

文章编号:1007-2780(2017)02-0077-07

量子点背光源白平衡特性的研究

黄佳敏¹, 陈恩果^{1, 2*}, 郭太良^{1, 2}

(1. 福州大学 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350002;

2. 福州大学 电子科学与技术博士后科研流动站, 福建 福州 350002)

摘要:为实现液晶显示中背光源的色域扩展和白平衡, 本文基于 CIE1931 色度学系统, 研究了光致发光量子点背光源的混色理论, 采用高斯函数拟合光谱曲线, 构建了量子点背光源的光谱函数模型, 提出了量子点光谱与色坐标之间的互转换方法, 最终实现背光源的白平衡。首先, 在保持光谱有效信息的基础上, 将复杂光谱数据拟合为拟定参数的高斯函数叠加; 然后, 根据 CIE1931XYZ 系统的色坐标求解光谱分布函数及其高斯参数。实验以色温为 5 560 K、6 500 K 和 10 000 K 的量子点背光源作为基准进行了白平衡的理论验证, 得到了光谱分布函数并评价了量子点背光源的白平衡颜色特性, 验证了其光谱和色坐标之间准确而高效的互转换, 简化了光谱曲线的基本函数形式和数值计算量, 实现了数据压缩, 对实现量子点背光源的白平衡实验提供了必要的技术依据和理论指导。

关键词:量子点; 液晶背光; 光谱; 色坐标; 色域

中图分类号:O433.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20173202.0077

White-balance characteristic of quantum-dot backlight

HUANG Jia-min¹, CHEN En-guo^{1, 2*}, GUO Tai-liang^{1, 2}

(1. National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology,

Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2. Post Doctoral Research Station of Electronic Science and Technology,

Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to realize color gamut extension and white balance of backlight source in liquid crystal displays, this paper researches light mixing theory of quantum-dot backlight in CIE1931 chromaticity system by using Gaussian curve fitting spectrum, and establishes spectral function model of quantum-dot backlight source, and further proposes a conversion method between quantum-dot spectrum and color coordinates. First, based on maintaining effective spectral information, the complex spectral data is fitted to conform to the superposition of Gaussian function. Then, color coordinate

收稿日期:2016-09-17; **修订日期:**2016-10-14.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61405037); 福建省科技计划项目(No. 2015H4014); 福州大学高等教育教学改革工程项目(No. 52001078); 福州大学本科专业核心课程建设项目(No. 52000735/工程光学)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61405037); Science and Technology Project of Fujian Province(No. 2015H4014); Higher Education and Teaching Reform Project of Fuzhou University (No. 52001078); Undergraduate Professional Core Curriculum Construction Project of Fuzhou University (No. 52000735/ Engineering Optics)

* 通信联系人, E-mail: ceg@fzu.edu.cn

calculated by CIE1931XYZ system is used to solve spectral function and Gaussian parameters. Finally, the white balance of backlight source can be achieved. Experimental verification achieves the spectral power function and analyses the color characteristics of quantum-dot backlight with color temperature of 5 560 K, 6 500 K and 10 000 K as a reference. Accurate and efficient mutual conversion between the spectrum and color coordinate can be achieved. These results simplify the form of spectral function and numerical computation, achieve the data compression, and provide a necessary technical basis and theoretical guidance for white-balance experiment of quantum-dot backlight source.

Key words: quantum dot; LCD backlight; light spectrum; color coordinates; color gamut

