

基于 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的白光 LED 器件的电流稳定性研究

殷录桥^{1,2}, 张豆豆^{2,3}, 王胜^{2,3}, 严宇贤^{2,3}, 张建华^{3*}

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072;

²上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444;

³上海大学新型显示技术及应用集成教育部重点实验室, 上海 200072

摘要 大多数针对 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的应用研究主要集中于绿光发射的 LED, 应用于 WLED 的报道较少, 为此对基于 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的白光 LED 器件的电流稳定性进行研究。首先通过热注入法制备 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点并测试其吸收光谱和发射光谱, 吸收峰和发射峰分别为 502 nm 和 512 nm。然后将 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点与紫外光固化胶混合形成 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点胶体, 叠加红色荧光粉制作两种不同封装结构的白色发光二极管(WLED), 分别为 WLED I 和 WLED II。在 10 mA 的电流下, WLED I 的显色指数达到 92.1, 相关色温为 4323 K, 流明效率为 33.04 lm/W, 三个指标均高于 WLED II。最后分别对 WLED I 和 WLED II 进行电流稳定性测试。在将驱动电流从 10 mA 慢慢增加到 150 mA 以及在 720 min 的通电时间和 15 mA 的驱动电流两种条件下, 分别测试两种 WLED 器件的性能。结果表明, WLED I 显示出更稳定的变化趋势。

关键词 光学器件; CsPbBr₃ 钙钛矿量子点; 白色发光二极管; 显色指数; 电流稳定性

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1923002

Research on Current Stability of White LED Devices Based on CsPbBr₃ Perovskite Quantum Dots

Yin Luqiao^{1,2}, Zhang Doudou^{2,3}, Wang Sheng^{2,3}, Yan Yuxian^{2,3}, Zhang Jianhua^{3*}

¹School of Mechatronic and Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

²School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

³Key Laboratory of Advanced Display and System Applications, Ministry of Education, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract Most studies on the application of CsPbBr₃ perovskite quantum dots mainly focus on LED with green light emission, while few reports are applied to WLED. Therefore, the current stability of white LED devices based on CsPbBr₃ perovskite quantum dots is studied. First, CsPbBr₃ perovskite quantum dots are prepared by thermal injection method and their absorption and emission spectra are tested. The absorption and emission peaks are 502 nm and 512 nm, respectively. Then the CsPbBr₃ perovskite quantum dots are mixed with ultraviolet-curable adhesive to form a CsPbBr₃ perovskite quantum dot colloid, and red phosphors are superimposed to make two white light-emitting diodes (WLEDs) with different packaging structures, WLED I and WLED II. Under a current of 10 mA, WLED I has a color rendering index of 92.1, a correlated color temperature of 4323 K, and a lumen efficiency of 33.04 lm/W. All three indicators are higher than WLED II. Finally, WLED I and WLED II are tested for current stability. The performances of the two WLED devices are tested under the conditions of slowly increasing the drive current from 10 mA to 150 mA, switching time of 720 min and driving current of 15 mA. The

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-30; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(51725505, 51605272)、上海市科委项目(20010500100)

通信作者: *jh Zhang@oa.shu.edu.cn

results show that WLED I shows a more stable trend of change.

Key words optical devices; CsPbBr₃ perovskite quantum dots; white light-emitting diode; color rendering index; current stability

OCIS codes 230.3670; 160.2540; 220.2945

1 引言

发光二极管(LED)由于其高亮度和长寿命而被广泛用作固态光源^[1]。通常,钇铝石榴石(YAG)和氮化物基磷光体因具有高的热稳定性和湿气稳定性等优点而被选作颜色转换器。但是在相同的电压下荧光粉和芯片的发光效率不同,导致所制备的发光二极管的色彩稳定性不好,显色指数(CRI)较低^[2]。在过去的十年中,量子点(Quantum Dots, QD)由于尺寸限制效应而具有新颖的光电特性,在纳米技术中得到了重视^[3-4]。QD具有可控的能带隙和出色的色纯度等优点^[5],可以在许多潜在的应用中使用,尤其是在照明设备上。2020年,胡雅萌等^[6]用蓝光LED芯片激发绿色和红色CdSe/ZnS量子点/硅胶复合薄膜,制备出热稳定性较好的WLED(White LED)。但是基于Cd²⁺的量子点材料是不环保的,有毒,而且还会恶化全球水资源和环境的质量^[7-8],不能在照明或者显示方面得到广泛的应用。传统的II-VI族量子点(CdSe、InP和InAs等)的发光比较强烈地依赖于其量子限域效应,发光位置会随着温度的改变而改变,因此寻找无毒的量子点材料显得尤为重要。

