

光谱校正积分光度法测量蓝光 LED 光通量*

潘建根¹ 沈海平^{2,†} 冯华君²

(1 杭州远方光电信息有限公司, 杭州 310053)
(2 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 介绍了一种光谱校正积分光度法及其在蓝光 LED 光通量测量中的应用, 对测量中的各种不确定因素作了理论分析, 并与单纯的分光光度法和积分光度法的不确定度作了比较, 证明该方法可实现极高的测量精度. 这对于 LED 的品质评价具有重要意义.

关键词: LED; 光度; 光通量; 测量; 不确定度

PACC: 0760D EEACC: 7320P

中图分类号: O432.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)05-0932-05

1 引言

自从 GaN 材料的发光二极管(LED)^[1]被发明以来, LED 在众多领域得到了广泛的应用, 甚至有可能成为 21 世纪最有前途的照明光源之一. 因此各国政府、科技工作者和企事业单位, 均在 LED 方面作了大量部署和投入. LED 产品的质量不仅要从生产封装过程中就加以严格控制^[2], 而且还要对 LED 成品的发光特性作精确测量. 由于 LED 的发光机理与传统光源存在着很大的差别, 因此其光辐射测量在很多方面都面临着国际性的难题, 为此国际照明委员会(CIE)成立了专门的技术委员会研究这些问题, 并已形成了 CIE127-1997 文件^[3], 但要建立完整的 LED 评价测试体系还有很长的一段路要走.

蓝光 LED 光度量度的精确测量就是众多难题中的一个. 即使一些实验室级别($f_1 < 1.5\%$)的光度探头在测量蓝光 LED 的光度量时也会产生较大的误差, 原因就在于探头的相对光谱灵敏度经常在短波段与标准光谱光效函数 $V(\lambda)$ 存在较大偏离, 这种偏离对于绿光、红光或白光 LED 的光度测量影响较小, 而对于蓝光 LED 则影响较大^[4]. 目前国际上对这一问题的解决方法一般有:

(1) 在蓝光 LED 的辐射区域(短波段)将光度探头的相对光谱灵敏度与 $V(\lambda)$ 曲线实现精确匹配, 即形成一个专门的蓝光光度探头, 但其实现难度和成本非常高.

(2) 使用精确替代的蓝光 LED 标准校准源, 标准校准源与待测 LED 为同一类型的 LED(即相对

光谱功率分布和空间光强分布一致). 由于 LED 的种类繁多, 因此需要配套很多的 LED 标准校准源, 成本也相当高.

(3) 与上述使用光度探头测量的积分光度法相对的, 还有使用光谱仪测量的分光光度法. 这种方法虽然能解决蓝光 LED 光谱功率分布特殊性所带来的光度测量问题, 精度比用普通光度探头的积分光度法高, 但这种方法存在的一个普遍问题就是光谱仪的光度线性响应范围一般都较窄, 而且光谱测量本身也具有不确定度.

本文介绍的光谱校正积分光度法, 结合了分光光度法和积分光度法的优点, 同时解决了两者的缺陷. 对这种方法在蓝光 LED 光通量测量中的不确定度作了理论分析, 并与单纯的分光光度法和积分光度法的不确定度作了比较, 证明了这种方法可实现极高的测量精度.

2 系统与方法

光谱校正积分光度法测量蓝光 LED 的光通量可采用如图 1 所示的测试系统.

具体步骤为: 光谱分析仪通过光纤导入的方式测量待测 LED 的相对光谱功率分布 $S_{LED}(\lambda)$; 通过光度探头测量待测 LED 的光通量 $\Phi_{tot, corrected}$, 计算机根据这些测量数据以及已知数据——校准光度探头所用的光通量标准灯的相对光谱功率分布 $S_s(\lambda)$ 、标准光谱光效函数 $V(\lambda)$ 以及光度探头的相对光谱灵敏度 $s(\lambda)_{rel}$, 按下式计算光谱校正因子 K :

* 国家高技术研究发展计划专项经费资助项目(批准号: 2004AA311060)

† 通信作者. Email: hainiushen@163.com

2005-08-27 收到, 2005-11-01 定稿

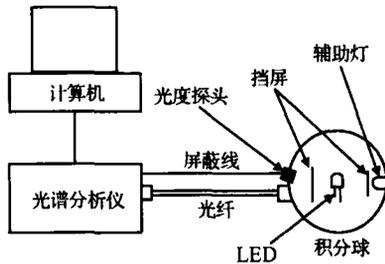


图 1 光谱校正积分光度法的蓝光 LED 光通量测试系统
Fig.1 Measurement system for luminous flux of blue LEDs using spectral-correction-integral-photometry method

