

文章编号: 1000-7032(2021)05-0635-07

# 碳点-纤维素复合红色发光材料制备及性能

李冬娜<sup>1</sup>, 何红想<sup>2</sup>, 张浩然<sup>1,3</sup>, 杨 邶<sup>4</sup>, 康云艳<sup>4</sup>, 董日月<sup>1</sup>,  
李 唯<sup>1,3</sup>, 潘晓琴<sup>1</sup>, 寇尔丰<sup>1</sup>, 刘应亮<sup>1,3</sup>, 雷炳富<sup>1,3\*</sup>

(1. 华南农业大学材料与能源学院 生物基材料与能源教育部重点实验室/广东省光学农业工程技术研究中心, 广东 广州 510642;  
2. 黄浦海关技术中心, 广东 东莞 523073; 3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室 茂名分中心, 广东 茂名 525000;  
4. 华南农业大学 园艺学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 白光 LED 器件作为新一代绿色固态照明光源, 已广泛应用于照明、液晶背光等领域, 也与智能照明、物联网技术等高新科技产业密切相关。常用的蓝光芯片复合黄光 YAG: Ce<sup>3+</sup> (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>: Ce<sup>3+</sup>) 荧光粉的白光器件由于缺少红色光谱的成分, 导致器件光谱较窄, 显色指数较低, 色温偏高。因此, 红色荧光粉对改善白光 LED 的光色品质起到了重要作用。本文首先制备了红色碳点(量子效率 28%), 通过把红色碳点与纤维素复合, 制备了红色荧光粉(量子效率为 18%)。该红色荧光粉与黄光 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光粉混合, 封装得到暖白光。结果表明, 相较于只有黄光 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光粉封装的 LED, 红色荧光粉掺杂之后, 在 460 nm 蓝光芯片的激发下, 白光 LED 的色坐标由(0.30, 0.33)变化到(0.33, 0.35), 色温从 7 396 K 下降到 5 714 K, 显色指数从 78.2 升高到 82.9, 实现了由色温高、显示指数低的冷白光向色温低、显示指数高的暖白光的调节。

**关 键 词:** 红色碳点; 纤维素; 暖白光 LED; 照明

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210055

## Preparation and Properties of Carbon Dots-cellulose Composite Red Emitting Phosphors

LI Dong-na<sup>1</sup>, HE Hong-xiang<sup>2</sup>, ZHANG Hao-ran<sup>1,3</sup>, YANG Xian<sup>4</sup>, KANG Yun-yan<sup>4</sup>, DONG Ri-yue<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,3</sup>, PAN Xiao-qin<sup>1</sup>, KOU Er-feng<sup>1</sup>, LIU Ying-liang<sup>1,3</sup>, LEI Bing-fu<sup>1,3\*</sup>

(1. Key Laboratory for Biobased Materials and Energy of Ministry of Education/Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Optical Agriculture, College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;  
2. Huangpu Custom District Technology Center, Dongguan 523073, China;  
3. Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming 525000, China;  
4. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

\* Corresponding Author, E-mail: tleibf@scau.edu.cn

**Abstract:** As a new generation of green solid-state lighting source, white light-emitting diode(LED) devices not only have been widely used in lighting, liquid crystal display(LCD) backlighting and other fields, but also are related to intelligent lighting, the Internet of Things technology and other high-tech industries. White light devices consisting of yellow emitting YAG: Ce<sup>3+</sup> (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>: Ce<sup>3+</sup>) phosphors and blue chip are commonly used but lacking the components of red spectrum, resulting in the device's narrow spectrum, low color rendering index(CRI) and high correlated color temperature(CCT). Therefore, red phosphors play an important role in improving the color quality of white LED. Herein, red carbon dots with 28% quantum yield(QY) are synthesized and then combined

收稿日期: 2021-02-08; 修訂日期: 2021-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(21671070)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(21671070)

with cellulose to form red phosphors ( $QY \approx 18\%$ ). Red phosphors are mixed with commercial YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ :  $\text{Ce}^{3+}$ ) to obtain warm white LED. Compared to the LED encapsulated with YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  phosphors, the CIE color coordinate of the LED which is encapsulated with YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  phosphors and red phosphors changes from (0.30, 033) to (0.33, 0.35), the CCT declines from 7 396 K to 5 714 K and the CRI raises from 78.2 to 82.9 under the excitation of 460 nm emitting blue chip. It achieves that cold white light-emitting diodes (WLED) with high CCT and low CRI were adjusted to warm WLED with low CCT and high CRI.