钙钛矿量子点作为一种新兴的纳米材料,具有荧光量子产率高、半峰宽窄以及荧光波长可以覆盖整个可见光区的特点,是近年来的研究热点^[9-10]。与传统半导体材料相比,CsPbBr₃钙钛矿量子点的荧光性能更加优异,在太阳能电池、发光二极管、光探头和激光器件等应用研究领域受到广泛关注。2015年,Song等^[11]首次报道了全无机钙钛矿量子点CsPbX₃(X=Cl, Br, I)的制备方法,制备了基于全无机钙钛矿CsPbX₃(X=Cl, Br, I)纳米晶体的蓝色、绿色和黄色量子点发光二极管。同年,Natalia等使用钙钛矿CsPbBr₃薄膜制备出在527 nm波长处发绿光的LED^[12]。2016年,Song等^[13]使用InGaN蓝光芯片激发具有CsPbBr₃量子点的乙基纤维素和Sr₂Si₅N₈:Eu²⁺红色荧光粉,可以制备出WLED,在20 mA的正向偏置电流下,实现了67.93的CRI,发光光效(Lumen Efficiency, LE)为65.78 lm/W,相关色温(CCT)为7540 K。2019年,吴江等^[14]制备了CsPbBr₃量子点微晶,紫

外光(波长为360 nm)的绿光发射,发射主峰位于517 nm。2021年,曾凡菊等^[15]使用由锡掺杂的CsPbBr₃量子点制备的WLED在白光范围内实现可调色坐标(*x*方向的色坐标为0.3179~0.3596,*y*方向的色坐标为0.3174~0.3665)和从6119 K到3128 K的可调CCT。

大多数CsPbBr₃钙钛矿量子点的应用研究主要集中于绿光发射的LED,应用于WLED的报道较少,并且没有实现较好的CRI。鉴于此,本文制备了CsPbBr₃钙钛矿量子点,测试了量子点的吸收和发射,并结合红色荧光粉制备出两种不同结构的WLED,在10~150 mA的驱动电流范围内对两种WLED器件的电致发光(EL)光谱、CRI、CCT和LE等光学参数进行了测试,并在720 min的通电时间、15 mA的驱动电流下测试了两种WLED器件的CRI、CCT和LE,由此来研究WLED器件的电流稳定性。

2 实验

2.1 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的制备

将0.188 mmol的溴化铅(PbBr₂)和0.188 mmol的油胺溴(OAmBr)与5 mL的十二烷加入到50 mL的三颈烧瓶中。在氮气保护和120 °C的环境下排气10 min,随后在三颈烧瓶中加入0.5 mL的油酸(OA)和0.5 mL的油胺(OAm)。待PbBr₂完全溶解后,将反应温度提高到180 °C。在另一个烧瓶中,将0.07828 g的硬脂酸(Csst)与3 mL的十二烷加热到140 °C,使其溶解。将溶解后的Csst溶液快速注入反应溶液中,用冰水浴快速冷却,再加入3倍体积的乙酸乙酯并以7000 r/min的转速离心3 min,沉淀后被重新分散到庚烷中,该过程重复一次。

PNC-PECA-OVS复合材料的制备。将0.1 g的 α -氰基丙烯酸乙酯(ECA)和0.05 g辛基乙基辛基倍半硅氧烷(OVS)加入1 mL的CsPbBr₃纳米晶庚烷溶液(质量浓度为15 mg/mL)中搅拌5 min,在大气环境下将该混合溶液滴涂在衬底上形成复合材料^[15-17]。

2.2 白光LED器件的制备

从市场购买了发射蓝光波长为450 nm的

InGaN LED 芯片、硅胶 (OE-6550A 和 OE-6550B) 和紫外光固化 (UV) 胶 (U-613)。首先将 InGaN LED 芯片和陶瓷基板通过银胶进行粘合, 在真空干燥箱中 150 °C 的条件下放置 1 h 进行固化, 使用金线实现芯片和陶瓷基板的电气互联; 接下来将 250 μL 的 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点与 0.48 g 的 UV 胶在真空搅拌机中混合均匀, 从而形成 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点胶体; 最后将红色荧光粉与硅胶 6550A 和硅胶 6550B 按照质量比为 1:1.3:1.3 进行混合, 同样在真空搅拌箱中进行均匀混合。WLED I 器件的结构如图 1(a) 所示, 首先将适量的红色荧光粉/硅胶混合体点涂在先前制备的 LED 器件上, 在真空干燥箱中 150 °C 的条件下放置 15 min 进行固化; 然后将适量的 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点胶体涂覆在已经固化的红色荧光粉/硅胶混合体表面, 随后用紫外灯进行照射以完成 WLED I 器件的制备。WLED II 器件的结构如图 1(b) 所示, 先将适量的 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点胶体点涂在先前制备的 LED 器件上, 并通过紫外灯的照射进行固化, 随后将适量的红色荧光粉/硅胶混合体涂覆在已经固化的 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点胶体表面, 在真空干燥箱中 150 °C 的条件下放置 15 min 进行固化, 完成 WLED II 器件的制备。

