

高色域量子点 LED 及其在背光显示中的应用研究

王 果, 杨 欣, 李东颖, 孙新雨, 方一旭, 章 勇, 宿世臣*

华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631

摘 要 量子点因其独特优异的光学特性而被广泛应用于发光领域, 其中最突出的特点是光谱调谐方便, 只需要改变材料的尺寸, 就可实现发光光谱的调谐。结合实际应用的需要, 选取 CdSe 材料作为主要研究对象, 通过改进工艺, 采用希莱克技术隔绝水氧, 使用高温热注入法, 调整原料中镉源和锌源, 硒源和硫源的比例, 获得了尺寸分别约为 6.0 和 4.2 nm, 发光峰分别为 625 和 525 nm, 半高宽分别为 30 和 28 nm, 荧光量子产率分别达到 82% 和 61% 的粒径均一、色纯度高且高效稳定核壳结构 CdSe/ZnS 红光和绿光量子点材料。然后对量子点 LED 在背光显示中的应用进行了研究, 采用合成的红光和绿光量子点材料替代传统工艺中的荧光粉材料, 通过改进封装方式, 对量子点光转换层采用双层环氧树脂 AB 胶保护, 同时引入 PMMA 透镜包覆, 从根本上隔绝水氧。最终得到的量子点白光 LED, 红绿蓝光发射峰分别为 630, 535 和 453 nm, 半高宽别为 20, 28 和 30 nm, 三段光谱发射峰两侧对称性良好, 有效解决了传统荧光粉白光 LED 在红色光谱波段缺失的问题, 并同时实现了单色性好、色纯度高、色彩饱和度高等优点。在 LED 积分球光电测试系统中 20 mA 电流条件下测试, 得到了 CIE 色坐标为(0.329, 0.324)的白光量子点 LED, 这是非常接近标准白光的色坐标。其色温为 5 094 K, 光效达到 $94.72 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, 显色指数 Ra 可达 78.6, 寿命超过 400 h。最后对量子点 LED 灯条进行封装得到背光源, 根据测试获取的白光量子点 LED 发射光谱, 可以得到 sRGB 颜色三角形, 即色域, 通过对比 NTSC1931 标准色域, 得到了色域覆盖率可以达到 109.7% 的高色域量子点 LED 背光源。开发的 LED 背光由 240 个白光量子点 LED 制成, 并且首次成功演示了 29 英寸液晶电视面板, 这一结果将进一步开发量身定制的量子点, 特别是在高性能显示器应用领域。

关键词 量子点; 发光二极管; 背光源; 高色域

中图分类号: TN383+.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)04-1113-07

引 言

胶体纳米晶体尺寸极小, 因其特殊的表面效应和体积效应, 具有一系列不同于宏观物体的特殊效应, 特别是其独特的光学特性^[1], 在基础研究^[2]和二极管^[3]、激光器、光伏电池^[4]等技术应用中都具有重要意义。量子点作为一种典型的胶体纳米晶体材料, 具有发射光谱窄、发光波长可调、荧光效率高等优点^[5], 广泛应用于 LED 照明^[6], 背光显示^[7]等领域。对于 CdSe 量子点而言, 因其苛刻的合成条件, 包括对水氧的敏感以及合成温度的精确控制导致其稳定性难以保证。例如, Nakamura^[8]等在微流反应器中通过快速准确的温度控制, 合成了粒径在 2~4.5 nm 之间的 CdSe 半导体纳米晶体, 虽然精确控制了合成温度, 但是合成产量小, 不利于实

际应用。Landry^[9]等在较低温度下通过简易的方法合成了全光谱颜色的 CdSe 量子点, 不过取而代之的是较慢的合成速度以及较低的发光效率。因此实现高效稳定, 工艺简单, 利于广泛应用的 CdSe 量子点势在必行。

量子点材料由于其尺寸可调的光电特性和潜在的高量子效率被认为是下一代 LED 的发射源, 并显示了其在背光显示领域的巨大潜力^[10]。目前将 CdSe/ZnS 核壳纳米晶体的有效尺寸结合到一个单一的器件中, 已被认为是制造白光 LED 的一种可能途径^[11]。传统白光 LED(wLEDs)主要由蓝光 LED 芯片加荧光粉组合而成, 由芯片发出的蓝光与荧光粉发出的黄光混合得到白光^[12]。然而, 目前的基于荧光粉的 LED 具有一定的局限性, 尤其是在颜色质量和光谱效率方面。尽管可以实现单独的高性能, 这些 LED 不能同时实现良好的色彩再现, 与人眼光谱灵敏度良好的光谱匹配, 以及暖白色

收稿日期: 2019-03-14, 修订日期: 2019-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61574063)资助

作者简介: 王 果, 1993 年生, 华南师范大学光电子材料与技术研究所硕士研究生 e-mail: guolu9394@163.com

* 通讯联系人 e-mail: shichensu@scnu.edu.cn

调。上述问题基本上源于荧光粉光谱调谐的困难。此外,对荧光粉供应和当前商业垄断的担忧增加了对替代颜色转换器的需求^[13]。量子点作为一种有希望的候选者正在崛起,因为它们通过尺寸控制和窄带发射实现了精细的光谱调谐。因此,通过优化的光谱设计,可以适当地呈现物体的真实颜色,同时实现暖白色调和与人眼灵敏度功能的良好光谱重叠,这反过来提高了光源的效率,所有这些改进都可以在白光 LED 中使用量子点来同时实现^[14]。此外,它们的高光致发光量子效率有助于实现器件的高电效率^[15]。考虑到量子点的这些特性,它们通过拥有高色彩质量以及光度和电效率,为白光 LED 提供了巨大的潜力^[16]。除了通用照明应用之外,基于量子点的 LED 可以轻松满足液晶显示器(LCD)中使用的背光的需求。特别是量子点的窄发射带能够再现高纯度的颜色。而且使用这些材料可以产生更多的颜色,LCD 的色域可以扩展到超出工业标准^[17]。

在器件制造和长期运行过程中,保持量子点的初始光学性能是非常困难的,因此采用合理的封装工艺将是量子点光学性能稳定性的保证。将量子点与蓝光 LED 芯片结合有两种主要的封装策略。一种是将量子点与硅胶的混合物涂覆到 LED 芯片上,即混合结构;另一种是分别涂覆量子点层和荧光粉层,即远程结构^[18]。在混合型中,量子点填充到反射杯中并靠近 LED 芯片,这是最有效率的一种接触方式,但量子点将直接面对高光功率密度;在远程型中,量子点薄膜远离芯片,因此具有较低的光功率密度,并能远离高温环境对量子点的影响^[19]。从两种封装策略可以看出封装顺序会影响光输出效率,进而改变温度分布,最终影响长期稳定性。

本研究量子点合成采用希莱克技术,通过引入双排管,同时实现抽真空和通惰性气体,最大程度保证了量子点无水无氧的合成环境。通过高温热注入法合成了高效稳定的核壳结构红绿光 CdSe/ZnS 量子点,将合成的两种量子点分别作为红绿光转换材料,与蓝光芯片组合通过混合远程型封装工艺形成覆盖 NTSC 标准色域接近 110% 的高色域 wLEDs 灯条。

1 实验部分

实验原料包括氧化镉(CdO, 99.99%)、无水醋酸锌(99.99%, 粉末)、硒粉(Se, 99.99%, 粉末)、硫粉(S, 99.99%, 粉末)、(油酸(OA, 90%)、油胺(OAM, 90%), 十八烯(ODE, 90%)和三正辛基膦(TOP, 90%)等,均购自西格玛公司。石油醚、丙酮、甲醇、甲苯等溶剂均为分析纯,购自国药集团。

核壳结构量子点采用希莱克技术,通过高温热注入法合成。首先是前驱体的制备,在三口烧瓶中加入 0.256 g 氧化镉、2.5 mL 油酸和 2.5 mL 十八烯,通氩气加热至 260 °C,得到镉源;取 0.041 6 g 硒粉加入 0.5 mL TOP 中超声溶解得到硒源;取 0.016 g 硫粉加入 0.5 mL TOP 中超声溶解得到硫源;在三口烧瓶中加入 0.091 5 g 无水醋酸锌、0.5 mL TOP、2 mL 油胺,通氩气加热至 150 °C,得到锌源。核壳结构的 CdSe/ZnS 量子点核合成要保证隔绝水氧的环境,在三

口瓶中加入 4.5 mL 油胺、0.3 mL TOP、0.2 mL 硒源,抽真空加热至 60 °C,再通氩气加热至 90 °C,重复抽真空通入氩气步骤 2~3 次,升温至 280 °C,快速注入 0.5 mL 镉源,待生长 5 min 后,去掉加热套,完成核结构的生长。待温度降至 220 °C 用恒压漏斗逐滴滴入混合好的锌源和硫源,裹好加热套保持温度,待滴加过程完成后,降温至 90 °C 保温 1 h,继续降温至 60 °C,取出反应产物先后加入石油醚、甲醇、丙酮萃取,再经过 4 000 转 3 min 离心,去掉上层无色液体,重复离心步骤两到三次,最后用甲苯溶液溶解管壁上的量子点。实验过程中通过调整镉源和锌源,硒源和硫源的比例最终得到了不同发光波长的红绿光量子点。

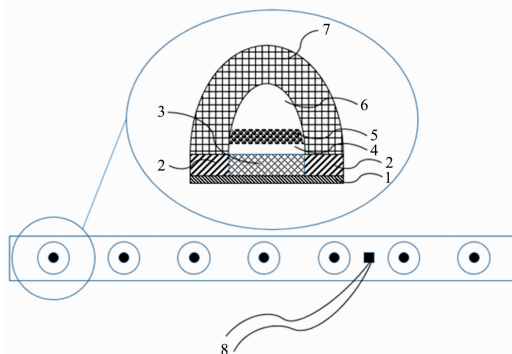


图 1 量子点 LED 灯条封装结构示意图

1: 条形基板; 2: 蓝光 LED 芯片电极; 3: 蓝光 LED 芯片; 4: AB 胶隔热层; 5: 量子点层; 6: AB 胶保护层; 7: PMMA 透镜封装层; 8: 共用电极

Fig. 1 Schematic diagram of the quantum dot LED strip package structure

1: Strip substrate; 2: Blue LED chip electrode; 3: Blue LED chip; 4: AB glue heat insulation layer; 5: Quantum dot layer; 6: AB glue protective layer; 7: PMMA lens encapsulation layer; 8: A common electrode

利用合成的红光和绿光量子点得到量子点白光 LED 灯条,其封装结构示意图如图 1 所示。首先将环氧树脂 AB 封装胶按质量比 1:2 混合均匀后真空脱泡,再注入 PMMA 透镜凹槽底部约 2/3 厚度,并在真空干燥箱内 80 °C 恒温固化 10 h,形成 AB 胶保护层;将合成的 CdSe/ZnS 红绿光量子点与配比好的 AB 胶混合均匀后真空脱泡,涂覆在 PMMA 透镜凹槽中 AB 胶保护层表面至略低于透镜底部水平面处,并在真空干燥箱内 60 °C 恒温固化 12 h,形成量子点发光层;在 PMMA 透镜凹槽中继续注满 AB 胶并在真空干燥箱内 60 °C 下恒温固化 6 h,形成 AB 胶隔热层(4);将填充完毕的 PMMA 透镜边缘涂上 UV 胶后,固定在条形基板整齐排列的蓝光 LED 芯片(3)正上方,并用紫外灯照射 10 min 固化,重复上述步骤完成条形基板上其余 LED 封装,最后通过共用电极(8)将每个蓝光 LED 芯片电极(3)串联,完成量子点 LED 灯条结构的封装。

量子点表面形貌和尺寸大小通过 JEM-2100HR 高分辨率 200 kV 透射电子显微镜测得,PL 光谱通过以 iHR320 光谱仪为基础搭建的组合式荧光光谱测量系统测得,吸收光谱

通过 agilent Cary60 紫外可见分光光度计测得, 室温下的荧光量子产率(PLQY)通过将样品的发射光和在甲醇中的罗丹明 6G(QY=95%) 在相同的光学密度相同激发波长下比较获得。量子点白光 LED 器件的光谱、色坐标、光通量、发光功效、显色指数、色温等通过远方 HAAS-2000 封装 LED 积分球光电测试系统检测。

2 结果与讨论

为了观察合成量子点的微观形貌和结构, 通过 HRTEM

对合成的两种量子点进行表征。图 2(a) 和 (b) 分别为红光和绿光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的扫描电子显微镜照片(TEM)图, HRTEM 图像确认了所得产物的球形形态, 且分散均匀。图 3(a) 和 (b) 分别为绿光和红光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点粒径分布直方图, 通过分析测量 HRTEM 图中 40 个粒子的尺寸大小, 产物红光和绿光核壳结构量子点尺寸分别约为 6.0 和 4.2 nm, 粒径分布范围窄, 与吸收光谱的结果一致。而且, 在 CdSe 核周围可以观察到均匀的浅灰色 ZnS 壳, 可区分晶格平面的存在也表明了合成量子点的高结晶度。

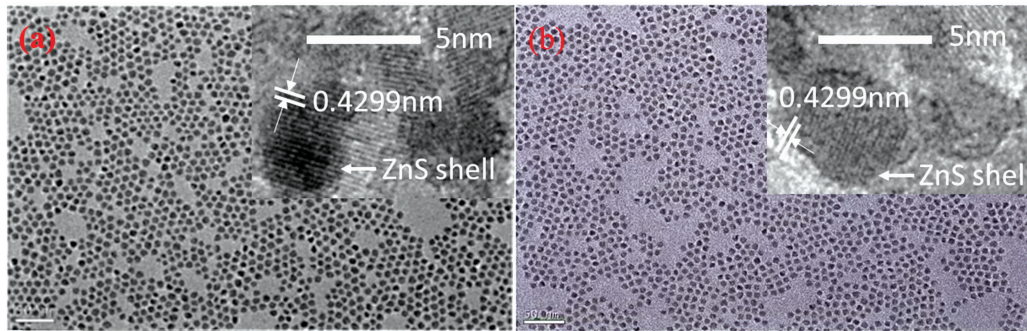


图 2 (a) 绿光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的 TEM 图; (b) 红光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的 TEM 图

Fig. 2 (a) TEM image of green CdSe/ZnS core-shell quantum dots;
(b) TEM image of red CdSe/ZnS core-shell quantum dots

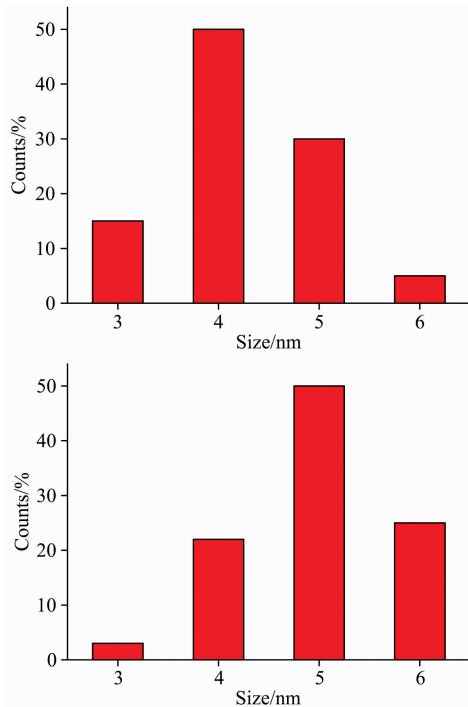


图 3 (a) 绿光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点粒径分布直方图;
(b) 红光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点粒径分布直方图

Fig. 3 (a) Size distribution histogram of red CdSe/ZnS core-shell structure quantum dots; (b) Size distribution histogram of green CdSe/ZnS core-shell structure quantum dots

为了进一步了解合成核壳结构量子点的光学性质, 对量子点进行 UV-Vis 光谱和 PL 光谱测试。图 4(a) 和 (b) 分别为红光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的紫外可见光吸收光谱和光致发光光谱, 图 4(c) 和 (d) 分别为绿光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的紫外可见光吸收光谱和光致发光光谱。众所周知, UV-Vis 吸收光谱是用于表征 CdSe 量子点的常用分析工具之一, 因为最低能量吸收特征(第一激子)可以产生带隙, 粒径和粒度分布的信息^[20]。可以看到合成的红绿量子点激子吸收峰都较为明显, 分别大约在 610 和 510 nm, 这也说明合成量子点的粒径分布窄。量子点 PL 光谱发光峰波长约 625 和 525 nm, 半高宽窄, 分别为 30 和 28 nm, 从图中也可以看出发光峰两侧分布对称均匀, 这都可以看出合成量子点单色性好, 色纯度高, 为制作高质量的量子点白光 LED 提供了可能。对比合成红绿量子点的吸收峰和发光峰, 可以观察到明显的蓝移, 这是由于量子尺寸效应导致。而单独观察每种量子点的吸收峰和发射峰, 也会看到明显的红移现象, 斯托克位移约 15 nm。核壳型量子点的紫外吸收峰要比发射波长小 20 nm, 一般认为紫外第一吸收峰标志着能够对量子点进行有效激发的最大的波长^[21]。

通过间接法获得合成的红光和绿光量子点荧光量子产率(PLQY)分别达到 82% 和 61%, 均超过了 50%。这是由于 ZnS 壳包覆在 CdSe 核表面之后, 减少了 CdSe 核表面的悬键, 钝化了表面缺陷。较厚 ZnS 壳的包覆也导致了晶格畸变, 从而影响到核壳结构量子点的 PLQY。这个结果也反映在后面的封装实验中, 因此需要更大比例的绿光量子点来达到较好的发光效果。

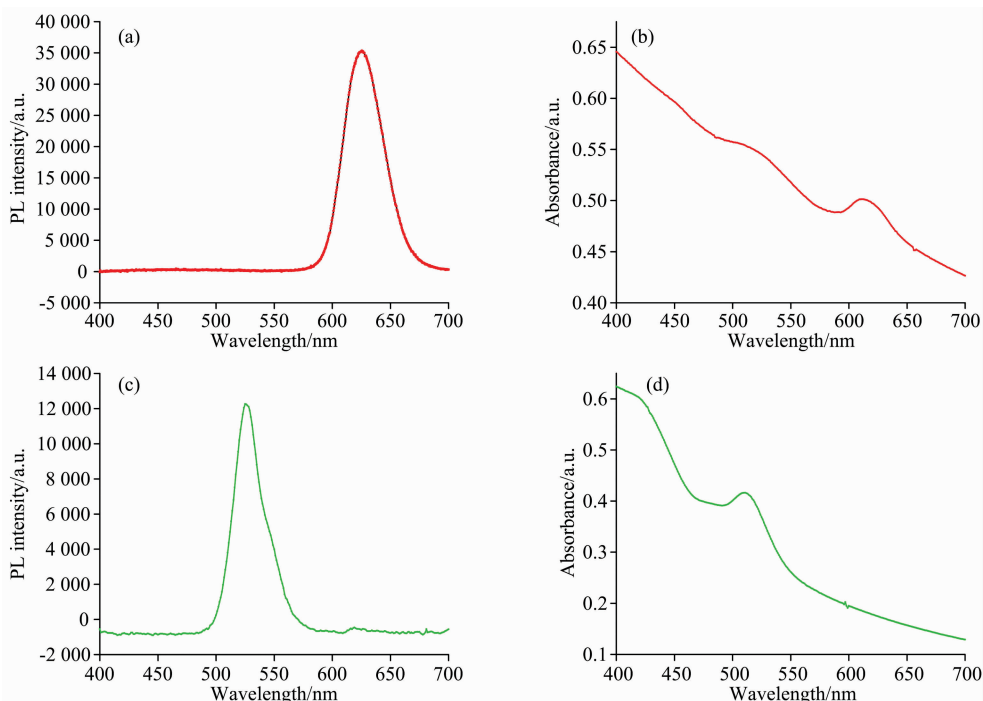


图 4 (a) 红光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的 PL 光谱; (b) 红光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的吸收光谱; (c) 绿光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的 PL 光谱; (d) 绿光 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的吸收光谱

Fig. 4 (a) The PL spectra of red CdSe/ZnS core-shell quantum dots; (b) The absorption spectra of red CdSe/ZnS core-shell quantum dots; (c) the PL spectra of green CdSe/ZnS core-shell quantum dots; (d) the absorption spectra of green CdSe/ZnS core-shell quantum dots

图 5 为基于蓝光 LED 芯片产生白光的量子点白光 LED 封装原理, 主要是利用蓝光 LED 芯片发射的蓝光激发混合有红绿量子点的 LED 层, 发射出红光和绿光再与透射的蓝光混合, 产生白光。通过得到高质量红绿量子点, 混合环氧树脂 AB 胶, 利用 PMMA 透镜改良封装工艺后制备的白光量子点 LED 如图 6(a) 所示。与传统的封装工艺不同, 通过双层保护结构(量子点隔热层和保护层)的设计, 以及封装透镜对整个 LED 器件的保护, 最大限度地隔绝水氧, 避免了 LED 蓝光芯片发热对量子点层发光效率的影响, 保证了白光量子点 LED 器件的寿命和稳定性。

研究中开发的 LED 背光由 240 个白光量子点 LED 制成, 并且首次成功演示了 29 英寸液晶电视面板, 如图 6(b) 所示, 这一结果将进一步地开发量身定制的量子点, 特别是在高性能显示器应用领域。图 6(c) 是白光量子点 LED 器件的发射光谱, 红绿蓝光发射峰波长分别为 630, 535 和 453 nm, 半高宽别为 20, 28 和 30 nm, 三段光谱发射峰两侧对称性良好。可以看到白光量子点 LED 有效解决了传统荧光粉白光 LED 在红色光谱波段缺失的问题, 并同时实现了单色性好、色纯度高、色彩饱和度高等优点。经 LED 积分球光色电测试系统在 20 mA 电流下测试, 得到了 CIE 色坐标为 (0.329, 0.324) 的白光量子点 LED, 非常接近标准白光的色坐标, 色温为 5 094 K, 光效可以达到 $94.72 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, 显色指数 Ra 高达 78.6。通过白光量子点 LED 的发射光谱, 可以得到 sRGB 颜色三角形, 即色域, 通过对比 NTSC1931 标准

色域, 如图 6(d) 所示, 此量子点白光 LED 的色域覆盖率可以达到 109.7%。

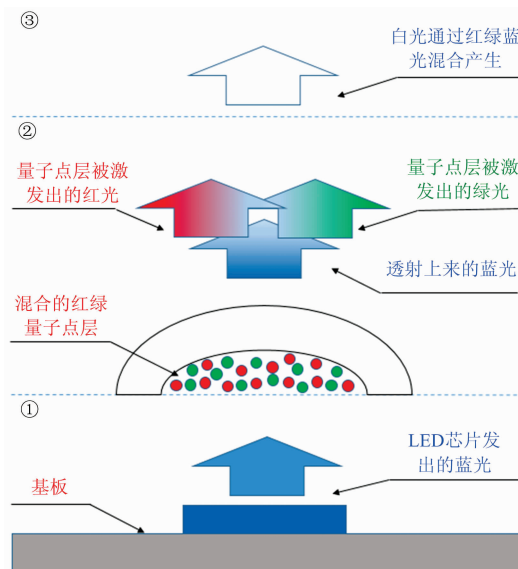


图 5 基于蓝光 LED 芯片产生白光的量子点白光 LED 封装原理

Fig. 5 Quantum dot white LED package principle based on blue LED chip to produce white light

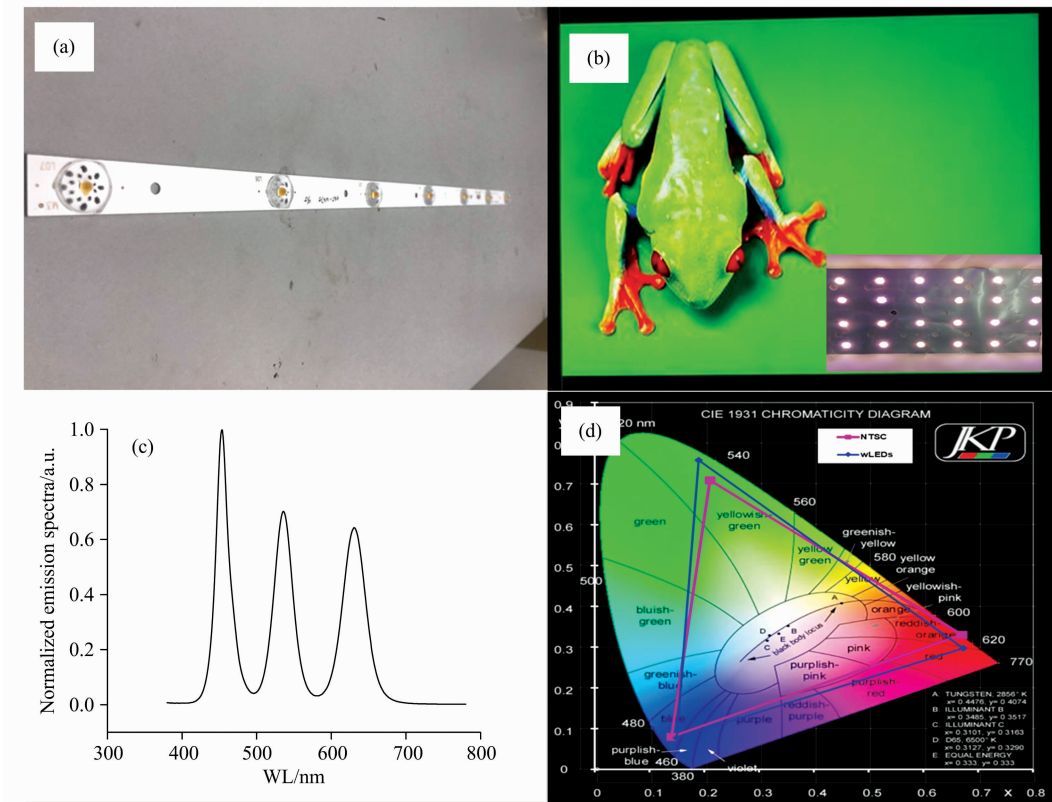


图 6 (a)封装的白光量子点 LED; (b)29 英寸 LCD 液晶电视面板显示图像和白光量子点 LED 背光插图; (c)量子点白光 LED 器件的发射光谱图; (d)白光量子点 LED 背光源与 NTSC1931 标准色域的 sRGB 颜色三角形对比图

Fig. 6 (a) packaged white light quantum dot LED; (b) 29-inch LCD liquid crystal TV panel display image and white light quantum dot LED backlight illustration; (c) emission spectrum of quantum dot white LED device; (d) white light quantum dot LED backlight and NTSC1931 standard color gamut sRGB color triangle comparison image

为了进一步验证这种量子点白光 LED 的性能, 对其进行老化测试, 如图 7 所示, 测试时间为 18 d(超过 400 h), 发现其发光效率维持在 $78 \sim 95 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 的范围内, 显色指数则维持在 68 以上, 并无明显下降现象。对比无保护层

直接在蓝光 LED 芯片上封装量子点层的结构, 其寿命小于 2 d。因此上述封装方式对器件稳定性有较大提升, 说明这种器件的性能稳定可靠, 有望进入商业应用。

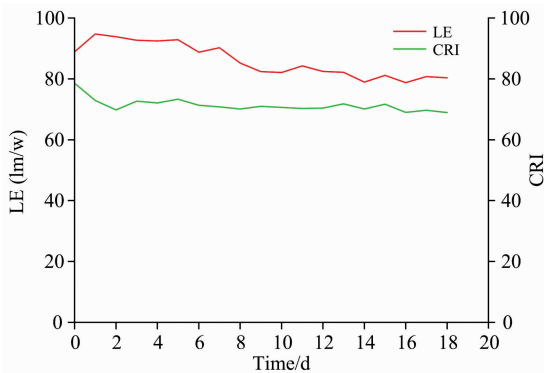


图 7 量子点白光 LED 光效和显色指数衰减曲线

Fig. 7 Luminescence and CRI decay curves of LED with quantum dots

3 结论

采用希莱克技术, 通过高温热合成法合成了高效稳定的 CdSe/ZnS 核壳结构红光和绿光量子点, 采用蓝光芯片和核壳结构红绿量子点的组合, 通过改进封装工艺, 提升量子点层的发光效率, 得到了色坐标为 (0.329, 0.324), 色温达到 5 094 K, 发光纯正的白光量子点 LED。其发光效率高达 $91.72 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, 显色指数达到 78.6, 寿命超过 400 h, 能够覆盖 NTSC 标准色域接近 110%, 与目前报道的量子点 LED 最高色域相似。综上所述, 本量子点 LED 背光源色彩饱和度高, 单色性好, 可以实现一般显示设备难以实现的高色域, 由此看出量子点白光 LED 作为未来背光显示技术的发展方向具有相当的竞争力。

