

doi: 10.3788/gzxb20144305.0523003

远程荧光体白光发光二极管的发光性能

肖华¹, 吕毅军¹, 朱丽虹¹, 王阳夏², 陈国龙¹, 高玉琳¹, 林思琪¹, 徐云鑫¹

(1 厦门大学 电子科学系; 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

(2 厦门华联电子有限公司, 福建, 厦门 361003)

摘 要:研究了高色温和低色温两种球冠状远程荧光粉白光 LED 在不同电流、不同热沉温度下的发光性能差异. 结果表明: 在大电流下, LED 有源层内由于量子限制斯塔克效应使其峰值波长向短波方向移动, 偏离了高色温荧光粉的最佳激发波长, 更加接近低色温荧光粉的最佳激发波长. 高色温 LED 的相关色温随电流增加呈上升趋势, 低色温 LED 的相关色温随电流增加呈下降趋势, 与它们的量子效率变化引起的色坐标漂移有很大关系. 两种 LED 量子效率和发光效能随热沉温度的升高均呈略微增大的趋势; 其中, 高色温 LED 的量子效率和发光效能随电流的增大而减小, 而低色温 LED 的量子效率和发光效能则随电流的增大而升高; 高色温 LED 发光性质较低色温 LED 好, 但色特性的稳定程度不如低色温 LED.

关键词: LED; 荧光粉; 相关色温; 量子效率; 发光效能

中图分类号: TN312+.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0523003-6

Luminous Performance of Remote Phosphor White LED

XIAO Hua¹, LV Yi-jun¹, ZHU Li-hong¹, WANG Yang-xia², CHEN Guo-long¹,
GAO Yu-lin¹, LIN Si-qi¹, XU Yun-xin¹

(1 Department of Electronic Science; Fujian Engineering Research Center for Solid-state Lighting,
Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

(2 Xiamen Hualian Electronics Co. Ltd, Xiamen, Fujian 361003, China)

Abstract: The luminous properties of sphere-like remote phosphor white LEDs with high Correlated Color Temperature(CCT) and low CCT were studied under different drive currents and heat sink temperatures. The result shown that the quantum efficiency and luminous efficacy of both LEDs raise with the increase of heat sink temperatures; the high-CCT LED's quantum efficiency and luminous efficacy decrease with rising currents. However, the low-CCT LED shows a reverse trend. The reason is attributed to the quantum confinement stark effect in the active region, which makes the wavelength move towards short-wavelength so as to deviate from the optimum stimulation wavelength of the high-CCT phosphor, but close to the optimum stimulation wavelength of the low-CCT phosphor. The CCT of the high-CCT LED increase with rising currents, again, the low-CCT LED shows a reverse trend with rising currents. This trend is mainly related to the drifting of color coordinates caused by quantum efficiency changing. To sum up, the high-CCT LED possesses better optical properties but inferior color properties than the low-CCT LED.

Key words: LED; Phosphor; Correlated Color Temperature (CCT); Quantum efficiency; Luminous efficacy

OCIS Codes: 230.3670; 230.5170; 230.0250

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11104230, 61102030)、福建省产学研重大科技项目(Nos. 2011H6025, 2013H6024)和福建省重点科技项目(No. 2012H0039)资助

第一作者:肖华(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为半导体光电检测及特性. Email:changsixie@sina.com

导师(通讯作者):陈国龙(1969-),男,硕士,实验师,主要研究方向为半导体材料光学性质和半导体照明检测. Email:glchen@xmu.edu.cn

收稿日期:2013-08-12; **录用日期:**2013-11-20

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

0 引言

InGaN/GaN 蓝光发光二极管 (Light-Emitting Diodes, LED) 作为激发荧光粉发光的常用激发光源,是实现白光二极管 (White LED, WLED) 不可或缺的发光器件^[1-2]. 白光由蓝光和荧光粉转换后产生的光 (比如黄光) 混合而得^[3]. 目前,商业化的白光 LED 主要是由 GaN 基蓝光 LED 芯片和黄光荧光粉 (YAG: Ge³⁺) 构成^[4]. 然而,传统大面积点胶的荧光粉涂覆方式,不但使得光子与荧光粉作用后,大部分光被荧光粉反射回芯片,造成 LED 光取出率降低,而荧光粉厚度不均会导致色温的空间分布均匀性差,影响出光质量^[5-6]. 为了提高 LED 光的出光效率,Chen 等^[7-8]将远程荧光粉作为 LED 封装方式,并取得较好的效果. Yu 等^[5]通过仿真对五种不同位置不同形状的荧光粉层发光性质进行了比较,证实了远程荧光粉比传统荧光粉涂覆方式有更高的光通量;Narendran 等^[8]的仿真结果显示,光子散射萃取法 (Scattered Photon Extraction, SPE) 远程荧光粉封装的白光 LED 阵列比传统白光 LED 阵列具有更高的光效.

