

文章编号: 0253-2239(2010)08-2412-05

基于发光二极管光源的光电高温计非线性研究

董 伟 原遵东 卢小丰

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要 光电高温计的非线性是复现和传递国际温标的主要不确定度贡献项之一。基于光通量倍增原理,采用中心波长 645 nm 的高亮度发光二极管(LED)光源,建立了新的光电高温计非线性测量系统。利用 LED 开关供电方式,取消光闸门设计,避免了光路多次反射引入的非理想性。实验研究了阶跃电流供电条件下 LED 光源的光谱辐射亮度漂移特性,确定了不同供电电流下的初始非线性漂移的结束时间。设计了具有固定相位差的双 LED 脉冲供电电流和半透半反双光源亮度叠加方案。选择 LED 线性漂移阶段测量光电高温计的非线性,利用测量序列互换模型消除两 LED 线性漂移差异的影响,并进行了实验验证。实验测量了用于温标传递的光电高温计 RT9032 的非线性特性。

关键词 光学测量;国际温标;光通量倍增;非线性;光电高温计

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2412

Research on the Nonlinearity of Photoelectric Pyrometer Based on Light-Emitting Diode Light Sources

Dong Wei Yuan Zundong Lu Xiaofeng

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract Nonlinearity of photoelectric pyrometer is one of the main uncertainty sources for realization of international temperature scale. A novel nonlinearity measurement system based on light-emitting diode (LED) light sources and flux addition method is established. A high-brightness LED with nominal 645 nm peak wavelength is utilized as light source to substitute conventional tungsten lamp. The switch of power supply for LED can realize flux addition, and the abandonment of optical strobe can avoid the nonideal result from repeated reflection. The experimental research on the spectral radiation drift of LED under step-mode power supply is carried out to validate the end time of nonlinear drift stage. The pulse-mode power supply of fixed phase shift for double LEDs and beam splitter are combined to attain flux addition. The linear drift stage of LED is chosen to measure the nonlinearity of pyrometer. The linear drift effect on the nonlinearity measurement is eliminated by exchange the measurement turn and experiments are carried out to validate the method. The nonlinearity of the standard radiation thermometer (model RT9032) is experimentally studied.

Key words optical measurement; international temperature scale; flux addition; nonlinearity; radiation thermometer

1 引 言

1990 国际温标^[1]银凝固点(961.78 °C)以上温区由普朗克定律定义,温标复现和传递的仪器为光电高温计^[2]。由于仅采用一个温度参考点,温标复现的不确定度随温度的增加成平方关系增大^[3]。光电高温计的非线性源于光电探测器和电测系统的非

理想性^[4],是温标复现和绝对辐射法热力学温度测量的主要不确定度贡献项之一^[4]。因此,对光电高温计非线性特性的研究是辐射测温法温度计量的重点之一。光通量倍增法是常用的非线性测量方案^[4]。Mielenz 等^[5]采用单光源双狭缝方案实现光通量的倍增,并讨论测量中的系统和随机偏差。

收稿日期: 2009-09-07; 收到修改稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAF06B03)资助课题。

作者简介: 董 伟(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事辐射测温 and 材料热物性等方面的研究。

E-mail: dongw@nim.ac.cn

Jung^[6]采用双钨带灯光源研究非线性。Coslovi 等^[7]同样采用钨带灯光源基于光通量叠加法和减弱滤光法实现光电探测器的非线性测量。钨带灯光源系统通常需要遮光闸门实现光通量的叠加,而闸门开闭引起的光学系统间多次反射特性的改变会引入系统偏差。减弱滤光方案则面临衰减系数的精确标定问题。Fisher 等^[8]采用的激光光源和减弱滤光方案测量光电探测器的非线性。Shin 等^[9]采用高亮发光二极管(LED)作光源研究光电探测器的非线性,并提出一种数据处理方法来消除系统偏差;Shin 等的工作需要继续研究的主要问题是光源的中心波长与探测器峰值波长的不一致性,从而导致光源光谱漂移引入的系统偏差难以消除;对 LED 的漂移特性和光谱分布缺乏实验研究,从而无法在原理上消除非线性漂移分量的影响。

