

基于双 LED 光源积分球的硅探测器宽动态范围 响应线性定标

刘 辉^{1,2}, 陈洪耀¹, 司孝龙¹, 张黎明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 介绍了一种硅探测器宽动态范围线性测量系统, 系统以光通量叠加为基础, 通过时间逻辑控制 LED 点亮、熄灭和采集数据, 在 $2.2 \times 10^{-6} \sim 0.57$ A 的 LED 注入电流调节范围内, 标定了硅探测器响应电流在 $3.92 \times 10^{-11} \sim 10^{-2}$ A 范围内近 9 个量级的线性。实验结果表明, 硅探测器在 9 个量级的动态范围内测量时探测器非线性引入的误差可达 0.23%, 通过非线性修正因子对其测量值进行修正很有必要, 并给出了非线性修正因子, 其数值范围为 1~1.0023。分析了测量结果的测量不确定度, 列出影响系统测量精度的因素, 并定量分析了 LED 光源的光谱漂移对系统测量精度的影响。给出了线性测量系统的相对合成不确定度, 硅探测器响应电流范围分别为 39.2 pA~0.326 nA、0.326~81.6 nA、81.6 nA~20.4 μ A、20.4 μ A~10.2 mA 时的测量不确定度分别为 0.269%、0.0116%、0.00536% 和 0.00320%。结果表明该系统可以用于高精度硅探测器的宽动态范围响应线性定标。

关键词 探测器; 光学测量; 线性定标; 光通量叠加; 不确定度

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0904001

Linear Calibration of Wide Dynamic Range Response of Silicon Detectors Based on Double LEDs Light Source Integrating Sphere

Liu Hui^{1,2}, Chen Hongyao¹, Si Xiaolong¹, Zhang Liming¹

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

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

Abstract A wide dynamic range linear measurement system of silicon detector is introduced. The system is based on flux addition, which controls the LEDs to turn on, off and the collector to collect data through time logic. In the adjustment range of LED injection current of $2.2 \times 10^{-6} - 0.57$ A, nearly nine orders linearity of silicon detector response current within the range of $3.92 \times 10^{-11} - 10^{-2}$ A is calibrated. The experimental results show that the error introduced by the nonlinearity of the detector can reach 0.23% when the silicon detector is measuring in the dynamic range of nine orders and it is necessary to correct the measured value by the nonlinearity correction factor. In the end, a nonlinearity correction factor is given, ranging from 1 to 1.0023. The measurement uncertainty of the measurement results is analyzed, and the factors that affect the measurement accuracy of the system are listed. The influence of the spectral drift of the LED light source on the measurement accuracy of the system is analyzed quantitatively. The measurement uncertainties are 0.269%, 0.0116%, 0.00536% and 0.00320%, when the response current ranges of the silicon detector are 39.2 pA-0.326 nA, 0.326-81.6 nA, 81.6 nA-20.4 μ A and 20.4 μ A-10.2 mA respectively. The result shows that the system can be used in wide dynamic range response of high

收稿日期: 2017-04-17; 收到修改稿日期: 2017-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)

作者简介: 刘 辉(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事光电测量、辐射标准传递等方面的研究。

E-mail: liuhui2011hello@126.com

导师简介: 张黎明(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

accuracy silicon detectors.

Key words detectors; optical measurement; linearity calibration; flux addition; uncertainty

OCIS codes 040.5160; 040.6040; 120.1880; 350.4800

1 引 言

光辐射探测器的线性指探测器的响应度随入射光辐射通量强度的变化而保持不变^[1]。探测器线性的精确测量是光度测量、辐射度测量和热辐射测量领域的重要条件。目前低温绝对辐射计是公认的光辐射测量绝对精度最高的标准辐射计,其测量激光绝对功率的不确定度为 0.005%~0.023%^[2-4],已被许多国家实验室作为初级辐射标准。但是低温辐射计运行条件苛刻,费用昂贵,不便作为常规运行的基准,而且其功率响应动态范围小,一般只有一个量级,如安徽光学精密机械研究所研制的低温绝对辐射计功率响应动态范围为 25~250 μW ^[4],在动态范围上往往与应用探测不一致,这就要求以线性位移不变测量系统来实现高精度辐射比对测量及其标准传递。在材料的漫反射特性测量和大动态辐射标准传递过程中,探测器测量信号的变化范围达 4 个量级甚至更多。在双向反射分布函数(BRDF)绝对测量中,光辐射测量单元的测量信号动态范围在 4 个量级以上^[5-7],可见光红外成像辐射计白天/夜晚通道(VIIRS DNB)的测量动态范围近 7 个量级^[8]。硅探测器响应率高、响应波段宽、线性范围大、制造工艺成熟,是作为可见-近红外波段辐射标准传递的最好选择。维持高精度并实现线性位移不变测量,为了得到较高的辐射标准传递精度和绝对测量精度,对硅探测器的线性进行定标十分必要。而且对于大动态范围辐射源,对其辐射能级变化进行监控的一个简单有效的方法就是使用动态范围足够大、线性特性优良的硅探测器^[9]。所以,对硅探测器的线性进行高精度测量并修正,可以大大降低辐射测量和辐射标准传递的不确定度,提高测量精度。

