

电流与温度对蓝光 LED 和白光 LED 发光性能的影响

唐燕如¹, 赵帝^{1,2}, 易学专¹, 陈杰¹, 田燕娜¹, 周圣明^{1*}¹中国科学院上海光学精密机械研究所微纳光电子功能材料实验室, 上海 201800;²上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

摘要 研究了在恒温变电流与恒电流变温下蓝光单色芯片的电致发光光谱特征, 以及在这两种模式下蓝光芯片与荧光陶瓷封装形成的白光 LED 的发光性能。结果表明: 在温度一定的条件下, 随着激发电流增大, LED 芯片的发光光谱蓝移; 在电流一定的条件下, 随着蓝光 LED 芯片温度升高, LED 芯片的发光光谱红移; 蓝光芯片发射光谱的改变会影响荧光陶瓷的吸收转换效率, 进而改变白光 LED 的发光性能。

关键词 材料; 发光二极管; 光谱; 峰值波长; 荧光陶瓷; 激发电流; 温度

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL202148.2103003

1 引言

发光二极管(LED)作为第三代照明光源, 具有节能环保、启动无延迟以及能耗低、寿命长等优点, 目前已被广泛应用于交通信号显示、路灯照明、车灯照明、家居照明、高功率场馆照明以及液晶显示器背光源与全彩显示等领域^[1-2]。目前, 白光照明与显示主要采用蓝光 LED 芯片与铈掺杂钇铝石榴石(Ce:Y₃Al₅O₁₂, 简称“Ce:YAG”)黄色荧光转换材料封装形成白光 LED。蓝光 LED 发出的部分蓝光被钇铝石榴石中的铈离子吸收后转换成黄光, 该黄光与未被铈离子吸收的蓝光一起混合形成白光^[3]。随着蓝光 LED 芯片功率的提升, 人们对黄色荧光转换材料的发光性能及热稳定性等提出了更高要求^[4-5]。黄色荧光转换材料主要为荧光粉、荧光玻璃、荧光晶体与荧光陶瓷, 国内外研究人员对不同荧光转换材料的发光性能进行了大量深入研究^[4,6-7], 然而激发条件与环境影响蓝光 LED 芯片发光性能, 进而影响白光 LED 发光方面的相关研究报道较少。

本文采用恒温变电流与恒电流变温两种激发模式, 研究蓝光 LED 芯片电致发光光谱(EL 谱)的变化趋势, 同时采用蓝光 LED 与 Ce:YAG 荧光陶瓷

封装形成白光 LED, 测试其光致发光光谱(PL 光谱)的变化趋势并分析其发光机理, 这对于蓝光 LED 调控以及白光 LED 封装都具有参考价值。

2 实验部分

2.1 蓝光 LED 芯片在恒温变电流条件下的光谱测试

将蓝光 LED 芯片放置在积分球内部的测试支架上, 测试环境温度为当日环境温度(15 °C), 施加 5~1000 mA 的脉冲驱动电流, 使用 HAAS-2000 高精度快速光谱辐射计进行测量, 获得蓝光 LED 在恒温变电流条件下的 EL 谱。由于采用的是脉冲宽度为 60 ms、积分时间为 90 ms 的快速测试条件, 因此可以忽略蓝光 LED 激发的自发热对测试期间温度的影响。

2.2 蓝光 LED 芯片在恒电流变温条件下的光谱测试

将蓝光 LED 固定在积分球内部的控温支架上, 脉冲电流选择 500 mA 以及 1000 mA, 通过控温支架实现 15~145 °C 的变温环境。采用 HAAS-2000 高精度快速光谱辐射计进行测量, 获得蓝光 LED 在各个温度下的 EL 谱。

收稿日期: 2021-01-28; 修回日期: 2021-03-24; 录用日期: 2021-04-20

基金项目: 中国科学院国际合作项目(181231KYSB20160005)、上海市科委创新项目(19511104600)