文献[9]研究了不同封装方式远程荧光粉的发光性质. Liu 等^[9]对几种不同的光学模型进行出光分析和讨论,结果显示,荧光粉位置对光效的影响较小,但是对相关色温 (Correlated Color Temperature, CCT) 的空间均匀性影响很大,凸面荧光粉层虽然显示出较高光取出率但具有较低色均匀性. Park 等^[10]对全封闭式的和半封闭式远程荧光粉 LED 在不同荧光粉浓度和电流条件下的发光效能和 CCT 进行了测试、对比,发现半封闭式的远程荧光粉 LED 可以在减少荧光粉用量的条件下实现同样的发光效能.

虽然多数研究者对远程荧光粉进行过很多不同方面的研究,但针对不同相关色温远程荧光粉白光 LED 发光性能受温度和电流的影响的研究较少. 本文研究了高、低色温远程荧光粉白光 LED 的量子效率、发光效能、相关色温、色坐标等参量,在变电流和变温度的实验条件下对其发光性能进行了全面测试和分析.

1 实验

1.1 实验装置

光谱测试实验设备如图1,由积分球、光谱仪、计

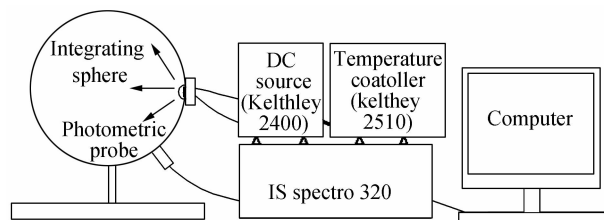


图1 光谱测试系统

Fig. 1 Spectra measurement system

算系统三部分组成,其中光学测试设备是德国 IS Spectro320 光谱仪,光收集装置是直径为 500 mm 的 ISP500 积分球,恒流源为 Keithley 2400,控温源为 Keithley 2510.

1.2 实验内容

实验中激发光源采用 BridgeLux 公司的 BXC4545 1W 大功率蓝光 LED,芯片大小为 1×1×0.01 mm³,发光峰值波长在 452~455 nm 范围,半峰宽 20 nm. 高相关色温和低相关色温 (简称高色温和低色温) 远程荧光粉受激发后分别发出冷白光和暖白光,形状为底边直径 22 mm,厚度 1 mm 的球冠状曲面,荧光粉的类型为 YAG: Ce³⁺.

进行荧光粉发光性能测量时,LED 驱动电流设置为 100~900 mA,利用 TEC 控温夹具控制 LED 热沉温度保持在 25℃~45℃ 范围,如图 2. 实验中设高色温远程荧光粉白光 LED 为样品 1,低色温远程荧光粉白光 LED 为样品 2.

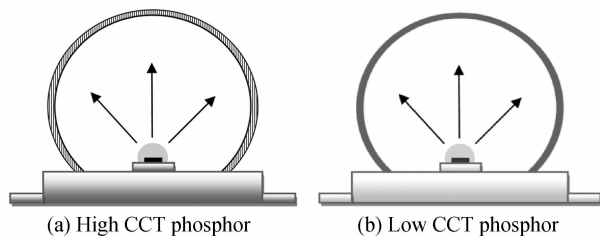


图2 远程荧光粉白光 LED

Fig. 2 Rremote phosphor white LED

2 结果与分析

2.1 光谱测试结果与分析

在 LED 荧光粉的效率评价中,引入发光效能及量子效率两个指标.