**Key words:** red carbon dots; cellulose; warm white light-emitting diodes; lighting

## 1 引言

人们日常生活与工作所需要的光源一般为白光,如何改善光色的品质、使光环境更舒适、更健康,是研究和改善人工光源的重要目标<sup>[1]</sup>。相较于白炽灯和荧光灯等传统光源,发光二极管(LED)具有体积小、寿命长、无污染、高效节能的特点<sup>[2-3]</sup>,逐渐成为新一代具有广泛用途的固态照明光源。其中,最常用的是蓝光芯片和黄光YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ :  $\text{Ce}^{3+}$ ) 荧光粉封装的白光器件。然而,该方法制备出来的白光LED由于缺少红色荧光的成分,导致其色温较高,显色指数较低<sup>[4]</sup>。为了降低色温,提高显色指数,通常在封装LED时加入红色发光材料,拓宽器件的发光光谱,将冷白光调节为更舒适的暖白光<sup>[5]</sup>。

碳点是近年来新型的零维碳纳米材料,具有光稳定性高、生物相容性好、发光可调、低毒等特点<sup>[5]</sup>,广泛应用于多个领域,如生物成像<sup>[6]</sup>、传感<sup>[7]</sup>、光催化<sup>[8]</sup>和发光器件<sup>[9]</sup>等。其中,红色碳点是现在主要研究的方向。但是,无复合的红色碳点一般很难实现其固态发光,相关报道较少<sup>[10]</sup>。通常情况下,红色碳点需与其他基质复合,例如淀粉、二氧化硅、聚乙烯醇、纤维素等,利用基质的作用,克服其聚集诱导猝灭现象,才能实现碳点的长波长固态荧光。

目前,红色碳点及其复合材料在LED中的应用已经有一些报道。Zhang等通过聚集诱导制备红色碳点,与YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  荧光粉混合用于制备白光LED<sup>[4]</sup>; Wang等以聚甲基丙烯酸甲酯为基质,复合了近红外碳点用于白光LED<sup>[11]</sup>; Chen等通过碳点与聚乙烯吡咯烷酮复合,形成具有蓝色到红色荧光的薄膜,从而制备了白光LED<sup>[12]</sup>。Li等通过碳点复合纤维得红橙色荧光粉并且实现荧光

增强<sup>[13]</sup>; Qu等通过碳点与淀粉复合得到量子效率为21%的橙色复合物<sup>[14]</sup>。

在本工作中,通过一步水热法合成高量子效率的红色碳点,红色碳点通过搅拌的形式,与纤维素复合,形成红色荧光粉。红色荧光粉与YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  以一定的比例调配,封装到蓝光芯片中,得到暖白光LED,改善了白光LED的发光质量。

## 2 实验

### 2.1 试剂和表征

YAG:  $\text{Ce}^{3+}$  ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ :  $\text{Ce}^{3+}$ ) 荧光粉为实验室自制; 封装用A、B胶、460 nm 蓝光芯片购自深圳黄志照明配件公司; 盐酸多巴胺、二甲基亚砜、N,N-二甲基甲酰胺、甲醇、乙醇、邻苯二胺和纤维素粉购自上海麦克林生化科技有限公司。丙酮、盐酸溶液购自广州化学试剂厂。透射电镜(TEM)的型号是日本电子TEM2100F; 傅里叶变换红外(FT-IR)光谱由 Nicolet Avatar 360 FT-IR 分光光度计测量; 荧光光谱采用日立 F7000 测试; 紫外-可见吸收光谱在 Shimadzu UV-2550 紫外-可见分光光度计测试; 光电子能谱(XPS)采用赛默飞 K-Aphla 测试; 碳点量子效率采用滨松 F7100 测试; 电致发光光谱采用海洋光学光谱仪的积分球在直流电流下测量。