通信作者: *zhousm@siom.ac.cn

2.3 白光 LED 在恒温变电流以及恒电流变温两种激发模式下的光谱测试

首先自制 Ce:YAG 荧光陶瓷,并将其加工至合适尺寸,然后采用透明硅胶将其封装在蓝光 LED 芯片上形成白光 LED。

将该白光 LED 固定在积分球内部的支架上,进行恒温变电流模式下的激发测试。测试环境温度为当日环境温度(15 °C),施加 150~1000 mA 的脉冲驱动电流,使用 HAAS-2000 高精度快速光谱辐射计进行测量,获得白光 LED 在恒温变电流条件下的 PL 谱与光电数据。

将白光 LED 固定在积分球内部的控温支架上,进行恒电流变温模式下的激发测试。脉冲电流选择 500 mA 和 1000 mA,通过控温支架实现 15~145 °C 的变温环境。使用 HAAS-2000 高精度快速光谱辐射计进行测量,获得白光 LED 在恒电流变温条件下的 PL 谱与光电数据。

3 结果与分析

3.1 蓝光 LED 的峰值波长随电流的变化

蓝光 LED 的峰值波长会直接影响白光 LED 中黄色荧光转换材料对蓝光的吸收转换效率,因此,在白光 LED 使用过程中,其蓝光 LED 芯片的峰值波长的改变会直接影响白光 LED 的色温、色坐标以及显色指数等。故而在封装白光 LED 时,应重点考虑蓝光 LED 峰值波长变化的影响。

图 1 是蓝光 LED 在不同激发电流下的光谱曲线,可见,随着激发电流增大,蓝光芯片的峰值波长蓝移。峰值波长的具体变化如图 2 所示,可见,在 5~1000 mA 的电流范围内,蓝光 LED 芯片的峰值

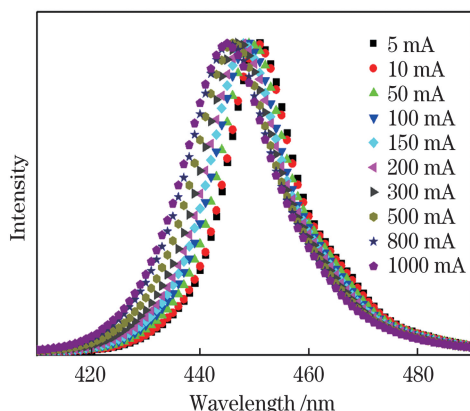


图 1 蓝光 LED 在不同激发电流下的 EL 谱

Fig. 1 Electroluminescent (EL) spectra of blue LED with different excitation current values

波长由 451.1 nm 减小到 444.8 nm,同时发射峰的半峰全宽(FWHM)展宽。波长蓝移的原因是注入载流子对极化场的屏蔽效应以及载流子填充效应。由于测试的积分时间短,器件自发热导致的热效应影响较弱,因此并未出现其他文献中峰值波长随电流增加先蓝移后红移的现象^[8]。同时,在如图 2 所示的恒温变电流条件下,随着电流增大,蓝光 LED 发射峰的半峰全宽展宽,发光效率下降。随着电流增大,载流子泄漏且内部损失增大,加剧了蓝光 LED 芯片的 droop 效应,因此发光效率下降;电流升高后,载流子注入效率增加,能带填充效应增强,进而导致半峰全宽展宽。

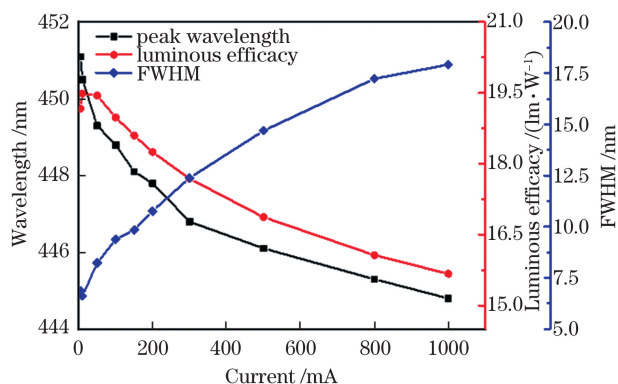


图 2 蓝光 LED 在不同激发电流下的发光参数

Fig. 2 Luminescence parameters of blue LED with different excitation current values

