

引用格式: JIANG Fu-chun, HE Si-yu, LIU Yuan-hai, *et al.* A Measurement Method Based on Characteristic Spectral Parameter for Determining Junction Temperature of LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3):0330003
蒋福春,何思宇,刘远海,等. 基于特征光谱参量表征发光二极管结温的方法[J]. *光子学报*, 2020, **49**(3):0330003

基于特征光谱参量表征发光二极管结温的方法

蒋福春¹,何思宇¹,刘远海¹,刘文¹,柴广跃²,赵志刚²,李百奎¹

(1 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)

(2 深圳技术大学 新材料与新能源学院,广东 深圳 518000)

摘 要:针对采用蓝光激发荧光粉产生白光的 YAG 型白光 LED,通过分析其光谱波谷特性,采用常规可见光光谱仪和温控系统设计了一套基于光谱特征参量的 LED 结温测试系统.测量方法分为定标函数的测定和任意状态下的测量两部分.首先采用光谱仪测量在给定的多个不同结温和正常驱动电流下的相对发光光谱数据,再分析其光谱波谷处的相对光谱强度.从实用性和降低成本的角度考虑,采用正常工作电流驱动,但以正常工作电流驱动下的 LED 在光谱仪的固定反应时间内其自加热效应不可忽略.因此采用选定基准状态法,将各温度下的相对发光光谱强度与基准状态下的逐点作差得到相应的发光光谱强度差,同时为了减少温控系统引入的温度偏差,同样将各温度与基准温度作差得到相应的结温差.实验表明高低色温大功率 LED 的结温差和发光光谱强度差经过一定的函数拟合形成的定标函数其线性度都较高, R^2 达到 0.99 以上;利用定标函数,可以测量出在任意状态下的 LED 结温.最后将采用本方法得出的高低色温 LED 在不同条件下的结温数据与通过 Mentor Graphics 公司的 T3Ster 仪器的测量结果进行了比较,最大偏离度为 2.82%,在可接受的误差范围内,表明此方法完全具备可行性,具有一定的实用价值.

关键词:相对光谱;发光二极管;波谷;结温;高色温;低色温

中图分类号:O472+.3

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0330003

A Measurement Method Based on Characteristic Spectral Parameter for Determining Junction Temperature of LED

JIANG Fu-chun¹, HE Si-yu¹, LIU Yuan-hai¹, LIU Wen¹, CHAI Guang-yue²,
ZHAO Zhi-gang², LI Bai-kui¹

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

(2 College of New Materials and New Energy, Shenzhen Technology University, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Aiming at YAG white LED generated by blue-light excitation phosphor, a set of junction temperature measurement system based on characteristic spectral parameters is designed by using conventional visible spectroscopy and temperature control system through analyzing spectral trough characteristics. The measurement process is divided into two parts: the measurement of calibration function and the measurement of arbitrary state. Firstly, the relative luminescence spectra at different junction temperature and normal driving current are measured by spectrometer, and then the relative spectral intensity at the spectral trough is analyzed. Considering practicability and cost reduction, normal working current drive is adopted, but the self-heating effect of LED driven by normal working current can

基金项目:国家自然科学基金(No.61604098),国家基金委-深圳市联合基金项目(No.U1613212)

第一作者:蒋福春(1981-),男,实验师,硕士,主要研究方向为光电子材料与器件及 LED 封装技术.Email:jfc@szu.edu.cn

收稿日期:2019-10-17;录用日期:2019-12-09

<http://www.photon.ac.cn>

not be neglected in the fixed reaction time of spectrometer. Therefore, the selected reference state method is used to make the difference between the relative luminescence spectral intensity at each temperature and the reference state point by point to get the corresponding difference value. At the same time, in order to reduce the temperature deviation introduced by the temperature control system, the corresponding junction temperature difference is also obtained by making the difference between each temperature and the reference temperature. Experiments show that the calibration functions of junction temperature difference and luminescence spectral intensity difference of LED with high and low color temperature have high linearity, and R^2 is above 0.99. Using the calibration function, the junction temperature of LED can be measured at any state. Finally, the junction temperature data of high and low color temperature LED obtained by the proposed method under different conditions are compared with the measurement results by T3Ster instrument of Mentor Graphics Company. The maximum deviation is 2.82%. Within the acceptable error range, it shows that the proposed method is completely feasible and has certain practical value.

Key words: Relative spectrum; LED; Trough; Junction temperature; High color temperature; Low color temperature

OCIS Codes: 300.6260; 230.3670; 300.0300; 150.2950; 230.2090; 130.5990

0 引言

白光 LED (White LED, WLED) 是新一代照明光源, 具有发光效率高、寿命长和绿色环保等优点, 在各领域中得到了广泛的应用, 被认为是最具有应用前景的照明光源之一。目前 LED 工作时光电转换效率仍不高, 大量的电能转变成成了热能, 导致 LED 结温过高^[1-2], 从而引起寿命变短、光谱漂移、光衰严重、可靠性降低^[3-4]等问题。快速、准确又便捷地测量 LED 结温成为研究者所关注的重要问题。正向电压法是目前国际上常用的 LED 结温标准测量方法^[5], 但在采用正向电压法测量 LED 结温时很容易受到其封装结构和灯具外壳的限制, 难以实现精确测量 LED 两极的电压降^[6], 并且其定标过程是在极小电流下进行的, 这给测量精度带来一定的影响, 根据 PN 正向电压与工作电流和结温的函数关系可知: 其结电压与结温的函数关系在高温端要明显优于低温端, 引起各种测量误差, 从而无法及时有效掌握 LED 结温, 这些问题使得正向电压法的应用受到一定程度的限制^[7]。HONG 等提出采用峰值波长漂移法可以估算出相应条件下 LED 的结温, 从而通过由结温引起的光衰预测 LED 的有效寿命^[8]。目前已报道的如管脚温度法、红外热成像法、蓝白比法^[9]等其它 LED 结温测量方法均受到一定程度的制约, 如蓝白比法是一种采用 LED 蓝光光谱和整体光体光谱分布来测量结温的非接触式结温测量方法^[10], 最大优点是会影响和破坏 LED 器件的整体性, 但在恒定电流下, 随着结温升高, 蓝光部分的峰值波长会发生少量红移, 导致蓝光与其激发荧光粉所产生的黄光强度都会减弱, 而且黄光的发光强度减弱得更为明显, 从而使蓝光光谱的比例发生变化, 该方法的缺点是测量结果随着结温的升高而大幅下降。

本文以大功率高低色温白光 LED 器件为研究对象, 分析在不同结温下的相对发光光谱数据, 建立白光 LED 特征光谱数据与结温的内在联系, 提出一种基于蓝光与黄光光谱曲线交点的相对光谱强度的非接触式 LED 结温测量方法。该方法采用常规的光谱仪在正常的驱动电流下采集 LED 发光光谱数据, 避免了类似传统电压法所采用的小电流定标而对仪器要求较高的限制, 具有低成本、可实现远程实时在线检测 LED 结温的特点, 并且对 LED 封装结构没有任何要求的限制。

1 理论

白光 LED 工艺流程通常采用蓝光激发掺杂铈离子的钇铝石榴石 ($Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$, 简称 YAG : Ce^{3+}) 黄色荧光粉的封装工艺^[11], 因制作工艺简单, 是市面上照明中最常用的一种工艺。其发光机理是: 蓝光 LED 芯片在电流的驱动下复合辐射发出的蓝光分为两部分, 一部分蓝光激发 YAG : Ce^{3+} 荧光粉产生黄光, 另一部分蓝光透过荧光粉与激发出的黄光混合产生白光^[12]。在此过程中产生的热量也有两部分, 在蓝光激发黄色荧光粉产生黄光的过程中, 一部分光能转化成热能, 另一部分来源于 LED 芯片正常工作时传导到荧光胶上的热量, 这两部分热量使得荧光粉处于高温状态^[13], 导致黄光光谱发生偏移。同时蓝光 LED 芯片结温大幅升高产生大量的热量, 使得蓝光光谱同样发生较大的偏移。

从蓝光光谱来看,LED 芯片结温升高时,晶体中电子共有化运动加剧,能级分裂更加明显,造成禁带宽度 E_g 变小,由波长公式 $\lambda = 1239.6/E_g$ 可知,峰值波长向长波方向移动,即产生红移现象^[14].在温度升高的同时,参与电子-空穴复合的能带有一定的宽度,因此导带底附近和价带顶附近的能态都会对发光有一定的影响,致使 LED 发光光谱较宽.以上因素对蓝光光谱造成两种影响:1)峰值波长变大;2)半峰宽变大.从黄光光谱来看,黄光是蓝光芯片辐射出的蓝光激发 YAG:Ce³⁺ 荧光粉而产生的,受激的电子跃迁到 Ce³⁺ 离子外层 5d 低能级激发态,当其返回至 4f 基态时释放能量,便辐射出黄光^[15].当 YAG:Ce³⁺ 荧光粉温度升高时,黄光峰值波长同样向长波方向漂移.蓝黄两光谱不同程度的漂移均是受温度影响引起的,理论上两光谱的交点 A(图 1)既能反映蓝光随温度的变化情况,又能反映黄光受蓝光激发的温度情况,即整个光谱波谷处的相对光谱强度能更全面地表征内部温度的变化情况.

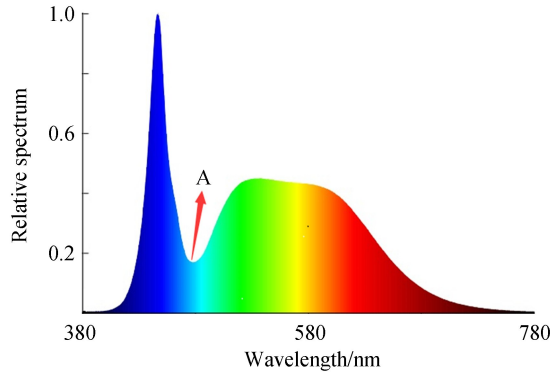


图 1 采用 YAG 荧光粉产生白光的 LED 光谱
Fig.1 Spectrogram of WLED with YAG phosphor

为了表征白光 LED 器件的结温,把 LED 器件放置在温度可控的恒温腔中,并将整个恒温腔与积分球相连接,快速光谱仪通过积分球采集 LED 光谱信息.

工作过程为:1)通过恒温腔调节 LED 器件的温度,保持温度稳定一定时间使 LED 达到热平衡状态,可以认为此时 LED 结温就是恒温腔的环境温度.2)对恒温腔内的 LED 施加正常的工作驱动电流的同时通过光谱仪快速采集相关的光谱数据.3)改变恒温腔的温度,通过同样的驱动电流,再重复上述过程,得到在不同温度下的系统光谱数据;由于大功率白光 LED 正常工作时电流达到数百毫安,从 LED 开始工作到采集到光谱数据的时间虽然只有几秒钟,但对待测 LED 器件本身的自加热效应不可忽略.由于光谱仪反应的时间是固定的,LED 器件在同样的驱动电流下,其结温增加量几乎是相同的,为了减少由自加热效应引起结温升高的影响,将白光 LED 发光光谱图位于 A 点的相对光谱强度分别作差得到 ΔI_A ,同时为了减少恒温腔的温度误差因素,将相应的温控腔的温度同样作差即得到 LED 结温差 ΔT_j .4)分析光谱数据,发现在不同温度下的结温差 ΔT_j 与 A 点的光谱强度差 ΔI_A 按一定的函数关系 $\Delta T_j = f(\Delta I_A)$ 线性变化.5)通过对待测 LED 在任意工作状态下在 A 点的光谱强度作差,通过函数关系式 $\Delta T_j = f(\Delta I_A)$ 即可得到在相应工作状态下的温度.

实验装置采用普通的光谱仪稍加改装并配上温控系统即可.分别对高低色温白光 LED 进行测试,实验过程除了温度不同,其它均保持一致.整个过程分为定标和测量两部分,定标的目的是得到样品在不同条件下结温差 ΔT_j 与 A 点的光谱强度差 ΔI_A 形成的 $\Delta T_j = f(\Delta I_A)$ 函数关系,此函数称为定标函数,具体测试步骤为:

- 1)将待测白光 LED 安装在恒温腔内,为了保持良好的热接触,在基底上均匀涂覆一层导热硅脂;
- 2)设定恒温腔温度为 T_1 ,稳定一定时间,使 LED 基底与发光芯片之间达到稳定热平衡;
- 3)给步骤 2)的白光 LED 器件通以正常的驱动电流(如 350 mA),并快速用光谱仪测量其发光光谱,得到光谱最低点 A 的相对光谱强度.
- 4)设定恒温腔的温度为 $T_i (i=2,3,\dots)$,重复步骤 3),得到在不同温度条件下发光光谱最低点(即波谷)的相对光谱强度 I_A .

为了消除自加热效应和温控系统精度的影响,选定某一状态(如恒温腔为 25℃)为基准状态,其对应的温度为 T_b ,光谱最低点 A 的相对光谱强度为 I_b ,将步骤 4)得出的 T_j 和 I_A 分别与基准值作差得到 $\Delta T_j =$

$T_j - T_b$, 和 $\Delta I_A = I_A - I_b$, 通过拟合, 得到线性函数关系 $\Delta T_j = f(\Delta I_A)$, 即得到了定标函数.

获取实际 LED 正常工作时的任一结温 T_j 的步骤为:

- 1) 用光谱仪测量待测条件下 LED 光谱分布, 得到光谱最低点 A 的相对光谱强度值 I_A ;
- 2) 将测得的 I_A 值与基准 I_b 作差得到 ΔI_A ;
- 3) 将计算出的 ΔI_A 代入到定标函数 $\Delta T_j = f(\Delta I_A)$, 得到此时的真实结温 $T_j = T_b + \Delta T_j = T_b + f(\Delta I_A)$.

2 实验

2.1 样品选择

为了证明所提方法的普适性, 随机在市面上选择了不同厂家的多种高低色温白光 LED, 实验前均在其基板上均匀涂覆一层导热硅脂.

2.2 实验仪器

基于光谱参量的 LED 结温测量系统由 ATA-500 型光谱仪、CL-200 恒温腔、积分球(内含挡板)和 WY305 型高精度恒流源及光纤等组成. 其中 ATA-500 型光谱仪采用杭州远方公司的 ATA-500 型自动温控光谱测试系统, 可快速采样 LED 发光光谱数据, 精确到 0.3 nm; WY305 恒流源给 LED 提供稳定的恒流驱动, 电流误差为 ± 0.1 mA; 温控腔给 LED 提供稳定的环境温度, 腔内壁安置 LED, 整体放置在积分球一孔径内, 并通过光纤将积分球和 ATA-500 型光谱仪连接起来, 基本连接方式和实物图如图 2 所示.

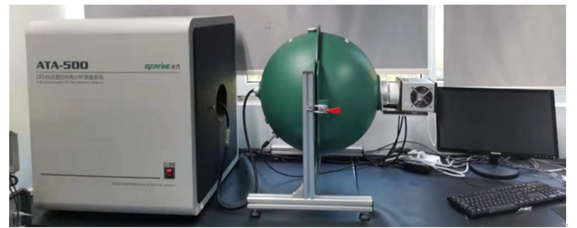
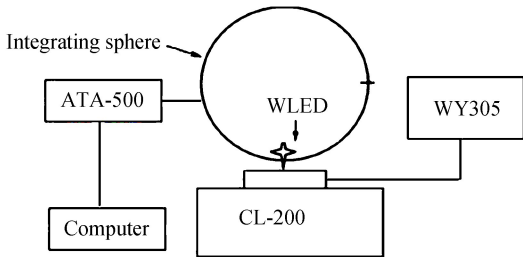


图 2 基于光谱参量的 LED 结温测量系统示意图和实物图

Fig.2 The schematic and physic diagram of LED junction temperature measurement system based on spectral parameters

2.3 实验过程

标定过程中, LED 芯片在 CL-200 恒温腔的控制下温度从 5°C 升至 85°C , 升温步径为 5°C , 为了确保 WLED 达到稳定的热平衡状态, 在每一温度点保持稳定 30 min 后, 立即给 WLED 通以正常的工作电流 350 mA, 然后快速测量其发光光谱数据.

3 结果与讨论

通过第 2 节的实验方案, 对高低色温大功率白光 LED 进行光谱数据分析, 选定 25°C 为基准温度, 并对结果进行讨论.

3.1 高色温白光 LED

对一大功率高色温 ($T_c = 8\ 251\text{K}$) 白光 LED (即蓝光占主导地位进行) 通过图 2 系统进行光谱数据测量, 其发光光谱如图 3, 并对在不同温度下的波谷(最低点)相对强度 I 进行拟合, 得到定标函数, 数据见表 1.

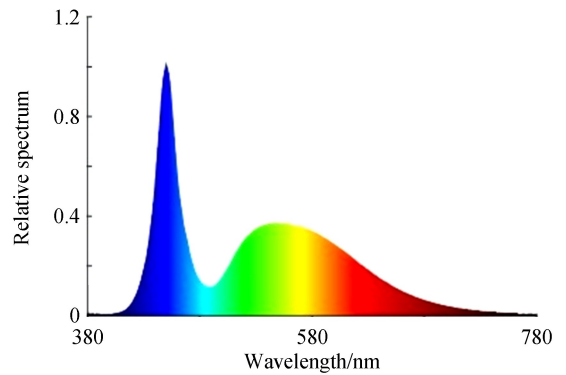


图 3 高色温白光 LED 发光光谱

Fig.3 Spectrogram of WLED with high color temperature

表 1 不同温度下高色温白光 LED 光谱波谷相对强度

Table 1 Relative strength of spectral trough of WLED with high color temperature at different temperatures

$T_j/^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$I/\%$	9.94	10.17	10.54	10.89	11.23	11.54	11.9	12.25	12.6
$T_j/^\circ\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80	85	
$I/\%$	12.95	13.36	13.73	14.13	14.48	14.83	15.34	15.76	

将上述高色温白光 LED 样品对应的波谷相对强度通过二维坐标呈现, 如图 4.

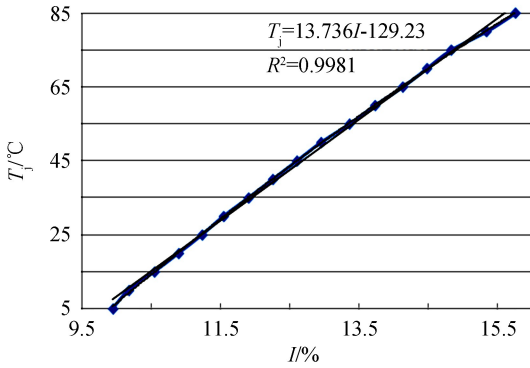


图 4 高色温白光 LED T_j - I 函数曲线

Fig.4 T_j - I calibration function curve of WLED with high color temperature

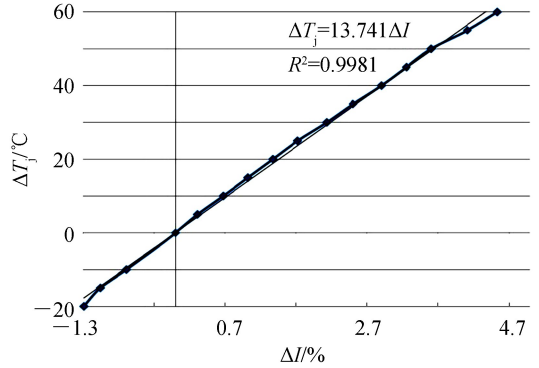


图 5 高色温白光 LED ΔT_j - ΔI 定标函数

Fig.5 ΔT_j - ΔI calibration function curve of WLED with high color temperature

对原始的光谱波谷相对强度作图, 并进行线性拟合, 得到原始的 T_j - I 函数 $T_j = 13.736I - 129.23$, 其中 $R^2 = 0.9981$, 拟合线性度相当高. 为了消除由正常驱动电流引起的自加热效应和温控腔引起的温度偏差, 选定 25°C 作为基准状态, 得到数据见表 2.

表 2 各温度下与基准状态下高色温白光 LED 光谱波谷相对强度的差值

Table 2 The difference of relative intensity of spectral trough of WLED with high color temperature at between different temperature and reference state

$\Delta T_j/^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$\Delta I/\%$	-1.29	-1.06	-0.69	-0.34	0	0.31	0.67	1.02	1.37
$\Delta T_j/^\circ\text{C}$	25	30	35	40	45	50	55	60	
$\Delta I/\%$	1.72	2.13	2.5	2.9	3.25	3.6	4.11	4.53	

将表 2 中选定标准状态之后的数据以二维坐标呈现如图 5. 通过相对原始光谱数据得到 ΔT_j - ΔI 函数 $\Delta T_j = 13.741\Delta I$, 即为标定函数, 其中 $R^2 = 0.9981$. 但此线性函数斜率 13.741 与图 4 未选定基准状态的函数斜率 13.736 不同, 主要是由光谱仪的反应时间内引起的自加热效应和温控腔引起的温度偏差导致, 通过选基准状态的方法可以提高 LED 结温测试精度. 将正常任意工作状态下发光光谱对应的波谷相对强度与标准状态下的波谷相对强度作差得到 ΔI , 通过标定函数便可得到 ΔT_j , 从而得到真实的结温值.