### 2.2 红色碳点制备

0.01 mol 盐酸多巴胺和0.01 mol 的邻苯二胺加入20 mL去离子水中,用盐酸溶液调节溶液pH,使其小于1。将该混合溶液超声10 min,转入50 mL反应釜内衬,之后将反应釜移入200 °C烘箱,反应6 h。待反应后溶液冷却至室温,反应后的溶液移入截留分子量为3 500的透析袋透析1 d。最后将透析袋内的液体冷冻干燥,得红色碳点粉末。

### 2.3 红色荧光粉制备

将碳点的乙醇溶液(浓度为0.1 mg/mL)与纤维素粉混合, 其中每10 mL碳点溶液中加入1 g纤维素粉, 接着将混合液置于常温下搅拌2 h。接着用8 000 r/min的转速离心5 min, 去掉上清液, 再用无水乙醇溶液清洗3次, 最后在60 °C真空干燥烘箱中干燥1 d, 得到红色荧光粉。

### 2.4 白光LED封装

分别称量25 mg YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光粉、10 mg所制备的红色荧光粉, 加入到A、B胶中(A、B胶体积均为200 μL), 搅拌均匀, 然后将搅拌好的凝胶滴在460 nm的LED芯片上, 固化后进行LED的电致发光光谱测试。

## 3 结果与讨论

### 3.1 结构分析

通过一步水热合成法, 制备得到红色碳点。图1为碳点的透射电镜(TEM)图像, 由图1(a)可知

碳点呈球状且无聚集现象。碳点的粒径分布如图1(a)插图所示, 平均粒径约为2.88 nm, 且碳点的粒径分布较集中; 图1(b)的高分辨透射电镜(HRTEM)图像明显呈现出碳点的晶格条纹, 其晶格间距为0.17 nm; 图1(c)为选区电子衍射(SAED)图, 通过计算, 验证了碳点的晶格间距约为0.17 nm。

碳点的化学组成与结构进一步分析如下。图2为红色碳点的傅里叶变换红外(FT-IR)光谱, 在3 500~3 200 cm<sup>-1</sup>处的宽峰属于O—H和N—H的伸缩振动。1 620, 1 580, 1 470 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰分别属于C=O、C=C、C=N伸缩振动。1 320, 1 215, 1 132 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰分别属于C—N、C—O—C、C—O的伸缩振动。745 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰归因于C—H键的弯曲振动<sup>[15-16]</sup>。

为了进一步研究碳点表面的官能团, 对碳点进行了光电子能谱(XPS)测试。图3(a)为碳点的XPS图谱, 由图可知, 碳点含有C、N、O、S元素,

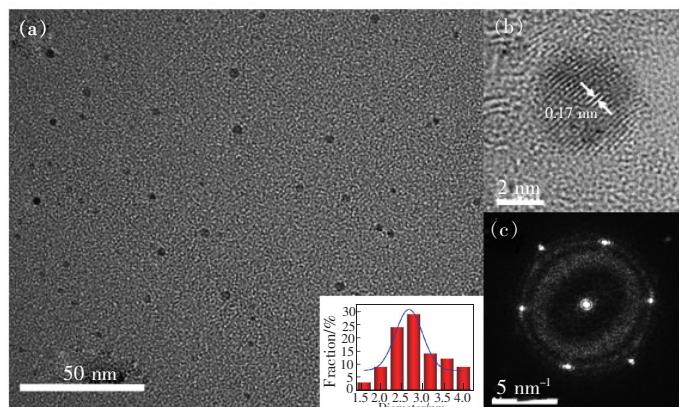


图1 (a) 碳点的TEM图像, 插图: 碳点的粒径分布图;(b) 碳点的HRTEM图像;(c) SAED图像。

Fig. 1 (a) TEM image of red carbon dots, inset: the particle distribution of carbon dots. (b) HRTEM image of carbon dots. (c) SAED pattern of carbon dots