3.2 蓝光 LED 的峰值波长随温度的变化

图 3 是蓝光 LED 在一定电流条件和不同温度下的光谱曲线。可见,随着温度升高,蓝光芯片的峰值波长红移。500 mA 与 1000 mA 激发电流下峰值波长的具体变化如图 4 所示。可见,在 15~145 °C 温度范围内,500 mA 激发电流下蓝光 LED 芯片的峰值波长由 446.1 nm 增至 449.3 nm,1000 mA 激发电流下蓝光 LED 芯片的峰值波长由 445 nm 增至 448.3 nm。波长红移的原因是温度升高产生的热效应引起了带隙收缩。随着温度升高,电子在晶体中的共有化运动加快,能级分裂严重,禁带宽度 E_g 变小,因此峰值波长向长波长方向移动,即峰值波长红移^[9]。同时由图 4 可以看出,在恒电流变温条件下,随着温度升高,蓝光 LED 的发光效率有所增大。这主要是因为温度升高后,蓝光 LED 的发射峰红移,红移后波长的视见函数增加,导致光通量略有增加,因此发光效率增大。但当温度超过 130 °C 后,蓝光 LED 芯片发射峰的红移量减小,发光效率的增量也明显减小。

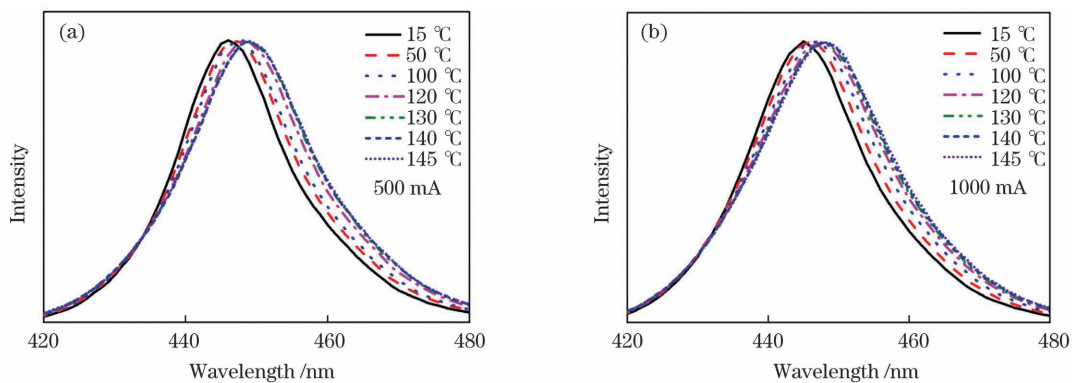


图 3 恒定激发电流下蓝光 LED 在不同温度下的光谱曲线。(a) 激发电流 500 mA; (b) 激发电流 1000 mA

Fig. 3 Spectra of blue LED under the conditions of different temperatures and constant excitation current values.

