

基于 LED 光谱可调谐光源的光电探测器相对光谱响应测量研究

刘洪兴^{1,2}, 任建伟¹, 万志¹, 刘则洵¹, 李葆勇¹, 叶钊^{1,2}

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 提出了采用 LED 光谱可调谐光源测量光电探测器相对光谱响应, 详细论述了测量原理和算法, 计算中将辐射传输积分方程改写成求和方程, 求和值与积分值的近似程度与波长间隔大小的选择有关, 仿真分析了不同色温黑体作为探测目标时硅光电探测器和 CCD 在不同波长间隔下的信号求和值与积分值差异。仿真结果表明: 10 nm 波长间隔时, 探测器信号求和值和积分值差异在 0.2% 以内, 是波长间隔的理想值。最后分析了影响该方法测量精度的因素及其解决方案。该测量方法结构简单, 避免了单色仪等仪器的测量传递误差。

关键词 LED; 光谱可调谐; 光电探测器; 相对光谱响应

中图分类号: O431.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)01-0250-05

引言

光辐射探测器在现代光学技术和光学工程中发挥着重要作用, 广泛应用于通信、气象、工业控制、科研生产、军工等领域^[1,2]。光辐射探测器可分为以光电效应为理论基础的光电探测器和以热效应为理论基础的光热探测器两大类型。常用的光电探测器包括: 硅单元光电探测器、面阵电荷耦合器件(CCD)和超大规模镶嵌式焦平面阵列器件等。常用的光热探测器主要有: 热敏电阻、辐射热电偶、热释电探测器和绝对辐射计等。

光辐射探测器的光谱响应度是指不同波长位置单位光通量在探测器上产生的电流(或电压)量, 实际工作中关心的是响应度随波长的相对变化, 即相对光谱响应度^[1,2]。由于光热探测器对不同波长的辐射有较平坦的响应, 是无选择性探测器, 所以, 通常提到的探测器的相对光谱响应度是指光电探测器。光电探测器相对光谱响应度测量方法分为直接比较法、替代法和宽带滤光片法^[3]。直接比较法和替代法是最常用的方法, 需要辐射源、单色仪、基准探测器以及光学系统等几个部分, 测量结构相对复杂, 测量误差来源也相对较多, 包括基准探测器、单色仪、光学系统和待测探测器等。其中, 基准探测器的误差来源包括暗信号和响应度的漂移、非线性以及非均匀性; 单色仪的误差来源包括波长误差、非均匀性、杂散光辐射以及偏振; 光学系统的误差来源包括两

光束的光谱非对称性、镜像移动的精确性、漫射杂散辐射以及孔衍射; 待测探测器的误差来源包括非线性、暗电流、非均匀性、偏移以及探测器窗口干扰。宽带滤光片法是利用已知光谱功率分布的标准光源和 n 个已知光谱透射比的滤光片进行测量, 对信号进行恰当的处理可以得到 n 个波长处的光谱响应度, 然后通过插值的方式得到全波段的相对光谱响应度。 n 个滤光片的透过率函数必须是非相关的。宽带滤光片法的优点在于结构简单且不需要基准探测器, 但是要得到高精度相对光谱响应, 必须要求得到可观的数目的滤光片, 此外滤光片光谱透过率具有方向性也是影响相对光谱响应函数精度的重要因素。

本文采用 LED 光谱可调谐光源直接照射光电探测器, 根据辐射传输数学物理方程构造描述不同光谱分布光源下的光电探测器辐射输入、信号输出值(电流值、电压值或者数码 DN 值)与相对光谱响应之间对应关系的数学物理方程组。光电探测器辐射输入和信号输出值, 通过求解方程组得到的相对光谱响应函数。

1 光谱可调谐光源

英国的 National Physical Laboratory (NPL) 设计了如图 1 所示光谱可调谐光源系统^[4], 该系统的光源为溴钨灯, 溴钨灯发出的光经准直系统(collimating lens)、分光系统(fixed grating)、聚焦透镜(focusing lens)以及空间滤波器(spatially

收稿日期: 2012-06-22, 修订日期: 2012-09-08

基金项目: 国家(863 计划)项目(863-2-5-1-13B)资助

作者简介: 刘洪兴, 1986 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: lhxing_888@126.com

selective filter)后入射到积分球,调整空间滤波器光谱透过特性即可改变积分球输出光谱分布。该光谱可调谐积分球光源系统所用的溴钨灯具有蓝绿光波段光谱能量偏低的不足^[5],且系统结构相对复杂。