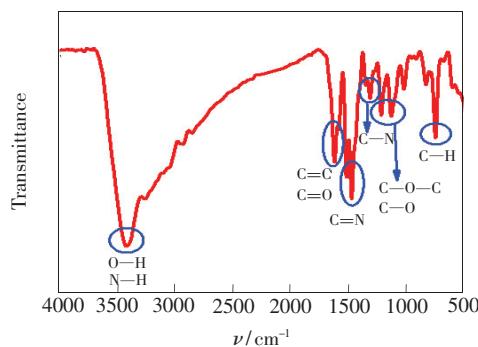


图2 碳点的FT-IR光谱

Fig. 2 FT-IR spectrum of red carbon dots

相对应的元素含量分别为72.94%、14.13%、11.19%、1.74%。图3(b)的碳点C 1s图谱可拟合划分为3个峰, 峰值位于284.8, 286.2, 287.8 eV, 分别对应着C—C/C=C、C—O/C—N、C=O键。图3(c)中N 1s图谱可以拟合为峰值位于398.8, 400.2, 401.8 eV的3个峰, 分别对应着吡啶氮、吡啶氮、石墨氮。图3(d)的O 1s图谱中两个位于531.70 eV和533.2 eV处的峰表明了碳点中C=O、C—O/O—H键的存在<sup>[17-18]</sup>。FT-IR与XPS测试相结合, 可初步得出碳点含有O—H、C=C、C=O、C—O等化学键。

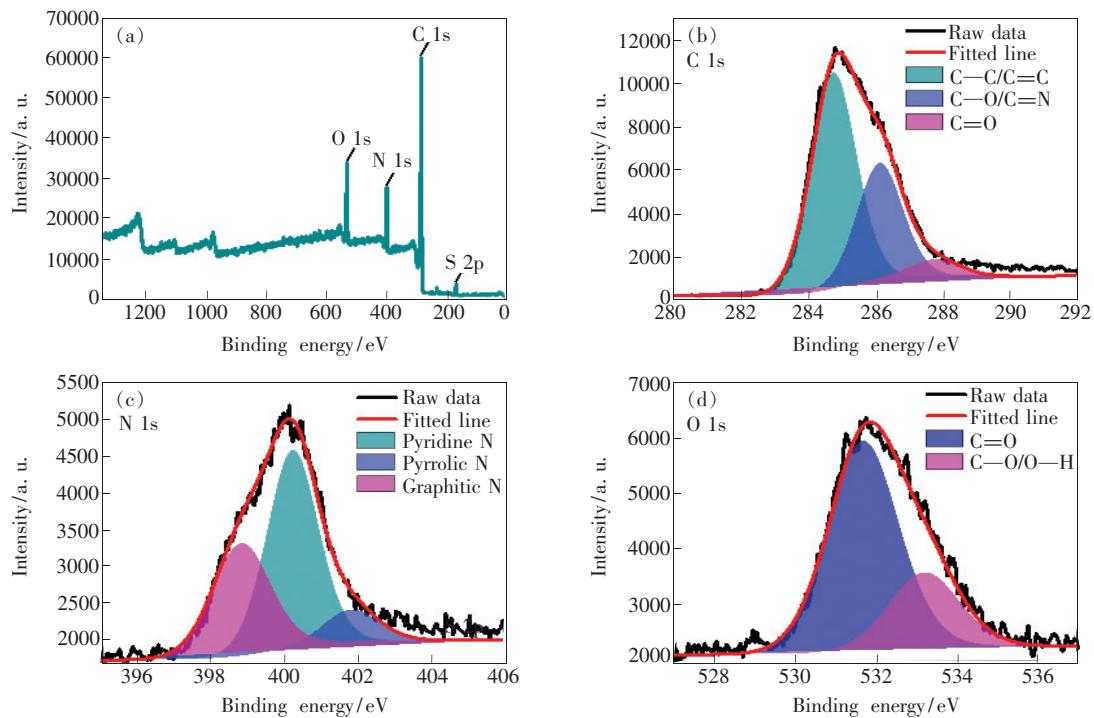


图3 (a) 碳点的XPS图谱;(b)~(d)红色碳点的C 1s、N 1s、O 1s高分辨XPS图谱。

Fig. 3 (a) XPS pattern of carbon dots. (b) – (d) High-resolution XPS of the C 1s, N 1s, O 1s of carbon dots.