(a) Excitation current of 500 mA; (b) excitation current of 1000 mA

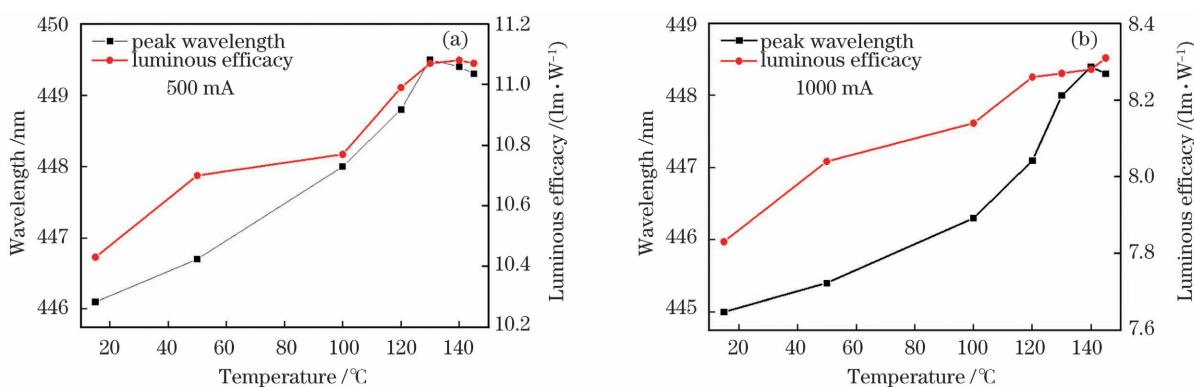


图 4 不同激发电流下蓝光 LED 的发光参数随温度的变化。(a) 激发电流 500 mA; (b) 激发电流 1000 mA

Fig. 4 Variations of luminescence parameters of blue LED with temperature at different excitation current values.

(a) Excitation current of 500 mA; (b) excitation current of 1000 mA

3.3 白光 LED 在恒温变电流及恒电流变温两种激发模式下的光电性能

图 5 为 Ce:YAG 荧光陶瓷在室温下的吸收与发射光谱。从图 5 中可以看出: Ce:YAG 在 440~460 nm 范围内的蓝光吸收效率受到了蓝光波长的影响, 而其对应的最佳吸收波长为 460 nm。可见,

蓝光芯片在使用过程中, 其峰值波长会随温度与激发电流的改变而改变, 这必将会影响荧光陶瓷对该蓝光芯片所发出的蓝光的吸收转换效率。

图 6 为蓝光 LED 芯片激发 Ce:YAG 荧光陶瓷的 PL 谱, 可以看出: 随着激发电流增加, 蓝光芯片的发射峰(400~480 nm)蓝移, 这一结果与单独蓝

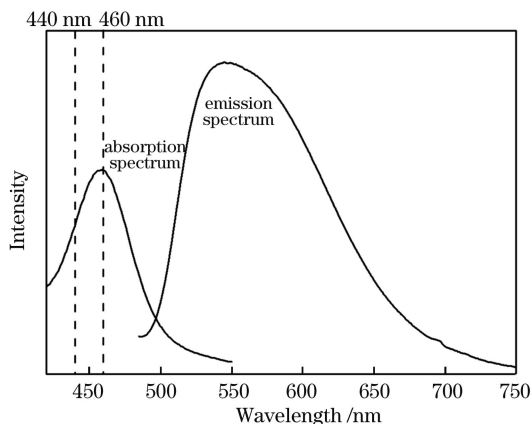


图 5 Ce:YAG 荧光陶瓷在室温下的吸收与发射光谱

Fig. 5 Absorption and emission spectra of Ce:YAG phosphor ceramic at room temperature

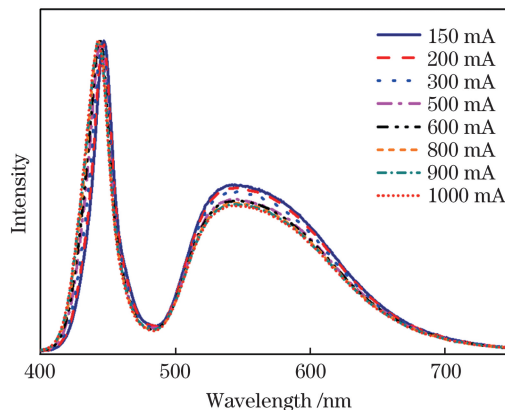


图 6 不同激发电流下白光 LED 的 PL 谱

Fig. 6 Photoluminescence (PL) spectra of white LED with different excitation current values