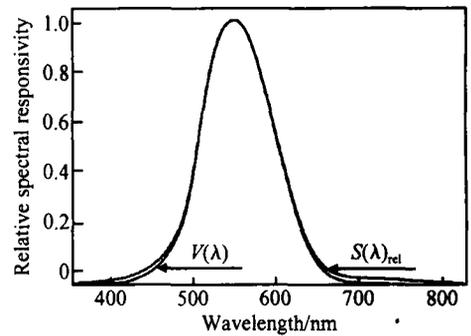


图 2 光度探头的相对光谱灵敏度曲线
Fig.2 Relative spectral responsivity curve of a photometer head

$$K = \frac{\int_{360}^{830} S_{LED}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{360}^{830} S_{LED}(\lambda) s(\lambda)_{rel} d\lambda} \times \frac{\int_{360}^{830} S_s(\lambda) s(\lambda)_{rel} d\lambda}{\int_{360}^{830} S_s(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

对 $\phi_{not\ corrected}$ 进行校正,从而得到待测 LED 的精确光通量值 $\phi_{corrected}$. 实际测量中给出的数据一般都是等间隔波长上的采样值,光谱校正因子 K 通常按下式计算:

$$K = \frac{\int_{i=360}^{830} S_{LED}(i) V(i) d\lambda}{\int_{i=360}^{830} S_{LED}(i) s(i)_{rel} d\lambda} \times \frac{\int_{i=360}^{830} S_s(i) s(i)_{rel} d\lambda}{\int_{i=360}^{830} S_s(i) V(i) d\lambda} \quad (2)$$

其中 $S_{LED}(i)$; $s(i)_{rel}$; $S_s(i)$ 和 $V(i)$ 分别为 $S_{LED}(\lambda)$; $s(\lambda)_{rel}$; $S_s(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ 在波长 i 上的采样值.

这里所使用的光度探头虽然也经过 $V(\lambda)$ 校正,但对其校正水平要求降低很多,其相对光谱灵敏度仅在 360~830nm 范围内有响应,允许与 $V(\lambda)$ 有一定的偏差,但要求均为正偏差,图 2 为一示例.探头的相对光谱灵敏度 $s(\lambda)_{rel}$ 须经过精确测量,测量时波长采样间隔至少应为 5nm^[5].

3 不确定度分析

实际测量过程中,光谱分析仪测量待测LED的

$$u_c(K)_{rel} = \frac{\sqrt{\int_{i=360}^{830} (c_{S_{LED}}(i) u(S_{LED}(i)))^2 d\lambda + \int_{i=360}^{830} (c_{s_{rel}}(i) u(s(i)_{rel}))^2 d\lambda + \int_{i=360}^{830} (c_{S_s}(i) u(S_s(i)))^2 d\lambda}}{K} \quad (4)$$

其中 $c_{S_{LED}}(i)$, $c_{s_{rel}}(i)$ 和 $c_{S_s}(i)$ 分别为对应 $S_{LED}(i)$, $s(i)_{rel}$ 和 $S_s(i)$ 各分量的敏感系数; $u(S_{LED}(i))$, $u(s(i)_{rel})$ 和 $u(S_s(i))$ 分别为 $S_{LED}(i)$, $s(i)_{rel}$ 和 $S_s(i)$ 的标准不确定度.这里假设各分量之间两两不相关.由(2)式得 $c_{S_{LED}}(i)$, $c_{s_{rel}}(i)$ 和 $c_{S_s}(i)$ 分别为:

相对光谱功率分布 $S_{LED}(i)$ 的不确定度、光度探头相对光谱灵敏度 $s(i)_{rel}$ 的测量不确定度以及标准灯相对光谱功率分布数据 $S_s(i)$ 的不确定度等都会给测量结果引入不确定度.另外,用辅助灯进行自吸收校正过程中的不确定度、积分球空间响应的不均匀性也会给测量结果引入不确定度.由于本文旨在证明这种光谱校正积分光度法的有效性,因此这里只分析光谱方面数据的不确定度影响.不确定度的评定方法基于国际标准化组织(ISO)的“测量不确定度表述导则”^[6].

