

# 基于红外LED的光学探测器非线性系数测量研究

赵伟强 刘 慧 刘 建

中国计量科学研究院, 北京 100013

**摘要** 研究了一种简单实用的光学探测器非线性系数测量方法。采用两颗红外发光二极管(LED), 配有数字源表控制LED光源的开关和驱动电流值, 通过光束叠加法在4个数量级内实现在特定红外波长上光学探测器非线性系数的测量, 波长位置由LED发光峰决定。采用红外940 nm LED, 在恒温实验室条件下, 进行了LED持续点燃的稳定性的研究。当点燃时间在1 min到10 min内, 光源到达探测器的辐射通量变化的相对标准偏差值不大于0.022%。进行了重复条件下红外LED辐射通量水平复现性的考察。短时间内重复点燃10次, 辐射量值变化的相对标准偏差不超过0.044%。进行了校准结果的测量不确定度评定, 基于940 nm LED的非线性系数校准结果的扩展不确定度为0.07% ( $k=2$ )。

**关键词** 测量; 红外; 非线性系数; 叠加法; 发光二极管

**中图分类号** TN206 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0912002

## Study on Nonlinearity Coefficient Measurement for Optical Detector Using Infrared LED

Zhao Weiqiang Liu Hui Liu Jian

National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

**Abstract** A simple and practical technique is studied to develop a near-infrared nonlinearity coefficient measurement for optical detector. Two infrared LEDs are used, and two source meters are adopted to control the LEDs and their driving currents. Using flux-addition method, the proposed method achieves the measurement of nonlinearity coefficient within four orders of magnitude at certain wavelength, which is determined by the emission peak of LED. The 940 nm LED is used as an example. The room temperature is controlled and the infrared LEDs as the light sources are quite stable. When the ignition time ranges from 1 min to 10 min, the relative standard deviation of the radiation flux is not greater than 0.022%. The reproducibility of the LED flux is also studied. The LED is turned on and off 10 times, and the relative standard deviation of the radiation flux does not exceed 0.044% at different flux levels. The measurement uncertainty is discussed and evaluated. The expanded measurement uncertainty of the calibration results is 0.07% ( $k=2$ ).

**Key words** measurement; infrared; nonlinearity coefficient; flux-addition method; LED

**OCIS codes** 120.3930; 120.3940; 120.4800

## 1 引 言

非线性系数是光学探测器的重要属性之一, 是指探测器的辐射通量输入值与响应输出光电流值两者偏离线性的程度<sup>[1-5]</sup>。红外光辐射量值测量具有多种重要的用途<sup>[6-7]</sup>, 因此在进行红外光辐射量值参数的精密计量测试时, 须考虑探测器的非线性因素对测试结果的影响, 并加以修正。因此, 人们日益重视探测器非线性系数的测量与标定。高精度的非线性系数测量一般是采用叠加法。传统的叠加法需使用复杂的光源(如配有激光稳定器的红外激光)、机械光开关和镜片等, 光路容易引入杂散光, 并且操作复杂、成本高<sup>[1-5]</sup>。

收稿日期: 2015-01-18; 收到修改稿日期: 2015-04-20

基金项目: 中国计量科学研究院基本业务费(AKY1318)

作者简介: 赵伟强(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光度计量学和固态光源光色测量等方面的研究。

E-mail: zhaowq@nim.ac.cn

文献[8]报道用白光发光二极管(LED)和叠加法实现了非线性系数测量。其为减小LED光衰减的影响,采用了较复杂的时间序列算法,不利于直接推广使用。本文研究一种简单新型的叠加法非线性测量技术,采用双红外LED光源,极大简化光路和系统的配置,操作简单,无复杂算法,成本显著下降,可在4个数量级动态范围内实现光学探测器近红外区域某一特定波长响应的非线性系数测量。

## 2 叠加法的基本原理

叠加法的基本原理是使用光束的叠加性质。将红外光辐射通量为 $P_A$ 的光束A入射至探测器,其对应的响应输出光电流为 $I_A$ ;将红外光辐射通量为 $P_B$ 的光束B入射至探测器,其对应的响应输出光电流为 $I_B$ ;将光束A和光束B同时入射至探测器,其对应的响应输出光电流为 $I_{(A+B)}$ 。定义非线性系数 $K$ 为

$$K = \left[ \frac{I_{(A+B)}}{I_A + I_B} - 1 \right] \times 100\% . \quad (1)$$

重复增加光束A和光束B的辐射通量值,可在大动态范围内测量探测器的非线性系数。关于如何使用非线性系数对测量结果的修正,请查阅文献[2,5]。

## 3 实验装置

研究设计的基于红外辐射LED的非线性校准技术的配置见图1。在被测试的探测器法线位置并列放置两个类型相同的红外LED A和红外LED B。LED的顶端到探测器的距离约10 mm。LED由程控数字源表驱动,通过调控驱动电流来控制LED的开关及输出的光辐射值。通过微弱电流计读取探测器的光电流值。研究测量程序为:

- 1) 关闭LED B,点燃LED A。调节LED A的驱动电流 $I_{LEDA}$ 并等待LED A的光输出稳定,使探测器的光电流值 $I'_A$ 接近某目标光电流值,如100.00 nA;
- 2) 关闭LED A,点燃LED B。调节LED B的驱动电流 $I_{LEDB}$ 并等待LED B的光输出稳定,探测器的光电流值 $I_B$ 应接近步骤1)的光电流值 $I'_A$ 。如 $I_B=100.01 \text{ nA} \approx I'_A$ 。
- 3) 维持LED B在点燃状态下,以步骤1)中所确定的驱动电流 $I_{LEDA}$ 再次点燃LED A。此时,LED A和LED B同时点燃。等待光输出稳定,记录探测器的光电流值 $I_{(A+B)}$ 。
- 4) 关闭LED B,维持LED A的点燃状态,记录此时的探测器的光电流值 $I_A$ 。
- 5) 必要时可重复步骤2)~4)。
- 6) 设定新的光电流值 $I'_A$ 的目标为 $I_{(A+B)}$ ,并重复步骤1)~5)。

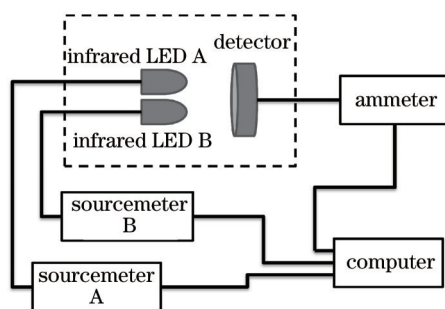


图1 非线性校准仪配置图

Fig.1 Schematic of nonlinearity coefficient measurement

由于不采用机械开关和镜片等光学元件,并且两LED和探测器的几何位置及光路相对固定,因此,LED光源不论是单独点燃还是同时点燃,其各自到探测器的辐射通量值不存在因光路的变动而引入杂散光的因素,减小了测量不确定度分量。

## 4 实验数据与讨论

校准研究中采用的红外LED光源采用双引脚式封装,发光峰值波长约940 nm,其光谱如图2所示。被

校准的探测器是S1337硅光电二极管。在恒温实验室中进行,环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度40%。实验过程无明显气流扰动。

影响非线性校准结果的主要因素是LED光辐射通量值的稳定性和重复性。图3是LED在光电流 $10\text{ }\mu\text{A}$ 辐射通量水平下,探测器光电流随点燃时间的典型变化曲线。

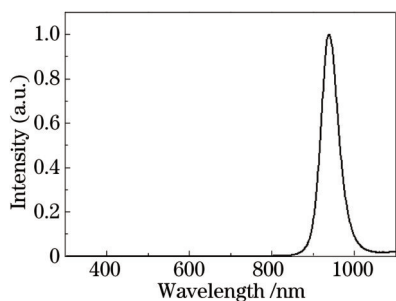


图2 红外LED光源的光谱图  
Fig.2 Spectra of LED light source

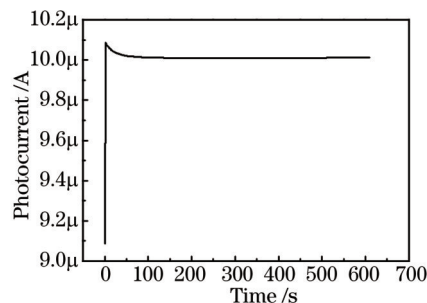


图3 LED辐射通量随时间的变化  
Fig.3 Shifting of LED radiation flux versus time

处于点燃状态的LED辐射量值稳定性主要受发光源区的PN结结温影响。一般而言,LED点燃后,PN结由于热积累效应而温度上升,内量子效率和辐射量值随之下降,直至PN结与外部建立了热平衡。如图3中,LED约50 s后辐射量值明显趋于稳定。

