

DOI:10.16136/j.joel.2023.04.0426

基于积分宽度法测量发光二极管结温方法的研究

蒋福春, 荆利青, 刘文, 武红磊*

(深圳大学 物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 本文提出了一种基于光谱积分宽度法来测量发光二极管(light emitting diode, LED)结温的新方法, 并进行了理论分析和实验研究。本方法主要分为光谱数据采集、定标函数的测定和结温测量三个过程。首先, 为了测量成本的降低和精度的提高而采用在正常工作电流下采集 LED 光谱数据, 并通过采用不同温度下的光谱积分宽度与选定的某一基准状态下的值逐差可得到线性度达 0.99 以上的定标函数, 并通过此定标函数可实时测定任意状态下的结温。其次, 为了比较本方法测量结温的精确性, 分别对单色和白光 LED 采用本方法和业界主流的正向电压法, 通过自行设计的基于积分宽度法结温测量系统和美国 Mentor Graphics 公司的 T3Ster 型仪器的测量结果进行比较, 两种方法测出的结温最大偏差为 2.1 °C, 在可接受的误差范围内。实验结果表明积分宽度法测结温具有高效便捷且低成本的特点, 具有一定的应用前景。

关键词: 发光二极管(LED); 积分宽度; 结温; 光谱分布; 自加热效应

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)04-0344-07

Study on the method based on integral width for determining junction temperature of LEDs

JIANG Fuchun, JIN Liqing, LIU Wen, WU Honglei*

(Key Laboratory of Optoelectronic Devices and System of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronics Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: This paper proposes a new method measuring LED junction temperature based on spectral integral width method, and conducts theoretical analysis and experiment research. This method is mainly divided into three processes: spectral data acquisition, calibration function measurement and junction temperature measurement. First, in order to reduce the measurement cost and improve the accuracy, LED spectral data are collected under normal working current, and a calibration function with a linearity of more than 0.99 can be obtained by using the spectral integration width at different temperatures and the value of a selected reference state, and the junction temperature under any state can be measured in real time through this calibration function. Second, in order to compare the accuracy of this method for measuring junction temperature, this method and the industry mainstream forward voltage method are used for monochrome and white LED respectively. The measurement results of the self-designed junction temperature measurement system based on integral width method and the T3Ster instrument of Mentor Graphics Company in the United States are compared. The maximum deviation of junction temperature measured by the two methods is 2.1 °C, which is within the acceptable error range. The experimental results show that the integral width method has the characteristics of high efficiency, convenience and low cost, and has a certain application prospect.

Key words: light emitting diode (LED); integral width; junction temperature; spectral distribution; self-heating effect

* E-mail: hlw@szu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-07 修订日期: 2022-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(61974094)、广东省重点领域重大研发计划(2020B010169003)和深圳大学实验室与设备管理研究基金(2021008)资助项目

0 引言

发光二极管(light emitting diode, LED)因其发光效率高、响应速度快、高亮度、节能环保等优势已被广泛应用于照明和显示等各类应用领域^[1-3]。相比于传统光源,虽然LED有较高的光电转换效率,但其内外量子效率并不高,仍有约高达70%的能量以热能的形式在PN结处耗散,并且该热能高度局部化,导致LED衬底上的热阻增大,引起LED芯片结温大幅升高^[4,5]。而LED具有较强的温度敏感特性,若温度的升高,其光学性能会呈现不同程度的降低,影响其峰值波长、色温、发光效率、光衰、色品等各方面性能,进而加速器件的老化^[6]、降低器件的可靠性并影响其寿命^[7,8],从而影响照明质量。随着LED器件向小型化、高集成度和高功率方向不断发展,其热性能的影响变得更为显著,因此结温成了评价LED性能的一个关键参数,精确而又快捷地测量出LED结温就显得尤为重要。

