

文章编号:1007-2780(2019)03-0229-07

基于分布式布拉格反射器的量子点彩膜

郭太良, 缪煌辉, 林淑颜, 郭 骞, 叶 芸, 陈恩果, 徐 胜*

(福州大学 物理与信息工程学院, 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350116)

摘要:通过研究量子点彩膜的转换效率、结构对出光强度和色域的影响, 提出了基于分布式布拉格反射器的量子点彩膜新结构。首先通过光学仿真软件导入红/绿量子点参数并构建量子点彩膜光色转换模型, 设置分布式布拉格反射器和传统滤光片的膜层属性; 再以蓝光背光源激发量子点彩膜, 研究膜层在不同膜厚和量子点比重的情况下蓝光利用率; 最后, 比较了传统彩色滤光片和分布式布拉格反射器两种结构对量子点彩膜光学性能的影响。设计结果表明: 新结构比传统彩色滤光片结构红、绿子像素光强分别提升了 2.19 和 2.26 倍, 在 CIE1931-NTSC 标准下可实现色域为 128%。

关键词:量子点; 彩膜; 光色转换; 分布式布拉格反射器

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193403.0229

Quantum dot color filter on distributed Bragg reflector

GUO Tai-liang, MIAO Huang-hui, LIN Shu-yan, GUO Qiang, YE Yun, CHEN En-guo, XU Sheng*

(National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology,
College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The quantum dot color filter membrane structure was simulated. The conversion efficiency of quantum dot film to backlight and the influence of external structure on light intensity and color gamut were researched. Two different band-pass distributed Bragg reflector structures were proposed on top and bottom of quantum dot film. Firstly, the parameters of red/green quantum dots were imported through the optical simulation software, the conversion model of quantum dot color filter was constructed, and the layer properties of distributed Bragg reflectors and conventional filters were set. The quantum dot color filter was excited by the blue backlight, the conversion efficiency of blue light to different film thicknesses and quantum dot specific gravity was studied. The optical influence of traditional filter and distributed Bragg reflector on the optical properties of quantum dot color filter was compared. The simulation results show that the distributed red-green sub-pixel brightness is increased to 2.19 and 2.26 times, by the CIE1931 standard, the color gamut can reach NTSC128%.

Key words: quantum dots; color filter; light color conversion; distributed Bragg reflector

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-12-18.

基金项目: 福建省教育厅科技项目 (No. JAT160043); 福州大学人才基金 (No. XRC-17042)

Supported by Science and Technology Project of Fujian Provincial Education Department (No. JAT160043); Talent Foundation of Fuzhou University (No. XRC-17042).

* 通信联系人, E-mail: xusheng06090@163.com

1 引言

传统液晶面板中,由于彩色滤光片(Color filter, CF)对进入光线的阻隔作用,损失了约 2/3 的能量,使得液晶显示器的能量利用率较低^[1-3]。随着量子点(Quantum dot, QD)技术的发展,将量子点封装成彩色滤光膜的方案来实现光色转换的方式日益受到重视。量子点彩膜结构的工作原理是以蓝光 LED 作为侧入式背光源,经过导光板转化成为均匀出光的蓝色面光源,量子点阵列层置于液晶层之上,受到蓝光激发产生与该子像素相对应颜色的单色光。由于没有了传统彩色滤光片对光线的吸收作用,该结构的发光效率比传统结构大幅增加。另一个优势则是高效的反应时间,因为只有蓝光通过液晶层,仅需要采用更薄的液晶层膜厚就能获得相应的相位差,更薄的液晶层意味着反应时间的提升。与此同时,由于量子点光致发光的出光具有各向同性的特征,一定程度上也保证了器件具有较大的可视角度。可见,未来液晶显示技术的重要发展方向之一就是采用量子点彩膜技术来提升液晶显示的色域,改善画质并且同时降低显示器的功耗^[4-6]。2016 年,韩国延世大学 Kim 等提出以白光机发光二极管作为背光激发红绿量子点膜层,基于在图案化的量子点膜上具有气隙结构,以通过回收不必要的光来提高光学效率^[7]。同年,中山大学刘益坤等人通过匹配相应的滤色器像素,将该量子点阵列进一步放置在传统的滤色器阵列上,以消除蓝光串扰^[3]。2017 年,京东方齐永莲等开发了量子点光刻胶替代彩色滤光片的方法,通过合成新型的量子点光刻胶,将其作为色彩转换膜制备在彩色滤光片下方,通过背光激发量子点自发光,可得到色纯度更高的红绿光^[8]。在此基础上,本文通过仿真提出了一种防蓝并提高光效的量子点彩膜新结构。有助于在实验过程中有效减少实验步骤和降低实验成本,对分析量子点彩膜具有一定的应用价值和实际意义。