红外LED持续点燃的稳定度是直接影响校准结果不确定度的主要因素。使用光电流读数的相对标准偏差表示LED的量值稳定性水平。计算机每1 s采集一个光电流数据,采集范围时间是点燃后的1 min到10 min。稳定性测量结果如表1所示。可见,采用的LED在点燃的1 min到10 min内,其辐射通量变化的相对标准偏差值不大于0.022%。稳定性测量过程中环境温度无明显变化。在进行不确定评估时,需单独考虑存在的环境温度对探测器响应度及零点漂移的影响。

表1 实测1 min到10 min不同辐射通量水平下的LED的量值稳定性  
Table 1 Results of stability for the LED source at various flux levels

Level of radiation flux (photocurrent from detector)	0.01 $\mu\text{A}$	0.1 $\mu\text{A}$	1 $\mu\text{A}$	10 $\mu\text{A}$
Averaged reading of photocurrent /A	$0.99981\times 10^{-8}$	$0.99970\times 10^{-7}$	$1.0082\times 10^{-6}$	$1.0003\times 10^{-5}$
Relative standard deviation of photocurrent	0.019%	0.017%	0.022%	0.011%

考察LED辐射量值的重复性。短时间内重复点燃LED10次,每次点燃稳定3 min后连续测量5次(每秒采集一次)探测器的光电流值,并将这5次平均值作为该次LED点燃后辐射通量读数。使用相对标准偏差表示该LED管辐射量值重复性水平。表2是实测的在不同辐射通量水平下量值的重复性,由LED自身性质、数字源表提供的驱动电流和测量过中环境温度的漂移共同决定。数据显示读数相对标准偏差不超过0.044%。

表2 不同的辐射通量水平下红外LED量值的重复性  
Table 2 Results of reproducibility for the LED source at various flux levels

Level of radiation flux (photocurrent from detector)	0.01 $\mu\text{A}$	0.1 $\mu\text{A}$	1 $\mu\text{A}$	10 $\mu\text{A}$
Averaged reading of photocurrent for 10 times / $\mu\text{A}$	0.010019	0.10003	1.0004	10.0015
Standard deviation/ $\mu\text{A}$	$4.38\times 10^{-6}$	$2.55\times 10^{-5}$	$1.23\times 10^{-4}$	$5.27\times 10^{-4}$
Relative standard deviation	0.044%	0.025%	0.012%	0.005%

以S1337硅光电二极管为实例进行非线性系数的标定。非线性校准实例测试数据如表3所示。所测试的动态范围为4个数量级,LED的峰值波长变化不大于0.5 nm,光电流从 $0.01\text{ }\mu\text{A}$ 到 $10\text{ }\mu\text{A}$ 。测量结果显示,在940 nm附近,该探测器的非线性系数绝对值的不超过0.05%。

表 3 S1337 硅光电二极管在 940nm 处的非线性系数测量实例

Table 3 An example of nonlinearity test for S1337 silicon photodiode at 940 nm

Photocurrent $I_A/\mu A$	Photocurrent $I_B/\mu A$	Photocurrent $I_{(A+B)}/\mu A$	Nonlinearity coefficient $K$	Peak wavelength of LED A /
				nm
0.010018	0.010004	0.020025	0.015%	939.0
0.020027	0.020001	0.040020	-0.020%	938.7
0.040008	0.040002	0.080015	0.006%	938.7
0.08002	0.08000	0.16000	-0.012%	938.8
0.16000	0.15999	0.31998	-0.003%	938.7
0.32007	0.32009	0.64014	-0.003%	938.8
0.64021	0.64022	1.28033	-0.008%	938.6
1.2800	1.2800	2.5590	-0.039%	938.6
2.5600	2.5600	5.1204	0.008%	938.6
5.1192	5.1126	10.2272	-0.045%	938.5

## 5 不确定度分析

由于研究中不涉及机械开关和反射镜,可忽略杂散光的影响。校准装置放置于黑箱内,且被光学绒布完全包裹,可忽略外部光线对结果的影响。可以确定,非线性系数校准结果的不确定度来源主要是 LED 量值的量值稳定度,以及探测器响应度及零点漂移对光电流的影响。LED 量值的量值稳定度可通过实验测量得到;探测器响应度及零点漂移主要是受环境温度影响,每一个非线性系数测量耗时约 3 min,考虑到恒温实验室环境,认为温度漂移对测量结果的影响很小,通过经验值评定。