采用这种光谱校正积分光度法测量蓝光 LED 的光通量,测量结果 $\phi_{corrected} = \phi_{not\ corrected} K$,其相对合成标准不确定度为:

$$u_c(\phi_{corrected})_{rel} = \sqrt{(u(\phi_{not\ corrected})_{rel})^2 + (u_c(K)_{rel})^2} \quad (3)$$

其中 $u(\phi_{not\ corrected})_{rel}$ 和 $u_c(K)_{rel}$ 分别为光度探头测量结果的相对标准不确定度和光谱校正因子 K 的相对合成标准不确定度,这里不考虑随机效应给光度探头测量结果带来的不确定度,因此 LED 光通量测量结果的相对合成标准不确定度等于光谱校正因子 K 的相对合成标准不确定度,即 $u_c(\phi_{corrected})_{rel} = u_c(K)_{rel}$.

根据(2)式, K 的不确定度由 LED 光谱测量不确定度、光度探头光谱灵敏度测量不确定度以及标准灯光谱数据不确定度三方面引入:

$$\left\{ \begin{aligned} c_{S_{LED}}(i) &= \frac{1}{\int_{i=360}^{830} S_{LED}(i) S(i)_{rel} di} \left[\int_{i=360}^{830} \frac{S_s(i) S(i)_{rel}}{S_s(i) V(i)} V(i) - K_s(i)_{rel} \right] \\ c_{S_{rel}}(i) &= \frac{1}{\int_{i=360}^{830} S_{LED}(i) S(i)_{rel} di} \left[\int_{i=360}^{830} \frac{S_{LED}(i) V(i)}{S_s(i) V(i)} S_s(i) - K_{S_{LED}}(i) \right] \\ c_{S_s}(i) &= \frac{1}{\int_{i=360}^{830} S_s(i) V(i) di} \left[\int_{i=360}^{830} \frac{S_{LED}(i) V(i)}{S_{LED}(i) S(i)_{rel}} S(i)_{rel} - K_V(i) \right] \end{aligned} \right. \quad (5)$$

这样只要知道三组相对光谱数据在各采样波长点上分量的标准不确定度,就可以评估测试结果的相对合成标准不确定度.一种比较合理的假设是^[7]:如果一组光谱数据的不确定度主要由参考源引入(光度探头光谱灵敏度测量中采用与标准光度探头对比的方法,标准灯用更高一级的标准灯进行定标),则 $u(S(i)) = S(i)$,即各分量的相对标准不确定度在整个采样波长范围内恒定;如果不确定度主要由测量仪器的背景噪声和漂移等引入(LED 光谱测量中经常用到的多通道快速光谱仪),则 $u(S(i)) =$,即各分量的标准不确定度在整个采样波长范围内为一常数.因此这里假设 $u(S_{LED}(i))$, $u(S(i)_{rel})$ 和 $u(S_s(i))$ 分别为,

$$\left\{ \begin{aligned} u(S_{LED}(i)) &= \\ u(S(i)_{rel}) &= S(i)_{rel} \\ u(S_s(i)) &= S_s(i) \end{aligned} \right. \quad (6)$$

其中 $u(S_{LED}(i))$ 为 $S_{LED}(i)$ 的标准不确定度,由于 LED 是窄带光源,仅在某段波长范围内有辐射,因此可以将 LED 光谱测量结果 $S_{LED}(i)$ 和不确定度 $u(S_{LED}(i))$ 在其辐射范围外的值都设为零,即 $u(S_{LED}(i))$ 仅在 LED 辐射范围内恒为; $u(S(i)_{rel})$ 和 $u(S_s(i))$ 的相对标准不确定度.

上述 $u(S_{LED}(i))$ 考虑的是随机效应给 LED 光谱测量带来的不确定度,实际测量中受光谱仪分辨率的限制,各采样点上的光谱测量结果是一定带宽范围内的积分值,

$$S_{LED}(i)_{measure} = \int_{i^-}^{i^+} S_{LED}(i) B(i) di \quad (7)$$

式中 $B(i)$ 为带通函数,这里假设为等腰三角形函数; $\Delta\lambda$ 为带宽,图 3 说明了这一过程.