本文基于 LED 光源和光通量倍增原理,采用双光源单光路法构建新的光电高温计非线性测量系统。建立了基于线性漂移修正的理论模型和新的实验方法。由于 LED 的芯片发热会导致光谱分布漂移^[10~12],实验研究了高亮度 LED 的光谱辐射亮度漂移特性和 RT9032 型光电高温计的非线性。LED 不同通电时间影响实验验证了消除线性漂移理论模型的正确性。

2 实验系统

图 1 为基于双 LED 光源的光电高温计非线性测量系统图。光源采用 Dialight Lumidrive Limited 高亮度红光 LED,型号 LSP1-R-005,名义峰值波长为 645 nm。最大功耗为 1.2 W,具有光学

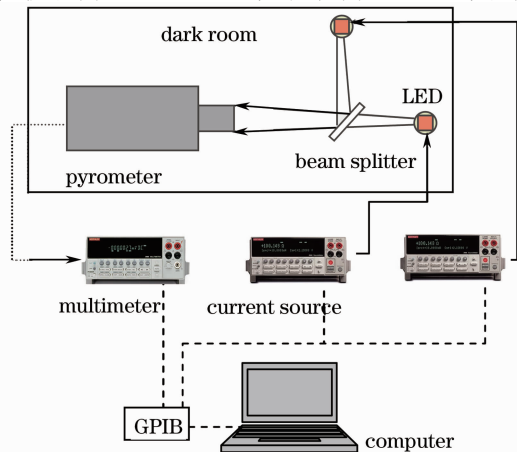


图 1 光电高温计非线性测量系统

Fig. 1 Measurement facility for the nonlinearity of photoelectric pyrometer

底座,用导热胶将其粘合在铝制热沉散热器上。实验前取掉发光芯片前的自带透镜,发光芯片几何尺寸为 1 mm×1 mm。采用 Keithley2400 型可编程微电流源对 LED 供电。

实验研究采用 RT9032 光电高温计^[13],中心波长为 660 nm,半峰全宽为 10 nm。其探测器为滨松 S1336-5BK 型硅光电二极管。采用 Keithley2000 型六位半数字多用表来测量光电高温计对 LED 光通量的响应光电流,GPIB 为通用接口总线。

采用三层遮光布、遮光海绵、不锈钢接杆和光学平台搭建暗室,将光路与环境隔离,避免环境辐射的变化对非线性测量的影响。

3 实验原理

精密光电高温计基于干涉滤光片实现单色化,其探测器的输出光电流为

$$I_p = \int_0^{\infty} \phi(\lambda)R(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

式中 $\phi(\lambda)$ 为光电探测器接收的光谱辐射亮度通量, $R(\lambda)$ 为光电探测器的光谱响应度。

基于 LED 光源和光通量倍增法原理的光电高温计非线性的数学描述为

$$N_L = \frac{I_{p12}}{I_{p1} + I_{p2}} - 1, \quad (2)$$

式中 I_{p1} 为 LED 1 亮时光电高温计的光电流, I_{p2} 为 LED2 亮时的光电流, I_{p12} 为 LED1 和 LED2 同时亮时的光电流。即比较测量光谱辐射亮度通量分别进入和叠加进入探测系统的响应的比值与 1 之差。本文提及的光电流均指已进行暗电流修正后结果。

将(1)式代入(2)式有

$$N_L = \frac{\int_0^{\infty} [\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda)]R_{12}(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} [\phi_1(\lambda)]R_1(\lambda)d\lambda + \int_0^{\infty} [\phi_2(\lambda)]R_2(\lambda)d\lambda} - 1, \quad (3)$$