目前针对LED器件结温测量的主要方法分为直接法和间接法。直接法需要与LED芯片紧密的物理接触,对已封装成型的LED器件是无法实现的,如基于红外辐射的直接测温法,它只能测得LED器件的表面温度。间接法是一种无需破坏原有的LED封装结构的测量方法,它又分为分接触式和非接触式,如正向电压法^[9]、蓝白比法^[10]、峰值波长法等。基中国际标准CIE127:2007《LED测量方法》^[11]规定的正向电压法就属于一种接触式间接法测量LED结温方法,它是利用LED在极小电流条件下正向电压与结温间的线性关系进行定标的,且需要在极短的时间内由定标小电流切换至正常的驱动电流,这就需要高精度和高速的数据采集系统且破坏LED的实际工作环境,使得测量设备昂贵;并且由理想二极管的电流方程可知:在高温时的结电压与结温的线性度要明显优于低温端,从而引起各种测量误差,无法精确实时地获取LED的结温度,这些问题使得正向电压法的应用受到一定程序的限制^[12]。蓝白比法^[13]是针对白光LED采用光谱方式的一种非接触式结温测量方法,此方法对单色光难以适用,且随着结温的升高,荧光粉的发光强度比蓝光强度下降得更显著,造成蓝白比值与结温的线性关系偏离程序较大,从而影响测量的精度和适用范围。峰值波长法^[14]是根据结温的变化而引起峰值波长漂移量来表征LED结温的一种方法,由于结温变化引起峰值波长漂移量变小且非单调变化,这样给结温的测量来较大的误差,同时存在对

设备精度要求较高的问题。

功率型LED产业的迅速发展使得LED的结温问题已成了制约其产业进一步发展的主要因素了,而现今各种LED结温测量方法都有一定的局限性,其中大部分方法都涉及成本高昂和精度有限等问题,甚至仅局限在实验室使用。随着市场的发展,产业要求提供快速、准确、简单、经济的LED结温测量方法,这也是LED结温测量技术发展的一个目标和趋势。

本文以功率型LED器件为研究对象,通过传统的光谱仪采集正常工作电流下的发光光谱,分析不同温度下的光谱数据,建立起发光光谱积分宽度与结温间的内在联系,提出一种表征LED结温的新方法,并基于此原理自行研制了一套结温测量系统,实现了功率型LED结温的精确测量。本方法采用非传统非接触式的结温测量方式,避免了类似主流的正向电压法需采用极小电流定标而对仪器较高要求的劣势,具有低成本、更高的测量精度、更宽的适用范围和可远程实时在线检测LED结温度的优势。

1 理论

从LED的发光机理来看,其发光属于半导体电致发光过程,几乎不产生红外线和紫外线,所耗散的电能主要分为两部分,一部分是可见光,另一部分是热能。由于量子阱和荧光粉材料等因素,发光过程中非辐射复合产生大量的热并积聚在PN结区,从而引起结温的升高,而高结温会加剧电子空穴非辐射热激活,非辐射复合缺陷的数量也会随着结温升高而增加,导致光输出减少,从而加剧温度的升高。对于主流的GaN基直接带隙半导体发光器件而言,由于禁带宽度随温度的升高而减小,其带隙宽度 E_g 与发光光谱波长存在 $\lambda = 1239.6/E_g$ 的函数关系,随着结温不断升高,载流子复合率降低,导致发光波长随着结温的变化而产生红移现象^[15]。并且随着结温的升高,参与电子空穴复合的能带变宽的趋势更加明显,因此导带底(E_c)附近和价带(E_v)顶附近的能态都会对发光有一定的贡献,这些因素均造成LED发光光谱不断变宽。同时结温升高加剧了晶体中电子共有化的运动程度,造成级带分裂更严重,而各能带的分裂都会使光谱整体变宽,基本原理见图1所示。所以,光谱整体变宽跟结温有着紧密关系,为了更全面地表征结温,从理论上可以通过积分宽度来反映结温的变化情况。