带宽带来的测量结果不确定度由下式评估,

$$u_c(K)_{rel} = \frac{|K_{measure} - K_{real}|}{K_{real}} \quad (8)$$

在下面的计算分析中,LED 的相对光谱功率分布 $S_{LED}(i)$ 采用了改进的高斯模型^[8],

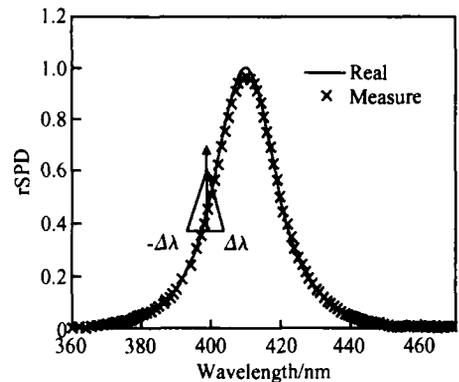


图 3 光谱测量中带通函数的影响

Fig. 3 Influence of the bandpass function in the spectral measurement

$$S_{LED}(i) = \frac{\exp\left[-0.8498\left(\frac{i-\lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2\right] + 2\left[\exp\left[-0.8498\left(\frac{i-\lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2\right]\right]^5}{3} \quad (9)$$

其中 λ_0 为 LED 的峰值波长; $\Delta\lambda$ 为波长半宽(本文均假设为 20nm).光度探头的相对光谱灵敏度 $s(i)_{rel}$ 采用正弦调制模型^[5],

$$s(i)_{rel} = V(i) + A \sin\left[\frac{i - start}{T} 2\pi + \phi_0\right], \quad (i \in [start, end], (\phi_0 = 0, \dots)) \quad (10)$$

其中 A 为调制幅度,它决定了 $s(i)_{rel}$ 与 $V(i)$ 的偏差大小; $start$ 为调制起始点; T 为调制周期; ϕ_0 为初始相位,它决定了偏差的正负.本文构造的 $s(i)_{rel}$ 如图 2 所示,幅度 A 为 0.02,其 $f_1 = 8.5\%$,属三级探头.光通量标准灯采用 A 光源,其相对光谱功率分布 $S_s(i)$ 由普朗克公式给出.不考虑波长采样间隔对结果的影响,这里均假设间隔为 1nm.

4 结果分析

对峰值波长 λ_0 在 410 ~ 510nm 之间的 6 种蓝

光 LED 进行计算,结果见表 1。

表 1 光谱校正积分光度法测量蓝光 LED 光通量不确定度计算结果

Table 1 Calculation results of uncertainties in the measurement of luminous flux of the blue LEDs using spectral-correction-integral-photometry method

λ_0 / nm	410	430	450	470	490	510
带宽: $u_c(\phi_{\text{corrected}})_{\text{rel}}(\Delta\lambda = 5\text{nm})$	1.442	0.352	0.128	0.064	0.026	0.003
光谱测量: $u_c(\phi_{\text{corrected}})_{\text{rel}}/$	2.900	0.716	0.316	0.157	0.050	0.013
光度探头: $u_c(\phi_{\text{corrected}})_{\text{rel}}/$	0.174	0.176	0.174	0.170	0.164	0.161
标准灯: $u_c(\phi_{\text{corrected}})_{\text{rel}}/$	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
相对扩展不确定度(%, $\lambda_0 = 0.002$, $\Delta\lambda = 2\%$, $\Delta\lambda_0 = 2\%$, $k = 2$)	1.98	0.84	0.72	0.69	0.66	0.64

由表 1 可知,探头光谱灵敏度测量和标准灯引入的不确定度对于不同的 LED 基本相同,且影响都较小;而 LED 光谱测量和带宽引入的不确定度对于不同的 LED 差别较大:对于 $\lambda_0 > 430\text{nm}$ 的蓝光 LED 影响较小,而 $\lambda_0 < 430\text{nm}$ 的蓝光 LED 则影响较大。

表 2 为光度探头测量值 $\phi_{\text{not corrected}}$ 的相对误差,单独用光谱仪的分光光度法测量结果的相对扩展不确定度以及光度探头的 $s(\lambda)_{\text{rel}}$ 与 $V(\lambda)$ 的偏差为负时使用光谱校正积分光度法的测量结果的相对扩展不确定度。

表 2 光度探头测量误差,分光光度法不确定度, $s(\lambda)_{\text{rel}}$ 与 $V(\lambda)$ 偏差为负时光谱校正积分光度法的不确定度