### 3.2 荧光光谱分析及碳点稳定性探讨

合成的红色碳点粉末溶于乙醇中,显示红色

的荧光。为了探究碳点的光学性能,进行了以下光谱测试。图4(a)为碳点的乙醇溶液的紫外-可

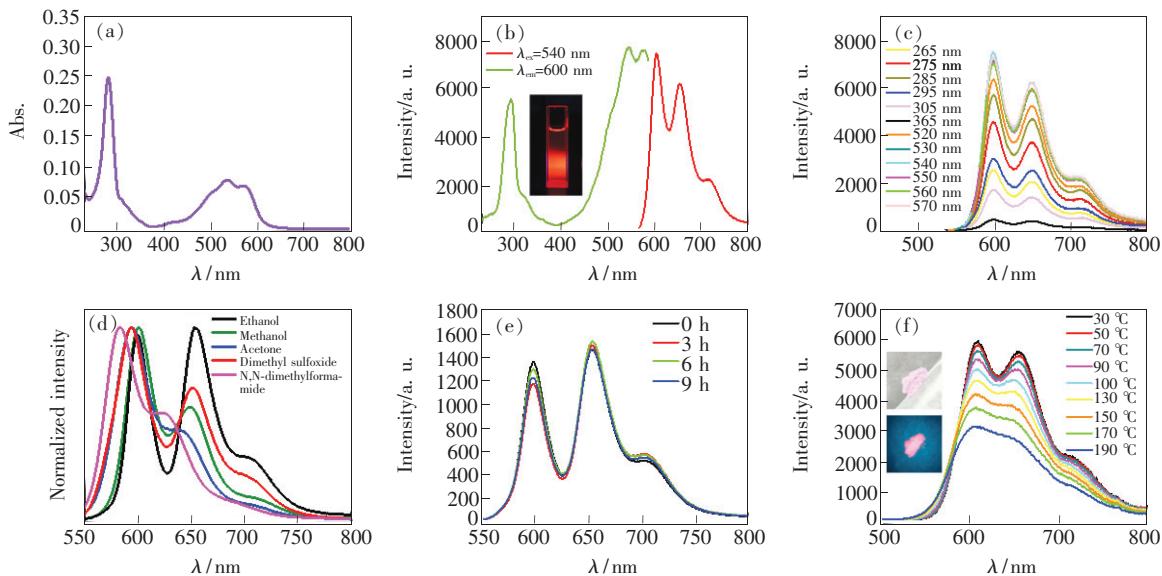


图4 (a) 碳点的UV-Vis光谱;(b)碳点在激发波长为540 nm的荧光发射光谱和在发射波长为600 nm的荧光激发光谱;(c)碳点在不同激发波长下的发射光谱;(d)碳点在不同溶剂中的荧光发射光谱;(e)碳点在氙灯照射下的荧光变化;(f)红色荧光粉在不同温度下的荧光发射光谱,插图:荧光粉在太阳光下和在紫外灯下的图像。

Fig. 4 (a) UV-Vis spectrum of carbon dots. (b) Fluorescence emission spectrum of carbon dots excited at 540 nm and the fluorescence excitation spectrum monitored at 600 nm. (c) Emission spectra of carbon dots excited at different wavelengths. (d) Fluorescence emission spectra of carbon dots dissolved in different solvent. (e) Changes in the fluorescence of carbon dots under xenon lamp irradiation. (f) Fluorescence emission spectra of red phosphors at different temperatures, inset: the images of phosphors in sunlight and ultraviolet light.

见吸收(UV-Vis)光谱。碳点在285 nm有强烈的尖峰吸收,源于芳香族C=C键的 $\pi\rightarrow\pi^*$ 跃迁,而450~600 nm处的吸收源于C=O、C=N键的n→π\*跃迁<sup>[19]</sup>。图4(b)为碳点的荧光光谱,从图中可见,红色碳点的激发光谱与紫外-可见吸收光谱相对应,表明碳点的吸收与发射源于同一类型的跃迁<sup>[19]</sup>。其中,碳点的最佳激发为540 nm,最佳发射在600 nm,图4(b)中的插图为碳点溶液在紫外灯下的荧光图像。另外,红色碳点的绝对量子效率为28%。为了测量碳点的发射与激发之间的关系,进行了不同激发波长下的发射光谱测试,如图4(c)所示,结果显示该碳点无激发依赖特性,随着激发波长的变化,碳点的峰值位置没有移动。此外,碳点几乎不溶于水,但可溶于其他有机溶剂,如甲醇、乙醇、丙酮、二甲基亚砜、N,N-二甲基甲酰胺等。碳点在不同溶剂中的荧光发射光谱如图4(d)所示,相对于碳点溶于乙醇溶液的光谱,碳点在其他溶液中的荧光光谱呈现出蓝移或者红移的现象,但这些发射光谱均含有3个发射峰,曲线的整体趋势相似。另外,为了测试红色碳点的光