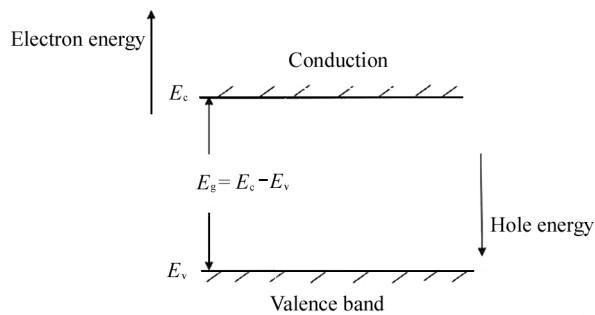


图1 能带影响光谱变化示意图

Fig.1 Schematic diagram of spectral changes affected by energy band

2 测量原理

LED 发光光谱受驱动电流、结温等因素的影响。当结温度发生变化时,其光谱积分宽度必将发生改变。光谱积分宽度类似于 LED 光谱的几何宽度,计算式如下:

$$B = \frac{1}{I_p} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为 LED 归一化光谱分布的上、下限波长,对于常见的可见光 LED,一般分别取 380 nm 和 780 nm, $I(\lambda)$ 为 LED 归一化光谱强度分布函数, I_p 为归一化光谱强度的峰值高度。

通过理论和实验可得出,将归一化发光光谱强度进行积分从而得出其在可见光范围的积分宽度 B , B 随 LED 结温 T_j 的变化呈现如下关系,即:

$$\frac{\partial B}{\partial T_j} = k, \quad (2)$$

式中, k 为与结温度相关的光谱敏感系数,定义为积分宽度 - 结温系数,它随着工作电流 I 的不同而变化,当对 LED 器件施加正常的驱动电流 I 时,式(2)可通过积分形式表示为:

$$B = k(I) \times \Delta T_j + B_0, \quad (3)$$

式中, $\Delta T_j = T_j - T_0$, T_j 为被测条件下的 LED 结温, T_0 为基准状态下的结温, B_0 和 B 分别为结温为 T_0 和 T_j 时所对应的积分宽度。这样,在确定了 k 、基准状态下的温度 T_0 和积分宽度 B_0 就可以得到任一状态下的结温。因此 LED 在某状态下的结温可用归一化积分宽度表示为:

$$T_j = \frac{B - B_0}{k(I)} + T_0. \quad (4)$$

3 测量方案

为了更精确地测量 LED 的结温,将温度可控式

的光谱仪改装成基于积分宽度式的结温测量系统。采用在器件基板上填充一层薄而均匀的导热脂以减少基板与 PN 结间的温差,通过改装后的测量系统测量在不同温度下的光谱数据。整体操作过程分为数据采集、标定和结温度测量等部分。

3.1 数据采集

1) 将涂覆了导热脂的 LED 器件紧密地固定在测量系统中恒温腔的温度探头上,并保持良好的热接触。

2) 将恒温腔温度设置为某一初始值 T_1 ,稳定一段时间,使 LED 基底、芯片以及恒温腔三者达到良好的热平衡状态。

3) 在正常的工作电流驱动下,快速启动改装后的测量系统,采集 LED 的发光光谱数据,并计算出同一温度下的归一化积分宽度 B_1 。

4) 改变恒温腔的温度,以 5 °C 的间隔逐步增加温度,重复步骤 3),得到不同温度下的积分宽度 B_i 。

3.2 定标

由于采用的是非类似正向电压法用极小电流进行定标,为了降低极小电流带来的测量精度和减小测量成本,本方法定标采用的是正常的驱动电流(比如 350 mA),LED 自加热效应热量对温升有一定的影响,从而将恒温腔的温度当成结温度会引起不少的偏差,将影响结温测量的精度。为了减小这种自加热效应带来的影响,根据在相同的驱动电流下和固定的极短(毫秒量级)光谱数据采集时间内,结温的升温几乎相同,所以选定室温状态为基准条件。在基准条件下,得到 LED 光谱归一化积分宽度 B_0 ,将其他不同条件下根据步骤 3) 测得的积分宽度分别为基准状态时的值逐项作差得: $\Delta T_j = T_j - T_0$, $\Delta B = B - B_0$,以温差 ΔT_j 为横轴,积分宽度差 $B - B_0$ 为纵轴,得到积分宽度 B 随温度的变化曲线,通过拟合得到线性定标函数 $\Delta T_j = f(B - B_0)$ 。

3.3 测量

测量的目的是在任一的正常工作条件下得到实际工作时的结温 T_j ,其步骤如下:

1) 通过改装后的系统中的光谱仪测量 LED 在待测条件下的光谱分布,计算得到其相应的归一化光谱积分宽度 B ;

2) 将得到的谱积分宽度 B 值与基准状态时积分宽度 B_0 作差得到 $\Delta B = B - B_0$;

3) 通过定标函数 $\Delta T_j = f(B - B_0)$ 得到实时的结温值 T_j 。

4 实验

4.1 实验样品

实验通过改变恒温腔的方式来改变定标温度,从而分析得出归一化光谱积分宽度与结温的内在联系。为了证明此方法的普通适应性,随机选取多种不同规则的功率型 LED 作为研究对象,在其基底均

匀填充一薄层卡夫特 k-503 型导热硅脂,并保持气流稳定。

4.2 实验装置

实验采用将杭州远方的 ATA 型光谱仪、恒温腔、积分球、高精密恒流源和一系列不同夹具等组成基于归一化积分宽度的结温测试系统,其测试系统结构图如图 2 所示。

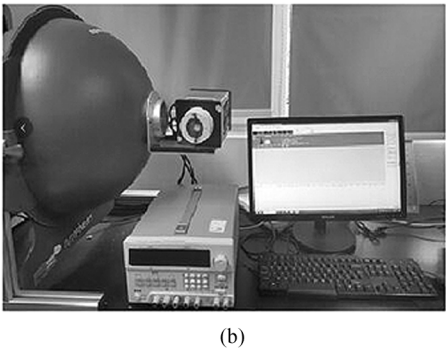
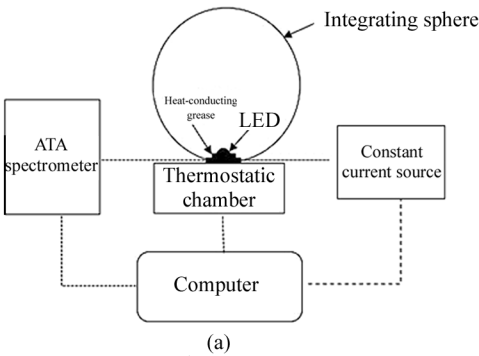


图 2 基于归一化积分宽度的结温测量系统(a) 示意图和(b) 装置图
Fig. 2 (a) Schematic diagram and (b) device diagram of junction temperature measurement system based on normalized integral width

4.3 实验步骤

实验旨在研究基于归一化积分宽度法测量结温的可行性和精确性,设计实验步骤如下:

- 1) 将涂覆了 k-5230 型导热脂的待测 LED 固定在恒温腔内,设置恒温腔的温度每间隔 5 °C 从 5 °C 升高到 85 °C,稳定一定时间(如 30 min)达到良好的热平衡;
- 2) 分别给待测 LED 正常的工作电流 350 mA,即使通过积分球(积分时间采用 9 ms)测量归一化光谱分布,计算出对应条件下的积分宽度,并与选定的基准条件下的积分宽度作差得到 ΔB ,根据式(2)拟合得出积分宽度 - 结温系数 k ;
- 3) 测量在待测条件下的 LED 的归一化光谱分布,得出在待测条件下的积宽度 B ;
- 4) 通过式(4)计算得出功率型 LED 器件在待测条件下的结温度;

5) 与采用目前主流的正向电压法测出的结温数据进行比较,得到归一化积分宽度测量结温的精度。

4.4 实验结果

本文采用自行改装的归化一积分宽度结温测量系统,测量随机选取的多种功率型 LED 器件,并对结果进行分析和比较。

4.4.1 归一化积分宽度测结温

分别对随机选定的红绿蓝单色 LED 和白光 LED 四种功率型 LED 在 350 mA 的驱动电流下采用图 2 所示的结温测量系统进行测量。

4.4.1.1 单色光

首先测出各单色光在不同结温环境下的归一化光谱强度分布,再在全光谱范围内积分得出归一化光谱积分宽度,数据如表 1 所示。

根据表 1 将不同单色 LED 在不同的温度下对应的归一化积分宽度制图表达如图 3 所示。

表 1 不同温度下单色光 LED 归一化积分宽度
Tab. 1 Normalized integral width of monochrome LED at different temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$B_{\text{red}}/\%$	19.529 03	19.832 04	20.167 68	20.441 8	20.760 74	21.114 24	21.431 98	21.748 45	22.052 98	22.373 86	22.674 99	23.025 78	23.298 3	23.564 97	23.883 25	24.162 52
$B_{\text{green}}/\%$	38.209 92	38.511 85	38.892 18	39.206 60	39.572 52	39.917 73	40.361 5	40.727 44	41.077 24	41.435 22	41.873 24	42.266 18	42.677 44	43.060 72	43.471 92	43.942 6
$B_{\text{blue}}/\%$	26.646 51	26.963 5	27.255 22	27.587 38	27.928 00	28.228 36	28.580 86	28.950 54	29.235 74	29.610 72	29.901 52	30.403 80	30.747 83	31.086 14	31.419 26	31.754 48

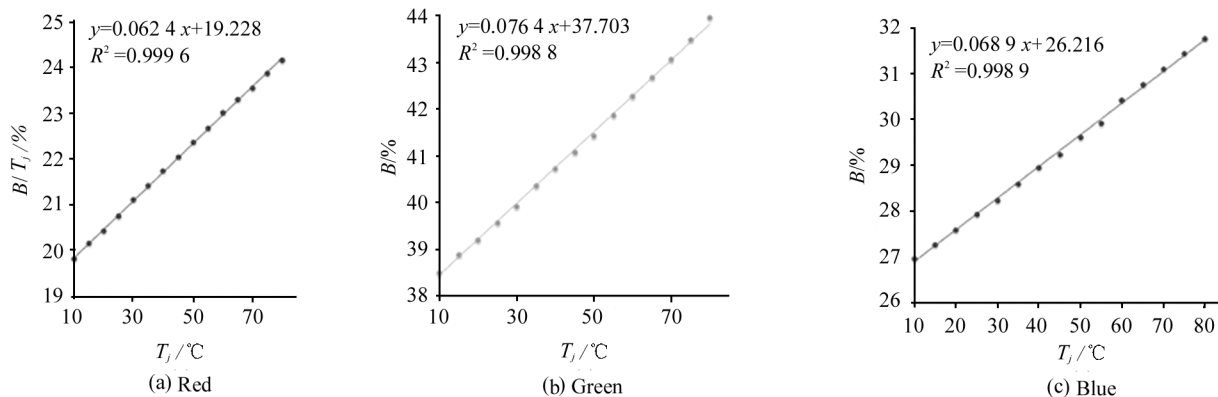


图3 各单色LED归一化积分宽度随温度变化曲线

Fig. 3 Curve of normalized integral width of each monochrome LED with temperature

从图3中可以看出,红绿蓝三种LED在正常的驱动电流下其归一化积分宽度随温度变化曲线均呈现良好的线性关系。从数学拟合的结果来看,拟合函数分别为: $y = 0.0624x + 19.228$, $y = 0.0764x + 37.703$ 和 $y = 0.0689x + 26.216$, 其线性系数 R -

Square 均大于 0.99, 均表现出良好的线性关系。

为了减小由高达 350 mA 的正常工作电流而带来的自加热效应和对恒温腔的温度控制不精确性, 从引起对结温测量所来的偏差, 选定室温条件为基准状态, 所得相对积分宽度数据如表2所示。

表2 相对于基准状态下不同温度下各单色LED归一化相对积分宽度

Tab. 2 Normalized relative integral width of monochrome LEDs at different temperatures relative to the reference state