探测器线性测量方面的研究已经有很长时间,研究机构做了大量的研究工作。对探测器线性测量的方法大致归为两种:间接测量法和直接测量法。间接测量法有滤光片或滤光片组合法、偏振片法、用标定过线性的探测器标定待测探测器法等^[10-12],直接测量法主要为光通量叠加法^[13-15]。间接测量法发展较早,其测量过程简单,测量速度快,但是由于测量时引入的辅助测量器件如滤光片、偏振片等会增加测量项(如滤光片透过率、稳定性测量,偏振片的偏振特性测量等),因此必然会引入额外的测量误差。

随着研究的深入,研究人员越来越多地采用基于光通量叠加的直接测量法。美国国家标准与技术研究院(NIST)基于以上方法建立了 Beamcon III 探测器线性测量系统,利用该装置测量了硅探测器 9 个量级内的线性和钢镓砷探测器 4 个量级的线性,测量不确定度分别为 0.054%($K=2$)、0.08%($K=2$),其中 K 表示置信因子, $K=2$ 表示所得结果的置信度为 95%。加拿大国家研究委员会(NRC)建立了双通光孔探测器线性测量装置,测量了硅探测器 9 个量级内的线性,其测量不确定度为 $\pm 0.2\%$ (受到电子学测量分辨率的限制)。以上方法采用机械快门的开闭来实现光通量的叠加,这就会引入杂散光,为了消除杂散光就会使实验装置变得复杂,影响测量效率。韩国韩国标准与科学技术研究所(KRISS)机构的 Shin 等^[16-17]通过利用两个高亮的发光二极管(LED)作为光源,建立了测量装置简单的测量系统;通过新的数据采集算法可以获得更高的测量精度,其在 6 个量级内的测量不确定度在 10^{-4} 左右。但是在该方法中有一个很关键的问题,即没有分析 LED 光源光谱漂移对测量结果产生的不确定度,从而会影响测量系统的不确定度评估的可靠性。本文基于光通量叠加的方法,搭建了线性测量系统。通过双 LED 的点亮、熄灭实现光通量的叠加。详细介绍了测量原理、方法和测量结果,并分析了 LED 光源光谱漂移等因素对测量结果的影响,评估了系统测量不确定度。

2 原 理

光通量叠加是线性的,以此为基准就可以检测探测器响应是否线性。就光电探测器而言,当探测器未饱和时到达探测器的光通量是探测器响应电流的单调递增函数,即光通量与探测器电流有一一对应关系。双 LED 积分球线性测量方法是由两个相同的 LED 光源(A 和 B)产生两个近似相等的光通量 Φ_A 和 Φ_B ,分别辐射到探测器,采集系统得到两个相应的响应值 D_A 和 D_B 。通过 LED 的通断电来实现光通量的叠加,得到光通量叠加响应值 D_{A+B} ,如果探测器存在非线性,则有:

$$D_{A+B} = D_A + D_B + \Delta, \quad (1)$$

式中 Δ 为非线性引起的响应误差。则线性误差为:

$$\epsilon = \frac{\Delta}{D_{A+B}} = 1 - \frac{D_A + D_B}{D_{A+B}}, \quad (2)$$

令 $C = \frac{D_{A+B}}{D_A + D_B}$, 则有:

$$1 - C \frac{D_A + D_B}{D_{A+B}} = 0, \quad (3)$$

据此,探测器的响应非线性得到修正, C 为非线性修正因子。

非线性测量中,通过上述的光通量逐次递增叠加,实现宽动态范围内光电探测器响应非线性测量。在每阶测量中得到的是该测量值对应的非线性因子,只能修正该测量值中包含的线性误差。而在线性位移不变的测量系统中测量信号有多个量级,测量结果中包括了探测器多阶的非线性误差累积。这就需要在探测器响应动态范围内选择线性最优的响应值或者响应值的端点作为参考点,来计算探测器在各个量级响应值的非线性修正因子。测量点至参考点范围的非线性修正因子可通过下式计算得到:

$$C_n = \frac{\prod_{i=1}^n R_i}{\prod_{i=1}^k R_i}, \quad (4)$$

式中, C_n 为非线性测量中第 n 阶对应的非线性修正因子,其对应的响应值为 $[D_{(A)n} + D_{(B)n}] / 2$, k 为参考点所对应的阶数, $R_i = D_{(A+B)i} / [D_{(A)i} + D_{(B)i}]$ 为非线性测量中第 i 阶对应的非线性因子。通过非线性修正因子,可由下式计算得到线性误差:

$$\epsilon = \frac{1 - C_n}{C_n}. \quad (5)$$

3 实验装置

根据光通量的叠加原理,搭建了一套如图 1 所示的线性测量装置。两个 LED 的型号相同,峰值波长为 632 nm,带宽为 20 nm。LED 贴在没有温控的热沉上,分别通过相同的电流源(Keithley 2400)为其提供工作电流。LED 对称地装在内径为 150 mm 的积分球内,积分球时间常数为几十纳秒,对测量结果无影响。积分球的内胆为聚四氟乙烯 (PTFE),其在紫外到近红外波段的反射率达 99%。积分球还有一个直径 50 mm 的出光口,用于放置探测器。探测器已经封装好,通过 BNC 线输出信号。探测器光敏面中心法线与出光口中心法线同轴安装,一方面可以充分利用积分球出光口的均匀性,另一方面可以减少杂散光的干扰。探测器的输出信号通过电流采集器(Keithley, Model6485)采集。积分球光源和探测器通过小暗室与外界隔开,用于减小来自光源和外界的杂散光。根据 LED 亮度时间特性分析,通过计算机程序精确控制光源开关、

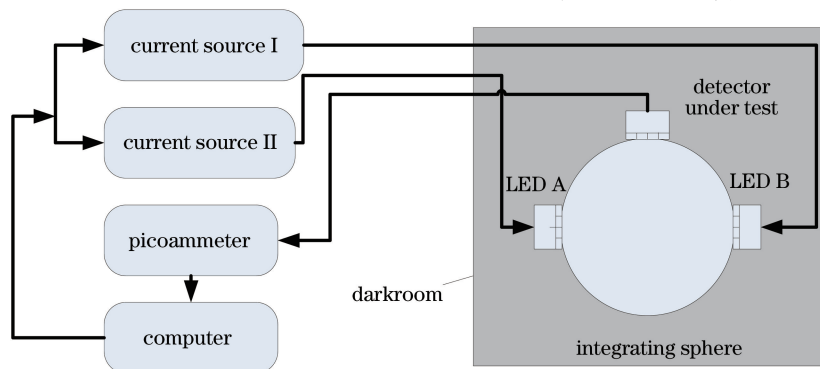


图 1 硅探测器线性测量装置示意图

Fig. 1 Schematic of the Si detectors linearity measurement instrument

探测器采集时间和 LED 电流调节,可以大大缩短测量时间,提高测量的精度。

4 实验结果

为了得到探测器响应电流与 LED 注入电流之间的关系,测量了不同 LED 工作电流下探测器的响应电流,其测量结果如图 2 所示。

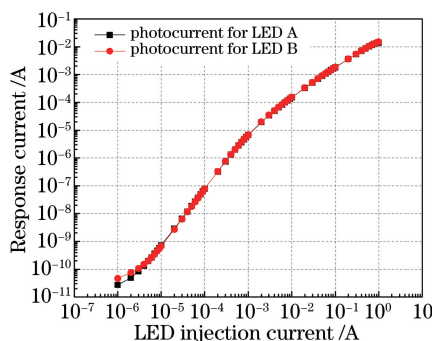


图 2 探测器响应电流与 LED 注入电流之间的关系

Fig. 2 Relationship between detector response current and LED injection current

从图 2 可以看出,在 LED 注入电流的变化范围为 $10^{-6} \sim 1$ A 时,探测器的响应电流变化范围为 $10^{-11} \sim 10^{-2}$ A,动态范围达 9 个量级,两个 LED 在每个电流下产生的光通量近似相等。

根据不同的 LED 注入电流测量了探测器响应电流在 $3.92 \times 10^{-11} \sim 0.01$ A 范围内硅探测器的线性,计算了硅探测器的非线性修正因子和线性误差,分别如图 3、图 4 所示。图 3、4 中箭头所指示的点为非线性修正因子和线性误差计算时的参考点。