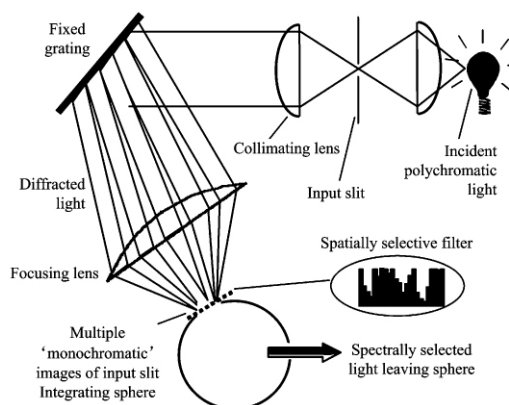


Fig 1 Schematic diagram of NPL spectrum-tunable source

LED 具有体积小、发光效率高、寿命长(理论寿命为 10^5 h)、环保、发光稳定以及峰值波长(λ_p)丰富等优点^[6-8]。美国的 National Institute of Standards and Technology(NIST)研制了一种以 LED 为发光介质的光谱分布可调的积分球光源^[9,10],它可以模拟不同光源的光谱分布,该光源的原理图如图 2 所示。LED 光谱分布可调光源由积分球、LED 灯头、光纤光谱仪、控制电脑组成。积分球起到匀光的作用,将装有大量不同峰值波长的 LED 的灯头放入积分球,调整 LED 的驱动电流和点亮数目,积分球即可输出不同光谱分布。光纤光谱仪用于实时监视光源的光谱分布并反馈给控制电脑,电脑通过计算模拟光谱与目标光谱的差异调整 LED 的驱动电流,从而得到与目标光谱最为接近的光谱曲线。在国内,长春光机所、安徽光机所以及台湾国立中央大学等单位也做了类似的研究^[11-13]。

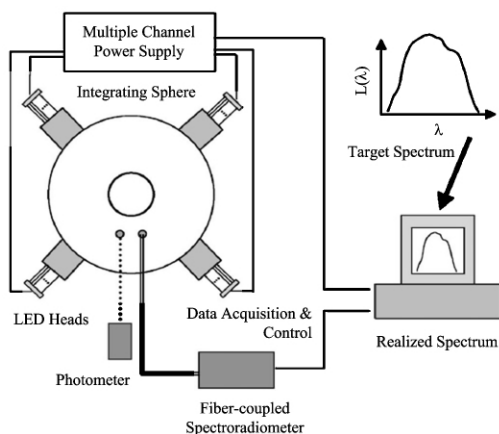


Fig 2 Schematic diagram of NIST LED-based spectrum-tunable source

2 测量原理与算法描述

采用 LED 光谱可调谐光源测量光电探测器相对光谱响

应的原理图如图 3 所示。

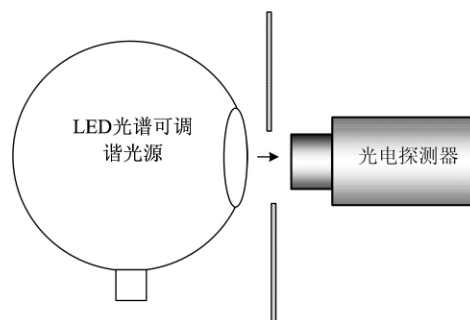


Fig 3 Schematic diagram of measuring relative spectral responsivity of photodetector by LED spectrum-tunable source

将 LED 光谱可调谐光源作为探测目标,通过光纤光谱仪可以得到光源的光谱分布(或者采用光谱辐亮度计测得积分球光源出口处的光谱辐亮度),将光电探测器对准积分球开口即可获得光电探测器的测量值(电流值、电压值或者数码 DN 值),关闭积分球光源,即可得到光电探测器的暗信号。

光电探测器辐射传输的数学物理方程为

$$\text{SIGNAL} = \alpha \int_{\lambda_p}^{\lambda_q} R(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda + n \quad (1)$$

其中, SIGNAL 为光电探测器的信号值, $R(\lambda)$ 为所述光电探测器的相对光谱响应函数, $\Phi(\lambda)$ 为光电探测器的输入的光谱功率分布, λ_p 和 λ_q 分别为光谱响应波长范围的下限和上限, α 为辐射传输的非光谱因子, n 为暗信号值。