3 分析与讨论

3.1 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的形貌和尺寸表征

图 2(a) 为 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点在透射电镜

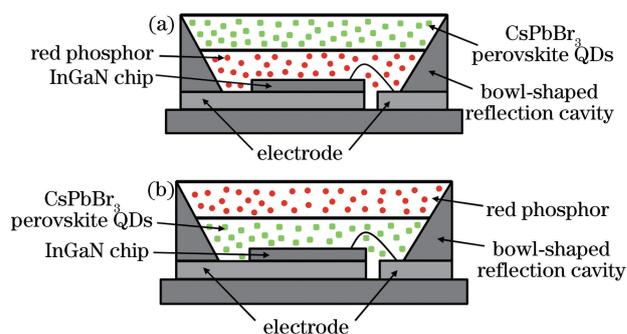
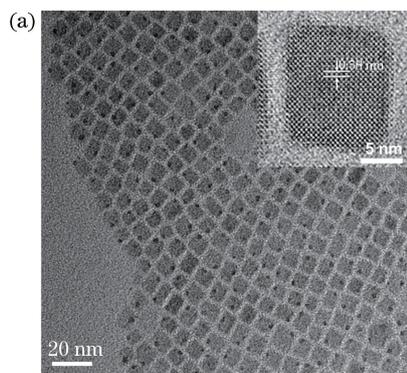


图 1 WLED 的结构。(a) WLED I 的结构;

(b) WLED II 的结构

Fig. 1 Structure of WLED. (a) Structure of WLED I ;

(b) structure of WLED II

(TEM) 下的图片。从图 2(a) 可以看到, CsPbBr₃ 钙钛矿量子点为立方体结构, 并且分散十分均匀。图 2(a) 插图 为 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的高分辨透射电镜 (HRTEM) 图片。经过测量, CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的晶格条纹间距为 0.58 nm。随机选取 100 个量子点进行粒径测量, 得到 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的粒径分布如图 2(b) 所示。从图 2(b) 可以看到, CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的粒径分布在 5.16~7.92 nm 之间, 平均粒径大小为 6.55 nm。

3.2 白光 LED 器件的光致发光特性

使用荧光光谱仪和荧光分光光度计对 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点/甲苯溶液进行光致发光 (PL) 和紫外-可见吸光光谱的测试, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看到, CsPbBr₃ 钙钛矿量子点/甲苯溶液在

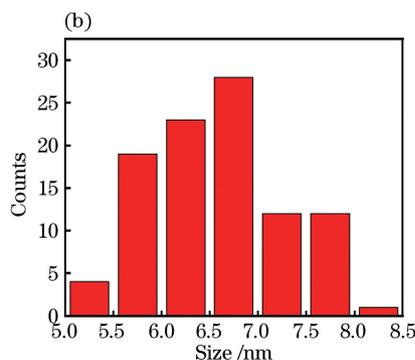


图 2 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的 TEM 图片和粒径分布。(a) CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的 TEM 图片, 插图 为 HRTEM 图片;

(b) CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的粒径分布

Fig. 2 TEM image and particle size distribution of CsPbBr₃ perovskite quantum dots. (a) TEM image of CsPbBr₃ perovskite quantum dots, illustration shows HRTEM image; (b) particle size distribution of CsPbBr₃ perovskite quantum dots

502 nm 波长处有吸收峰, 发射峰位于 512 nm, 与吸收光谱相比, 光致荧光发射光谱显示出了明显的斯托克斯位移, 该现象在半导体材料中是非常常见的, 可以使用谱扩散/激子弛豫过程来解释。

3.3 白光 LED 器件的电致发光特性

使用积分球 HAAS-2000 对制备的 WLED I 和 WLED II 分别进行电致发光 (EL) 性能测试, 结果如图 4 所示。从图 4(a) 可以看到, 在红色荧光粉

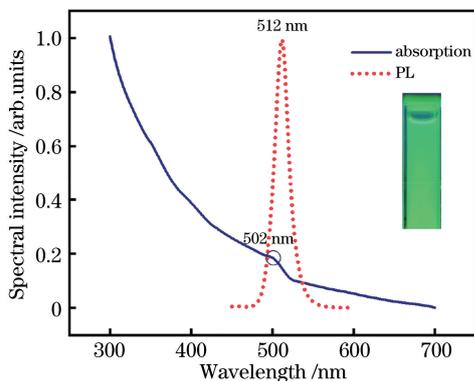


图 3 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点/甲苯溶液的紫外可见吸收/PL 光谱, 插图为 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点/甲苯溶液在紫外线照射下的情况