荧光粉的发光效能 η_l ,是光辐射通量经过“人眼”以后可以产生多少相应光通量的刺激. 用发射的黄光光通量 Φ_V (lm) 与激发用蓝光光功率 Φ_E (W) 之比来表示,其量纲单位为 lm/W,即

$$\eta_l = \frac{\Phi_V}{\Phi_E} = \frac{683 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{em}(\lambda_{em}) \cdot V(\lambda_{em}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) d\lambda_{ex}} \quad (1)$$

荧光粉的量子效率 η_Q 指荧光粉在入射光激发下,发射光的光子数 $N_{emission}$ 与激发光的光子数 $N_{stimulation}$ 之比,即

$$\eta_Q = \frac{N_{emission}}{N_{stimulation}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{em}(\lambda_{em}) / (\frac{hc}{\lambda_{em}}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) / (\frac{hc}{\lambda_{ex}}) d\lambda_{ex}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda_{em} \varphi_{em}(\lambda_{em}) d\lambda_{em}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda_{ex} \varphi_{ex}(\lambda_{ex}) d\lambda_{ex}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: λ_{ex} 为激发光波长; λ_{em} 为发射光波长; $\varphi_{em}(\lambda_{em})$ 为荧光粉的发射光谱功率分布; $\varphi_{ex}(\lambda_{ex})$ 为激发光谱功率分布; λ_1 至 λ_2 是发射光谱范围, λ'_1 至 λ'_2

是入射光谱范围^[14].

由图3可知样品2光通量较低,且更易趋于饱和.这是由于两种荧光粉本身的激发条件不同,以及所需的最佳激发波长也有所差别,因此,在同一蓝光LED激发下,两者的光通量存在差异.另外,当色温较低时,光谱中红光波段所占的比例相对要高,而红光成分的人眼响应后光通量较低,这就导致低色温样品的光通量较低.随着电流增大,蓝光LED注入电流密度也随之增加,会出现所谓的“电流泄露”现象,即发生在pn结结区的载流子复合几率下降,因此造成芯片光通量上升趋势越来越慢,最终趋于饱和^[15].

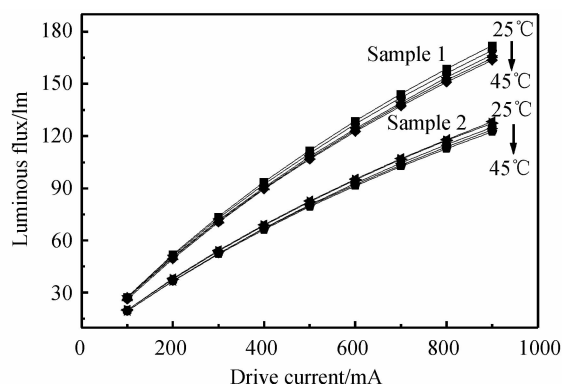
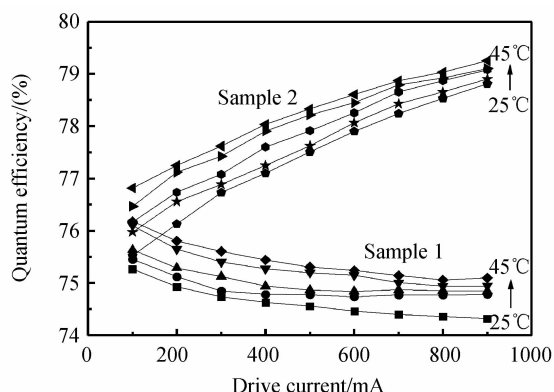


图3 不同电流和热沉温度下的光通量

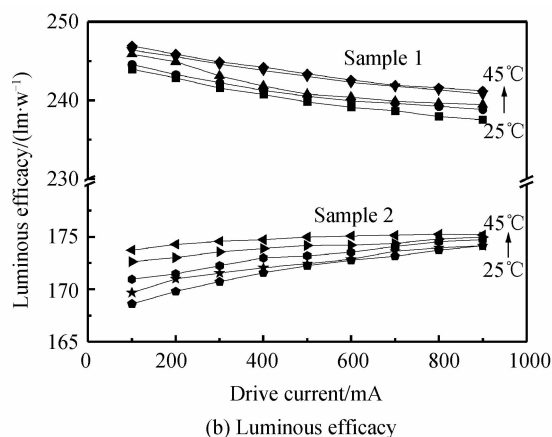
Fig. 3 Luminous Flux under different drive currents and heat sink

图4(a)、(b)分别为样品1和样品2的量子效率和发光效能随电流和热沉温度的变化情况.结果显示,样品1的量子效率总体上比样品2低,但它的发光效能比样品2要高得多.且随着电流逐渐增大,样品2的量子效率和发光效能呈上升趋势,而样品1的两种效率则呈下降趋势,最终,两者都趋于稳定.由于低色温荧光粉光谱中红光成分较多,光通量值较小,从而导致低色温(样品2)LED发光效能较低.