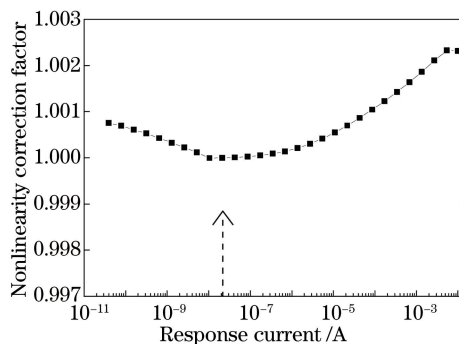


图 3 硅探测器的非线性修正因子

Fig. 3 Nonlinearity correction factor of Si detector

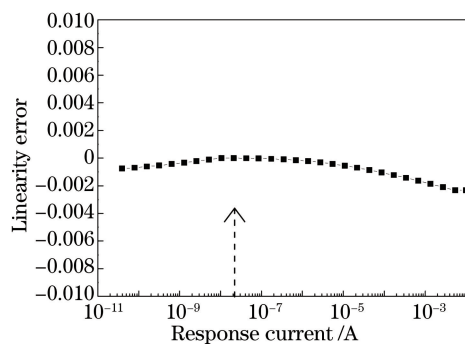


图 4 硅探测器的线性误差

Fig. 4 Linearity error of Si detector

5 分析与讨论

通过光通量叠加的方法,在探测器响应电流从 $3.92 \times 10^{-11} \sim 0.01$ A 一阶一阶逐渐增加,测量了硅探测器的线性。以非线性因子最接近 1(即线性最好)的点(光电流为 2.05×10^{-8} A,非线性修正因子为 1.000004)作为参考点计算了非线性修正因子和线性误差,参考点为图 3、图 4 中箭头所指位置。得到了整个测量范围内的非线性修正因子,其数值范围为 $1 \sim 1.0023$,非线性因子在参考点处为 1,在测量范围两端略微增加。与非线性修正因子相对应,在测量范围内探测器的线性误差在 0.23% 以内,从图 4 可见在大动态范围测量时,非线性误差会随着测量动态范围的增大而逐渐增大,影响测量结果的精度,通过非线性因子对测量结果进行修正很有意义。

探测器在测量范围内线性的好与坏、非线性修正因子测量的准确与否直接影响了测量系统的测量精度。准确测量非线性修正因子,可以有效校正探测器线性误差,对提高测量系统的精度具有很重要的意义。探测器非线性修正因子的测量精度主要受 LED 光源之间的光谱差异、波长漂移、LED 辐射功率稳定性以及响应

低端信噪比等因素的影响。

5.1 LED 光谱差异及波长漂移的影响

非线性测量时尽管用了两个型号相同的 LED,但依然有可能存在光谱差异,并且注入电流范围大,中心波长会漂移。通过大量筛选,选择了两个发光光谱曲线接近一致的 LED,其在 0.1 A 注入电流下的相对光谱曲线如图 5 所示。

在非线性修正的各阶,LED 辐射功率相同,光谱相同,非线性修正因子不受光谱漂移影响,对非线性修正因子、不确定评估无影响。但当进行下一级非线性测量时,LED 注入电流增大,中心波长有略微的漂移,如图 6 所示,当 LED 注入电流分别为 1,50,100 mA 时,通过光谱仪测得相对光谱有明显的红移,100 mA 时的峰值波长红移了 1 nm,这会导致注入不同电流时测得非线性因子对应的光谱不完全一致,有可能是影响线性测量的一个因素。而且目前还未看到有报道分析光谱漂移对线性测量的影响,这就需要定量地分析光谱漂移对线性测量精度的影响。

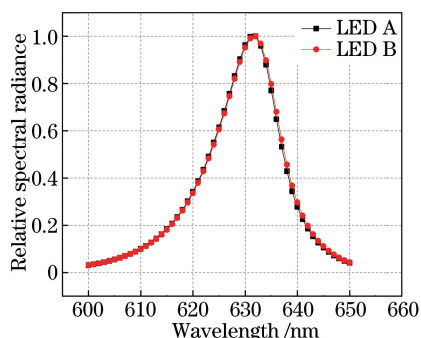


图 5 两个 LED 的相对光谱辐亮度

Fig. 5 Relative spectral radiance of two LEDs

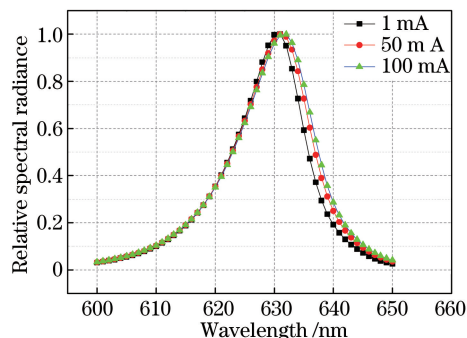


图 6 注入不同电流时 LED 相对光谱辐亮度

Fig. 6 Relative spectral radiance of the LED with different injection currents

通过分析探测器相同响应电流下不同入射光谱测得的非线性因子的相对标准偏差来定量评估线性测量过程中光谱漂移对线性测量精度的影响。在探测器与积分球光源之间插入不同光密度(OD)的中性滤光片,如图 7 所示,使得注入不同电流下有光谱差异的光通量照在探测器上产生相同的光电流。由于线性测量的动态范围较宽,对应的 LED 注入电流范围为 $2.2 \mu\text{A} \sim 0.57 \text{ A}$,分别在电流范围内的 4 个阶段(即 $0.76 \sim 5.3 \mu\text{A}$ 、 $5.3 \sim 92 \mu\text{A}$ 、 $92 \mu\text{A} \sim 2.5 \text{ mA}$ 、 $2.5 \text{ mA} \sim 0.57 \text{ A}$)中分别插入 OD 值为 3、2、1、0.1 的中性滤光片(其中 $0.76 \sim 5.3 \mu\text{A}$ 对应动态范围较窄,且响应值较小,没有使用 OD 值为 3 的中性滤光片),其对应的探测器响应电流分别为 3.6 pA、0.18 nA、67.6 nA 和 $24.5 \mu\text{A}$ 。通过分析每一阶段中插入不同 OD 值中性滤光片测得的线性因子的相对标准偏差来表示光谱漂移对线性测量的影响,其测量数据如表 1 所示,其中 $u_{r,w}$ 为不同插入 OD 值测得非线性因子的相对标准偏差,用来表示光谱漂移引入的相对不确定度。