1 引言

在当今主流显示技术中,液晶显示技术占有重要地位,其技术发展也较为迅速^[1]。虽然液晶显示技术已经较为成熟,但由于显示原理与其他显示方式不同,所以其颜色特性将直接影响显示图像的质量。市场上液晶显示器的色域大多都难以突破 100%NTSC,这造成了画面显示颜色不够丰富和鲜艳,色彩还原能力较差^[2]。随着用户对显示设备性能要求越来越苛刻,高色域显示技术也将成为液晶显示厂商争相占领的新一轮技术高地。量子点材料特点是量子效率高,发射谱的半高全宽小,发射波段可调、色纯度高^[3-7]。量子点技术与背光源结合将大大提升液晶显示器件的色域和亮度,从而使得液晶显示器件拥有更高的显色性和色彩还原能力^[8-9]。2015 年,中国海洋大学朱荣贵对比了 New R 粉方案、双色芯片 LED 方案、量子点方案三种不同高色域背光的方案,认为量子点技术方案较适合实际产品应用^[10]。2014 年,上海大学陈赞汉等以实验方式将红绿量子点涂覆于蓝色 LED 芯片上,实现色坐标为 (0.322 8, 0.335 9) 的正白光^[3]。2013 年,东南大学的高小钦等基于量子点白光 LED 器件的电光转换过程,给出了该器件的色坐标、光效和量子点配比等计算公式^[11]。将量子点背光技术与背光模组配套组成完整的液晶显示器,最终实现的目标是整机白平衡,而整机的白平衡又决定于背光模组。因此,本文基于 CIE1931 色度学系统,研究了光致发光量子点背光源的混色理论,建立了量子点背光源光谱的普适性函数模型,提出了量子点光谱与色坐标之间的互转换方法,对实现量子点背光源的白平衡提供了必要的技术依据,为实验提供了理论指导。

2 量子点背光源光谱与色坐标的互转换理论

2.1 量子点背光源色坐标的数学推导

根据量子点背光源光谱计算 CIE1931XYZ 色度学系统^[12]的色坐标分为两个步骤:第一,由光谱计算颜色的 CIE 三刺激值,第二,再将三刺激值转化为相应的色坐标。由格拉斯曼定律,混合色的三刺激值为各谱带三刺激值之和。而任意色光都是由三原色组成的,如果预先测得三原色的光谱三刺激值,则根据混色原理就能够计算出该色光的三刺激值。将待测光的光谱分布函数 $\varphi(\lambda)$,按波长加权光谱三刺激值可以得出每一波长的三刺激值,再进行相加混合即可得到待测色光的三刺激值。由于利用实验设备测试过程中,获得的光谱曲线是由离散点构成的,所以本文在计算三刺激值时使用求和的方法,如下:

$$\begin{cases} X = k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (1)$$

格拉斯曼(H.Grassmann)在颜色匹配实验的基础上总结出了颜色混合的定性性质,称为“格拉斯曼定律”。即:人眼只能分辨颜色的三种变化,即明度、色调、饱和度;由几个成分组成的混合色,如果一个成分连续的变化,混合色的外貌也连续的变化;混合色取决于参与混合的颜色的色表,而与他们的光谱组成无关;混合色的总亮度等于组成混合色的各颜色亮度的总和。格拉斯曼定律用“颜色方程”表示为:

$$C(C) \equiv X(X) + Y(Y) + Z(Z), \quad (2)$$

其中:(C)代表被匹配色的单位;(X),(Y),(Z)分

别代表产生混合色(匹配色)的三原色的单位; C , X, Y, Z 分别代表被匹配色和三原色的数量;“=”代表颜色相互匹配。颜色方程式(2)的两端都同时除以“ $X+Y+Z$ ”,则方程变成如下形式,即:

$$(C) = \frac{X}{X+Y+Z}(X) + \frac{Y}{X+Y+Z}(Y) + \frac{Z}{X+Y+Z}(Z). \quad (3)$$

由如下方程(4)可知,一个单位的颜色(C)的色品只取决于 $X+Y+Z$ 总量中三原色各自所占的相对比例,色品坐标分别用 x, y, z 来表示,它与三刺激值之间的关系如下,即:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases}. \quad (4)$$

2.2 量子点背光源的光谱函数理论模型

若利用蓝光 LED 光源激发红绿量子点,混光后发出固定色温和色坐标的白光,则需研究红绿蓝三种颜色的匹配问题,因此研究由量子点光谱目标色品坐标构建理论光谱函数对实验具有一定的指导意义。在保证光谱有效信息的基础上,将原始光谱数据统一为少量且确定的高斯特征参

数,即包括峰高、峰位和峰宽,这样简化了光谱曲线,实现数据的压缩。采用高斯拟合光谱曲线需假设原始光谱是由若干个单峰谱带相互叠加形成,以高斯函数作为基本函数形式,则光谱的函数模型可由公式(5)确定。

$$\varphi(\lambda) = \sum_{i=1}^n A_i \exp \left[-2.773 \left(\frac{\lambda - B_i}{C_i} \right)^2 \right], \quad (5)$$