稳定性,红色碳点的乙醇溶液被放置于光照强度为25 000 lx的氙灯下照射,每隔3 h取样进行光谱测试,所得光谱如图4(e)所示。由图4(e)结合计算可知,光照9 h后红色碳点的荧光光谱对应的曲线积分面积减少了1.5%,这充分表明了碳点具有较好的光稳定性。

红色碳点与纤维素混合搅拌得到的红色荧光粉量子效率为18%。红色荧光粉的变温荧光发射光谱如图4(f)所示,室温情况下荧光粉存在两个明显的发射峰,分别位于610 nm和655 nm处。随着温度的升高,荧光粉的荧光强度有所下降,当温度升高至150 °C时,红色荧光粉的荧光强度虽然有所下降,但依然有较强的荧光。图4(d)中的两张插图分别是荧光粉在日光灯下和紫外灯下的图片,荧光粉显示红色荧光。

### 3.4 冷白光到暖白光的调节

基于红色荧光粉稳定的发光性能以及较高的量子效率,并且有很宽区域的红色荧光发射,将该荧光粉用于调控LED的发光及色温、显色指数等发光性能。YAG:Ce<sup>3+</sup>荧光粉封装LED色温较高,显色指数较低,在黄色荧光粉中添加所制备的

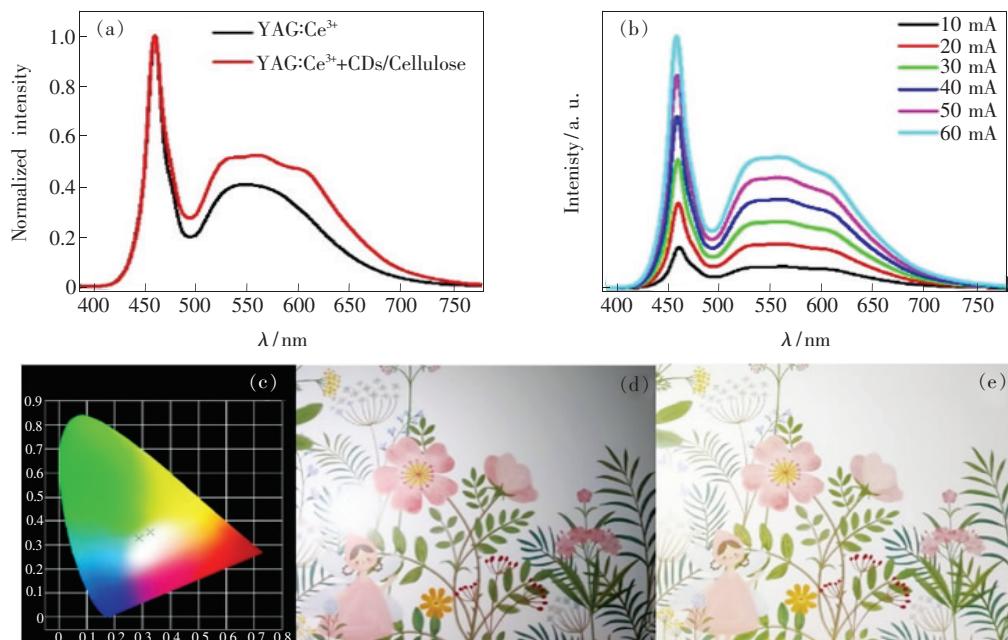


图5 (a)单独YAG:Ce<sup>3+</sup>和YAG:Ce<sup>3+</sup>加红色荧光粉封装LED的电致发光光谱;(b)YAG:Ce<sup>3+</sup>与红色荧光粉封装的LED在变电流下的光致发光光谱;(c)单独YAG:Ce<sup>3+</sup>和YAG:Ce<sup>3+</sup>加红色荧光粉封装LED的发光对应的色坐标(由左到右);(d)~(e)YAG:Ce<sup>3+</sup>和YAG:Ce<sup>3+</sup>加红色荧光粉封装的LED在光照下的图像。