传统白光LED的量子效率和发光效能随热沉温度升高一般皆明显下降^[16].但是远程荧光粉白光LED却表现出与传统白光LED的明显区别.如图4所示,随热沉温度升高,两种样品在同一电流下的量子效率



(a) Quantum efficacy



(b) Luminous efficacy

图4 不同电流和热沉温度下的量子效率和发光效能
Fig. 4 The Quantum efficiency and Luminous efficacy under different drive currents and heat sink

和发光效能有一定程度的上升.一般来说,在同一电流点,白光LED的蓝光和黄光辐射通量随热沉温度的升高都有一定程度的下降^[17].但由于远程荧光粉几乎不受芯片温度的影响,温度的增加仅对蓝光激发光源的辐射通量和发光效率有较大影响.

为研究这两种色温的荧光粉量子效率随驱动电流变化的原因,对比样品1和样品2在25°C下量子效率随电流的变化趋势,如图4(a).在相同温度下,随电流增大,样品1量子效率呈下降趋势,且在大电流下趋于平缓;样品2的量子效率的变化趋势刚好相反,且随电流增加变化的范围更大,说明样品2的发光特性在电流的影响下更敏感.一般来说,不同荧光粉,发光性质随电流的变化不同.为得到较为全面的光谱,低色温的荧光粉中添加了其他元素以增加光谱中红光成分.因而,显色指数虽得到提升,但这也导致低色温荧光粉发光的不稳定.

不同温度下样品1蓝光和白光光谱见图5.温度从25°C升高到45°C时,分解白光光谱后得到的蓝光部分和黄光部分光通量的变化率分别为5.2%和3.5%,蓝光部分的变化率略大于黄光部分的变化率,从而导致量子效率和发光效能的比值有所上升,对于样品2亦同理.

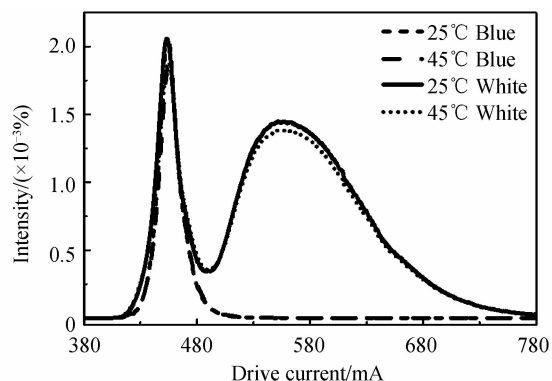


图5 350 mA下样品1的光谱分布
Fig. 5 Spectra distribution of sample 1 under 350 mA

通常,荧光粉类型的白光 LED 量子效率在大电流下呈下降趋势^[18-19],但样品 2 在电流增加条件下量子效率反而上升,原因可能是驱动电流的增大导致蓝光 LED 的发光波长蓝移,使其更加接近其荧光粉最佳激发波长. 电流增大,由于 InGaN/GaN 多量子阱区强烈的极化效应,包括压电极化和自发极化,引起芯片内量子限制斯塔克效应使 InGaN 的禁带宽度增大,使 LED 峰值波长向短波方向移动^[16],如图 6.