其中: A_i 为峰值, B_i 为峰位, C_i 为峰宽。则红绿蓝三种颜色的峰值分别为 A_R, A_G, A_B ,红绿蓝三种颜色的峰位分别为 B_R, B_G, B_B ,红绿蓝三种颜色的峰宽分别为 C_R, C_G, C_B 。实验中所使用的红、绿两种颜色量子点都为同一批次,一般具有固定的峰宽和峰位,根据两种颜色量子点用量的不同来改变不同发射波长的量子点峰值,则量子点光谱分布函数 $\varphi(\lambda)$ 可以由下式表示:

$$\begin{aligned} \varphi(\lambda) = & A_R \exp \left[-2.773 \left(\frac{\lambda - B_R}{C_R} \right)^2 \right] + \\ & A_G \exp \left[-2.773 \left(\frac{\lambda - B_G}{C_G} \right)^2 \right] + \\ & A_B \exp \left[-2.773 \left(\frac{\lambda - B_B}{C_B} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

将 $\varphi(\lambda)$ 带入到公式(2)、(4)中得到色品坐标 x, y :

$$x = \frac{k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda}{k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda + k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda + k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda}, \quad (7)$$

$$y = \frac{k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda}{k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda + k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda + k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda}, \quad (8)$$

约去 k 和 $\Delta\lambda$ 后可得:

$$x = \frac{\sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda)}{\sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) + \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) + \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda)}, \quad (9)$$

$$y = \frac{\sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda)}{\sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) + \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) + \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda)}. \quad (10)$$

公式(7)、(8)中色品坐标 x, y 是仅与光谱分布函数 $\varphi(\lambda)$ 相关的函数。光谱分布函数 $\varphi(\lambda)$ 是

仅与峰值 A_R, A_G 和 A_B 有关的函数,将光谱分布函数 $\varphi(\lambda)$ 带入式(9)、(10)中,则量子点背光源的

色坐标也仅与红绿蓝三色光的峰值 A_R , A_G 和 A_B 有关。固定蓝光 LED 的峰值, 则式(9)、(10)是一个只有两个变量 A_R 和 A_G 且有唯一解的二元方程组。通过理论计算确定了 A_R 和 A_G 两个峰的峰值, 即可得到唯一的光谱分布函数, 则色品坐标 x 、 y 是仅与红、绿光谱峰值相关的值, 即色品坐标 x 、 y 与峰值 A_R , A_G 呈一一对应关系。若已知色坐标则可得到相对应的峰值, 由此解得 A_R , A_G 即可得到了已知色坐标的光谱。

3 理论验证与结果讨论

3.1 量子点背光源白平衡光谱的色坐标求解

根据 2.1 节中理论, 将图 1 光谱分布函数与三原色的刺激量相乘, 按波长进行求和, 三原色的刺激量 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 可以通过查表得到, $\Delta\lambda$ 为求和过程中选定的固定步长(本文取 1 nm)。 $\Delta\lambda$ 越小则计算精度越高, k 为比例系数, 在色品坐标的计算过程中可以约去。取三组峰值、峰位、峰宽不同的实验测试光谱数据导入程序中, 其中(a)(b)两组使用同一批次的量子点, 其峰位、峰宽均相等, (c)组与(a)(b)组实验中使用的量子点不同, 其峰值、峰位、峰宽与(a)(b)组均不相等, 计算得到数据分别为: (a)组色坐标(0.313 8, 0.330 2)、色温 6 439 K、色域范围 121.888% NTSC。(b)组色坐标(0.274 6, 0.286 9)、色温 10 818 K、色域范围 121.887% NTSC。(c)组色坐标(0.330 6, 0.309 1)、色温 5 560 K、色域范围 119.267% NTSC。图 1 中(b)组与图 1(a)(c)组进行对比, 前者光谱中绿光和红光的

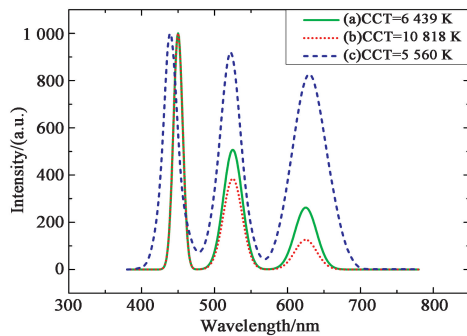


图 1 实验得到的量子点背光源的白平衡光谱 (a)色温为 6 439 K; (b)色温为 10 818 K; (c)色温为 5 560 K

Fig. 1 Schematic diagram of the spectrum of quantum-dot backlight after experiment. (a) Color temperature of 6 439 K; (b) color temperature of 10 818 K; (c) color temperature of 5 560 K