2 基于分布式布拉格反射器的量子点彩膜结构

量子点彩膜结构中用蓝色背光源激发量子点

后会存在一个问题,其出光中会有大量的蓝光掺杂而导致出光不纯。如图 1(a)所示,当量子点彩膜结构单用一层量子点膜层去转化蓝光时,其转化效率远远达不到所需的单一颜色的效果,影响其单色出光性能。因此,如图 1(b),需在量子点膜层中加入大量的散射粒子,从而达到增加光程提高蓝光的转化效率,减少量子点用量^[9]。为了进一步减少蓝光的漏过率,现常见的解决方案是在量子点膜层上方再加入一层彩色滤光片^[10],如图 1(c)所示。

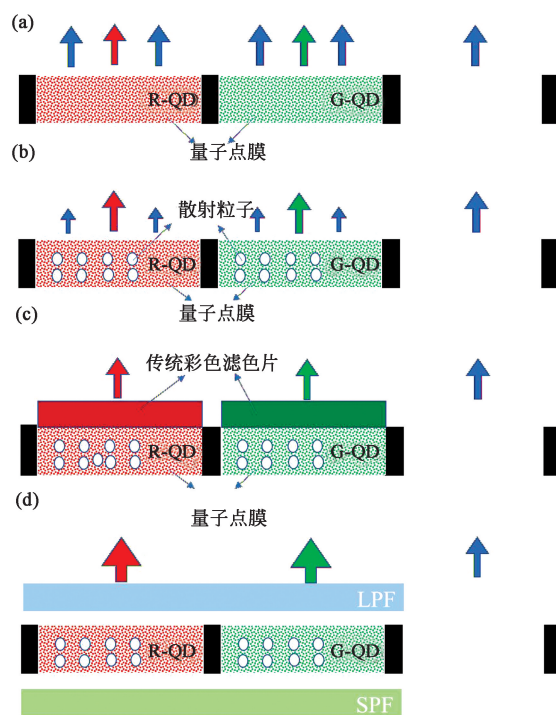


图 1 量子点彩膜结构对比。(a)量子点膜;(b)加入散色粒子的量子点彩膜;(c)量子点膜层中加入散色粒子配以彩色滤光片膜层;(d)量子点膜层中加入散色粒子配以 LPF 和 SPF 膜层。

Fig.1 Quantum dot color filter structure comparison. (a) Quantum dot color filter; (b) Quantum dot color filter with Scattering particle; (c) Quantum dot color filter with dispersive particles and CF film layer; (d) Quantum dot color filter with dispersing particles LPF and SPF layers.

为了提高光效和防蓝光,提出图案化的带通滤波器替代彩色滤光片来实现高效的量子点彩膜。如图 1(d)所示,分别在彩膜中设置上层的长通滤波器(Long-pass filter, LPF)及下层的短通

滤波器(Short-pass filter, SPF),这两种滤波器为分布式布拉格反射器(Distributed Bragg reflector, DBR),通过多对两种不同折射率的材料交替达到高反射率^[11-12]。其对波段的选择依赖于选用的材料及膜层的厚度,得到对不同波段选择的分布式布拉格滤波器反射器^[13]。通过两层图案化 DBR 膜层的作用,可使得未被量子点转换的蓝光反射回来二次激发,而反向发射的红绿光则被下层的低通滤波器再次向上出射,达到能量循环高效出光。

量子点彩膜中影响其出光效率和纯度的主要因素在于蓝光的光程,而改变蓝光光程与量子点膜层厚度、膜层中量子点用量的比重和外部结构参数有关。当使用特定的量子点时,其量子效率不会改变,因此本文从外部结构着手并调节膜层厚度和膜层中量子点用量的比重,进行仿真研究,并对比图 1(c)与(d)两种结构的优劣,为后续实验提供了理论指导和依据。