$T/^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$B_{\text{red}}/\%$	0.91277	0.60976	0.27412	0.00000	0.31894	0.67244	0.99018	1.30665	1.61118	1.93206	2.23319	2.58398	2.85650	3.12317	3.44145	3.72072
$B_{\text{green}}/\%$	0.99668	0.69475	0.31442	0.00000	0.36592	0.71113	1.15490	1.52084	1.87064	2.22862	2.66664	3.05958	3.47084	3.85412	4.26532	4.73600
$B_{\text{blue}}/\%$	0.94087	0.62388	0.33216	0.00000	0.34062	0.64098	0.99348	1.36316	1.64836	2.02334	2.31414	2.81642	3.16045	3.49876	3.83188	4.16710

根据表2数据可得如图4所示的各单色LED的定标曲线, 并得到定标函数分别为 $y = 16.029x + 24.465$, $y = 13.073x + 24.705$ 和 $y = 14.501x +$

24.931, 其中线性相关系数 R -Square 均大于 0.998, 此线性度几乎达到理想值, 表明通过归一化积分宽度表征LED结温的可行性。

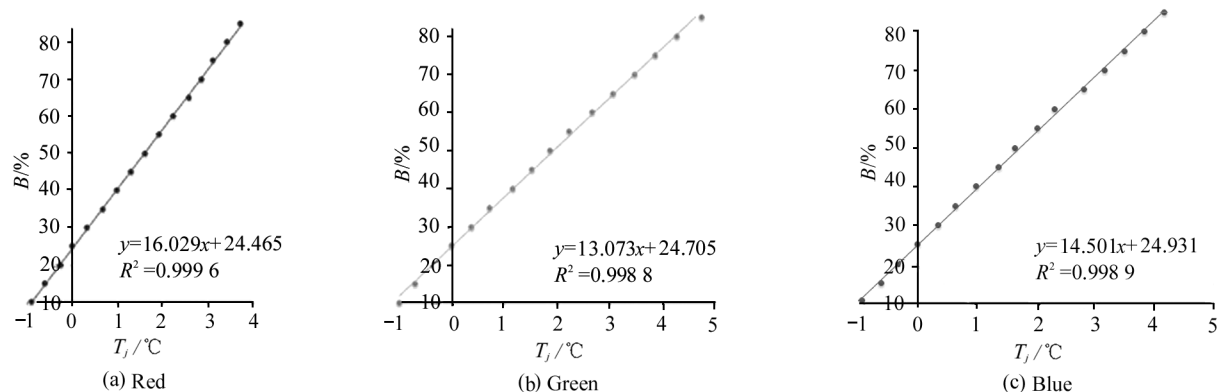


图4 各单色LED定标函数曲线图

Fig. 4 Calibration function curve of each monochrome LED

4.4.1.2 白光LED

因市面上常见的白光LED均采用蓝光激发

YAG荧光粉产生的方式产生白光, 其发光光谱如图5所示。对于此类白光LED, 选取整个光谱中波谷

点为临界点,分别对蓝光光谱部分进行积分得出在不同温度下的积分宽度,再以室温状态为基准条件得到的等效积分宽度(B_E)如表 3 所示。

通过表 3 的数据得到白光 LED,采用线性拟合得到归一化等效积分宽度与结温的定标函数曲线,如图 6 所示。

从图 6 可以看出白光 LED 定标函数 $y = 11.841x + 24.855$,线性程度同样大于 0.99,表明对于采用蓝光激发荧光粉的白光 LED,其等效积分宽度与温度呈现良好的线性关系,通过定标函数可知此白光 LED 积分宽度-结温拟合系数 k 为 $11.84\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

表 3 白光 LED 等效积分宽度随温变化关系

Tab. 3 Relationship between equivalent integral width of white LED and temperature

$T/^{\circ}\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
B_E	1.565 821	1.202 480	0.929 460	0.381 620	0.000 000	0.453 380	0.885 481	1.271 881	1.271 881	1.569 84	2.545 2	2.960 38	3.283 13	3.750 2	4.128 28	4.793 67	5.209 37