3.2 低色温白光 LED

白光 LED 发光光谱的波谷即是蓝光光谱曲线与由蓝光激发荧光粉产生的黄光光谱曲线的交点, 这个交点受到蓝光与黄光双重影响, 所以随机选取一款荧光粉较多的大功率白光 LED, 黄光相对量较高时 (即黄光占主导地位), 形成色温相对较低的白色 LED. 本次选取的白光 LED 色温 $T_c = 3510\text{K}$, 其发光光谱如图 6, 数据见表 3.

通过对表 3 中相对基准状态下的温度差 ΔT_j 和波谷强度差的原始数据 ΔI 得到图 7, 并通过拟合得到定标函数 $\Delta T_j = 15.387\Delta I$, 其中 $R^2 = 0.9964$, 线性度大于 0.99, 说明通过消除自加热效应和温控腔引起的温度偏差后, 在正常驱动电流下低色温 LED 的 ΔT_j 和 ΔI 两参数仍具有较好的线性度. 通过此定标函数, 可以测算出此低色温 LED 在任意状态下真实的结温值.

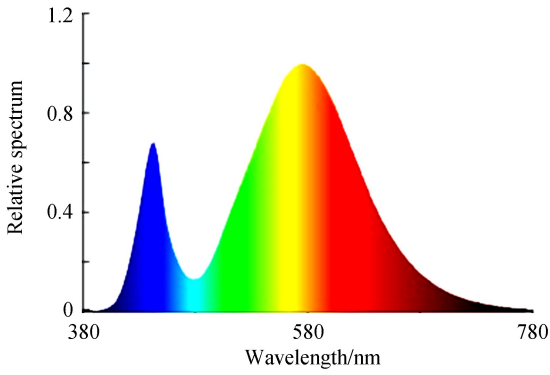


图6 低色温白光 LED 发光光谱

Fig.6 Spectrogram of WLED with low color temperature

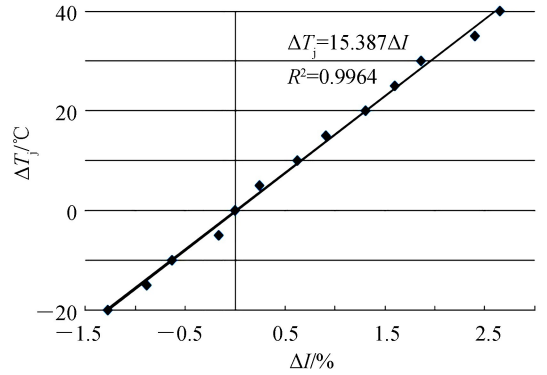


图7 低色温白光 LED ΔT_j - ΔI 定标函数

Fig.7 ΔT_j - ΔI calibration function curve of WLED with low color temperature

表3 不同温度下低色温白光 LED 光谱波谷相对强度

Table 3 Relative strength of spectral trough of WLED with low color temperature at different temperatures

$\Delta T_j/^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-5	0	5	10
$\Delta I/\%$	-1.27	-0.88	-0.63	-0.16	0	0.24	0.62
$\Delta T_j/^\circ\text{C}$	15	20	25	30	35	40	
$\Delta I/\%$	0.91	1.31	1.60	1.86	2.40	2.64	

在定标过程中,两种大功率白光 LED 发光光谱图波谷点的相对强度均呈现出线性度较好的定标函数,在正式的测量中,只需测量其发光光谱波谷的相对强度,并与选定的标准状态下的相对强度作差,再代入相应的定标函数,便可得处于正常工作状态下的结温,操作简单方便。

为了验证该方法的可行性,将上述两类 LED 在室温环境下以 350 mA 恒流驱动,并将通过搭建的基于光谱参量结温测量系统测出的结温,与采用 Mentor Graphics 公司的 T3Ster 仪器在同样的环境中测出的结果进行比较,结果见表 4。

表4 与 Graphics 公司的 T3Ster 仪器测量结果比较

Table 4 Comparisons with the results of Graphics' T3Ster instrument

Measuring method	High color	Low color	High color	Low color	High color	Low color
	temperature LED (light up 20s)	temperature LED (light up 20s)	temperature LED (light up 15s)	temperature LED (light up 15s)	temperature LED (light up 60s)	temperature LED (light up 60s)
Junction temperature measured by this method/ $^\circ\text{C}$	82	90.9	75.5	83.9	119.8	112.7
Junction temperature measured by T3ster/ $^\circ\text{C}$	81	90.7	76.3	81.6	121.5	110.8
Deviation degree	1.23%	0.22%	-1.04%	2.82%	-1.39%	1.71%