Fig. 3 Ultraviolet visible absorption/PL spectrum of CsPbBr₃ perovskite quantum dots/toluene solution, illustration shows CsPbBr₃ perovskite quantum dots/toluene solution under UV irradiation

上方加上 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点之后, 绿色量子点吸收了透过荧光粉层的部分蓝光而发出绿光, 因此蓝光光谱强度变弱, 绿光光谱强度变强; 同时, 红光光谱强度也有轻微的变化, 这可能是由荧光粉层中微米尺寸的荧光粉颗粒引起光后向散射, 从而导致红色荧光粉颗粒和绿色量子点的发射强度增加^[17]。在 10 mA 的驱动电流下, 测试得出 WLED I 的 CRI 为 92.1, CIE 为 (0.3656, 0.3601), LE 为 33.04 lm/W, CCT 为 4324 K, 图 4(a) 插图 WLED I 在 10 mA 的驱动电流下的发光情况。从图 4(b) 可以看到, WLED II 的 CRI 为 89.4, CIE 为 (0.3332, 0.3379), LE 为 29.24 lm/W, CCT 为 5474 K, 图 4(b) 插图 WLED II 在 10 mA 的驱动电流下的发光情况。比较图 4 可以看到, 在 10 mA 的电流下, WLED I 的 CRI 比 WLED II 增加了 2.7, LE 增加了 3.8 lm/W。

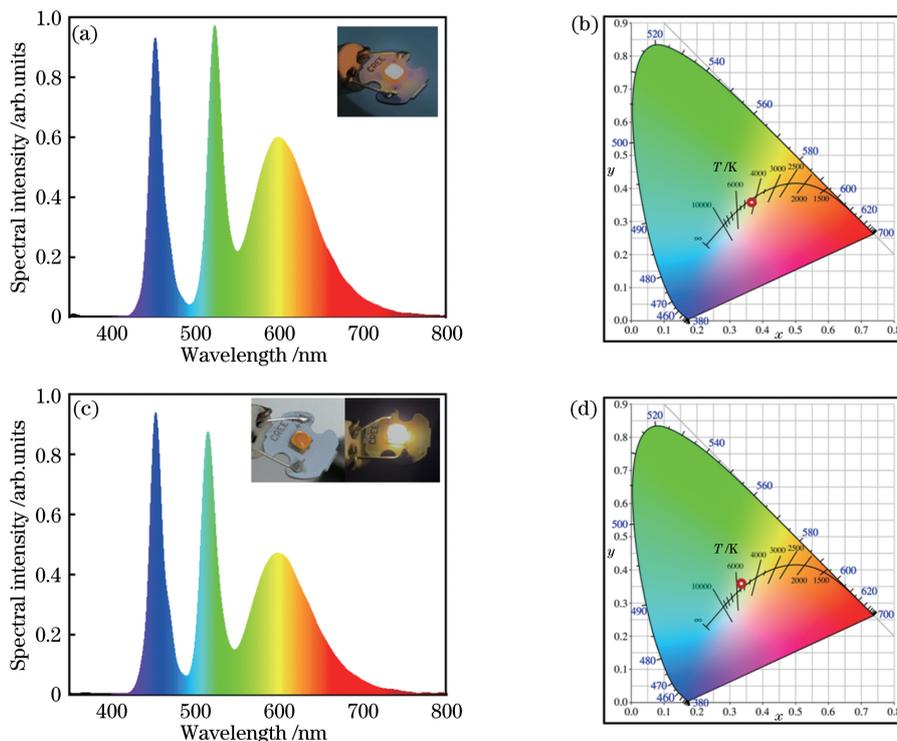


图 4 EL 光谱和 CIE 色坐标图。(a) WLED I 在 10 mA 电流下的 EL 光谱图, 插图为 WLED I 在黑暗中的发光状态; (b) WLED I 在 10 mA 电流下的 CIE; (c) WLED II 在 10 mA 电流下的 EL 光谱图, 插图为 WLED I 的封装图及其在黑暗中的发光状态; (d) WLED II 在 10 mA 电流下的 CIE

Fig. 4 EL spectrum and CIE color coordinate diagram. (a) EL spectrum of WLED I at current of 10 mA, illustration shows luminescence of WLED I in dark; (b) WLED I CIE at current of 10 mA; (c) WLED II EL at current of 10 mA, illustration shows package diagram and its luminescence of WLED I in dark; (d) CIE of WLED II at current of 10 mA