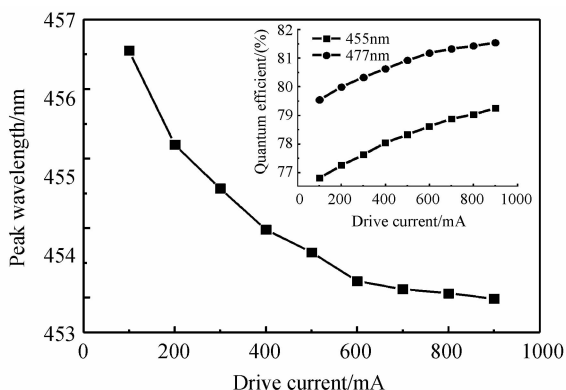


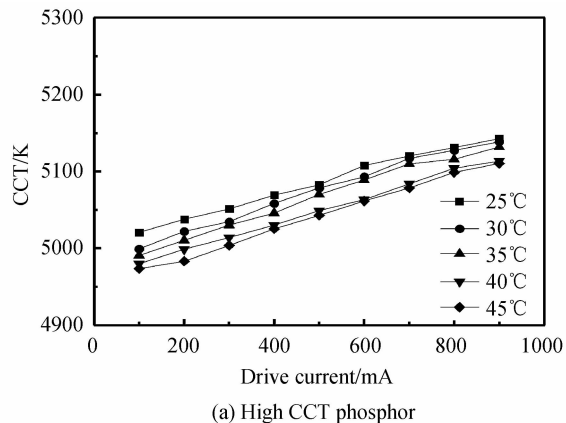
图 6 不同驱动电流下峰值波长漂移趋势,插图为样品 2 量子效率随驱动电流的变化关系

Fig. 6 The shifting trend of the peak wavelength different drive currents; Inset: The quantum efficiency versus the drive current

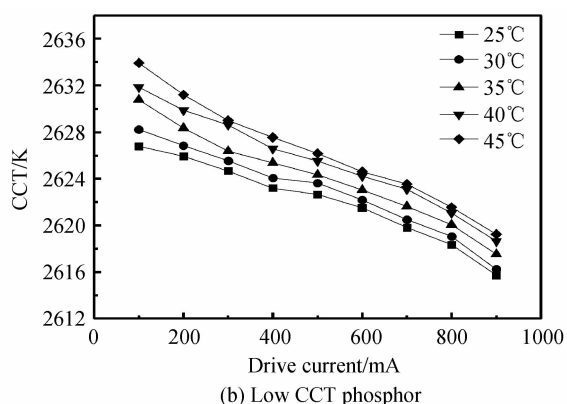
图 6 中,电流从 100 mA 变化至 900 mA 的过程中,激发光源的峰值波长漂移了 3 nm 左右,对荧光粉的发光性质会产生一定影响. 为了验证峰值波长对样品 2 发光的影响,实验分别采用峰值波长为 447 nm 和 453 nm 的蓝光 LED 在热沉温度控制在 25℃ 的条件下激发低色温荧光粉发光,结果如图 6 中的插图所示. 在控制外界条件一致,激发波长不同的情况下,样品 2 在波长 447 nm 的蓝光激发下明显量子效率较高. 因此可以证实,短波激发效果明显是样品 2 量子效率随电流增大而增大的主要原因.

2.2 相关色温测试结果与分析

由图 7 可以看出,样品 1 的 CCT 随电流增大几乎呈线性上升趋势,样品 2 的 CCT 随电流增大呈下降趋势.



(a) High CCT phosphor



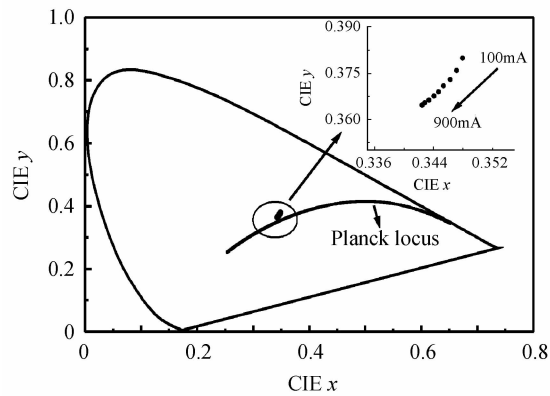
(b) Low CCT phosphor

图 7 CCT 随电流和热沉温度的变化

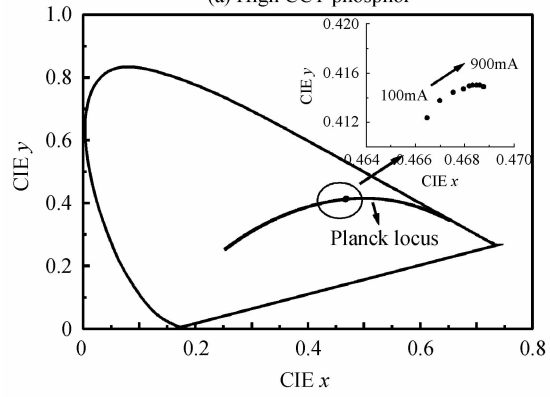
Fig. 7 CCT under different drive currents and heat sink temperature

原因是电流增大,样品 1 的量子效率降低,因此产生的黄光所占比例也会降低,黄蓝光比下降,相关色温升高;同理,样品 2 的相关色温在大电流下呈下降趋势.