比例较小, 则前者的光谱色温较后两者高, 色坐标位置更靠近蓝色区域。计算结果与实际相符。将三组光谱数据分别计算色域范围, 图 1(a)(b)组的光谱峰宽、峰位均相等, 且红绿蓝三色的单色色坐标相近, 色域范围相等, 而色温为 5 560 K 的光谱色域范围比前两组小。由于(a)(b)组中蓝光 LED 光源、红绿量子点的峰位、峰宽一致, 即红绿蓝三色的单色波长和单色色坐标一定的情况下, 背光源的色域范围相同。(a)(b)组中红光和绿光的单色峰值和组份比例不同, 导致混合白光色坐标不同。

图 2 是根据对应的白平衡光谱计算单色色坐标, 在舌形图中表现出的三种色温的色域范围。图 3 是由图 1 中光谱分布函数归一化后得到的白

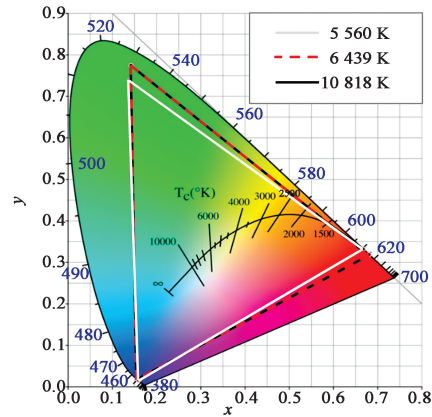


图 2 不同色温对应白平衡光谱的色域范围

Fig. 2 Schematic diagram of color gamut for white-balance spectrum with different color temperature.

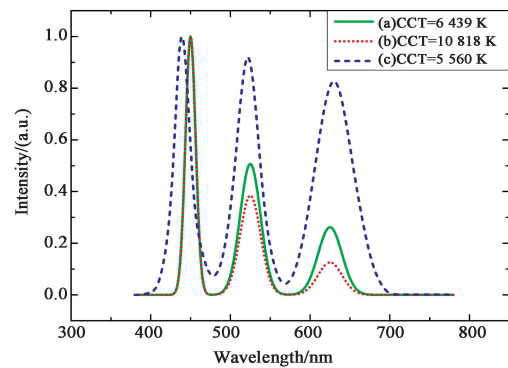


图 3 归一化量子点背光源的白平衡光谱 (a)色温为 6 439 K; (b)色温为 10 818 K; (c)色温为 5 560 K

Fig. 3 Schematic diagram of the normalized white-balance spectrum of quantum-dot backlight. (a) Color temperature of 6 439 K; (b) color temperature of 10 818 K; (c) color temperature of 5 560 K

平衡光谱,将图3中的光谱分布函数进行计算,与图1的色温、色坐标和色域相同,符合颜色方程的线性运算法则,即:将匹配的三色光强度扩大或者缩小相同的倍数,则三色光仍然匹配。

3.2 量子点背光源光谱函数模型的验证

参考量子点供应商提供的数据,将光谱中绿色和红色量子点的峰位 B_G, B_R 分别设置为525 nm和625 nm,红绿两种颜色的半峰宽 C_G, C_R 都设置为40 nm。由于实验利用蓝光光源激发红绿量子点,则根据蓝光LED的峰位和半峰宽进行设置,分别将 B_B, C_B 设置为450 nm和20 nm。若已知色温色坐标,即可得到光谱中红绿量子点出光峰值的比例。图4(a)组是色温为6 500 K、色坐标(0.312 8, 0.329 2)计算得到的光谱函数,图中红绿蓝三色的峰值比为0.29 : 0.52 : 1。图4(b)组是色温为10 000 K、色坐标(0.278 8, 0.292 0)计算得到的光谱函数,图中红绿蓝三色的峰值比为