3.4 白光 LED 器件的电流稳定性测试

在 10~150 mA 的驱动电流下, 分别对 WLED

I 和 WLED II 进行了电致发光测试, 结果如图 5 和图 6 所示。从图 5(a) 可以看到, 在 10 mA 的驱动

电流下, WLED I 和 WLED II 的绿光光谱强度基本一致, 而 WLED I 的红光光谱强度明显比 WLED II 强; 但随着驱动电流的增大, WLED I 的红光和绿光光谱强度都远远高于 WLED II; 并且可以观察到 WLED I 的绿光光谱相对于 WLED II 有些许红移, 这与半导体中观察到的红移相似, 原因在于导带和价带的变化取决于晶格的温度膨胀^[18-19]。从图 5 可以看到, 随着驱动电流增大到 150 mA, WLED II 的红光和绿光光谱强度一直在急剧减小,

而 WLED I 的红光和绿光光谱强度有轻微的下降。图 6(a)和图 6(b)分别为 WLED I和 WLED II与驱动电流的 CIE 色坐标的关系。WLED I的 CIE 色坐标从 (0.3656, 0.3601)变化到(0.3758, 3227), WLED II的 CIE 色坐标从 (0.3332, 0.3560)变化到 (0.3211, 0.2438), WLED I的 CIE 色坐标变化量远远小于 WLED II; 并且 WLED I的色坐标分布较为集中, 而 WLED II的色坐标分布明显较为分散。综上, WLED I的结构拥有更好的电致发光性能。

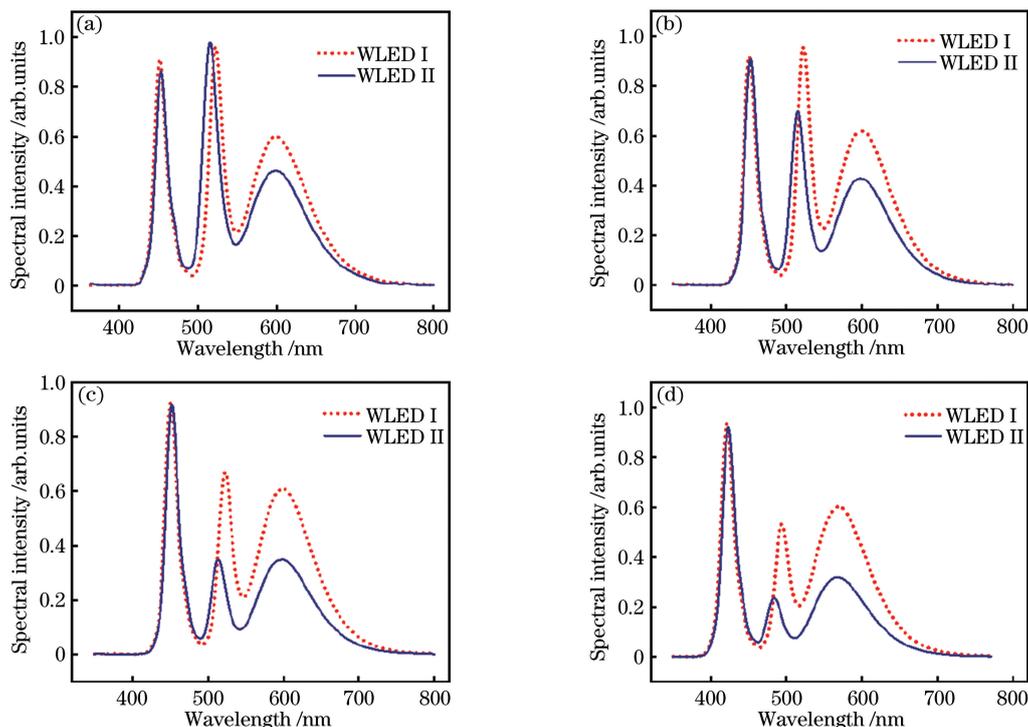


图 5 不同电流下 WLED I 和 WLED II 的 EL 光谱对比。(a) 10 mA; (b) 30 mA; (c) 70 mA; (d) 150 mA
Fig. 5 Comparison of EL spectra of WLED I and WLED II under different currents. (a) 10 mA; (b) 30 mA; (c) 70 mA; (d) 150 mA