图 8 为两种不同色温的样品在 25℃,不同驱动电流下色坐标的漂移情况. 由于驱动电流增大,LED 内部温度升高,样品激发效率产生变化,辐射波长也会发生变化^[20],荧光粉辐射特性的改变,引起样品色坐标的变化. 样品 1 色坐标随电流增大而减小,样品 2 色坐标



(a) High CCT phosphor



(b) Low CCT phosphor

图 8 不同热沉温度下 100~900 mA 的色坐标变化

Fig. 8 The color coordinates under different heat sink in 100~900 mA

标随电流增大而增大并在大电流下趋于饱和. 电流变化引起的色坐标的变化,是导致色温产生变化的原因. 由图 8 可以看出,在电流变化过程中,两种样品的色漂移在色品图中并不明显,尤其是样品 2 色坐标随电流的变化.

为了进一步研究样品的色漂移情况,采用 1960 UCS 色度空间的色度距离 Duv 来衡量色漂移的变化趋势.

$$Duv = \sqrt{(u - u_r)^2 + (v - v_r)^2} \quad (3)$$

式中 (u_r, v_r) 为参考色坐标,将电流为 100 mA 下的相应色坐标作为参考色坐标,然后计算其它电流下的色坐标与该参考色坐标的色度距离. 该变化趋势如图 9,可知样品 1 的 Duv 随电流的变化率远大于样品 2 的 Duv 变化率,表明光谱的不同,尤其是黄光部分的饱满程度是该色品属性随电流变化不同的原因.

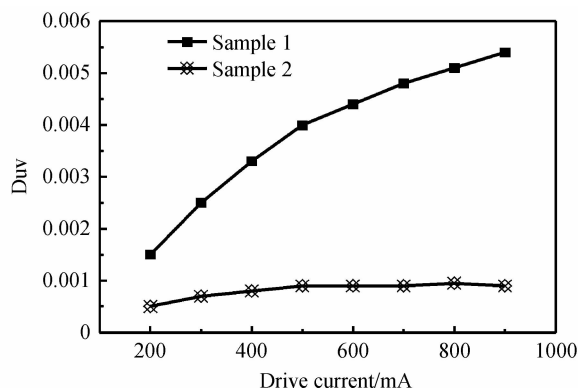


图 9 样品 1 和样品 2 Duv 的变化
Fig. 9 Duv of sample 1 and sample 2

3 结论

通过对两种形状相同但色温不同的球冠状远程荧光粉在不同电流和热沉温度蓝光 LED 激发下的发光性能进行对比,发现高色温 LED 的量子效率和发光效能随电流的增大而减小,低色温 LED 的量子效率和发光效能随电流的增大而升高. 研究表明:电流增大,芯片内量子限制斯塔克效应使 InGaN 的禁带宽度增大,蓝光 LED 峰值波长蓝移,使暖白光在较小峰值波长下取得更好的激发效果. 高色温 LED 的 CCT 变化随电流增加呈上升趋势,但低色温 LED 的 CCT 变化趋势刚好相反,这是因为它们的量子效率随电流变化趋势不同,进而导致色坐标产生的漂移程度不同,从而影响相关色温的变化.

总体来说,低色温 LED 发光性质没有高色温 LED 稳定,原因是加了红光波段的荧光粉之后,显色指数虽有所提高,但是光视效能和稳定性下降;就色特性的稳定性而言,低色温 LED 更稳定,原因是低色温 LED 的光谱较高色温 LED 光谱要宽.