式中光通量 $\phi_1(\lambda)$ 为 LED1 亮时光电高温计接受的光谱辐射亮度通量, $R_1(\lambda)$ 为对应光通量下的光谱响应。

由于 LED 的响应快速,利用改变 LED 开关供电的时序实现光源亮度倍增。该方案避免了采用钨带灯光源所需的光闸门设计,可消除因闸门开闭引起的光学系统间多次反射特性的改变,因而不会引入光源亮度叠加的方法误差。

实验过程中采用对精密微电流源编程,实现具有固定相位差的脉冲电流输出,以控制 LED 的亮灭,如图 2 所示。

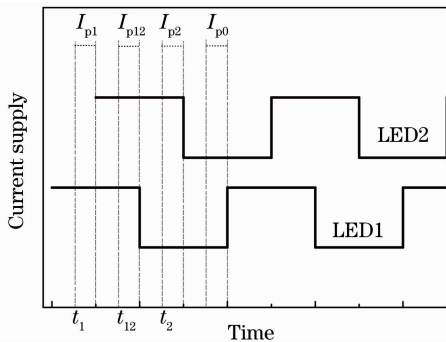


图 2 采用 LED 光源的非线性测量原理图(测量序列 1)

Fig. 2 Nonlinearity measurement principle by using LED light sources (Turn 1)

LED light sources (Turn 1)

LED 的光谱辐射亮度随节点温度(通电时间)存在漂移^[14,15],考虑 LED 光谱辐射亮度漂移效应,采用 LED1 先亮序列得到 N_{L1} 为

$$N_{L1} = \frac{\int_0^{\infty} \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} [\phi_1(\lambda, t)] R_1(\lambda, t) dt d\lambda + \int_0^{\infty} \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} [\phi_2(\lambda, t)] R_2(\lambda, t) dt d\lambda}{\int_0^{\infty} \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} [\phi_1(\lambda, t)] R_1(\lambda, t) dt d\lambda + \int_0^{\infty} \int_{t_2}^{t_2+\Delta t} [\phi_2(\lambda, t)] R_2(\lambda, t) dt d\lambda} - 1, \quad (4)$$

式中 t_1, t_{12}, t_2 为 LED1 亮、LED1 与 LED2 同时亮、LED2 亮的条件下高温计开始测量的时刻, Δt 为统计测量的时间间隔。通过测量时间的选择可满足统计时间内 $d\phi(\lambda, t)/dt$ 为常数,见 4.1 部分。则(4)式可简化为

$$N_{L1} = \frac{\int_0^{\infty} [\phi_1(\lambda) + \Delta\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda) - \Delta\phi_2(\lambda)] R_{12}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} [\phi_1(\lambda)] R_1(\lambda) d\lambda + \int_0^{\infty} [\phi_2(\lambda)] R_2(\lambda) d\lambda} - 1, \quad (5)$$

式中 $\Delta\phi_1(\lambda)$ 为在测量 I_{p12} 时的 LED1 的光谱辐射亮度的漂移量。同样的可导出 LED2 先亮序列的 N_{L2} 。由于两个光源的线性漂移系数可能存在差异,因此仅测量一个序列的导出非线性会存在由于线性漂移系数的差异引入的系统偏差。

通过设置精密微电流源可使得 $\phi_1(\lambda)$ 与 $\phi_2(\lambda)$ 近似相等,满足光通量倍增。如果不同的序列中 $d\phi(\lambda, t)/dt$ 保持不变,则光源的漂移量在不同的测量序列中数值相当,符号相反,可得出基于线性漂移

修正模型的光电高温计的非线性值为两个序列导出非线性的统计平均值。

4 LED 的光谱辐射亮度漂移特性实验

采用 RT9032 光电高温计来研究 LED 的光谱辐射亮度漂移特性。测量了 0.01~0.64 A 供电电流、热沉自然对流冷却条件下 100 s 内 LED 的光谱辐射亮度的相对漂移,结果如图 3 所示。在本文选择的 LED 供电电流条件下,LED 通电 50 s 后的漂移均呈线性特性。本文的线性漂移指光谱辐射亮度实验数据对时间的线性度拟合结果在 0.999 以上。

