司孝龙, 等. 基于双 LED 光源积分球的硅探测器宽动态范围响应线性标校[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0904001.
Liu H, Chen H Y, Si X L, et al. Linear calibration of wide dynamic range response of silicon detectors based on double LEDs light source integrating sphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0904001.
- [12] Mielenz K D, Eckerle K L. Spectrophotometer linearity testing using the double-aperture method[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(10): 2294-2303.
- [13] Wu Z F, Dai C H, Wang Y F, et al. Nonlinearity measurement of silicon detector and PMT detector[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10463: 104631Q.
- [14] Shin D J, Park S, Jeong K L, et al. High-accuracy measurement of linearity of optical detectors based on flux addition of LEDs in an integrating sphere[J]. *Metrologia*, 2014, 51(1): 25-32.
- [15] Wu Z F, Dai C H, Li L, et al. Nonlinearity of photodetector using laser facility[C]//*Proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE*, June 14-22, 2019, Washington DC, USA. Vienna: International Commission on Illumination, CIE, 2019: OP57.
- [16] Tanabe M. Evaluation of the nonlinearity of silicon photodiodes for ultraviolet light detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106852.
- [17] Boivin L P. Automated absolute and relative spectral linearity measurements on photovoltaic detectors[J]. *Metrologia*, 1993, 30(4): 355-360.
- [18] Yang S, Keenan D A, Laabs H, et al. 193-nm detector nonlinearity measurement system at NIST[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5040: 1651-1656.
- [19] Laabs H, Keenan D, Yang S, et al. Measurements of detector nonlinearity at 193 nm[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(6): 841-848.
- [20] Kübarsepp T, Haapalinna A, Kärhã P, et al. Nonlinearity measurements of silicon photodetectors[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2716-2722.
- [21] 孙德贝, 李志刚, 李福田. 用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 294-301.
Sun D B, Li Z G, Li F T. Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 294-301.
- [22] Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(3): 377-381.
- [23] 刘辉, 陈洪耀, 李佳伟, 等. 基于积分球光源的大动态范围辐射标准传递技术研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(8): 0804002.
Liu H, Chen H Y, Li J W, et al. Large dynamic range radiation standard transmission research based on integrating sphere source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(8): 0804002.
- [24] 刘辉. 大动态范围辐射标准传递技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 76-102.
Liu H. Research on radiation standard transfer technology in large dynamic range[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 76-102.
- [25] Hamamatsu. Si photodiodes[EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S2281.html>.
- [26] Hamamatsu. Phototubes[EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/phototube/R6800U-11.html>.
- [27] InstrumentsKeithley. Model 6485 and model 6487 user's manual [EB/OL]. (2011-03-01)[2023-10-26]. <https://www.tek.com/en/low-level-sensitive-and-specialty-instruments/series-6400-picoammeters-manual/model-6485-model-6487>.
- [28] Eppeldauer G. Chopped radiation measurements with large area Si photodiodes[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1998, 103(2): 153-162.
- [29] OSI Optoelectronics. Photodiode characteristics and applications [EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.osioptoelectronics.com/knowledgebase>.
- [30] 郑泽宇, 罗谦, 徐开凯, 等. 基于黑硅微结构的全硅 PIN 光电探测器[J]. *光电工程*, 2021, 48(5): 200364.
Zheng Z Y, Luo Q, Xu K K, et al. All-silicon PIN photodetector based on black silicon microstructure[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(5): 200364.
- [31] Tanabe M, Amemiya K, Numata T, et al. Spectral supralinearity of silicon photodiodes in visible light due to surface recombination[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(11): 3084-3089.
- [32] 李双, 吴浩宇, 李照洲, 等. 近红外高精度光辐射标准探测器的实验研究[J]. *光学技术*, 2004, 30(4): 498-501.
Li S, Wu H Y, Li Z Z, et al. Highly accurate calibration of optical radiation detectors at near infrared spectrum[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(4): 498-501.