通过表 4 的数据可以看出本文方法与 T3Ster 仪器测出的结果最大偏离了 2.82%,偏离度较小,在可接受的范围内,说明该方法具有一定的精度,完全具备可行性。

4 结论

本文采用光谱波谷法测量白光 LED 结温,从整个光谱曲线来看,波谷是由蓝光光谱曲线和由荧光粉产生的黄光光谱曲线的交点形成的,这一点既能反映黄光的性能又能表征蓝光芯片温度情况,所以能更全面反映 LED 的温度情况.黄光成分越高,代表其色温越低,实验中选用蓝光占主导地位的高色温白光 LED 和黄光占主导地位白光 LED.实验数据表明:不论高低色温的白光 LED 均可采用该方法测量结温,比传统的峰值波长等方法具有更好的线性拟合度,精度更高.与 Mentor Graphics 公司的 T3Ster 测出结果的对比验证了该方法的可行性.该方法采用非接触测量,保持了光谱法测量不破坏灯具结构、高效直观的优点,不需要昂贵的仪器设备,是一种实用的 LED 结温测量方法。

参考文献

- [1] PAASSCHENS J C J, HARMSMA S, der TOOM R. Dependence of thermal resistance on ambient and actual temperature[J]. *IEEE BCTM*, 2004(1):96-99.
- [2] ZUKAUSKAS A, SHUR M, GASKA R. Introduction to solid-state lighting[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [3] CHEN K, NARENDRAN N. Estimating the average junction temperature of AlGaInP LED arrays by spectral analysis [J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, **53**(7):701-705.
- [4] CHENG Xing-fu, LIU Xian-ming, CHEN Wei-ming, *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.
- [5] XI Y, SCHUBERT E F. Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(12):2163-2165.
- [6] QIU Xi-zhen, ZHANG Fang-hui. 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[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(1):36-39.
- [7] XU Yu-zhen, LIN Wei-ming. A novel LED photo- electro- thermal model with simplified variables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(5): 0523001.
徐玉珍, 林维明. 一种简化变量的新型 LED 光电热模型[J]. *光学学报*, 2013, **33**(5): 0523001.
- [8] HONG E, NARENDRAN N. A method for projecting useful life of LED lighting system[C]. SPIE, 2004, 5187:93-99.
- [9] GU Y, NARENDRAN N. A Non-contact method for determining junction temperature of phosphor-converted white LEDs [C]. SPIE, 2010, 5187:107-114.
- [10] CHEN Ting, CHEN Zhi-zhong. Methods for determining junction temperature of GaN-based white LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2003, **27**(3):407-412.
陈挺, 陈志忠. GaN 基白光 LED 的结温测量[J]. *发光学报*, 2006, **27**(3):407-412.
- [11] GAO X, DANG J, WU L. Multi-color-emitting quantum dot based white LEDs[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(11): 90-93.
- [12] ZHAO Xiao-xia, WANG Xiao-jun, CHEN Bao-jiu, *et al.* Preparation of α -Gd₂(MoO₄)₃:Eu red emitting phosphor for white light emitting diodes and its luminescence study[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(4):629-633.
赵晓霞, 王晓君, 陈宝玖, 等. 白光 LED 用红色荧光粉 α -Gd₂(MoO₄)₃:Eu 的制备及其发光性能研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(4):629-633.
- [13] YIN Lu-qiao, WENG Fei, SONG Peng, *et al.* Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer[J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, **34**(3):0323002.
殷录桥, 翁菲, 宋朋, 等. LED 芯片与 YAG 荧光粉的相互热作用[J]. *光学学报*, 2014, **34**(3):0323002.
- [14] DIN Tian-ping, GUO Wei-Ling, CUI Bi-feng, *et al.* The effect of temperature on the PL spectra of high power LED[J]. *Spectroscopy and Spectral 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.
- [15] TANABE S, FUJITA S, YOSHIHARA S, *et al.* YAG glass-ceramic phosphor for white LED(II): luminescence characteristics[C]. SPIE, 2005, 5941:594112.