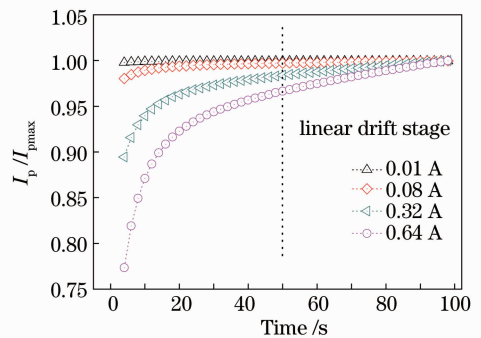


图 3 高亮 LED 的光谱辐射亮度漂移特性
Fig. 3 Spectral radiation luminance drift of high-brightness LED

高温计非线性实验中,保持 LED 通电时间为非线性漂移阶段时间的 2 倍以上,仅统计线性漂移阶段光谱辐射亮度实验数据的平均值,即测量中通过开始测量的时间设置规避光谱辐射亮度非线性漂移的影响。由实验原理部分可知,实验过程中,在线性漂移阶段开始测量可满足消除线性漂移影响的模型要求。

以 0.64 A 的 LED 供电电流为例,由图 3 可知 50 s 后光谱辐射漂移呈线性化行为。结合图 2,选择 t_1, t_{12}, t_2 的时刻分别为 50, 100 和 150 s,统计测量的时间设定为 50 s。由于统计测量的起始时刻在 LED 线性漂移阶段,因此测量的光电流均在 LED 的线性漂移阶段,与测量序列无关。

值得指出的是,LED 光谱辐射亮度的漂移特性与冷却方式有关,采用水冷或半导体制冷控温将是进一步改进漂移特性和提高实验水平的方向。

5 光源漂移影响抑制效果的实验验证

图 3 可知,LED 的光谱辐射亮度随通电时间呈非线性漂移至线性漂移的特性。实验中,通过设置 LED 的通电时间可使得测量模型中的 $d\phi(\lambda, t)/dt$

为常数。对于很短的通电时间,为 $d\phi(\lambda, t)/dt$ 非常数,则非线性的测量结果会含无法消除的系统偏差,此系统偏差的引入即由于 LED 光源的光谱辐射亮度漂移的非线性。而足够长的通电时间则可保证测量阶段线性漂移,非线性的测量结果不含光源漂移引入的非理想因素。

设置 LED 的供电电流 50 mA,不同的通电时间 16,80 和 160 s,基于线性漂移修正模型导出的非线性结果如图 4 所示。图 4 结果表明,16 s 通电时间结果非线性明显含系统偏差,即光源漂移项的影响。而 80 s 和 160 s 的结果的平均值在 5×10^{-5} 不确定度范围内吻合良好。

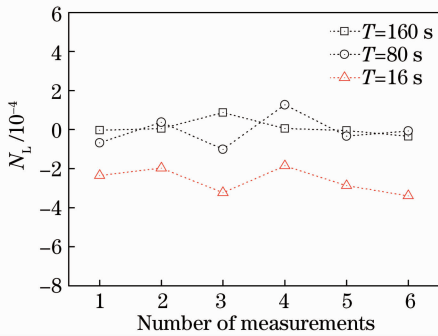


图 4 不同通电时间对非线性的影响实验结果
Fig. 4 Results of effect of variable lighting time on the nonlinearity

供电电流 5 mA,0.3 A 和 0.7 A 条件下,设置通电时间为 8~240 s 验证光源漂移影响抑制效果实验,结果与 50 mA 一致,在光源漂移非线性阶段测量,结果含系统偏差;线性漂移阶段测量,结果一致性良好。