Fig. 5 (a) Electroluminescent spectra of YAG:Ce<sup>3+</sup> and YAG:Ce<sup>3+</sup> doped with red phosphors encapsulated LED. (b) Photoluminescence spectra of YAG:Ce<sup>3+</sup> doped with red phosphors encapsulated LED under different flow. (c) CIE color coordinate of YAG:Ce<sup>3+</sup> and YAG:Ce<sup>3+</sup> doped with red phosphors encapsulated LED corresponding color coordinates (from left to right). (d) - (e) Image by illumination of YAG:Ce<sup>3+</sup> and YAG:Ce<sup>3+</sup> doped phosphors encapsulated LED.

红色荧光粉,增加 LED 红色区域的发光,可拓宽 LED 的发光范围,使得光谱更加接近日光灯,在降低 LED 色温的同时,提高显色指数。单独 YAG: Ce<sup>3+</sup> 和 YAG: Ce<sup>3+</sup> 掺杂红色荧光粉封装的 LED 的电致发光光谱如图 5(a)所示,红色荧光粉的加入增加了 LED 的红色区域,拓宽了 LED 的发光峰宽。图 5(b)为不同量的红色荧光粉掺杂的 LED 灯在变电流(10~60 mA)的电致发光光谱。随着电流的增大,LED 各部分光区域光谱的比例几乎保持一致,表明红色荧光粉掺杂的 LED 在不同电流下工作时,发光性能较稳定。单独 YAG: Ce<sup>3+</sup> 和 YAG: Ce<sup>3+</sup> 掺杂红色荧光粉封装 LED 的电致发光光谱的色坐标分别是(0.299 2, 0.327 3)和(0.327 3, 0.352 7),如图 5(c)所示。由于红色荧光粉的加入,所获得的 LED 发光的红光比例增加,使得 LED 的色坐标向右移动。在这两种 LED 照明下,图片的显色情况如图 5(d)、(e) 所示。相较于 YAG: Ce<sup>3+</sup> 封装的 LED,掺杂了红色荧光粉的 LED 的色温由 7 296 K 下降为 5 714 K,显色指

数由 78.2 升高至 82.9,但流明效率由 133.27 lm/W 下降为 124.6 lm/W,稍微有所下降。这是由于红色荧光粉的吸收与黄色荧光粉的发射有重合区域,黄色荧光粉的一部分发光会被红色荧光粉吸收,并且黄色荧光粉的量子效率高于红色荧光粉,进而导致 LED 的流明效率下降。但整体而言,掺杂红色荧光粉的 LED 更适合于人们日常生活与工作。

## 4 结 论

本文将采用一步水热法合成的高量子效率、表面富含官能团的红色碳点与纤维素粉搅拌复合得到红色荧光粉,其具有发光稳定、耐高温等性能。将其与 YAG: Ce<sup>3+</sup> 荧光粉按 2:5 的比例混合进行封装,实现了 LED 冷白光向暖白光的调节,并在一定程度上降低了 LED 色温、提高了显色指数,使得光的质量更加符合人眼舒适度的需求。该研究对于制备更高性能的暖白光 LED 具有指导性意义。