Response Nonlinear Calibration of Solar Blind Phototube Detection System Using Indirect Method

Cao Hanhui^{1,2}, Chen Hongyao^{2*}, Huang Wenxin², Li Jiawei²

¹University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract

Objective Ultraviolet detection technology is widely used in military and civilian fields, playing an important role in missile warning, ultraviolet/infrared composite guidance, detection of solar ultraviolet radiation intensity, ozone detection, biomedicine, and other fields. In recent years, with the development of ultraviolet optical remote sensing detection technology, quantitative research on ultraviolet radiation information has become particularly important. As a type of ultraviolet detector, the solar blind phototube can reduce the impact of out-of-band leakage in ultraviolet radiation measurement, thereby improving the detection accuracy of the ultraviolet band. Based on its characteristics, it is often used in various large military equipment missile approaching warning systems and also commonly used in corona detection to effectively and quickly detect fault locations. In Europe and America, it has been used as a standard power detection method and widely applied in equipment. At present, research on solar blind phototube preparation has gradually begun in China, and the study of its radiation quantification is one of the key links for application. Therefore, in the face of the urgent need for high-precision radiation calibration in the ultraviolet band and the exploration of the application of solar blind photocell, it is necessary to study its response nonlinearity.

Methods The research on the response nonlinearity of detectors can be divided into two methods: direct method and indirect method. Based on the indirect method, the responsivity standard is transferred to the detector to be calibrated by the standard detector method. The response nonlinearity of the solar blind phototube detection system is studied, and a standard transfer chain based on the detector is established. In terms of the measurement method, we use an external xenon lamp integrating sphere as the radiation source and control the luminous flux of the external xenon lamp entering the integrating sphere through an adjustable aperture. The adjustment of the radiance of the sphere exit portal is achieved and the spectral consistency during the adjustment process is ensured. In this way, the synchronous measurement of the reference detector and the detector to be tested is easy to achieve under the same radiation conditions. In traditional measurement methods, the optical power level of the radiation source is selected with a set of neutral density filters used either one at a time or in combinations of several filters. It needs to construct a dual optical path to achieve synchronous measurement between the reference detector and the detector to be tested. Otherwise, it needs to establish a standard transfer chain by a motor to continuously exchange the positions of the two detectors. Therefore, we provide a new approach for the study of detector response nonlinearity. Compared to traditional measurement methods, the proposed approach simplifies the complexity of the optical path, reduces the strict requirements for the stability of the light source, and eliminates errors and drifts introduced by non-synchronization during the measurement process. In addition, it reduces sensitivity to environmental and interference factors, improves measurement repeatability and accuracy, and obtains more reliable and accurate measurement results.

Results and Discussions We first analyze the stability of the xenon lamp light source spectrum, indicating that there is no drift phenomenon in its relative spectral radiance within 2 h. The peak value (wavelength: 308.558 nm) has a relative standard deviation of 0.254% during the measurement period, with little fluctuation. Then, we propose a method for selecting a reference point, and based on the relative error calculated in Table 3, 0.147 is selected as the reference responsivity. Subsequently, we focus on the influencing factors of indirect synchronous measurement and discuss the interference of light source fluctuations and dark background noise on linear measurement devices from the perspective of the correlation between the measured data of the detector to be tested and the reference detector. Results show that the response nonlinearity of the detector to be tested can be studied within a range of 2.97×10^{-10} – 6.61×10^{-8} A. Finally, based on the principle that the transmittance of the neutral density filter is independent of the radiation output of the light source, we study the nonlinearity of the reference detector responsivity, indicating that its linear error is within the range of 0.69% when the response photocurrent is greater than 1.239×10^{-9} A, which can be used as a standard detector with excellent linearity in the ultraviolet band.

Conclusions We introduce an indirect method to establish a transfer chain based on a standard detector and study the application of the standard detector method in laboratory calibration. Compared to the typical light flux superposition method, this method reduces the tedious measurement procedures and the requirements for light source stability. The experiment adopts an external xenon lamp light source integrating sphere as the radiation source, which has good illumination uniformity and reduces the complexity of the optical path compared to the typical dual optical path measurement method. The research results indicate that the response photocurrent of the solar blind phototube detection system is within 2.97×10^{-10} – 6.61×10^{-8} A, and its linear error is within 5.2%. The value range of the nonlinear correction factor is 0.948–1.006. The main factor affecting the nonlinear correction factor is the dark background noise of the detector to be tested, and the uncertainty of the measurement system is 3.59% ($k=2$).

Key words detectors; solar blind detector; nonlinear measurement; indirect method; radiation standard transfer