Table 2 Measurement errors of the photometer head, uncertainties of the spectrophotometry method, uncertainties of the spectral-correction-integral-photometry method when the deviations between $s(\lambda)_{\text{rel}}$ and $V(\lambda)$ are minus

λ_0 / nm	410	430	450	470	490	510
$\phi_{\text{not corrected}}$ 的相对误差 / %	461.39	107.21	35.43	10.68	0.03	4.26
分光光度法相对扩展不确定度 ($\lambda_0 = 0.002$, $\Delta\lambda = 5\text{nm}$, $k = 2$) / %	2.26	0.86	0.61	0.59	0.48	0.22
$s(\lambda)_{\text{rel}}$ 与 $V(\lambda)$ 为负偏差时的相对 扩展不确定度(条件同表 1) / %	13.68	3.17	0.88	0.71	0.67	0.65

将表 2 和表 1 进行比较发现,使用光谱校正积分光度法可以有效地校正光度探头的测量误差;并

且具有与分光光度法相当的不确定度,甚至更小($\lambda_0 < 430\text{nm}$ 或更大时); $s(\lambda)_{\text{rel}}$ 与 $V(\lambda)$ 的正偏差能实现比负偏差小得多的不确定度($\lambda_0 < 430\text{nm}$),而且还能增大光度探头的信噪比。

5 结论

使用光谱校正积分光度法测量蓝光 LED 的光通量,能够在允许光度探头与 $V(\lambda)$ 存在一定正偏差(甚至是三级光度探头)的情况下实现极高的测量精度,并且具有比分光光度法高几个数量级的光度测量范围,因此对于 LED 光源的品质评价具有重要意义。这种方法不仅适用于 LED 光通量测量,也适用于其他光度量的测量。

参考文献

- [1] Shao Jiaping, Guo Wenping, Hu Hui, et al. Influence of blue-band emission in GaN-based green light emitting diode materials on device performance. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(11): 1496(in Chinese) [邵嘉平, 郭文平, 胡卉, 等. GaN 基绿光 LED 材料蓝带发光对器件特性的影响. 半导体学报, 2004, 25(11): 1496]
- [2] Su Zhe, Dong Zhanmin, Han Li, et al. New method of quality controlling of LED epi-wafers. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(12): 1295(in Chinese) [苏哲, 董占民, 韩立, 等. 发光二极管外延片质量控制的新方法. 半导体学报, 2002, 23(12): 1295]
- [3] CIE 127-1997. Measurement of LEDs. Vienna: CIE publication, 1997
- [4] Muray C. Blue LED photometry. Proc SPIE, Illumination and Source Engineering, 1998, 3428: 115
- [5] Pan Jianguan, Shen Haiping, Feng Huajun, et al. Accurate assessment of f_1 value of fine photometer heads. Metrology, 2005, 42(4): 239
- [6] ISO. Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2nd edition. Geneva: ISO Publication, 1995
- [7] Gardner J L. Uncertainties in quantities derived from spectral sums. Proceedings of CIE Expert Symposium 2001 on Uncertainty Evaluation Methods for Analysis of Uncertainties in Optical Radiation Measurement, 2001, CIE x020: 1
- [8] Ohno Y. Color Rendering and luminous efficacy of white LED spectra. Proc SPIE, Fourth International Conference on Solid State Lighting, 2004, 5530: 88

Measurement of Luminous Flux of Blue LEDs Using Spectral-Correction-Integral-Photometry Method^{*}

Pan Jiangen¹, Shen Haiping^{2,†}, and Feng Huajun²

(1 *Everfine Photo-E-Info Co., Ltd., Hangzhou 310053, China*)

(2 *State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: A spectral-correction-integral-photometry method and its application in the measurement of the luminous flux of blue LEDs are introduced. The sources of uncertainty in the measurements are theoretically analyzed. Compared to the uncertainties of the spectrophotometry method and the integral method, the results show that this method can achieve high measurement accuracy. It is important to the assessment of the LEDs' qualities.

Key words: LED; photometry; luminous flux; measurement; uncertainty

PACC: 0760D **EEACC:** 7320P

Article ID: 0253-4177(2006)05-0932-05

^{*}Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA311060)

[†]Corresponding author. Email: hainiushen@163.com

Received 27 August 2005, revised manuscript received 1 November 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics