

引用格式: RAO Feng, FANG Tao, WANG Zi-ling, *et al.* Determining the Junction Temperature of Two Phosphors-converted LED Based on Spectral Feature Parameters of the Chip[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9):0912002

饶丰, 方涛, 王紫凌, 等. 用芯片光谱特征参数表征双荧光粉转换型白色 LED 结温[J]. 光子学报, 2020, 49(9):0912002

用芯片光谱特征参数表征双荧光粉转换型 白色 LED 结温

饶丰¹, 方涛², 王紫凌¹, 陈晨¹

(1 常州工学院, 江苏 常州 213022)

(2 国家半导体照明联合创新国家重点实验室·常州基地, 江苏 常州 213161)

摘 要: 采用正向电压法测量不同衬底温度、不同电流驱动时, 双荧光粉转换型白色 LED 的结温, 同时采用光谱仪测量归一化光谱分布. 选择芯片的蓝色光谱, 计算其质心波长和半高全宽, 得到质心波长、半高全宽、驱动电流和结温四者之间的变化规律图, 然后根据实际点灯状态下芯片的光谱特征参数, 结合规律图计算得到实际结温. 研究表明: 对于环境温度变化引起的结温变化, (B+Y+R)/B 法与本文方法准确度相当, 测量误差均为 2 °C 左右, 无统计性差异. 对于电流变化引起的结温变化, 本文方法误差仍然约为 2 °C, 而 (B+Y+R)/B 法误差与电流正相关, 变化率为 0.048 °C/mA. 同时在点灯 6 周内, 本文方法误差仅 4 °C. 因此, 本文方法不仅适合因环境温度和驱动电流变化引起的结温变化, 且无需重新校准, 能准确测量长时间点灯 LED 结温, 具有明显的技术优势.

关键词: 光谱学; 结温测量; 光谱分析; 发光二极管; 光谱仪; 质心波长; 半高全宽

中图分类号: TN312+.8; O433.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0912002

Determining the Junction Temperature of Two Phosphors-converted LED Based on Spectral Feature Parameters of the Chip

RAO Feng¹, FANG Tao², WANG Zi-ling¹, CHEN Chen¹

(1 Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

(2 State Key Laboratory of Solid State Lighting Joint Innovation Changzhou Base, Changzhou, Jiangsu 213161, China)

Abstract: The junction temperatures of LED with different ambient temperatures and drive currents were measured with the Forward Voltage method, at the same time, the normalized spectral distributions were measured with spectrometer. The specific spectral distribution of blue chip was selected to calculate its centroid wavelength and full width at half maximum, and then the relationships among these two parameters, drive current and junction temperature were obtained. At last, the junction temperature of the LED at the lighting condition was obtained with the relationships and the measured spectral feature parameters of the chip. It was found that for the junction temperature changed with ambient temperature, the measured error of this method and (B+Y+R)/B method were both about 2 °C, and no statistical significance. For the junction temperature changed with drive current, the measured error of this method was always 2 °C. However, the error of the (B+Y+R)/B method was positively correlated with the current, with the change rate of 0.048 °C/mA. Therefore, the established method was suitable for determining the junction temperature with the change of not only ambient temperature, but drive current, and it was also accurate when LED lighting

基金项目: 国家重点研发计划(No.2017YFF0210002), 江苏省“双创博士”项目, 江苏省 333 人才项目(No.BRA2019157), 常州市智能感知和无人机应用技术研究重点实验室项目(No. CM20173003)

第一作者: 饶丰(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为 LED 光色热检测技术. Email: 1270437521@qq.com

收稿日期: 2020-05-12; **录用日期:** 2020-07-03

for a long time without re-calibration, which showed significant technical advantages.

Key words: Spectroscopy; Junction temperature measurement; Spectral analysis; Light emitting diode; Spectrometer; Centroid wavelength; Full width at half maximum

OCIS Codes: 120.4630; 300.6260; 230.3670; 150.2950; 230.2090; 130.5990

0 引言

白色 LED 因其高效、环保、节能和小巧等优点,广泛地应用于照明和显示领域^[1].随着技术的进步^[2],LED 能发出从红外到紫外的各种单色光^[3],还能由荧光粉转换得到白色光^[4],光效也在不断提高^[5].但是 LED 光色电特性受结温影响很大^[6],研究快速方便测量 LED 结温方法,具有重要的理论意义和实用价值.

LED 结温的基准测试方法是国际标准 CIE127:2007《LED 测量方法》规定的正向电压法^[7],但该方法要接触 LED 管脚,不适合 LED 成品.人们又开发了非接触式结温测量方法,如基于红外辐射的直接测温法^[8]、峰谷波长法^[9]和蓝白比法^[10]等.直接测温法受封装影响大,峰谷波长法受电流和芯片差异影响大.蓝白比法测量方便,应用广泛,文献报道与正向电压法相比,误差 2 °C 左右^[11].

单一荧光粉转换型白色 LED,红光成分少,显色性不高.为了改善显色性,部分企业在荧光粉中掺入红色荧光粉,得到双荧光粉转换型 LED^[12].另外,为了打破日亚公司白色 LED 专利垄断,国内也有厂商开发红色和绿色荧光粉混合的白色 LED.研究表明,采用蓝白比法测量双荧光粉转换型 LED 结温误差较大,为了提高准确度,客洪亮等将不同荧光粉发出的光谱适当加权,然后采用加权后的白蓝比(B+Y+R)/B 来表征结温^[13].但是,获取合适的加权系数,技术难度较高.

本项目组前期发现采用质心波长和半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)能够表征 GaN 基蓝色 LED 的结温,并推广至 YAG 荧光粉转换型 LED 中^[14],研究表明,对于环境温度导致的结温变化,采用带宽为 1 nm,测试误差为 1%的高精度光谱仪(如远方公司 HASS2000),结温误差在 2 °C 左右.但是,不同荧光粉吸收波长范围不同,双荧光粉转换型 LED 的蓝光光谱对应的特征光谱参数能否表征结温,准确度如何,需要进一步深入研究.

1 原理

LED 光谱分布由驱动电流和结温决定,因此,LED 光谱特征参数也是结温和电流的函数^[15],本研究选择质心波长 λ_c 和半高全宽 $\lambda_{0.5}$ 这两个特征参数来表征结温,质心波长 λ_c 为光谱分布的几何对称波长,定义为

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中, λ_1 、 λ_2 是 LED 光谱分布的上、下限波长, $F(\lambda)$ 为光谱分布.半高全宽 $\Delta\lambda_{0.5}$ 定义为光谱分布为峰值高度之一半对应的波长宽度.根据文献^[12], λ_c 、 $\lambda_{0.5}$ 、 T_j 和 I_f 四者之间的内在联系,可以准确地表示为

$$\begin{cases} \lambda_c = k(T_j - T_a) + \sigma_0 + \sigma_1 \exp(I_f/I_0) \\ \lambda_{0.5} = k'(T_j - T_a) + \sigma'_0 + \sigma'_1 \exp(I_f/I'_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中, K 、 σ_0 、 σ_1 和 I_0 是与质心波长 λ_c 有关的系数;同理, K' 、 σ'_0 、 σ'_1 和 I'_0 是和半高全宽 $\lambda_{0.5}$ 有关的系数, T_a 为环境温度.式(2)中只有两个变量是独立的,四个参数中任意两个确定,其他两个都能够计算得到.

在实际点灯过程中,式(2)中的系数会随着点灯条件变化略有变化,不易准确描述.因此不直接计算系数,而是构建 λ_c 、 $\lambda_{0.5}$ 、 T_j 和 I_f 四者关系图,然后根据实际工作条件下的 LED 光谱特征参数在关系图中的位置,计算得到实际结温.

2 实验

2.1 样品选择

选择 Cree 公司 5050 型 GaN 蓝光芯片,正向电压为 3.2 V,峰值波长为 450 nm.选择 10% 浓度黄色荧

光粉(Y₃Al₅O₁₂:Ce)和1%浓度的红色荧光粉(CaAlSiN₃:Eu),由国家半导体照明联合创新国家重点实验室·常州基地封装成白色LED,色温约5000K,额定功率为1.5W,共封装10只.试验前,在环境温度25±1℃,功率1.5W条件下老化12h,剔除光通量衰减5%以上和色温变化超过100K的,得到4只LED,任选1只作为样品开展研究,其实物如图1.

2.2 实验仪器

本研究测量结温的仪器是杭州远方公司的TRA-200型LED热阻结构分析系统,测量光谱分布的是该公司的光色电综合分析系统.LED热阻结构分析系统能够采用正向电压法测量不同条件下LED的结温,其正向电压的测量可精确到0.1mV,对应LED结温误差一般不大于0.1℃.

光色电综合分析系统由LED300型数控高精度恒流电源、TC-100温控、积分球和Hass2000型光谱仪组成,其连接方式如图2.其中,数控高精度恒流电源给待测LED提供直流驱动,电流误差为±1mA.恒温器给LED提供稳定的环境温度,误差为±0.3℃.光谱仪步长为1nm,线性误差为1%.积分球开有两个孔,LED通过一只孔伸入积分球内壁,光谱仪探头通过另外一只孔伸入积分球内,这样,当LED发光时,就可以用光谱仪测量LED的光谱分布.

2.3 数据处理

图3是不同标称色温LED的归一化光谱分布.在前期研究中,单荧光粉转换型LED一般以光谱分布的峰谷C为界,提取短波长部分的光谱分布,利用特征光谱参数表征结温.对于双荧光粉转换型LED,红色荧光粉的吸收峰为460nm.C附近受芯片光谱、红色荧光粉吸收光谱和黄色荧光粉发射光谱多重影响,考虑到荧光粉光谱特性,令B点光谱为C点两倍,这样B段左侧受荧光粉的影响可以忽略.

又令A点归一化光谱应大于环境杂散光归一化光谱,这样环境杂散光的影响也可以忽略,采用ADB段光谱特征参数来表征结温.

为了减小测量误差对光谱特征参数的影响,本研究先拟合蓝光光谱函数,然后剔除误差较大的数据,重新拟合新的光谱模型,最后计算光谱特征参数.本研究采用何兴国^[16]等提出的函数拟合蓝光光谱分布

$$S_{LED}(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda) = \frac{1}{1+k_1} [g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda) + k_1 g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda)^{k_2}] \quad (3)$$

式中, $g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda) = \exp\left[-\left(\frac{\lambda-\lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2\right]$, $\Delta\lambda$ 表示与半高全宽相关的系数, k_1 、 k_2 为待定系数. D 为峰值点,将 AD 、 DB 两段光谱数据分别代入式(3),拟合出待定系数.

计算实测光谱与拟合函数之差,若该差值大于光谱仪的不确定度,剔除该光谱数据,剩下的数据重新拟合得到新的函数,若剔除的数据量超过20%,则需重新测量光谱.最后,采用拟合函数来计算质心波长和半高

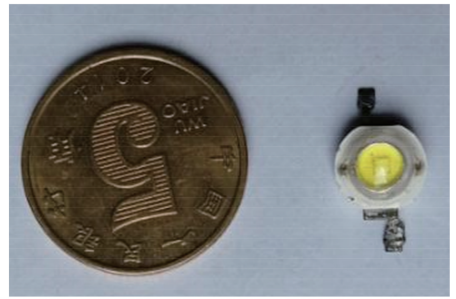


图1 样品实物与硬币作比较

Fig.1 Comparison of LED sample and the coin

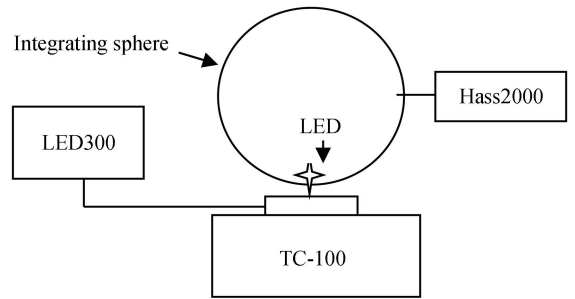


图2 光色电综合分析仪结构示意图

Fig.2 The schematic diagram of optic, chromatic and electric comprehensive analyzer

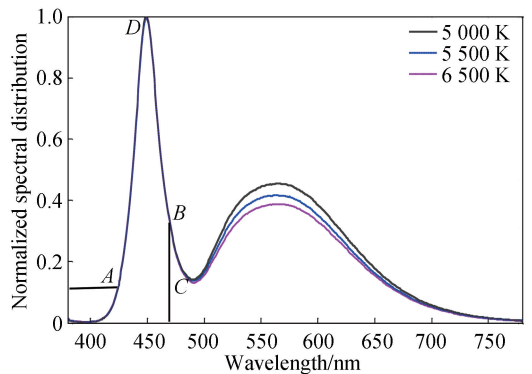


图3 荧光粉转换型白色LED归一化光谱分布

Fig.3 Normalized spectral distributions of phosphor-converted white LED

全宽,用以表征 LED 结温.

2.4 实验设计

实验过程可分成标定和测量两部分.标定的目的是得到驱动电流、质心波长、半高全宽和结温关系图,揭示四者之间的内在联系.步骤如下:

- 1) 将待测 LED 样品安装在温控台上,保持良好的热接触;
- 2) 设定温控温度为 T_1 ,保持 5 min,使得 LED 与基座之间达到热平衡;
- 3) 设定驱动电流依次从 150 mA 到 500 mA,间隔 50 mA,采用 LED 热阻结构分析系统测量热稳定时的结温,调整温控温度 T_1 ,使得结温为固定值.如 20 °C,采用 Hass2000 光谱仪测量 LED 光谱分布,得到了同一结温下的质心波长和半高全宽,这样,可以画出质心波长为横轴,半高全宽为纵轴的不同驱动电流对应的等结温线.

4) 改变结温,使之成为 30,40,⋯,80 °C,重复步骤(4),就得到了不同结温、不同电流下对应的等结温曲线簇.连接同一电流对应的质心波长和半高全宽,就得到了等电流曲线簇.

这样就完成了标定过程.测量旨在得到实际点灯时的光谱特征参数,进而计算出结温,其步骤为:

- 1) 用光谱仪测量待测条件下 LED 的光谱分布 5 次,计算出质心波长和半高全宽,去除最大值和最小值,采用余下三次的平均数为最终结果;
- 2) 在标定过程中得到的等结温曲线簇上标出质心波长和半高全宽坐标;
- 3) 根据质心波长和半高全宽坐标所在的等结温区间,采用线性估算法得到 LED 结温;

为了对比测试结果,本研究同时采用 LED 热阻结构分析系统测量实际点灯时的结温,采用蓝白比法和 $(B+R+Y)/B$ 法计算结温.

3 结果与讨论

3.1 光谱特征参数

图 4 是双荧光粉转换型 LED 之芯片(chip),黄色(Y)、红色(R)及双荧光粉(Y+R)的光谱分布.可以看出,由于红色荧光粉的作用,双荧光粉转换型 LED 的长波段较宽,这有利于提升光源显色性.若红色和黄色荧光粉的比例不同,长波段宽度也不同^[9,10].

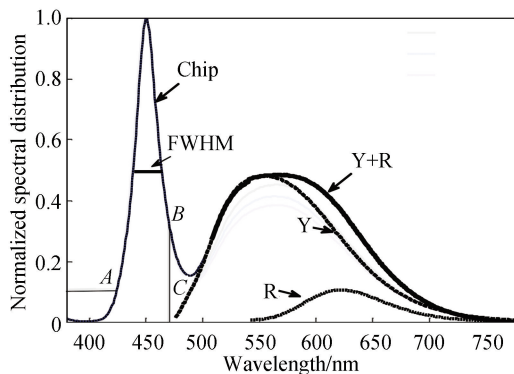


图 4 归一化光谱分布
Fig.4 Normalized spectral distribution

A 点光谱选择 0.1,C 点值约为 0.15,B 点选择 0.3.图 5 是同一点灯状态下,20 次实测的光谱分布计算得到的质心波长和半高全宽,和采用拟合函数得到的结果.结果表明:20 次测量的质心波长极差不超过 0.1 nm,说明质心波长容易准确测量.采用拟合函数同采用测量数据得到的质心波长极差不超过 0.02 nm,说明函数拟合对质心波长的改善不明显.对于半高全宽,20 实测值的极差 0.17 nm,采用函数拟合后,极差为 0.09 nm,因此函数拟合提升了半高全宽的测量精度.这是由于采用函数拟合后,去除了部分测量误差,而质心波长是由 40 多个光谱数据加权得到的,本身对误差有较强的校正能力,拟合与否影响不大;但半高全宽是二个测量值的差值,拟合后直接减小了这两个值的误差,因而更精确.

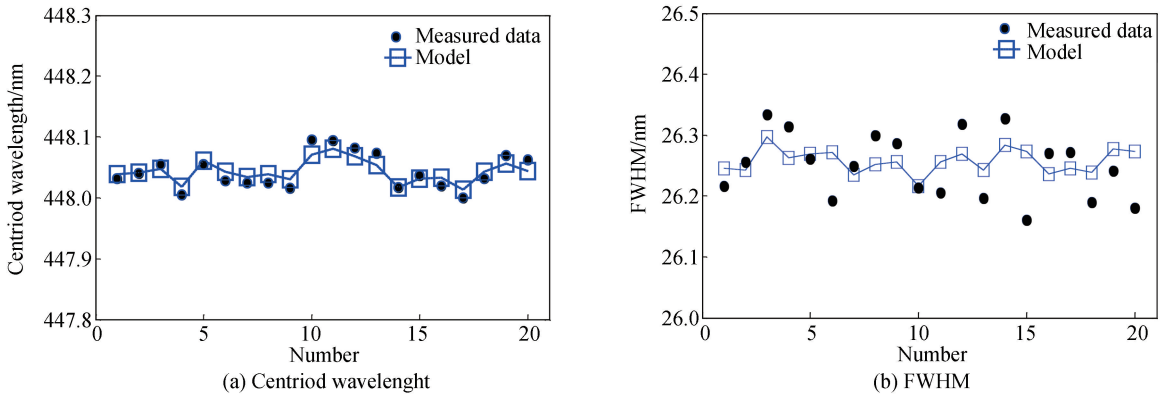


图5 测量值和模型值
Fig.5 Measured and fitted values

3.2 结温计算过程

图6(a)是双荧光粉转换型LED的结温、电流、蓝光部分半高全宽和质心波长关系图,带符号标志的实线是二次函数拟合的等结温曲线,从左至右,对应的结温分别为20℃~80℃,间隔10℃.随着电流增加,符号标志越来越密,说明随着电流变大时,FWHM和质心波长变化越来越慢.虚线是同一电流下不同结温对应的质心波长和半高全宽,是等电流线,图中标出了150mA和450mA两条等电流线.图中星点表示该LED七个不同点灯状态下的光谱特征参数.很明显,每一个坐标均在等结温线和等电流线构成的方框内,采用线性插值,很容易计算出坐标点对应的电流和结温.

图6(b)是局部放大图,很明显,数据点A在300mA和350mA等电流线、结温20℃到30℃之间,采用线性插值法,可以得出结温为28.0℃,电流为322mA.由于等电流线之间的间隔随电流的增加而减小,导致数据点靠左时,计算出的电流值偏大,靠右时偏小.但是,等结温曲线之间的间隔距离平均误差仅8%,对应结温误差0.8℃,因此测算得到的结温值比较准确.