0.15 : 0.41 : 1。图4(a)组与(b)组相比,前者的红绿光谱成分比例较大,色坐标位置相对后者更加靠近红色区域,色温较低;后者的蓝色光谱成分比例较大,色坐标位置更加靠近蓝色区域,色温较高,实验结果中色温色坐标随光谱分布函数的变化情况与实际情况相符。通过光谱分布函数得到单色色坐标,根据色域计算公式,可以求得色温6 500 K和10 000 K的色域范围分别为119.161% NTSC和119.175% NTSC,在舌形图上画出二者的色域范围,如图5(a)所示。在量子点峰位、峰宽一致的情况下,即红绿蓝三色的单色波长和单色色坐标一定的情况下,不同色温的色域范围相差仅为0.014% NTSC,在误差允许的范围内,可近似认为两色温的色域范围相等,验证了3.1中的结论。(c)组中是色温为5 560 K的计算光谱函数图,与图1(c)组相比,绿光光谱组份比例偏低,单色色坐标与实际坐标位置发生微小位移,

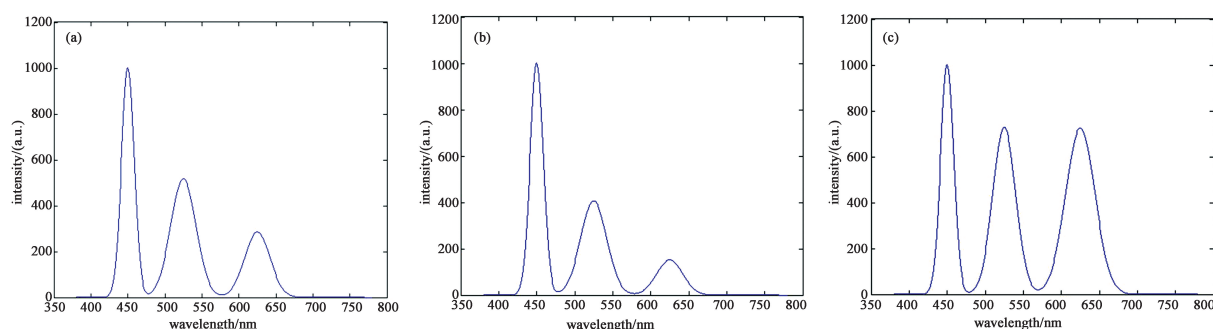


图4 根据达到白平衡的色坐标构建量子点背光源光谱函数模型的结果验证。(a)色温为6 500 K;(b)色温为10 000 K;(c)色温为5 560 K

Fig.4 Verification of the spectrum function calculated by color coordinates of the quantum-dot backlight.(a) Color temperature of 6 500 K; (b) color temperature of 10 000 K; (c) color temperature of 5 560 K.

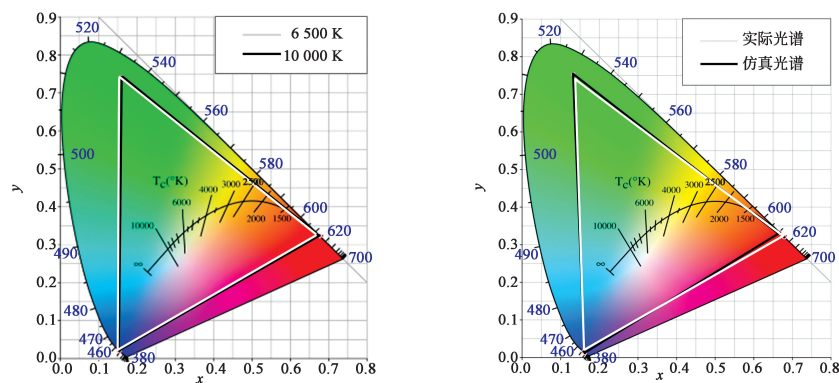


图5 (a)不同色温对应光谱的色域范围;(b)色温5 560 K的实际、仿真光谱色域范围对比

Fig.5 (a)Schematic diagram of color gamut with different color temperature;(b)Contrast diagram of color gamut between reality and simulation (5 560 K).