光 LED 芯片的测试结果一致。500~700 nm 的发射峰为 Ce:YAG 荧光陶瓷中的 Ce^{3+} 吸收蓝光转换形成的发射光。随着激发电流增加, Ce:YAG 荧光陶瓷发射峰的峰值波长保持在 540 nm 不变, 但荧光陶瓷的相对发射峰强度有所减弱。由图 5 可知, 在 440~460 nm 范围内, Ce:YAG 荧光陶瓷对蓝光的吸收效率随波长的增加而增大, 因此当蓝光波长蓝移时, Ce:YAG 荧光陶瓷对蓝光的吸收效率下降, 导致其发射峰强度也下降。图 7 为 150~1000 mA 激发电流下白光 LED 发光参数的具体变化情况。

在激发电流恒定的条件下, 通过调节环境温度测得的白光 LED 的 PL 谱如图 8 所示。随着温度

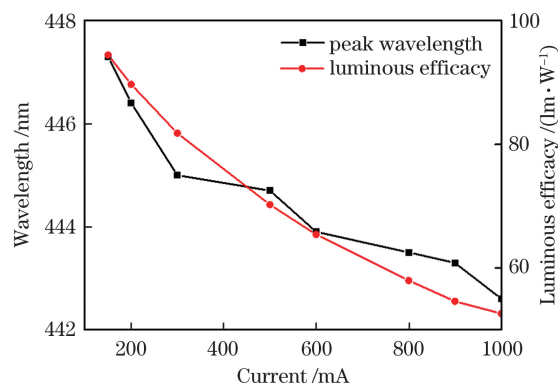


图 7 白光 LED 发光参数随激发电流的变化

Fig. 7 Variations of luminescence parameters of white LED with excitation current values

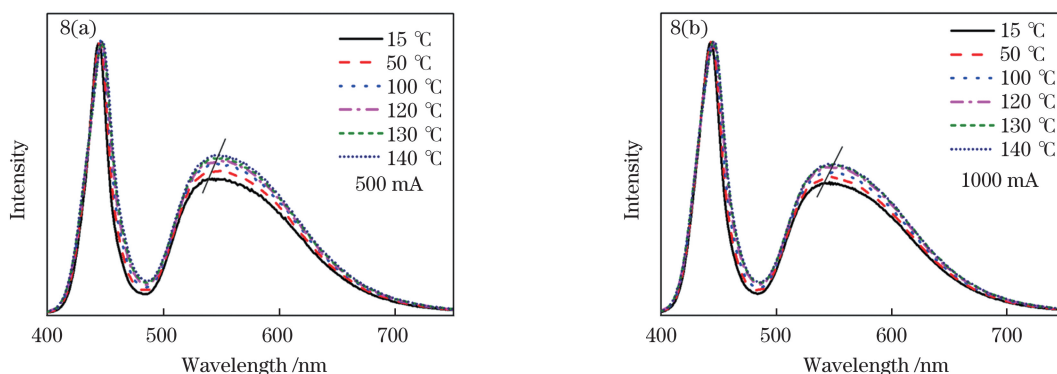


图 8 恒定激发电流下白光 LED 在不同温度下的 PL 谱。(a) 激发电流 500 mA; (b) 激发电流 1000 mA

Fig. 8 PL spectra of white LED under the conditions of different temperatures and constant excitation current values.

(a) Excitation current of 500 mA; (b) excitation current of 1000 mA

升高, 蓝光 LED 芯片的发射峰 (400~480 nm) 红移, 这一结果与单独蓝光芯片的测试结果一致。随着温度升高, Ce:YAG 荧光陶瓷发射峰的峰型发生了明显变化: 首先, Ce:YAG 荧光陶瓷发射峰的峰值波长随着温度升高而红移, 在 500 mA 激发电流下荧光陶瓷发射峰的峰值波长从 15 °C 时的 540 nm 红移至 140 °C 时的 548 nm, 而在 1000 mA 激发电流下荧光陶瓷发射峰的峰值波长从 15 °C 时的 540 nm 红移至 140 °C 时的 550 nm。Ce:YAG 荧光陶瓷发射峰红移的主要原因是温度升高后 Ce:YAG 荧光陶瓷中的声子散射增加, 因此 Ce^{3+} 的发光峰红移并展宽。其次, 随着温度升高, 荧光陶瓷发射峰的相对强度增加。结合图 5 可知 Ce:YAG 荧光陶瓷对 440~460 nm 范围蓝光的吸收效率随着波长的增加而增大, 又由于蓝光芯片的发射峰随温度升高而红移, 荧光陶瓷对红移后的蓝光的吸收效率略有增加, 因此荧光陶瓷的黄光发射峰相对于透过的蓝光的强度有所增加。随着温度升高, 白光 LED 的发光效率有所下降: 500 mA 激发条件下白光