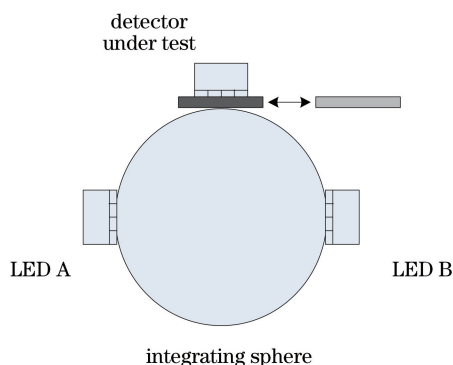


图 7 光谱漂移测量示意图

Fig. 7 Schematic of the measurement of spectral drift

表 1 光谱漂移测量数据

Table 1 Measurement data of spectral drift

Injection current	0.76~5.3 μA	5.3~92 μA	92 μA ~2.5 mA	2.5 mA~0.57 A
Nonlinearity factor (OD: 3)	—	1.000036	1.000151	1.00011
Nonlinearity factor (OD: 2)	1.00221	0.99978	1.000100	1.00018
Nonlinearity factor (OD: 1)	0.99825	0.99995	1.000048	1.00018
Nonlinearity factor (OD: 0.1)	1.00480	0.99978	1.000015	1.00016
Spectral drift $u_{r,w}$	2.69×10^{-3}	1.11×10^{-4}	5.17×10^{-5}	2.86×10^{-5}

通过不同阶段的测量数据可以看到,光谱漂移对线性测量产生的不确定度与 LED 注入电流的大小呈反比,注入电流越小光谱漂移产生的不确定度越大。当认为探测器响应电流与 LED 辐射光通量之间为线性关系时,则图 2(LED 注入电流与探测器响应电流曲线)可认为是 LED 注入电流与其辐射光通量之间的关系,结合表 1 测量数据可以推断,LED 光谱漂移对线性测量精度的影响与 LED 注入电流与输出光通量之间的线性有关,即当 LED 注入电流与输出光通量之间为线性关系时,LED 光谱漂移较少对线性测量的影响较小,当 LED 注入电流与输出光通量之间的关系为非线性时,光谱漂移较大对线性测量的影响增加。

5.2 LED 出射光功率随时间变化的影响分析,LED 辐射输出稳定性的影响

实验装置中采用 LED 光源的优点是,LED 为非相干光源,具有寿命长、稳定性好、亮度高、光谱选择范围大等优点,避免了相干光源有可能产生的干涉对测量的影响,易于实现紫外-短波红外范围的探测器响应线性测量,而且 LED 的开关和光通量可以通过其注入电流快速调节,这就可以省略机械快门,减少杂散光并使实验装置简化。同时也存在缺点,LED 的光辐射功率很容易受到温度的影响,这主要是因为 LED 通电之后内部 PN 节温度升高,从而使 LED 的发光效率发生改变,影响线性测量的精度。

为减小温度的影响,通过时间序列数据采集算法修正一个测量周期内 LED 光功率受温度的影响。该算法将数据采集的时间考虑进来,则非线性因子可表示为:

$$R_{(AB)i} = \frac{D_{(A+B)i}(t_{AB})}{D_{(A)i}(t_A) + D_{(B)i}(t_B)}, \quad (6)$$

式中 t_A 、 t_{AB} 、 t_B 分别表示三次响应值的测量时刻, i 为测量阶数。为使结果更精确,将每个 LED 光功率随时间的漂移表示出来,这里将每个 LED 的点亮时刻和信号采集时刻联系起来表示:

$$\begin{cases} t_A = t_a + \tau = t_b \\ t_{AB} = t_A + \tau = t_a + 2\tau = t_b + \tau, \\ t_B = t_{AB} + \tau = t_b + 2\tau \end{cases} \quad (7)$$

式中 t_a 、 t_b 分别表示某一个测量周期中 LED A、LED B 的点亮时刻, τ 为系统响应时间,约为 0.25 s;LED B 的点亮时刻紧接着 LED A 信号采集时刻结束,程序中设置相差时间很短,可以忽略。其采集时序如图 8 所示,图中黑色实线代表 LED A 随时间点亮和熄灭状态变化,红色点线代表 LED B 随时间点亮和熄灭状态变化,两个 LED 的点亮区域有重叠区域,用来测量光通量叠加时的响应值。(6)式可以表示为:

$$R_{(AB)i} = \frac{D_{(AB)i}(t_a + 2\tau, t_b + \tau)}{D_{(A)i}(t_a + \tau) + D_{(B)i}(t_b + 2\tau)} \quad (8)$$