色域范围为 120.161% NTSC,与实际光谱的色域范围相差 0.894% NTSC,图 5(b)中展示了色温为 5 560 K 时,实际与仿真光谱色域范围对比图。在误差允许的范围内,这证明了该方法对三基色混光白平衡有一定的指导作用。

4 结 论

本文提出了量子点光谱与色坐标之间的互转

换方法,对几种典型色温下的量子点背光源的白平衡光谱进行理论研究,并实验验证该方法能够准确高效地确定混合光中三基色的组成比例,构建达到白平衡条件下的量子点背光源光谱函数,为量子点背光源颜色特性的理论研究提供了必要的技术依据,为红绿蓝三色混光实现白平衡的实验提供了良好的理论支撑,有助于在实验过程中有效减少实验步骤和降低实验成本,对分析量子点背光源具有一定的应用价值和实际意义。

参 考 文 献:

- [1] 钟建.液晶显示器件技术[M].北京:国防工业出版社,2014:1-10.
ZHONG J.*Liquid Crystal Display Technology* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 1-10. (in Chinese)
- [2] 周忠伟,孟长军,王磊,等.液晶显示器广色域技术的研究[J].发光学报,2015,36(9):1071-1075.
ZHOU Z W, MENG C J, WANG L, *et al.* Research of wide color gamut technology for liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(9): 1071-1075. (in Chinese)
- [3] 陈赞汉,张雪,周洁,等.红绿 CdSe@ZnS 量子点配比对三波段标准白光 LED 器件的影响[J].发光学报,2014,35(8):992-997.
CHEN Y H, ZHANG X, ZHOU J, *et al.* Effect of red, green CdSe@ZnS quantum dots ratios on standard three-band white LED devices [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(8): 992-997. (in Chinese)
- [4] 许献美,吴亮亮,郭晋芝,等.CdSe/CdS 核壳型量子点的合成及其在白光 LED 的应用[J].河北师范大学学报:自然科学版,2012,32(6):593-596,600.
XU X M, WU L L, GUO J Z, *et al.* Synthesis of CdSe/CdS Core/shell quantum dots and their application for white LEDs [J]. *Journal of Hebei Normal University :Natural Science Edition*, 2012, 32(6): 593-596, 600. (in Chinese)
- [5] 翟保才,张文君,吴奉炳,等.半导体量子点电致发光器件用于航空舱内照明的可行性研究[J].照明工程学报,2013,24(2):92-96.
ZHAI B C, ZHANG W J, WU F B, *et al.* Discussion of using semiconductor quantum dot electroluminescent light-emitting devices in the interior lighting of aviation cockpit lighting [J]. *Zhaoming Gongcheng Xuebao*, 2013, 24(2): 92-96. (in Chinese)
- [6] 刘鹏,蒋玉蓉,杨盛谊.基于量子点的白光二极管的研究进展[J].半导体光电,2013,34(2):162-170.
LIU P, JIANG Y R, YANG S Y. Research progresses of quantum dots-based white light-emitting diodes [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(2): 162-170. (in Chinese)
- [7] 张锋,薛建设,喻志农,等.量子点发光在显示器件中的应用[J].液晶与显示,2012,27(2):163-167.
ZHANG F, XUE J S, YU Z N, *et al.* Quantum-dot light emitting device for displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 163-167. (in Chinese)
- [8] FRECKER T, BAILEY D, ARZETA-FERRER X, *et al.* Review-quantum dots and their application in lighting, displays, and biology [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2016, 5(1): R3019-R3031.
- [9] COE-SULLIVAN S, LIU W H, ALLEN P, *et al.* Quantum dots for LED down conversion in display applications [J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2013, 2(2): R3026-R3030.
- [10] 朱荣贵.色彩增强算法及高色域背光研究与应用[D].青岛:中国海洋大学,2015.
ZHU R G. *The research and application of colour-enhanced algorithm and wide color gamut backlight* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)
- [11] 高小钦,卓宁泽,王海波,等.半导体量子点在白光 LED 器件上的应用研究[J].物理学报,2015,64(13):1370801.

GAO X Q, ZHUO N Z, WANG H B, *et al.* Application of semiconductor quantum dots no white-light-emitting diodes [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(13): 1370801. (in Chinese)

[12] 徐海松.颜色信息工程[M].杭州:浙江大学出版社,2005:27-152.

XU H S. *Color Information Engineering* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005: 27-152. (in Chinese)

作者简介:黄佳敏(1994—),女,福建南平人,硕士研究生,2015 年于福州大学获得学士学位,主要从事量子点背光方面的研究。E-mail: hjm45661@sina.com

陈恩果(1984—),男,福建福州人,博士,副教授,2013 年于浙江大学获得博士学位,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: ceg@fzu.edu.cn