## 参 考 文 献:

- [1] 李嘉祥,潘拴,刘军林,等. 低色温无荧光粉 LED 光源的可靠性研究 [J]. 发光学报, 2020, 41(3):323-330.  
LI J X, PAN S, LIU J L, et al.. Reliability of low color temperature phosphor-free LED light source [J]. Chin. J. Lum. , 2020,41(3):323-330. (in Chinese)
- [2] 夏振平,付保川,程成. 基于冷暖白光 LED 的线性调光混合照明 [J]. 发光学报, 2018, 39(5):730-736.  
XIA Z P, FU B C, CHENG C. Mixed lighting based on linear dimming of cold and warm white LEDs [J]. Chin. J. Lum. , 2018,39(5):730-736. (in Chinese)
- [3] JIA H R, WANG Z B, YUAN T, et al.. Electroluminescent warm white light-emitting diodes based on passivation enabled bright red bandgap emission carbon quantum dots [J]. Adv. Sci. , 2019,6(13):1900397-1-10.
- [4] ZHANG X Q, YANG H Y, WAN Z J, et al.. Self-quenching-resistant red emissive carbon dots with high stability for warm white light-emitting diodes with a high color rendering index [J]. Adv. Opt. Mater. , 2020,8(15):2000251.
- [5] LI D N, LI W, ZHANG H R, et al.. Far-red carbon dots as efficient light-harvesting agents for enhanced photosynthesis [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020,12(18):21009-21019.
- [6] LI W, ZHENG Y J, ZHANG H R, et al.. Phytotoxicity, uptake, and translocation of fluorescent carbon dots in mung bean plants [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016,8(31):19939-19945.
- [7] CHEN J L, YAN J, FENG Q M, et al.. Label-free and enzyme-free fluorescence detection of microRNA based on sulphydryl-functionalized carbon dots via target-initiated hemin/G-quadruplex-catalyzed oxidation [J]. Biosens. Bioelectron. , 2021, 176:112955.
- [8] MAHMOOD A, SHI G S, WANG Z, et al.. Carbon quantum dots-TiO<sub>2</sub> nanocomposite as an efficient photocatalyst for the photodegradation of aromatic ring-containing mixed VOCs: an experimental and DFT studies of adsorption and electronic structure of the interface [J]. J. Hazard. Mater. , 2021,401:123402.
- [9] YUAN F L, WANG Z B, LI X H, et al.. Bright multicolor bandgap fluorescent carbon quantum dots for electroluminescent light-emitting diodes [J]. Adv. Mater. , 2017,29(3):1604436-1-6.
- [10] YANG H Y, LIU Y L, GUO Z Y, et al.. Hydrophobic carbon dots with blue dispersed emission and red aggregation-induced

- emission [J]. *Nat. Commun.*, 2019, 10(1):1789-1-11.
- [11] WANG B Y, LI J, TANG Z Y, et al. Near-infrared emissive carbon dots with 33.96% emission in aqueous solution for cellular sensing and light-emitting diodes [J]. *Sci. Bull.*, 2019, 64(17):1285-1292.
- [12] CHEN D Q, GAO H B, CHEN X, et al. Excitation-independent dual-color carbon dots: surface-state controlling and solid-state lighting [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9):2352-2358.
- [13] LI W, ZHANG H R, ZHENG Y J, et al. Multifunctional carbon dots for highly luminescent orange-emissive cellulose-based composite phosphor construction and plant tissue imaging [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(35):12976-12983.
- [14] QU S N, ZHOU D, LI D, et al. Toward efficient orange emissive carbon nanodots through conjugated sp<sup>2</sup>-domain controlling and surface charges engineering [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(18):3516-3521.
- [15] WU Z L, ZHANG P, GAO M X, et al. One-pot hydrothermal synthesis of highly luminescent nitrogen-doped amphoteric carbon dots for bioimaging from *Bombyx mori* silk-natural proteins [J]. *J. Mater. Chem. B*, 2013, 1(22):2868-2873.
- [16] GUO L, GE J C, LIU W M, et al. Tunable multicolor carbon dots prepared from well-defined polythiophene derivatives and their emission mechanism [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(2):729-734.
- [17] SHENG Z H, SHAO L, CHEN J J, et al. Catalyst-free synthesis of nitrogen-doped graphene via thermal annealing graphite oxide with melamine and its excellent electrocatalysis [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(6):4350-4358.
- [18] QU D, ZHENG M, DU P, et al. Highly luminescent S, N co-doped graphene quantum dots with broad visible absorption bands for visible light photocatalysts [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(24):12272-12277.
- [19] LU S Y, SUI L Z, LIU J J, et al. Near-infrared photoluminescent polymer-carbon nanodots with two-photon fluorescence [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(15):1603443-1-6.



李冬娜(1995-),女,广东湛江人,硕士研究生,2018年于华南农业大学获得学士学位,主要从事碳点调控白光LED发光性能及碳点对植物光合作用影响的研究。  
E-mail: 2840626122@qq.com



雷炳富(1977-),男,广东茂名人,博士,教授,博士研究生导师,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光-光/电-光转换功能材料及其在设施农业领域的工程化应用、农业环境中重金属离子污染物检测及氧气等的光学传感材料合成与性能的研究。  
E-mail: tleibf@scau.edu.cn