从(8)式可以清楚地看到分子和分母是在 LED 点亮后的不同时刻获得的,这就引入额外的误差。为了

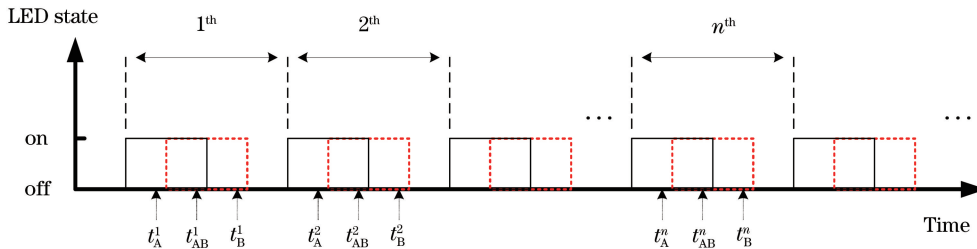


图 8 LED 开关与数据采集时序图

Fig. 8 Timing diagram of LEDs switch and data collection

修正采集时刻不同引起的误差,交换图 8 中采集时序 LED A、LED B 的开灯顺序,则(8)式变形为

$$R_{(BA)i} = \frac{D_{(BA)i}(t_b + 2\tau, t_a + \tau)}{D_{(B)i}(t_b + \tau) + D_{(A)i}(t_a + 2\tau)} \quad (9)$$

取(8)式跟(9)式的几何平均值来定义探测器响应在某响应电流下的非线性:

$$R_i = \sqrt{R_{(AB)i}R_{(BA)i}} = \sqrt{\frac{D_{(AB)i}(t_a + 2\tau, t_b + \tau)}{D_{(A)i}(t_a + \tau) + D_{(B)i}(t_b + 2\tau)} \cdot \frac{D_{(BA)i}(t_b + 2\tau, t_a + \tau)}{D_{(B)i}(t_b + \tau) + D_{(A)i}(t_a + 2\tau)}} = \sqrt{\frac{D_{(AB)i}(t_a + 2\tau, t_b + \tau)}{D_{(B)i}(t_b + \tau) + D_{(A)i}(t_a + 2\tau)} \cdot \frac{D_{(BA)i}(t_b + 2\tau, t_a + \tau)}{D_{(A)i}(t_a + \tau) + D_{(B)i}(t_b + 2\tau)}} \quad (10)$$

从(10)式可以看出,经过修正后式中分子分母的响应值都是在相同的时刻获得的,可将误差进一步减小。修正前后非线性因子如图 9 所示。

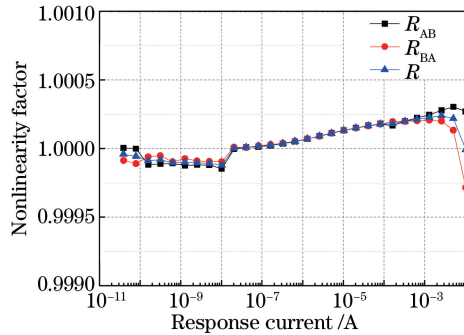


图 9 修正前后的非线性因子

Fig. 9 Uncorrected and corrected nonlinearity factors

从结果可以看出,通过时间序列采集算法可以将非线性因子进一步优化。在探测器响应电流值的高端和低端,探测器测得的非线性因子在 LED 点亮顺序交换前后差别较大。探测器响应高端的差异跟 LED 的温度敏感特性有很大关系,因为在响应高端 LED 电功率接近 10 W,尽管采用快速打开、关闭的方式,但还是会有大量的热量堆积导致 LED 的发光效率发生变化,同时不同的 LED 发光效率变化大小存在差异,从而影响探测器非线性定标精度,通过该算法可以弥补由于热量累积导致的误差。探测器响应低端的差异,一方面 LED 的辐射功率很小,另一方面在该辐射功率下已经接近探测器探测能力的下限,这两方面的因素导致测量数据的信噪比降低,非线性比例系数差异增大,通过该算法计算几何平均值可以进一步减小测量误差。

5.3 小信号处理

LED 注入电流在 $1 \mu\text{A} \sim 1 \text{ A}$ 范围内有 6 个量级可调,LED 输出光通量达到 9 个量级,覆盖了探测器的响应高端和低端。为了精确测量数据,将探测器、数据采集器等屏蔽并接地,且采集器有 8 个量程($2 \text{ nA} \sim 20 \text{ mA}$),通过调整量程,使得探测器测量的输出计数值接近满量程附近。但是当探测器响应值小于 2 nA 时,已经达到采集器的最小量程,采集器电路引入的噪声与探测器内阻、采集器中放大电路的反馈电阻和温度等因素有关^[18],与电路的输入电流无关,故探测器的响应电流越小采集器采集数据的信噪比就越小,从而采集数据的不确定度就越大。所以为了提高小信号测量的精度,可以通过多次测量求平均来获取小信号测量值。