LED 在 15 °C 时的发光效率为 71.64 lm/W, 在 140 °C 时下降为 66.33 lm/W; 1000 mA 激发条件下白光 LED 在 15 °C 时的发光效率为 50.59 lm/W, 在 140 °C 时降为 47.35 lm/W。温度升高导致白光 LED 发光效率下降的原因主要是温度升高会导致 Ce:YAG 荧光陶瓷中处于激发态的荧光转换离子 Ce^{3+} 的非辐射跃迁加剧, Ce^{3+} 对蓝光的转换效率下降, 从而导致白光 LED 的发光效率下降。

Ce:YAG 荧光陶瓷对蓝光的有效吸收波长范围较宽, 对 450~470 nm 范围内的光都具有较高的吸收效率。蓝光 LED 发光峰值波长受电流影响的改变幅度约为 6 nm, 受温度影响的改变幅度更小, 约为 3 nm; 因此, 蓝光 LED 发射峰位的移动对 Ce:YAG 荧光陶瓷蓝光吸收效率的影响较小。

图 9 为同一白光 LED 在不同测试条件下的色温变化。由图 9(a) 可以看出, 随着激发电流增大, 白光 LED 的色温 (CCT) 升高。随着注入电流增加, 蓝光 LED 发射的蓝光光子数增加, 在未改变 Ce:YAG 荧光陶瓷的条件下, 荧光陶瓷吸收和转换

蓝光的效率不变,而入射荧光陶瓷的蓝光光子增加,所以透过荧光陶瓷的蓝光光子增加,蓝光在形成的白光中相对于黄光的比例增加,因此色温升高。由图 9(b)可以看出,当环境温度低于 100 °C 时,白光

LED 的色温变化不明显,而当温度超过 100 °C 后,色温明显升高。这主要是因为温度升高影响了荧光陶瓷对蓝光的吸收效率和转换效率,导致白光 LED 中的蓝光相对于黄光的比例增大。

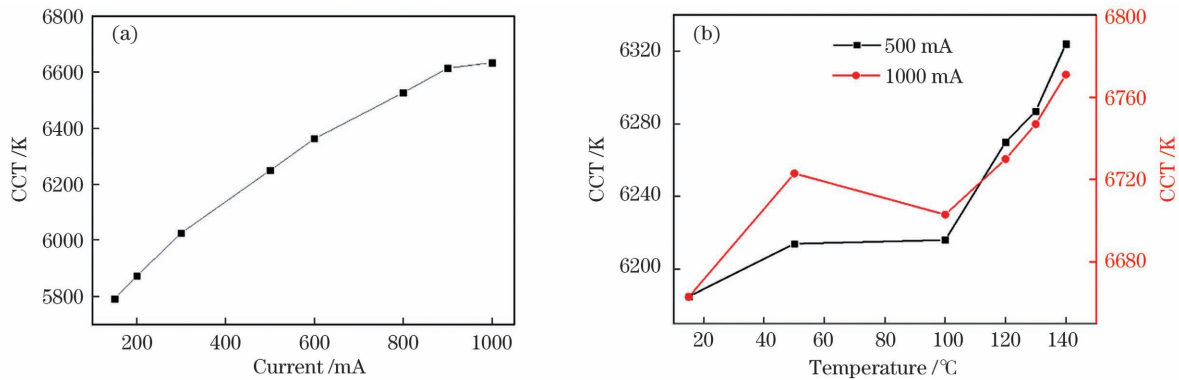


图 9 不同测试条件下白光 LED 的色温。(a)恒温变电流测试条件;(b)恒电流变温测试条件

Fig. 9 Correlated color temperature (CCT) of white LED under different testing conditions. (a) Constant temperature and variable currents testing; (b) constant current and variable temperatures testing