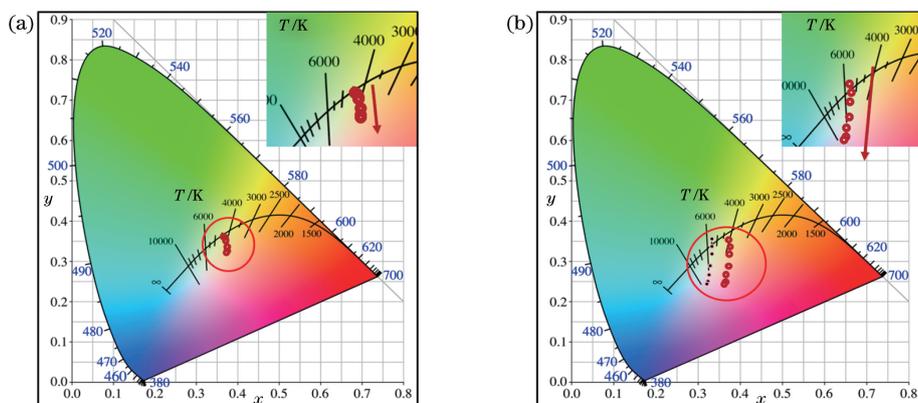


图 6 不同电流下 WLED I 和 WLED II 的 CIE 对比。(a) 10 mA 到 150 mA 电流下 WLED I; (b) 10 mA 到 150 mA 电流下 WLED II
Fig. 6 CIE comparison of WLED I and WLED II under different currents. (a) WLED I at current from 10 mA to 150 mA; (b) WLED II at current from 10 mA to 150 mA

同时还对 WLED I 和 WLED II 进行了多次重复的 CCT、CRI 和 LE 测试,随机选取的一组数据分析结果如图 7 所示。从图 7 (a)可以看到,随着驱动电流的增大,WLED I 和 WLED II 的 CRI 均呈下降趋势,这是由于随着驱动电流的增大,显色指数 R_1 、 R_5 和 R_8 都下降;在 150 mA 的电流下,WLED I 的 CRI 为 86.4,WLED II 的 CRI 为 73.1,WLED I 的 CRI 下降幅度是远小于 WLED II 的。这是因为在大电流下,器件产生的热量对 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点有影响,造成了轻微的失效,导致红光光谱和绿光光谱都减小。WLED I 的 CCT 随着电流的增加缓慢下降,从 4324 K 下降到 3636 K,WLED II 的 CCT 随着电流的增加大幅度增加,从 5474 K 增大到 7028 K。WLED I 更偏向暖白光,WLED II 更偏向冷白光。从图 7(b)可以看到,WLED I 的 LE

从 33.04 lm/W 先增加再缓慢下降到 27.11 lm/W,在 30 mA 的电流下 LE 达到 36.23 lm/W,WLED II 的 LE 从 29.24 lm/W 大幅度下降到 9.84 lm/W,随着电流的增加,WLED I 的 LE 缓慢降低,而 WLED II 的 LE 大幅度降低。

另外多次在 720 min 的通电时间和 15 mA 的驱动电流下对 WLED I 和 WLED II 进行 CCT、CRI 和 LE 测试,随机选取的一组数据分析结果如图 8 所示。从图 8(a)可以看到,随着工作时间的加长,WLED I 和 WLED II 的 CRI 总体均呈下降趋势,这是由于随着 WLED 工作时间的增加,器件产生的热量对量子点产生了影响。在 720 min 的通电时间下,WLED I 的 CRI 和 CCT 变化一直较为稳定,CRI 从开始的 89.7 下降到 79.1,CCT 从 5501 K 缓慢下降到 4021 K;而 WLED II 的 CRI 从 87.4 下

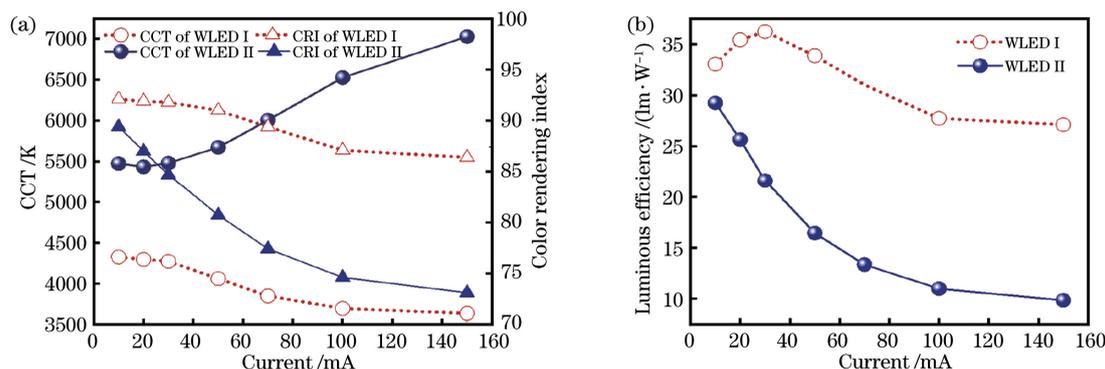


图 7 WLED I 和 WLED II 的 CCT、CRI 和 LE 随电流的变化趋势对比。(a) WLED I 和 WLED II 随电流增加增加的 CCT 和 CRI 变化趋势对比;(b) WLED I 和 WLED II 随电流增加的 LE 变化趋势对比