5.4 非线性修正因子测量不确定度分析

实验中各阶非线性因子都是通过多次测量取平均值得到的,即:

$$\bar{R}_{(AB/BA)n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_{(AB/BA)ni} \quad (11)$$

式中 n 为测量阶数, k 为采样次数, $R_{(AB/BA)ni}$ 为 AB 顺序或者 BA 顺序测量时的第 i 次采样数据。则测量结果的不确定度用均值的标准偏差表示,如下式所示:

$$u_{R_{(AB/BA)n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [R_{(AB/BA)ni} - \bar{R}_{(AB/BA)ni}]^2}{k(k-1)}} \quad (12)$$

其相对不确定度可通过下式即标准不确定度与均值的比值计算得到：

$$u_{rR_{(AB/BA)n}} = \frac{u_{R_{(AB/BA)n}}}{R_{(AB/BA)n}}, \quad (13)$$

根据不确定度传递定律,各阶非线性因子的相对不确定度可通过下式计算得到：

$$u_{rR_n} = \frac{u_{R_n}}{R_n} = \frac{1}{R_n} \cdot \sqrt{\left[\frac{1}{2} \cdot \frac{R_{(BA)n}}{\sqrt{R_{(AB)n} \cdot R_{(BA)n}}} \right]^2 \cdot u_{R_{(AB)n}}^2 + \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{R_{(AB)n}}{\sqrt{R_{(AB)n} \cdot R_{(BA)n}}} \right]^2 \cdot u_{R_{(BA)n}}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \right)^2 \cdot u_{rR_{(AB)n}}^2 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \cdot u_{rR_{(BA)n}}^2} \quad (14)$$

通过(14)式可得各阶非线性因子的相对测量不确定度,如图 10 所示。测量不确定度在 10^{-7} A 附近突然降低,这是由采集器在该电流处的量程切换引起的,采集器内部反馈电路切换,电路引入的噪声较小。当探测器响应值小于 2 nA 时,非线性因子的测量不确定度随着响应值的减小而增大,这和小信号分析里的解释一致。

各阶非线性因子之间是相互独立的,由(4)式和各阶非线性因子的测量不确定度可得到非线性修正因子的相对测量不确定度为：

$$u_{rC_n} = \frac{u_{C_n}}{C_n} = \sqrt{\left| \sum_{i=1}^n u_{rR_i}^2 - \sum_{i=1}^k u_{rR_i}^2 \right|}, \quad (15)$$

其计算结果如图 11 所示。

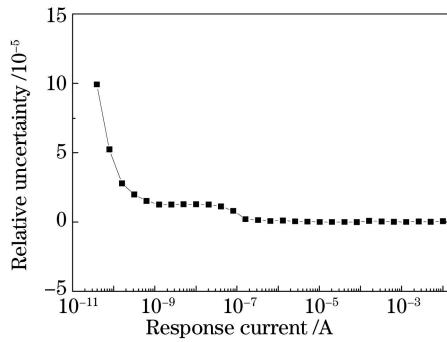


图 10 非线性因子的相对测量不确定度

Fig. 10 Relative uncertainty of nonlinearity factor

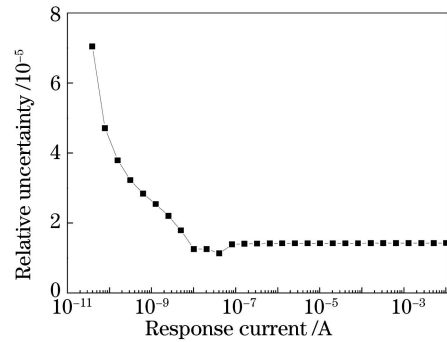


图 11 非线性修正因子的相对测量不确定度

Fig. 11 Relative uncertainty of nonlinearity correct factor

根据不确定度传递定律,非线性修正因子的相对不确定度主要由测量过程中 LED 的光谱漂移和非线性修正因子的测量不确定度共同产生,测量系统的相对合成不确定度为：

$$u_r = \sqrt{u_{rC_n}^2 + u_{rW}^2} \quad (16)$$

系统相对合成不确定度计算结果如表 2 所示。为了方便评估探测器不同响应值下对应非线性修正因子的不确定度,表 2 中同时列出了注入电流对应的光电流范围。可以看出系统相对合成不确定度中 LED 光源光谱漂移引入的不确定度占主要部分,在光谱漂移不确定评估时,将测量范围按照 LED 点亮时的注入电流大小分为 4 个部分进行评估,故这里计算系统的相对合成不确定度也在 4 个范围内进行评估。