白光 LED 的色温改变会显著影响照明效果,因此,在白光 LED 设计中需要特别关注蓝光 LED 发光性能的变化规律,同时据此调整荧光陶瓷,以保证发光性能的稳定性。可以通过调整 Ce:YAG 荧光陶瓷的厚度以及 Ce³⁺ 掺杂量来调节白光 LED 发光光谱中蓝光与黄光的相对比例,实现对色温的稳定控制。

4 结 论

在恒温变电流和恒电流变温两种模式下,研究了蓝光 LED 芯片的 EL 谱与白光 LED(Ce:YAG 荧光陶瓷和蓝光 LED 芯片封装)的 PL 谱的变化规律。结果发现:在温度一定的条件下,随着激发电流增加,蓝光 LED 芯片的发射峰蓝移;而在激发电流一定的条件下,随着温度升高,蓝光 LED 芯片的发射峰红移。在恒温条件下,白光 LED 中荧光陶瓷的发光峰位不随激发电流的增加而改变,仅是发射峰的相对强度随电流升高而降低;在激发电流一定的条件下,白光 LED 中荧光陶瓷的发光峰随环境温度的升高而红移,同时发射峰的相对强度随温度升高而增大。

白光 LED 照明产品的工作条件与环境会直接影响产品的光学参数。对于照明产品应用和品质管理来说,需要严格匹配荧光转换材料与蓝光 LED 芯片两者的吸收波长与发射波长,同时注意工作环境温度对产品性能的影响。

参 考 文 献

[1] Su X L, Wang C, Ying L Y, et al. Research on auto-

split GaN-based vertical structure LED [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1223004.

苏旭良, 王灿, 应磊莹, 等. 自分裂 GaN 基垂直结构 LED 研究 [J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1223004.

[2] Li Z T, Wang H Y, Yu B H, et al. High-efficiency LED COB device combined diced V-shaped pattern and remote phosphor [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(4): 042301.

[3] Tang Y R, Zhou S M, Chen C, et al. Composite phase ceramic phosphor of Al₂O₃-Ce:YAG for high efficiency light emitting [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17923-17928.

[4] Tang Y R, Zhou S M, Yi X Z, et al. The Cr-doping effect on white light emitting properties of Ce:YAG phosphor ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100(6): 2590-2595.

[5] Tang Y R, Zhou S M, Yi X Z, et al. The characterization of Ce/Pr-doped YAG phosphor ceramic for the white LEDs [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 84-89.

[6] Ni Y, Wang K, Zhou S M, et al. Preparation and research of Ce, Pr:YAG fluorescent transparent ceramics applied to white LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0206005.

倪屹, 王凯, 周圣明, 等. 可用于白光 LED 的 Ce, Pr:YAG 荧光透明陶瓷的制备及研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0206005.

[7] Jin Y S, Guo X C, Cao D H, et al. Luminescence properties of Ce:YAG single crystals and ceramics under laser excitation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1003001.

靳亚硕, 郭向朝, 曹顿华, 等. 激光激发 Ce:YAG 单

- 晶与陶瓷的发光性能[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1003001.
- [8] Wang Q, Liu N Y, Wang J J, et al. The effect of current and temperature stress on the electrical spectral characteristics of LED[J]. *Materials Research and Application*, 2016, 10(3): 186-190.
- 王巧, 刘宁扬, 王君君, 等. 电流及温度应力对 LED 电致发光光谱特性的影响[J]. *材料研究与应用*, 2016, 10(3): 186-190.
- [9] 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 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.