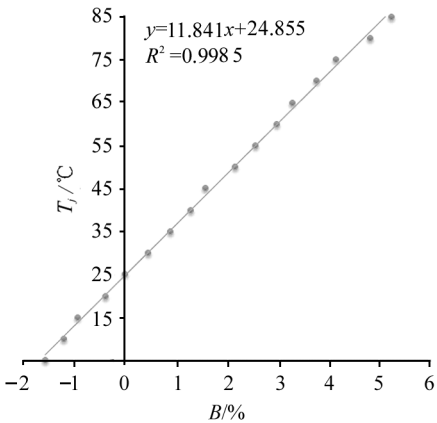


图 6 白光 LED 定标函数曲线

Fig. 6 Calibration function curve of white LED

从三种单色 LED 和白光 LED 的定标函数可知功率型 LED 的归一化光谱积分宽度随结温的变化均呈现较好的线性关系。通过此定标函数可测出任意条件下的结温,只需采集在待测条件下 LED 的

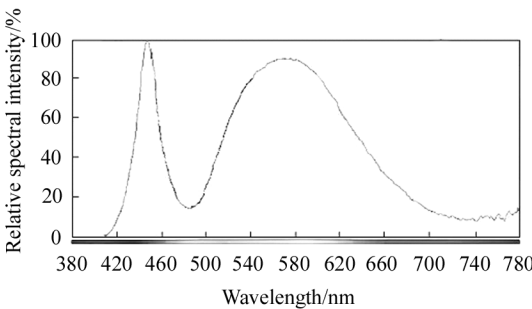


图 5 蓝光激发荧光粉产生的白光 LED 光谱

Fig. 5 LED spectrum of white light generated by blue light excited phospho

归一化光谱分布,再计算出其对应的积分宽度,并与基准条件对比得出相对积分宽度,通过定标函数和式(4)便可得出任意条件下的实时结温。

4.4.2 与正向电压法的比较

目前业界均采用正向电压法测 LED 的结温,此方法需要在极小电流下定标,需要较高灵敏度的数据采集系统;测量时需高速从正常驱动电流转换到定标电流,此要求需要高速电路转换模块,这些因素造成仪器设备成本昂贵,极大地增加了测试成本。利用本文的方法只需将常规的光谱仪稍加改装便可以简便地测出结温,具有明显的成本优势。

为了比较通过本方法测量正常工作时 LED 结温的精度,将本实验中的四类 LED 在 350 mA 的电流下工作相同的时间,分别采用美国 Mentor Graphics 公司的 T3Ster 型仪器运用正向电压法(B_{jFVM})和采用归一化积分宽度法(T_j (proposed))对所测出的结温度结果进行对比,如表 4 所示。

表 4 两种测量功率型 LED 结温方法的比较

Tab. 4 Comparison of two methods for measuring power LED junction temperature

LED	R-LED	G-LED	B-LED	W-LED
$k / ^{\circ}\text{C}^{-1}$	16.029	13.073	14.501	11.841
R-Square	0.999 6	0.998 8	0.998 9	0.998 5
T_j (proposed)/ $^{\circ}\text{C}$	49.4	57.2	68.8	73.5
$T_{jFVM}/^{\circ}\text{C}$	51.2	55.3	70.4	75.6
Difference/ $^{\circ}\text{C}$	-1.8	1.9	-1.6	-2.1

从表4的实测数据来看,由于定标函数线性度均达0.99以上,且线性度越高,通过积分宽带法和正向电压法在同种条件下测出的结温差异性基本越小,最大偏差仅为2.1℃,表明采用积分宽带法测量结温具有一定的准确度和可行性。

5 结 论

通过在正常的驱动电流和不同的温度下,对多种LED的光谱进行测量,将测出的归一化光谱强度进行积分得出积分宽度,从理论和实验中分析出了其归一化积分宽度与结温间的关系,发现不管是单色还是白光LED,两者均保持高度的线性关系。根据这些线性关系,本文提出了一种基于归一化积分宽度测量LED的新方法。采用本文的新方法和业界主流采用美国Mentor Graphics公司的T3Ster型仪器使用的正向电压降法对多种LED测量的结果进行比较,两种方法测出的结果最大偏差仅为2.1℃。相比较Mentor Graphics公司的T3Ster型仪器,本方法不需要昂贵的高灵敏的数据采集系统和高速电路转换模块,便可达到相仿的精度,且具有更广泛的使用范围,表明此方法在实际应用中的可行性。