表 2 测量系统的合成不确定度

Table 2 Combined uncertainty of measurement system

LED injection current	Response current	Spectral drift $u_{rW}/10^{-5}$	Correction factor $u_{rC_n}/10^{-5}$	Combined uncertainty $u_r/10^{-5}$
0.76-5.3 μ A	39.2 pA-0.326 nA	269	7.05	269
5.3-92 μ A	0.326-81.6 nA	11.1	3.23	11.6
92 μ A-2.5 mA	81.6 nA-20.4 μ A	5.17	1.43	5.36
2.5 mA-0.57 A	20.4 μ A-10.2 mA	2.86	1.43	3.20

6 结论与展望

基于光通量叠加法建立了线性测量系统,通过控制 LED 光源的点亮和关闭实现光通量叠加,取代了机械快门的开闭,加快了线性测量的效率。测量了硅探测器响应电流在 $3.92 \times 10^{-11} \sim 0.01$ A 范围内近 9 个量级的线性,给出了整个测量范围内的非线性修正因子,其数值范围在 1~1.0023 之间,非线性因子在参考点处为 1,在测量范围两端略微增加。分析了测量系统的不确定度因素,并分析了 LED 光谱漂移对测量精度的影响,表明 LED 光源的光谱漂移对测量系统产生的影响是不可忽略的。测量系统的相对合成不确定度在硅探测器响应电流 39.2 pA~0.326 nA、0.326~81.6 nA、81.6 nA~20.4 μ A、20.4 μ A~10.2 mA 范围内的测量不确定度分别为 0.269%、0.0116%、0.00536% 和 0.00320%。本实验可实现硅探测器宽动态范围内高精度的线性定标,对提高线性位移不变系统的测量精度和实现大动态范围辐射标准传递具有重要意义。为进一步降低系统测量的不确定度,提高线性测量系统的测量精度,可进一步改进测量系统,确定 LED 光谱波动较小的注入电流范围,减小光谱漂移对测量系统的影响。

参 考 文 献

- [1] Sanders C L. Accurate measurements of and corrections for nonlinearities in radiometers[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry, 1972, 76(5): 437-453.
- [2] Hoyt C C, Foukal P V. Cryogenic radiometers and their application to metrology[J]. Metrologia, 1991, 28: 163-167.
- [3] Gentile T R, Houston J M, Hardis J E, *et al.* National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. Applied Optics, 1996, 35(7): 1056-1068.
- [4] Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, *et al.* High precision optical radiation calibration and standard transfer method[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(12): 1341-1344.
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 高精度光辐射定标和标准传递方法[J]. 科学通报, 2000, 45(12): 1341-1344.
- [5] Chen Hongyao, Zhang Liming, Shi Jiading, *et al.* High accuracy gonireflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 9(1): 73-80.
陈洪耀, 张黎明, 施家定, 等. 高精度星上定标漫射板双向反射分布函数绝对测量系统研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(1): 73-80.
- [6] Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.* Development of BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
- [7] Asmail C C, Cromer C L, Proctor J E, *et al.* Instrumentation at the national institute of standards and technology for bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurements[C]. SPIE, 1994, 2260: 52-61.
- [8] Shao X, Cao C Y, Zhang B, *et al.* Radiometric calibration of DMSP-OLS sensor using VIIRS day/night band[C]. SPIE, 2014, 9264: 92640A.
- [9] Sadler F B, Lessard M R, Cogger L L. Facility for optical calibration at low level light (FOCAL³)[C]. Proceedings of 33rd Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods, 2008: 87-91.
- [10] Hawes R C. Technique for measuring photometric accuracy[J]. Applied Optics, 1971, 10(6): 1246-1253.
- [11] Bennett H E. Accurate method for determining photometric linearity[J]. Applied Optics, 1966, 5(8): 1265-1270.
- [12] Kùbarsepp T, Haapalinna A, Kàrhà P, *et al.* Nonlinearity measurements of silicon photodetectors[J]. Applied Optics, 1998, 37(13): 2716-2722.
- [13] Budde W. Multidecade linearity measurements on Si photodiodes[J]. Applied Optics, 1979, 18(10): 1555-1558.
- [14] Thompson A, Chen H M. Beamcon III, a linearity measurement instrument for optical detectors [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1994, 99(6): 751-755.
- [15] Chen Feng, Li Shuang, Wang Ji, *et al.* Linearity measurement of accurate photodetector[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 889-893.
陈 风, 李 双, 王 骥, 等. 高精度光电探测器的线性测量[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 889-893.
- [16] Shin D J, Lee D H, Park C W, *et al.* A novel linearity tester for optical detectors using high-brightness light emitting diodes[J]. Metrologia, 2005, 42: 154-158.
- [17] Shin D J, Park S C, 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: 25-32.
- [18] Eppeldauer G, Hardis J E. Fourteen-decade photocurrent measurements with large-area silicon photodiodes at room temperature[J]. Applied Optics, 1991, 30(22): 3091-3099.