Current and Temperature Effects on Luminescence Properties of Blue and White LEDs

Tang Yanru¹, Zhao Di^{1,2}, Yi Xuezhuan¹, Chen Jie¹, Tian Yanna¹, Zhou Shengming¹

¹Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Functional Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²College of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract

Objective The third generation of lighting source, light emitting diode (LED), has the advantages of energy savings and environmental protection, no startup delay, low energy consumption, and long life. As a result, it is widely used in traffic signal display, street lighting, car lighting, home lighting, high-power stadium lighting, liquid crystal display backlight, full-color display, and other fields. Currently, the white LED which is composed of blue LED chips and cerium-doped yttrium aluminum garnet ($\text{Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, abbreviated as Ce:YAG) yellow phosphor conversion materials is mainly used for white light illumination and display. Part of the blue light emitted by the blue LED is absorbed by the cerium ion in the yttrium aluminum garnet and converted into yellow light, which is mixed with the remaining blue light to form white light. As the power of the blue LED chips increases, the requirements for the luminescence performance and thermal stability of yellow phosphor conversion materials also increase. Yellow phosphor conversion materials are mainly phosphor powder, phosphor glass, phosphor crystal, and phosphor ceramics. Researchers at home and abroad have conducted several in-depth studies on the luminescence properties of phosphor conversion materials. However, there are only a few reports on the effect of excitation conditions and environment on the luminescence performance of blue LED chips and then on the luminescence of white LED chips.

Methods The changing trend of blue LED chip electroluminescence (EL) spectra is studied based on two excitation modes—constant temperature and constant current. Ce:YAG phosphor ceramic has been made and processed to a suitable size and encapsulated on the blue chip to form a white LED. The white LED is fixed inside the integrating sphere's bracket to perform a constant temperature and variable current excitation test. The ambient temperature of the test was 15 °C, and a pulse driving current of 150–1000 mA was applied. The photoluminescence (PL) spectra and the photoelectric data of the white LED with constant temperature and variable currents were measured using the HAAS-2000 high-precision rapid spectroradiometer. The white LED was fixed on the temperature control bracket inside the integrating sphere to perform the excitation test with constant current and variable temperatures. Pulse currents of 500 and 1000 mA were selected, and a variable temperature environment of 15–145 °C was applied to the temperature control bracket. The PL spectra and the optoelectronic data of the white LED under the constant current and variable temperature conditions were measured using the HAAS-2000 high-precision rapid spectroradiometer. The results have a reference value for the blue LED control and white LED encapsulation.

Results and Discussions The EL spectra of the blue LED chip and the PL spectra of the white LED (Ce:YAG phosphor ceramic and blue LED chip package) are studied with two modes of constant temperature and constant current. The results show that the emission peak of the blue LED chip generates a blue shift with the increase of excitation current at a certain temperature (Fig. 1). Under the condition of constant excitation current, with the increase of temperature, the emission peak of the blue LED chip appears red shift (Fig. 3). Under constant

temperature conditions, the emission peak of white LED does not change with the increase of excitation current. However, the relative intensity of the emission peak decreases with the increase of current (Fig. 6). When the excitation current of the white LED is a fixed value, the emission peak of the phosphor ceramics is redshifted with the increase of ambient temperature. The relative intensity of the emission peak increases with the increase of ambient temperature (Fig. 8). With the increase of the excitation current, the color temperature of white LED increased. When the ambient temperature is less than 100 °C, the color temperature of white LED does not change significantly, while when the temperature exceeds 100 °C, the color temperature increases significantly (Fig. 9).

Conclusions Under constant temperature conditions, the emission peak of a white LED does not change as the excitation current increases; whereas, the relative intensity decreases. When the excitation current of a white LED remains constant, the emission peak of phosphor ceramics redshifts as the ambient temperature increases. As a result, the relative intensity of the emission peak increases with the increase of the ambient temperature. Therefore, the working conditions and the environment of white LED lighting affect the optical parameters of the white lighting products. For the application and the quality management of lighting products, it is necessary to strictly match the absorption and emission wavelengths of phosphor conversion materials and blue light LED chips, as well as pay attention to the influence of working environment temperature on product performance.

Key words materials; light emitting diode; spectrum; peak wavelength; phosphor ceramic; excitation current; temperature

OCIS codes 160.2540; 230.3670