因此,不同通电时间实验验证模型对于线性漂移修正可靠,同时也验证了两 LED 光谱辐射线性漂移差异的重复性。由于测量原理仅要求正反两个序列中,统计测量的阶段 LED 处于线性漂移状态,且测量结果为比较测量,因此不要求 LED 光谱辐射稳定。

6 光电高温计非线性实验

对 RT9032 型光电高温计的非线性进行了实验研究。光电流范围为 $1.1 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-7}$ A。结果表明,在测量范围内光电高温计的非线性值为 $-1 \times 10^{-4} \sim 0.2 \times 10^{-4}$,如图 5 所示。测量结果的标准不确定度:光电流为 $3.6 \times 10^{-11} \sim 4.4 \times 10^{-8}$ A 条件下,高温计非线性的标准不确定度优于 0.7×10^{-4} ;光电流在 1.1×10^{-11} A 和 2×10^{-7} A 条件下

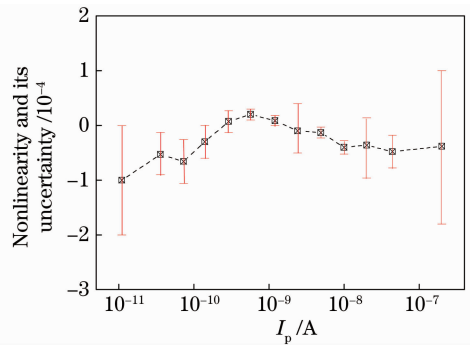


图 5 非线性实验结果及非线性不确定度
Fig. 5 Experimental result and associated uncertainty of nonlinearity

不确定度优于 1.5×10^{-4} 。

由图 5 可看出,在光电流 1.1×10^{-11} A 条件下,光电高温计的非线性不确定度相对明显增大,这是由于光源的光谱辐射亮度靠近光电探测器测量下限,光电流的数值与噪声接近,信噪比较差带来的偏差为不确定度的主要贡献项。在光电流 2×10^{-7} A 条件下,LED 的供电电流为 0.64 A,由图 3 也可看出光源的光谱辐射亮度非线性漂移阶段较长,选择线性漂移起始时间相对难度增大,而线性漂移阶段实验数据拟合的线性度的差异也会引入不确定度。此外,在大电流高光谱辐射亮度条件下,光源亮度的稳定性和重复性也是不确定度放大的主要原因。

表 1 给出了光电流为 1.4×10^{-8} A,对应亮度温度约 1750 °C,修正线性漂移后非线性的测量结果。其中,第 1 列为 N_{L1} ,即采用 LED1 先亮序列得到的非线性结果;第 2 列为 LED2 先亮序列结果;第 3 列为计算得到的非线性结果,第 4,5 列分别为 5 次测量结果的统计平均值及平均值的标准偏差。由表中可以看出,线性漂移对于不同的测量序列,对于非线性的影响方向相反,数值相当。基于测量模型修正漂移影响后,非线性结果平均值的标准偏差在 3.6×10^{-5} 。

表 1 基于线性漂移修正的非线性结果
(光电流 1.4×10^{-8} A)

Table 1 Result of nonlinearity based on linear drift correction (photocurrent 1.4×10^{-8} A)

$N_{L1}/10^{-3}$	$N_{L2}/10^{-3}$	$N_L/10^{-5}$	Aver / 10^{-5}	Stdev / 10^{-5}
3.358	-3.119	15.5		
3.297	-3.241	7.18		
3.246	-3.335	-0.25	3.3	3.6
3.210	-3.354	-3.3		
3.238	-3.36	-2.5		