Fig. 7 Comparison of CCT, CRI, and LE with current trends of WLED I and WLED II. (a) Comparison of variation trends of CCT and CRI of WLED I and WLED II with increasing current; (b) comparison of LE variation trends of WLED I and WLED II with increasing current

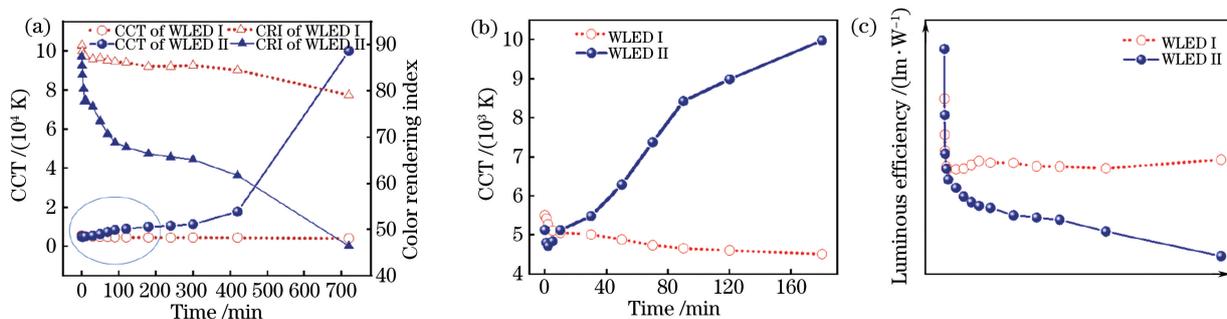


图 8 WLED I 和 WLED II 的 CCT、CRI 和 LE 随工作时间增大的趋势对比。(a) WLED I 和 WLED II 工作时间从 1 min 到 720 min 的 CCT 和 CRI 变化趋势对比;(b)图(a)圆圈部分,WLED I 和 WLED II 工作时间从 1 min 到 180 min 的 CCT 对比;(c) WLED I 和 WLED II 随工作时间增大的 LE 变化趋势对比

Fig. 8 Comparison of CCT, CRI, and LE of WLED I and WLED II with increasing working time. (a) Comparison of variation trends of CCT and CRI of WLED I and WLED II from 1 min to 720 min; (b) Fig. (a) circle part, CCT comparison of WLED I and WLED II working time from 1 min to 180 min; (c) comparison of LE variation trends of WLED I and WLED II with increasing working time

降到 46.4, CCT 从 5125 K 上升到 100000 K。从图 8(b) 可以看到, WLED II 的 CCT 相较于 WLED I 极其不稳定。图 8(c) 为 WLED I 和 WLED II 在 720 min 的通电时间下的 LE 变化趋势。从图 8(c) 可以看到, 一开始的 LE 下降趋势一致, 即很快下降, 这可能是器件的不稳定所造成的。之后的时间, WLED I 的 LE 一直比较稳定, 变化很小, 而 WLED II 的 LE 下降趋势比较快。从不同电流和长通电时间下的测试结果可以得到, WLED I 的电流稳定性远远高于 WLED II。

4 结 论

通过热注入法制备了 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点, 将 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点与 UV 胶混合形成 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点胶体, 叠加红色荧光粉制作了两种不同封装结构的白色发光 LED 器件 WLED I (红色荧光粉在下, CsPbBr₃ 钙钛矿量子点在上) 和 WLED II (CsPbBr₃ 钙钛矿量子点在下, 红色荧光粉在上)。对 WLED I 和 WLED II 分别进行电致发光测试和电流稳定性测试, 分析得出在 10 mA 的电流下, 得到 WLED I 的 CRI 为 92.1, CCT 为 4323 K, LE 为 33.04 lm/W, 均高于 WLED II, WLED I 的 CIE 为 (0.3656, 0.3601)。在电流稳定性测试中, 将驱动电流从 10 mA 增加到 150 mA, 研究随着驱动电流的增大, WLED I 和 WLED II 的 EL 光谱, CIE、CRI、CCT 和 LE 的变化趋势; 以及在 720 min 的通电时间和 15 mA 的驱动电流下, 研究 WLED I 和 WLED II 的 CRI、CCT 和 LE 的变化趋势。结果表明, 随着驱动电流的增加, WLED I 的结构显示出更稳定的 EL 光谱, 更稳定的 CIE、CRI、CCT 和 LE 变化趋势; 同样在 720 min 的通电时间和 15 mA 的驱动电流下, WLED I 的结构也显示出更稳定的 CRI、CCT 和 LE 变化趋势。证明 WLED I (红色荧光粉在下, CsPbBr₃ 钙钛矿量子点在上) 的结构拥有更好的发光性能和更稳定的工作性能, 促进了 CsPbBr₃ 钙钛矿量子点在发光二极管领域的应用。