将光电探测器的光谱响应波长区间 $\lambda_p \sim \lambda_q$ 按等分离散成 k 个波长间隔,光电探测器辐射传输方程右侧的积分部分改写成求和,则

$$\text{SIGNAL}' = \alpha \sum_{i=1}^k R(\lambda_i) \Phi(\lambda_i) \frac{(\lambda_q - \lambda_p)}{k} + n \quad (2)$$

其中, SIGNAL' 为光电探测器信号的求和值, λ_i 为第 i 个波长间隔的中心波长, $R(\lambda_i)$ 为光电探测器在波长 λ_i 处的相对光谱响应函数, $\Phi(\lambda_i)$ 为所探测光谱在的波长 λ_i 处的光谱值, $\frac{(\lambda_q - \lambda_p)}{k}$ 为波长间隔长度,当 k 大到一定程度时,求和值近似等于测量值, $\text{SIGNAL}' \approx \text{SIGNAL}$ 。

调节 LED 的驱动电流或 LED 的点亮数目,测得 m 个不同光谱分布下的光电探测器信号值,并根据式(2)构造光电探测器的辐射传输测量的数学物理矩阵方程

$$\alpha \frac{(\lambda_q - \lambda_p)}{k} \begin{bmatrix} \Phi_1(\lambda_1) & \cdots & \Phi_1(\lambda_k) \\ \vdots & & \vdots \\ \Phi_m(\lambda_1) & \cdots & \Phi_m(\lambda_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(\lambda_1) \\ \vdots \\ R(\lambda_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{SIGNAL}_1 - n \\ \vdots \\ \text{SIGNAL}_m - n \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\begin{bmatrix} \Phi_1(\lambda_1) \\ \vdots \\ \Phi_1(\lambda_k) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \Phi_m(\lambda_1) \\ \vdots \\ \Phi_m(\lambda_k) \end{bmatrix}$ 为 m 组不同光谱分布光源分别

在波长 $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ 处的光谱值向量, $m \geq k$, 且向量组

$$\begin{bmatrix} \Phi_1(\lambda_1) \\ \vdots \\ \Phi_1(\lambda_k) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} \Phi_m(\lambda_1) \\ \vdots \\ \Phi_m(\lambda_k) \end{bmatrix} \text{ 线性无关。}$$

采用最小二乘法求解超定方程组(3), 即可得到光电探测器的相对光谱响应特性。

3 仿真实验与讨论

波长间隔的选择将影响求和值和积分值的近似程度, 而两者的近似程度是影响测量结果精度的重要因素。为此仿真分析了波段间隔对两者近似程度的影响。

硅光电探测器在 380 nm~780 nm 波段的光谱响应是线性的, 光谱响应函数设为: $\tau(\lambda) = k\lambda$, 将 380~780 nm 波长区间按等份离散成多个波段, 然后仿真分析硅光电探测器不同波长间隔下求和值与积分值的近似程度, 波长间隔选择 1, 5, 10, 20 和 50 nm 五种, 仿真计算了 401 种光源光谱分布下各波长间隔硅光电探测器信号求和值与积分值的比值, 如图 4 所示, 401 种光源为色温为 3 000~7 000 K 的黑体, 色温间隔为 10 K。

又如某线阵 CCD 的相对光谱响应如图 5 所示, 将 380~830 nm 波长区间按等份离散成多个波段, 然后仿真分析 CCD 不同波长间隔下求和与积分值的近似程度, 波长间隔选择 1, 5, 10, 30 和 50 nm 五种, 计算了 451 种光源光谱分布

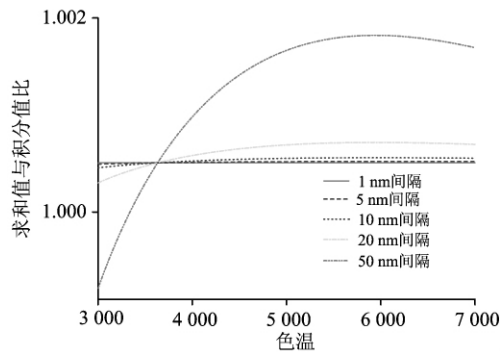


Fig 4 The ratio of summation value to integral value under different colour temperatures of Si photodiode in different wavelength intervals