参考文献:

- [1] JEON D, CHAN B. Thermal performance of plate fin heat sinks with dual-height fins subject to natural convection [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 1086-1092.
- [2] ZHAO H L, LIANG Z Y, SHI X C, et al. The design of LED using in optical projector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2): 244-246.
赵华龙, 梁志毅, 石兴春, 等. 利用LED的投影系统光源设计[J]. *光子学报*, 2007, 36(2): 244-246.
- [3] CAO H, ZHENG B, GU Z F, et al. Luminescent properties of Pr^{3+} doped LiYF_4 glass ceramics for white-emitting diodes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(9): 09160003.
曹慧, 郑斌, 谷招峰, 等. 白光LED用 $\text{LiYF}_4:\text{Pr}^{3+}$ 微晶玻璃的发光性能研究[J]. *光子学报*, 2018, 47(9): 09160003.
- [4] WANG J, HUANG X, LIU L, et al. Effect of temperature and current on LED luminous efficiency [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(2): 358-362.
王健, 黄先, 刘丽, 等. 温度和电流对白光LED发光效率的影响[J]. *发光学报*, 2008, 29(2): 358-362.
- [5] XU D D, HU X G. Thermal analysis of high-power LED lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1023001.
许丹丹, 胡学功. 大功率LED透镜热学特性分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1023001.
- [6] CHEN K, NARENDRAN N. Estimating the average junction temperature of AlGaInP LED arrays by spectral analysis [J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(7): 701-705.
- [7] YU B H, WANG H. Junction temperature and thermal resistance restrict the developing of high-power LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2005, 26(6): 761-766.
余彬海, 王浩. 结温与热阻制约大功率LED发展[J]. *发光学报*, 2005, 26(6): 761-766.
- [8] CHENG X F, LIU X M, CHEN W M, et al. Thermal resistance measurement of light-emitting diodes based on photo-electro-thermal theory [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(10): 1949-1954.
程星福, 刘显明, 陈伟民, 等. 基于光-电-热理论的LED热阻测量方法[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(10): 1949-1954.
- [9] GB/T24824-2009 普通照明用LED模块测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [10] GU Y, NARENDRAN N. A non-contact method for determining junction temperature of phosphor-converted white LEDs [C]// *Proceeding of SPIE, Third International Conference on Solid State Lighting*, August 3-8, 2003, San Diego, California, United States. Bellingham, WA: SPIE Press, 2004, 5187: 107-114.
- [11] CIE127. Measurement of LEDs [R]. Vienna, Austria: Central Bureau of the CIE, 2007.
- [12] QIU X Z, ZHANG F H. A new non-contact method based on relative spectral intensity for determining junction temperature of LED [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 36-39.
邱西振, 张方辉. 基于相对光谱强度的非接触式LED结温测量法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(1): 36-39.
- [13] RAO F, GUO J, ZHU X F, et al. Determining the junction temperature of AlGaInP-based LED with the centroid wavelength [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(3): 44-449.
饶丰, 郭杰, 朱锡芳, 等. 用质心波长表征AlGaInP基LED的结温[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(3): 44-449.
- [14] HONG E, NARENDRAN N. A method for projecting useful life of LED lighting system [C]// *Proceedings of SPIE, Third International Conference on Solid State Lighting*, August 3-8, 2003, San Diego, California, United States. Bellingham, WA: SPIE Press, 2004, 5187: 93-99.
- [15] DING T P, GUO W L, CUI B F, et al. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED [J]. *Spectroscopy and Analysis*, 2011, 31(6): 1450-1453.
丁天平, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 温度对功率LED光谱特性的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1450-1453.

作者简介:

武红磊 (1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子半导体材料与器件方面的研究。