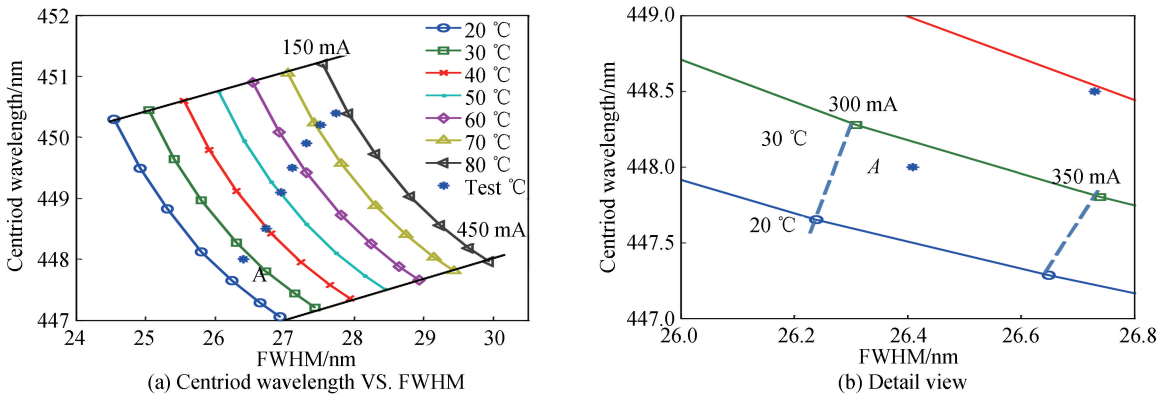


图6 标定曲线
Fig.6 Calibration curve

3.3 不同方法测量比较

图7(a)是驱动电流300mA,不同衬底温度下,正向电压法(F-V)、蓝白比法、文献[12,13]的(B+Y+R)/B法和本研究的方法得到的结温.为了研究方便,结温控制在40℃,50℃,⋯,90℃.以正向电压法测量值为标准值,其他方法均测量12次,去除最大值和最小值,然后计算平均值和方均根误差.从图中可以看出,(B+Y+R)/B法和本研究的方法测算结温误差均在2.2℃左右,经统计分析(F检测,软件spss), $p = 0.6309$,说明这两种方法测量的结果无统计差异,都能准确地表征环境温度变化导致的双荧光粉转换型LED结温变化.蓝白比法测量的结温均方根误差达到3.68℃,这主要是红色荧光粉与黄色荧光粉随结温的变化规律不一致造成的.若增加红色荧光粉,误差还会增大^[10].

图7(b)是增大电流,降低衬底温度,保持结温80℃,采用不同方法测量的实际结温,从横坐标的状态1

到状态 6, 对应电流从 200 mA 到 450 mA, 间隔 50 mA. 可见, 本研究采用的光谱特征参数表征的结温, 与正向电压法测量值平均差异大小约 2 °C, 且差异无明显规律. 但是, (B+Y+R)/B 法计算的结温, 在 300 mA 时, 与其他两种方法结果的一致性较好. 当电流小于 300 mA, 测量值明显小于实际值; 当电流大于 300 mA, 测量值明显大于实际值, 且误差大小与电流成正比, 变化率为 0.048 °C/mA. 这是由于在同一结温下, 驱动电流增大, 荧光粉发出的光减少的缘故. 虽然从数学上可以修正, 但需要已知驱动电流.