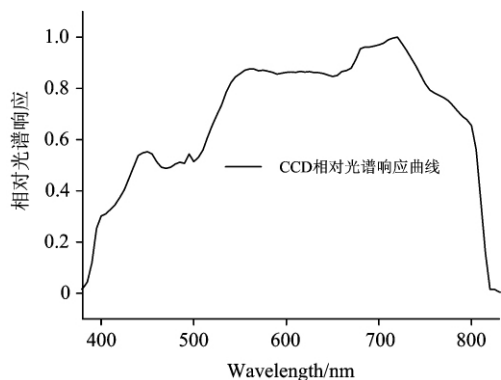


Fig 5 The relative spectral responsivity curve of CCD

下各波长间隔 CCD 光电探测器求和值与积分值的比值, 如图 6 所示, 451 种光源为色温为 3 000~7 500 K 的黑体, 色温间隔为 10 K。

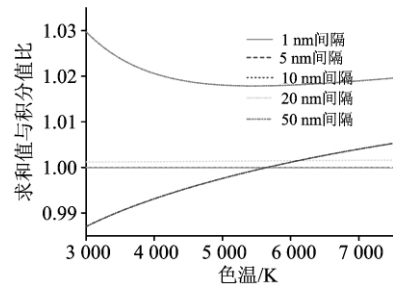


Fig 6 The ratio of summation value to integral value under different colour temperatures of CCD in different wavelength intervals

之前的仿真计算用得黑体光源光谱分布相对平缓, 为此仿真分析了硅光电探测器和 CCD 在 CIE D65 光源照明和不同波长间隔下的信号求和值与积分值比, CIE D65 的相对光谱分布如图 7 所示, 仿真计算求和值与积分值比如表 1 所示。

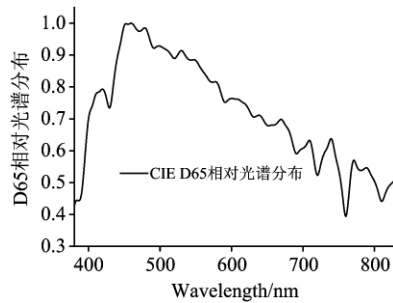


Fig 7 Normalized spectral distribution curve of CIE D65

Table 1 The ratio of summation to integral value under under CIE D65 of Si photodiode and CCD in different wavelength intervals

	1 nm 间隔	5 nm 间隔	10 nm 间隔	20/30 nm 间隔	50 nm 间隔
硅探测器	1.000 0	1.000 0	0.999 9	1.002 3(20 nm)	1.004 3
CCD	1.000 0	0.999 9	1.001 2	0.990 1(30 nm)	1.013 2

仿真结果表明: 波长间隔越小, 求和值与积分值越接近, 然而减小波长间隔会成倍的增加实验的次数, 不仅增加了实验的工作量, 而且由于实验中要求光源的光谱分布线性无关, 减小波长间隔还对光源光谱分布的可调谐能力提出了更高的要求, 因此, 选择合适的波长间隔, 不仅会能保证相对光谱响应精度, 还可以减少实验的工作量。根据图 4、图 6 和表 1 的结果, 10 nm 波长间隔时的信号求和值和积分值差异在 0.2% 以内, 是相对理想的波长间隔。当相对光谱响应曲线存在细尖峰时, 则需要选择比尖峰波长宽度小的波长间隔来体现相对光谱响应曲线的细节。

在细节上, 对比图 4 和图 6 可知, 探测器信号的求和值

和积分值的差距还与相对光谱响应曲线的平缓及光滑程度有关。相同波长间隔下的仿真,相对光谱响应平缓及光滑程度好的探测器(如上文的硅光电探测器)的信号求和值与积分值的差异要比平缓光滑程度差的探测器(如上文的 CCD 探测器)小得多。此外,探测器信号的求和值和积分值的差距还有光源光谱分布的平缓光滑程度有关,因此应尽量选择光谱分布平缓及光滑程度好的光源。

影响该方法测量探测器相对光谱响应的主要误差还包括待测探测器的误差和光源光谱分布的测量误差。待测探测器的误差来源主要包括探测器非线性、暗电流、非均匀性、偏移以及探测器窗口干扰。

所有探测器都仅在特定的范围是线性的,而探测器的使用不当将会大大减弱探测器的线性,因此,测量探测器光谱响应时应先对其输入信号的线性范围进行测试。探测器的暗电流和非均匀性可分别通过探测器的暗电流修正和非均匀性校正解决。大部分光电探测器的响应度是一个温度的函数,通常温度系数是波长的函数,其在光谱的一部份上是正数而在其他部分上是负数(如硅—光电二极管或光电发射 CsSb 阴极),因此,测量光谱响应度时探测器的温度必须保持稳