7 结 论

对国际温标辐射温区的温标复现和传递仪器(光电高温计)的非线性特性进行了研究。建立了基于线性漂移修正的理论模型和新的实验方法。搭建了新的基于光通量倍增的高亮度 LED 光源的非线性实验台。采用干涉滤波单色方案实验研究恒流条件 LED 光谱辐射亮度的漂移特性。在测量时间选择上规避光谱辐射亮度非线性漂移阶段,测量序列互换模型在理论上可消除线性漂移对光电高温计非线性测量的影响。通过 LED 不同通电时间影响实验的结果验证了模型的正确性。

实验研究了 RT9032 型光电高温计在光电流范围为 $1.1 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-7}$ A 的非线性不确定度,结果为 $-1 \times 10^{-4} \sim 0.2 \times 10^{-4}$,测量结果的标准不确定度在 $3.6 \times 10^{-11} \sim 4.4 \times 10^{-8}$ A 范围内优于 0.7×10^{-4} ,在其它光电流条件下优于 1.5×10^{-4} 。光电高温计非线性不确定度的测量结果可为温标的复现和传递提供基础数据。

参 考 文 献

- 1 H. Preston-Thomas. The international temperature scale of 1990 (ITS-90) [J]. *Metrologia*, 1990, **27**(1): 3~107
- 2 Yuan Zundong, Zhao Qi, Duan Yuning *et al.*. A new transfer standard photoelectric pyrometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2003, **24**(4): 257~261
原遵东, 赵 琪, 段宇宁 等. 新型精密光电高温计[J]. 计量学报, 2003, **24**(4): 257~261
- 3 Duan Yuning, Yuan Zundong, Wu Jiyu. A new non linearity measurement system for radiation thermometer in Nim [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2000, **21**(1): 51~58
段宇宁, 原遵东, 吴继或. 光电比较仪(或高温计)系统非线性测量装置 [J]. 计量学报, 2000, **21**(1): 51~58
- 4 D. R. White, M. T. Clarkson, P. Saunders *et al.*. A general technique for calibrating indicating instruments [J]. *Metrologia*, 2008, **45**(2): 199~210
- 5 K. D. Mielenz, K. L. Eckerle. Spectrophotometer linearity testing using the double-aperture method [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(10): 2294~2303
- 6 H. Jung. Spectral nonlinearity characteristics of low noise silicon detectors and their application to accurate measurement to accurate measurements of radiant flux ratios [J]. *Metrologia*, 1979, **15**(4): 173~181
- 7 L. Coslovi, F. Righini. Fast determination of the nonlinearity of photodetectors [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18): 3200~3203
- 8 J. Fischer, L. Fu. Photodiode nonlinearity measurement with an intensity stabilized laser as a radiation source [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(22): 4187~4190
- 9 D. J. Shin, D. H. Lee, C. W. Park *et al.*. A novel linearity tester for optical detectors using high-brightness light emitting diodes [J]. *Metrologia*, 2005, **42**(2): 154~158
- 10 Chen Huanting, Lü Yijun, Chen Zhong *et al.*. Analysis of thermal spreading boards for high-power AlGaInP red LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 805~810
陈焕庭, 吕毅军, 陈 忠 等. 大功率 AlGaInP 红光 LED 散热基板热分析 [J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 805~810
- 11 Zhong Gaoyu, Zhou Suyun, Chen Guanyu *et al.*. An invalidation mechanism in organic light-emitting diodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 36~38
钟高余, 周素云, 陈冠雨 等. 有机发光器件的一种失效机制 [J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 36~38
- 12 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 143~145
邝 海, 刘军林, 程海英 等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响 [J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 143~145
- 13 Yuan Zundong, Wang Tiejun, Lu Xiaofeng *et al.*. Calibration facilities for radiation thermometry at NIM [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, **29**(5A): 70~75
- 14 P. Manninen, P. Orrevelinen. On spectral and thermal behaviors of AlGaInP light-emitting diodes under pulse-width modulation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 181121
- 15 N. C. Chen, Y. N. Wang, C. Y. Tseng *et al.*. Determination of junction temperature in AlGaInP/GaAs light emitting diodes by self-excited photoluminescence signal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(10): 101114