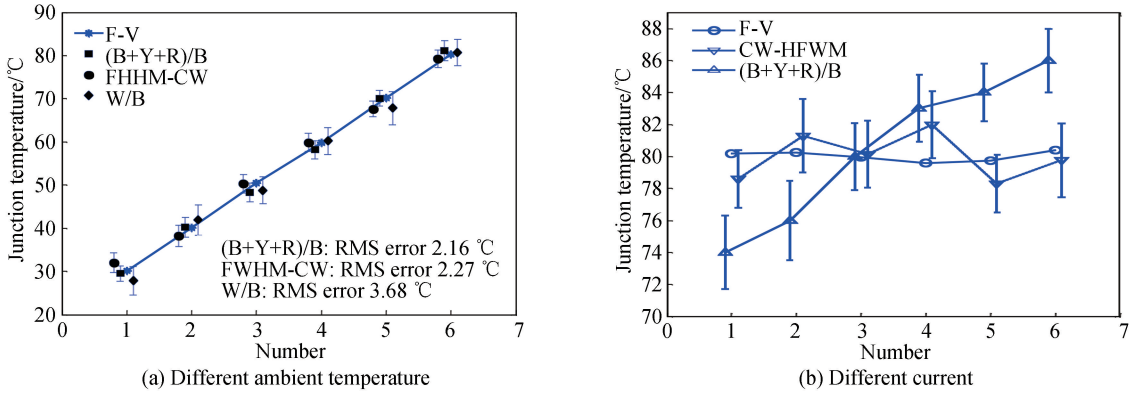


图 7 不同方法测量结温比较

Fig.7 Comparison of junction temperatures with different methods

3.4 时效性

图 8 中曲线从上到下, 分别是驱动电流为 300 mA, 环境温度为 80 °C 时点灯 1 周末到 6 周末的光谱分布. 可见, 随着时间的增加, 蓝光部分几乎没有变化, 而荧光粉发出的蓝绿光不断减小. 原因是, 随着点灯时间增加, 荧光粉不断老化, 光转化效率不断降低.

6 周内每隔半周测量光谱分布, 测量时驱动电流为 300 mA, 调整衬底温度以保持实际结温 80 °C, 一共得到 11 个值. 图 9(a) 是质心波长-半高全宽图, 可以看出, 11 次测量值比较集中, 其差异对应结温不超过 4 °C. 图 9(b) 是 11 次测量的 (B+Y+R)/B 值, 它随点灯时间的增加而不断减小, 6 周的变化量达到 0.08. 一般地, GaN 基白色 LED (B+Y+R)/B 的变化率为 0.005/°C, 因此, (B+Y+R)/B 法的误差达到 16 °C. 因此, 如果不重新校准, (B+Y+R)/B 法测试准确度难以满足工程技术要求.

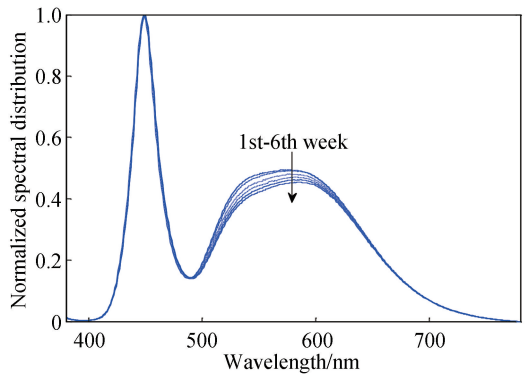
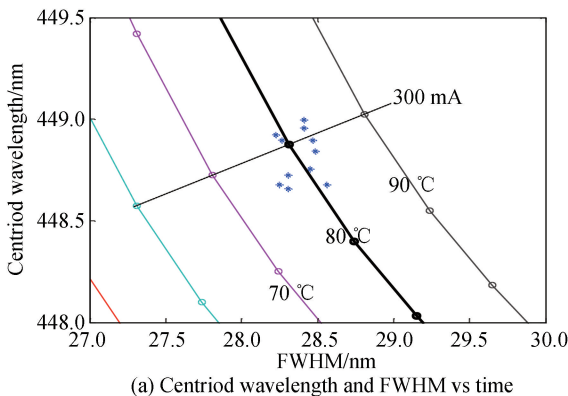
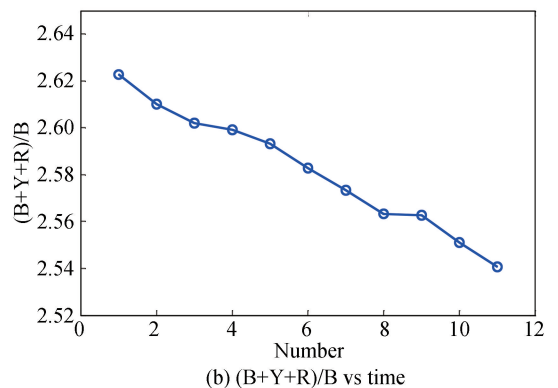


图 8 老化后的归一化光谱分布

Fig.8 Normalized spectral distribution after aging



(a) Centroid wavelength and FWHM vs time



(b) (B+Y+R)/B vs time

图 9 不同点灯时间下的光谱特征参数

Fig.9 Spectral feature parameter at different time

4 结论

LED结温、驱动电流与光谱分布之间存在内在的本质联系.本研究选择芯片的部分光谱分布,选择质心波长和半高全宽这两个光谱特征参数,建立电流、质心波长、半高全宽和结温四参数模型,最后使用该模型测算待测条件下LED的结温.研究表明,无论是环境温度还是驱动电流变化,该方法均能较准确地测量出实际的结温,误差约为2℃.本方法在长时间点灯后依然无需校准.同时,本方法测试技术简单,操作方便,无需破坏LED产品的结构,因而是一种实用有效的LED结温测试方法.