叠加法测量非线性系数  $K$  的数学模型为(1)式,根据不确定度传播律有

$$\begin{aligned}
 u(K) &= u\left[\frac{I_{(A+B)}}{I_A + I_B}\right] \approx u_{rel}\left[\frac{I_{(A+B)}}{I_A + I_B}\right] = \sqrt{u_{rel}^2[I_{(A+B)}] + u_{rel}^2(I_A + I_B)}, \\
 u_{rel}^2[I_{(A+B)}] &\approx u_{rel}^2(I_A + I_B) \approx u_{rel}^2(I_A) \approx u_{rel}^2(I_B), \\
 u(K) &\approx \sqrt{u_{rel}^2[I_{(A+B)}] + u_{rel}^2(I_A)} = \sqrt{u_{rel}^2(I_A)_1 + u_{rel}^2(I_A)_2 + u_{rel}^2(I_B)_1 + u_{rel}^2(I_B)_2}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

根据(2)式,可得  $u(K)$  的不确定评估结果,如表 4 所示。

表 4 非线性系数的测量不确定度评估表

Table 4 Measurement uncertainty budget for nonlinearity coefficient

Expressions	Symbols	Relative uncertainty	Type	Distribution pattern	Sensitivity coefficient	Uncertainty component
Stability of LED A	$u_{rel}(I_A)_1$	0.022%	A	Normal	1	0.022%
Influence of response and zero drift for $I_A$	$u_{rel}(I_A)_2$	0.01%	B	Normal	1	0.01%
Stability of LED B	$u_{rel}(I_B)_1$	0.022%	A	Normal	1	0.022%
Influence of response and zero drift for $I_B$	$u_{rel}(I_B)_2$	0.01%	B	Normal	1	0.01%
Combined standard uncertainty				Normal		0.035%

根据表 4 可得

$$\begin{aligned}
 u(K) &= 0.035\%, \\
 U(K) &= 0.07\%, \quad (k=2). \quad (3)
 \end{aligned}$$

研究中,在波长 940 nm 附近,基于两个老化的红外 LED 的探测器非线性系数的测量不确定度为  $U(K)=0.07\%$  ( $k=2$ )。若测量其他波长位置的探测器非线性系数,只需更换 LED 光源,再采用所描述的稳定性和重复性考察方法,并进行不确定度评估即可。

## 6 结 论

本文进行了基于红外辐射 LED 的光学探测器非线性校准方法的研究。该研究采用两个红外 LED,配有

数字源表控制LED的开关和电流值,通过叠加法实现了探测器在红外特定波段的非线性系数的校准测量。校准动态范围约4个数量级。进行了红外LED光源持续点燃的稳定度研究,点燃时间从1 min到10 min的条件下,光源到达探测器的辐射通量变化的相对标准偏差值不大于0.022%。进行了重复条件下红外LED辐射通量水平的复现性的考察,重复点燃10次,量值变化的相对标准偏差不超过0.044%。评定校准结果的测量不确定度可得非线性系数校准结果的扩展不确定度为 $U(K)=0.07\%$  ( $k=2$ )。

## 参 考 文 献

- 1 Tang Danying, Li Honglei, Chen Xiongbing, *et al.*. Effects of detector's nonlinearity on frequency response of visible light communication system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405002.  
唐丹颖,李洪磊,陈雄斌,等. 探测器非线性对可见光通信系统幅频响应的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405002.
- 2 Yao Hejun, Lü Zheng, Lin Yandong. The development of nonlinearity tester for optical detector[J]. Modern Measurement and Test, 2001, (2): 31-35.  
姚和军,吕正,林延东. 光学探测器非线性度测试仪的研制[J]. 现代计量测试, 2001, (2): 31-35.
- 3 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.
- 4 Sun Quanshe, Chen Kunfeng, Li Yanhui. Study on nonlinearity measurement of ultraviolet photodetectors by superposition method [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 23(7): 1881-1884.  
孙权社,陈坤峰,李艳辉. 叠加法测量紫外探测器非线性的技术研究[J]. 光学学报, 2009, 23(7): 1881-1884.
- 5 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. High precision linearity measurement instrument for ultraviolet photodetectors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2007, (9): 59-63.  
薛庆生,王淑荣,李福田. 紫外光电探测器高精度线性测量装置[J]. 仪表技术与传感器, 2007, (9): 59-63.
- 6 Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712006.  
孙志远,常松涛,朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712006.
- 7 Wang Mao, Li Chunyan, Sun Yunfei, *et al.*. Research of near-infrared small living animal fluorescence imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0617003.  
王懋,李春炎,孙云飞,等. 近红外小动物活体荧光成像系统的研制[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0617003.
- 8 Dong-Joo Shin, Dong-Hoon Lee, Chul-Woung Park, *et al.*. A novel linearity tester for optical detectors using high-brightness light emitting diodes[J]. Metrologia, 2005, 42(2): 154-158.

栏目编辑:何卓铭