定以消除温度带来的偏移。如果用激光提供单色辐射,则光束的高相干性会导致探测器窗口或平行面的玻璃滤光片中产生干扰效应,将滤光片倾斜放置可能会阻止相互干扰,但不能消除干扰效应,通常将平行替换成楔形窗口来消除干扰效应。此外,还需要高精度辐亮度计或光谱仪精确测量可调光源的光谱分布以保证探测器相对光谱响应的测量精度。

4 结 论

采用 LED 光谱可调谐光源测量光电探测器相对光谱响应,该方法避免了引入单色仪等仪器的测量传递误差,因此具有简单有效的优点。

LED 光谱可调谐光源提供的是面均匀光源,该光源不仅可以应用于单元探测器相对光谱响应的测量,还可以用于阵列探测器相对光谱响应的测量,并且还可以应用于阵列探测器不同探测单元的非均匀性校正。此外,在空间遥感领域,采用大口径 LED 光谱可调谐光源可以为空间遥感相机进行辐射定标和光谱定标^[11-13]。

References

- [1] Palamer J M, Grant B G. The Art of Radiometry. Bellingham: SPIE Press, 2010. 127.
- [2] JIN Qi-wei, HU Wei-jie(金其伟, 胡威捷). Radiometry, Photometry, Colorimetry Theory and Measurement(辐射度, 光度与色度及其测量). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京: 北京理工大学出版社), 2009. 74.
- [3] GB/T 26209—2010/CIE 64—1984. 2011.
- [4] Wall C F, Hanson A R, Taylor J A F. Proceedings of SPIE, 2001, 4295: 259.
- [5] YE Zhao, REN Jian-wei, LI Xian-sheng, et al(叶 钊, 任建伟, 李宪圣, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(1): 64.
- [6] DING Tian-ping, GUO Wei-ling, CUI Bi-feng, et al(丁天平, 郭伟玲, 崔碧峰, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2011, 31(6): 1450.
- [7] JIN Peng, YU Chun-yu, ZHOU Qi-feng, et al(金 鹏, 喻春雨, 周奇峰, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2011, 19(1): 51.
- [8] WANG Yao, LIU Hua, JING Lei, et al(王 尧, 刘 华, 荆 雷, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(7): 1463.
- [9] Brown S W, Santana C, Eppeldauer G P. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 2002, 107(4): 363.
- [10] Fryc I, Brown S W, Eppeldauer G P, et al. Opt. Eng., 2005, 44(11): 111309.
- [11] CHEN Feng, YUAN Yin-lin, ZHENG Xiao-bing, et al(陈 风, 袁银麟, 郑小兵, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2008, 16(11): 2060.
- [12] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, LI Bao-yong, et al(刘洪兴, 任建伟, 李葆勇, 等). Chinese Journal of Luminescence(发光学报), 2011, 32(10): 1074.
- [13] LIU Hong-xing, SUN Jing-xu, LIU Ze-xun, et al(刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(7): 1447.

Measurement of Relative Spectral Responsivity of Photodetector by LED-Based Spectrum-Tunable Source

LIU Hong-xing^{1,2}, REN Jian-wei¹, WAN Zhi¹, LIU Ze-xun¹, LI Bao-yong¹, YE Zhao^{1,2}

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A method of determining relative spectral responsivity of photodetector by LED-based spectrum-tunable integrating sphere source is put forward, and the measuring principle and algorithm are exhaustively described. In the course of calculation, the radiant transmission integral equation was changed into summation formula, and the degree of approximation between integral value and summation value is related to the selected wavelength interval. The differences between integral value and summation value in different wavelength intervals of Si photodiode and CCD were simulated and analyzed. The simulated results demonstrated that the relative differences between signal integral value and signal summation value of Si photodiode and CCD were below 0.2% in 10 nm interval, so 10 nm interval was an ideal choice. In the end, the factors affecting measurement accuracy were discussed and the solution suggestions were given. This method is easy in structure, and it avoids the measurement transmission errors of some instruments, such as monochromator.

Keywords LED; Spectrum-tunable; Photodetector; Relative spectral responsivity

(Received Jun. 22, 2012; accepted Sep. 8, 2012)