参考文献

- [1] CAO Hui, ZHENG Bin, GU Zhao-feng, *et al.* Luminescent properties of Pr³⁺ doped LiYF₄ glass ceramics for white light-emitting diodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0916003.
曹慧,郑斌,谷招峰,等.白光LED用LiYF₄:Pr³⁺微晶玻璃的发光性能研究[J].光子学报,2018,**47**(9):0916003.
- [2] HONG Y I, HAMIDUL I M B, KYOUNG K T, *et al.* Impact of grain growth of silver reflective electrode by electron bombardment on external quantum efficiency of III-nitride micro-light-emitting diode arrays [J]. *Applied Surface Science*, 2020, **512**(2): 145698.
- [3] ZHOU Sheng-jun, LIU Xiong-tong, YAN Han. Highly efficient GaN-based high-power flip chip light-emitting diodes [J].*Optics Express*, 2019, **27**(12): A669.
- [4] LEE D, CHOI H, EONG J. A study on the measurement and prediction of LED junction temperature[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, **127**(11): 1243-1252.
- [5] WANG Shuai, LONG Han-ling, ZHANG Yi, *et al.* Monolithic integration of deep ultraviolet LED with a multiplicative photoelectric converter[J]. *Nano Energy*, 2019, **66**: 104181.
- [6] 王潇洵. LED照明产品加速测试中结温测量及寿命预测修正方法研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2019.
- [7] CIE127. Measurement of LEDs[S]. Central Bureau of the CIE, Vienna, Austria, 2007.
- [8] SHU Wei-cheng, HU Run, XIE Bin, *et al.* Experimental study on LED chip surface temperature via the quantum dot [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, **39**(2): 442-445.
舒伟程,胡润,谢斌,等.基于量子点测量LED芯片表面温度的实验研究[J].工程热物理学报,2018,**39**(2):442-445.
- [9] 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.
- [10] HONG E, NARENDRAN N. A method for projecting useful life of LED lighting systems[C]. SPIE, 2004, **5187**: 93-99.
- [11] MALIKA O, AUMEUR E A, CHOUKRI M, *et al.* Experimental investigation on thermal performances of SMD LEDs light bar: Junction-to-case thermal resistance and junction temperature estimation[J]. *Optik*, 2019, **182**(4): 580-586.
- [12] KE Hong-liang, JING Lei, HAO Jian, *et al.* Estimation of the average junction temperature of two phosphors-converted white LED array based on (B+Y+R)/B ratio[J]. *Solid-State Electronics*, 2016, **121**(5): 47-53.
- [13] 客洪亮.白光LED阵列结温检测以及寿命预测分析[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
- [14] GUO Jie, MA Jun-shan, RAO Feng, *et al.* White light LED junction temperature measurement method based on the spectral distribution characteristic parameters[J]. *Optical Instruments*, 2018, **40**(5): 1-7.
郭杰,马军山,饶丰,等.基于光谱分布特征参数的白光LED结温测量方法[J].光学仪器,2018,**40**(5):1-7.
- [15] LIU Yue, GAO Yu-lin, LU Yi-jun. Study of temperature sensitive optical parameters and junction temperature determination of light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(20): 202108.
- [16] HE Guo-xin, ZHENG Li-hong. A model for LED spectra at different drive currents[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(11): 1090-1094.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China(No.2017YFF0210002), Project of Post-Doctor of Innovation and Entrepreneurship of Jiangsu Province, Project of "333" of Jiangsu Province(No.BRA2019157), Project of Changzhou Key Laboratory of Intelligent Perception and UAV Application Technology (No.CM20173003)