参考文献

- [1] ZHU Yi-ting, NARENDRAN N. Investigation of remote-phosphor white light-emitting diodes with multi-phosphor layers[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49**: 100203.
- [2] HU Run, BIN Cao, LIU Zong-yuan, et al. Modeling the light extraction efficiency of bi-layer phosphors in white LEDs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(12): 1141.
- [3] LUO Xiao-bing, FU Xing, CHEN Fei, et al. Phosphor self-heating in phosphor converted light emitting diode packaging [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **58**(1): 276-281.
- [4] GUO Zi-quan, GAO Yun-lin, LU Yi-jun, et al. Spectrum optimization of tricolor white LEDs at fixed correlated color temperature[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(7): 992-996.
郭自泉,高玉琳,吕毅军,等. 固定相关色温下三基色合成白光 LED 的光谱优化[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(7): 992-996.
- [5] YU Ren-yong, JIN Shang-zhong, CEN Song-yuan, et al. Effect of the phosphor geometry on the luminous flux of phosphor-converted light-emitting diodes[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(23): 1765-1767.
- [6] LIU Zhi-bin, QIAN Ke-yuan, LUO Yi. Influence of phosphor layers with different shapes on white LED's CCT uniformity in space[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, **33**(5): 651-656,671.
刘志彬,钱可元,罗毅. 荧光粉层形状对白光 LED 空间色温均匀性的影响[J]. *半导体光电*, 2012, **33**(5): 651-656,671.
- [7] KANG Dun-yen, WU Enboa, WANG Da-ming. Modeling white light-emitting diodes with phosphor layers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(23): 231102-1-3.
- [8] LIU Zong-yuan, LIU Sheng, WANG Kai, et al. Effects of phosphor's thickness and concentration on performance of white LEDs[C]. *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, ICEPT-HDP 2008. International Conference on, IEEE, 2008: 1-6.*
- [9] MOON K M, AN S H, KIM H, et al. Phosphor concentration and geometry for high power white light emitting diode [C]. *OPTO, International Society for Optics and Photonics, 2010: 76171Y-1-8.*
- [10] NARENDRAN N. Improved performance white LED[C]. *Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005: 594108-1-6.*
- [11] ZHU Yi-ting, NARENDRAN N, GU Yi-min. Investigation of the optical properties of YAG : Ce phosphor[C]. *Optics & Photonics, International Society for Optics and Photonics, 2006: 63370S-1-8.*
- [12] LIU Zong-yuan, LIU Sheng, WANG Kai, et al. Optical analysis of phosphor's location for high-power light-emitting diodes[J]. *IEEE Transactions on*, 2009, **9**(01):65-73.
- [13] PARK S C, RHEE I, KIM J Y, et al. Luminous efficiency of open remote phosphor-converted white-light-emitting diodes [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2012, **60**(7): 1191-1195.
- [14] WANG Yi, MOU Tong-sheng, LI Li. Characterization and measurement of white LED phosphors[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2010, **37**(9): 127-132.
- [15] LI Bing-qian. Luminous efficiency of 1w-level high power white LED [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **26**(4): 314-316,361.
李炳乾. 1W 级大功率白光 LED 发光效率研究[J]. *半导体光电*, 2005, **26**(04):314-316,361.

- [16] LU Yi-jun, LEI Rui-rui, GAO Yu-lin, *et al.* Analysis of luminous efficiency of power LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 313-316.
吕毅军, 雷瑞瑞, 高玉琳, 等. 功率 LED 发光效率分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 313-316.
- [17] TIAN Chuan-jun, ZHANG Xi-yan, ZOU Jun, *et al.* Temperature effect on the photoelectric parameter of high-power LED illumination system [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(1): 96-100.
田传军, 张希艳, 邹军, 等. 温度对大功率 LED 照明系统光电参数的影响[J]. *发光学报*, 2010, **31**(1): 96-100.
- [18] WU Guo-qing, GUO Wei-ling, ZHU Yan-xu, *et al.* Effect of driving current on the phosphor conversion efficiency of high-power white LED[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **3**(10): 1869-1875.
吴国庆, 郭伟玲, 朱彦旭, 等. 驱动电流对大功率白光 LED 荧光粉转换效率的影响[J]. *光电子·激光*, 2012, **3**(10): 1869-1875.
- [19] SONG Guo-hua, SONG Jian-xin, MIU Jian-wen, *et al.* Study on energy conversion efficiency of LED [J]. *Semiconductor Technology*, 2008, **33**(7): 592-595, 634.
宋国华, 宋建新, 缪建文, 等. 白光 LED 能量转换效率的研究[J]. *半导体技术*, 2008, **33**(7): 592-595, 634.
- [20] LIU Li, WU Qing, HUANG Xian, *et al.* Promoting of the phosphor-based white-LED and optical properties[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2007, **28**(6): 890-894.
刘丽, 吴庆, 黄先等. 白光 LED 荧光粉涂敷工艺及光学性质[J]. *发光学报*, 2007, **28**(6): 890-894.