参 考 文 献

- [1] Chung W, Park K, Yu H J, et al. White emission using mixtures of CdSe quantum dots and PMMA as a phosphor[J]. *Optical Materials*, 2010, 32(4): 515-521.
- [2] Ye S, Xiao F, Pan Y X, et al. Phosphors in phosphor-converted white light-emitting diodes: recent advances in materials, techniques and properties[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2010, 71(1): 1-34.
- [3] Jung K Y, Kang Y C. Preparation of BaMgAl₁₀O₁₇: Eu blue phosphor by flame-assisted spray pyrolysis: photoluminescence properties of powder and film under VUV excitation[J]. *Materials Letters*, 2004, 58(16): 2161-2165.
- [4] Kim J S, Jeon P E, Park Y H, et al. White-light generation through ultraviolet-emitting diode and white-emitting phosphor [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(17): 3696-3698.
- [5] Jang E, Jun S, Jang H, et al. White-light-emitting diodes with quantum dot color converters for display backlights[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(28): 3076-3080.
- [6] Hu Y M, Zhang D D, Zhang J H, et al. Thermal stability of CdSe/ZnS quantum dot white light device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0823002. 胡雅萌, 张豆豆, 张建华, 等. CdSe/ZnS 量子点白光器件的热稳定性[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0823002.
- [7] Derfus A M, Chan W C W, Bhatia S N. Probing the cytotoxicity of semiconductor quantum dots[J]. *Nano Letters*, 2004, 4(1): 11-18.
- [8] Hardman R. A toxicologic review of quantum dots: toxicity depends on physicochemical and environmental factors[J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114(2): 165-172.
- [9] Huang Y. Electrochemiluminescence of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals and its application [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2017. 黄燕. CsPbBr₃ 钙钛矿量子点的电化学发光性质研究及其应用[D]. 聊城: 聊城大学, 2017.
- [10] Kang R Y, Yan L L, Zhang Z Q, et al. Research progresses, opportunities and challenges of perovskite light-emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(7): 070001. 康汝燕, 闫莉莉, 张子琦, 等. 钙钛矿发光二极管的研究进展与机遇挑战[J]. *激光与光电子进展*, 2021, 58(7): 070001.
- [11] Song J Z, Li J H, Li X M, et al. Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides (CsPbX₃) [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(44): 7162-7167.
- [12] Yantara N, Bhaumik S, Yan F, et al. Inorganic halide perovskites for efficient light-emitting diodes [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2015, 6(21): 4360-4364.
- [13] Song Y H, Yoo J S, Kang B K, et al. Long-term stable stacked CsPbBr₃ quantum dot films for highly

- efficient white light generation in LEDs [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(47): 19523-19526.
- [14] Wu J, Cao G Y, Zhang Y J, et al. Preparation and luminescence properties of CsPbBr₃ perovskite quantum dot microcrystals [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(9): 1073-1078.
吴江, 曹冠英, 张彦杰, 等. CsPbBr₃ 钙钛矿量子点微晶的制备及发光性能 [J]. *发光学报*, 2019, 40(9): 1073-1078.
- [15] Zeng F J, Tan Y Q, Zhang X M, et al. Synthesis of Sn-doped CsPbBr₃ quantum dot and research on its photoelectric properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0416001.
曾凡菊, 谭永前, 张小梅, 等. 锡掺杂 CsPbBr₃ 量子点的合成及其光电性能研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0416001.
- [16] Li J S, Tang Y, Li Z T, et al. Toward 200 lumens per watt of quantum-dot white-light-emitting diodes by reducing reabsorption loss [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 550-562.
- [17] Xu J, Zhu L, Chen J, et al. Transient optical properties of CsPbX₃/poly (maleic anhydride-alt-1-octadecene) perovskite quantum dots for white light-emitting diodes [J]. *Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 2021, 15(1): 2170010.
- [18] Kim Y, Ham S, Jang H, et al. Bright and uniform green light emitting InP/ZnSe/ZnS quantum dots for wide color gamut displays [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, 2(3): 1496-1504.
- [19] Tang J L, Li F, Yang G L, et al. Reducing the chromaticity shifts of light-emitting diodes using gradient-alloyed Cd_xZn_{1-x}Se_yS_{1-y} @ ZnS core shell quantum dots with enhanced high-temperature photoluminescence [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1801687.