References

- [1] Li X, Wu Y, Zhang S, et al. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(15): 2435.
- [2] Han Heyou, Sheng Zhonghai, Liang Jiangong, et al. *Materials Letters*, 2006, 60(29): 3782.
- [3] Abe S, Joos J J, Martin L I, et al. *Light Science & Applications*, 2016, 6(6): e16271.
- [4] Bauer C A, Hamada T Y, Kim H, et al. *Journal of Chemical Education*, 2018, 95(7): 1179.
- [5] Owen J S, Brus L E. *Chemical Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(32): 7b.
- [6] Luo X, Hu R, Liu S, et al. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2016, 56: 1.
- [7] Nizamoglu S, Ozel T, Sari E, et al. *Nanotechnology*, 2007, 18(6): 160.
- [8] Nakamura H, Yamaguchi Y, Miyazaki M, et al. *Chemical Communications*, 2002, 23(23): 2844.
- [9] Landry M L, Morrell T E, Karagounis T K, et al. *Journal of Chemical Education*, 2014, 91(2): 274.
- [10] Zhang Z, Ye Y, Pu C, et al. *Advanced Materials*, 2018, 30(28): e1801387.
- [11] Shirasaki Y, Supran G J, Bawendi M G, et al. *Nature Photonics*, 2013, 7(1): 13.
- [12] Sheu J K, Chang S J, Kuo C H, et al. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(1): 18.
- [13] Eunjoon J, Shinae J, Hyosook J, et al. *Advanced Materials*, 2010, 22(28): 3076.
- [14] Erdem T, Demir H V. *Nanophotonics*, 2013, 2(1): 57.
- [15] Schreuder M A, Xiao K, Ivanov I N, et al. *Nano Letters*, 2010, 10(2): 573.
- [16] Xuan T T, Liu J Q, Xie R J, et al. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(4): 61207301.
- [17] Kovalenko M V, Liberato M, Andreu C, et al. *ACS Nano*, 2018, 9(2): 1012.
- [18] Xie B, Chen W, Hao J, et al. *Optics Express*, 2016, 24(26): A1560.
- [19] Lin C C, Liu R S. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2011, 2(11): 1268.
- [20] Shinae J, Eunjoon J. *Angewandte Chemie*, 2013, 52(2): 679.
- [21] Polovitsyn A, Dang Z, Movilla J L, et al. *Chemistry of Materials*, 2017, 29(13): 7b.

High Color Gamut Quantum Dots LED and Its Application Research in Backlight Display

WANG Guo, YANG Xin, LI Dong-ying, SUN Xin-yu, FANG Yi-xu, ZHANG Yong, SU Shi-chen*

South China Normal University, Institute of Optoelectronic Materials and Technology, Guangzhou 510631, China

Abstract Quantum dots are widely used in the field of luminescence because of their unique and excellent optical properties. The most prominent feature is that the spectral tuning is convenient, and only the size of the material needs to be changed to realize the tuning of the luminescence spectrum. In combination with the needs of practical applications, CdSe materials were selected as the main research object. By improving the process, introducing Schlenk line to isolate water and oxygen, using high temperature thermal injection method, adjusting the ratio of cadmium source and zinc source, selenium source and sulfur source in raw materials, the core-shell structure CdSe/ZnS red and green quantum dot materials with high color purity and high efficiency and stability were obtained. The synthetic quantum dots have a size of about 6.0 and 4.2 nm, luminescence peaks of 625 nm and 525 nm, the full width at half maximum (FWHM) in PL spectra of 30 and 28 nm, and photoluminescence quantum yield (PLQY) of 82% and 61%, respectively. And then the application of quantum dot LED in backlight display was studied. The composite red and green quantum dot materials were used to replace the phosphor materials in the traditional process. By improving the packaging method, the quantum dot light conversion layer was protected by a double-layer epoxy resin AB glue, at the same time, a PMMA lens coating was introduced to fundamentally isolate water and oxygen. Finally, the packed quantum dot white light-emitting diodes (wLEDs) have red, green and blue emission peaks of 630, 535 and 453 nm, respectively. The FWHM of PL spectra are 20, 28 and 30 nm. The three-segment spectral emission peaks have good symmetry on both sides, effectively solving the problem that the LED is missing in the red spectral band of the traditional phosphorwLEDs. And it achieves the advantages of good monochromaticity, high color purity, and high color saturation. The quantum dot wLEDs with CIE color coordinate (0.329, 0.324) was obtained under the condition of 20 mA current in the LED integrating sphere photochromic test system. The color coordinate was very closed to the standard white light. Its color temperature was 5 094 K, the luminous efficiency reached 94.72 lm · w⁻¹, and the color rendering index Ra could approach 78.6, and the lifetime was more than 400 h. Final-

ly, the quantum dot LED strip was packaged to complete the backlight. According to the quantum dot wLEDs emission spectrum gained from the test, we could obtain the sRGB color triangle, ie the color gamut. By comparing the NTSC1931 standard color gamut, we discovered a high color gamut quantum dot LED backlight with a colorgamut coverage of 109.7%. The LED backlight developed was made up of 240 quantum dot wLEDs and successfully demonstrated the 29-inch LCD TV panel for the first time. This result will further develop tailor-made quantum dots, especially in high-performance display applications.

Keywords Quantum dots; Light-emitting diode; Backlight; High color gamut

(Received Mar. 14, 2019; accepted Jul. 10, 2019)

* Corresponding author