3 建模与仿真

在建立彩膜模型之前需对其中关键因素进行设定,包括量子点及散射粒子参数的确定。为了与实际相符合,采用了实际红绿量子点尺寸作为模型构建的仿真参考。其中红绿量子点粒子直径分别为 9 nm 及 6 nm,将其应用于量子点彩膜相应颜色子像素当中并建立发光模型^[14]。通过中心波长为 450 nm 的蓝色背光去激发模型子像素中的红/绿量子点,研究量子点彩膜的色彩转换情况。为了达到高光线转换效率,采用不同量子点比重和不同厚度膜层的彩膜进行模拟。

3.1 DBR 膜层基本参数

DBR 膜层是由高低不同折射率的材料多层交替的周期结构,每层材料的光学膜厚为中心反射波长的 4 倍材料折射率分之一,其禁带的宽度通过设置膜层交替的对数来控制。本文使用 SiO₂ 及 TiO₂ 作为交替材料,通过调节膜层的厚度和对数达到两种不同带通的 DBR^[15]。

当一定出射角度的面光源去测试 DBR 膜层与 CF 膜层的反射率和透射率,如图 2(a)所示了在平行光的情况下红/绿/蓝三色 CF 膜层以及两种不同带通的 DBR 膜层在 400~700 nm 之间透射率的变化。SPF 透射 490 nm 以下的蓝光并反

射红绿光,而 LPF 透射 500~680 nm 红绿光并反射蓝光。两种滤波器在入射光角度小于 40°时对波段选择的透射率达到 95%,其透射率大于 CF 红光波段的透射率 91%、绿光波段的透射率 85%、蓝光波段的透射率 80%,但 DBR 的光学特性随光入射角而改变,CF 的光学特性对于所有角度都是相同^[13]。如图 2(b)和 2(c)所示,SPF 和 LPF 在不同入射角时对波段的反射率,在入射光线角度小于 40°的情况下,SPF 对 490~700 nm

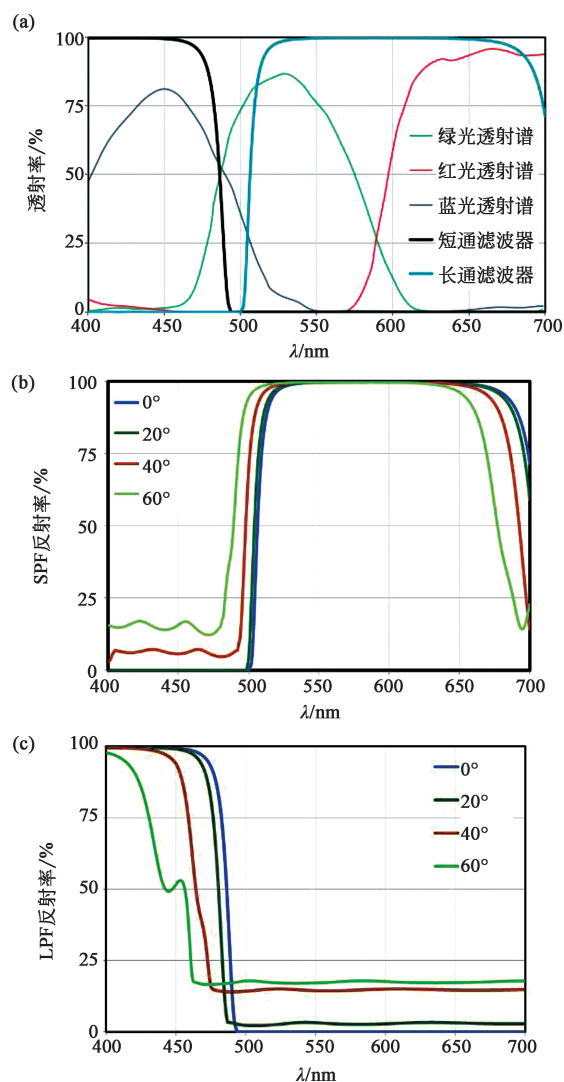


图2 (a)CF 红绿蓝三色透光率和 LPF、SPF 膜层透光率;(b)SPF 膜层对不同入射角度的反射率;(c) LPF 膜层对不同入射角度的反射率。

Fig.2 (a) Red, green and blue light transmittance of CF and the transmittance of LPF and SPF; (b) Reflectivity of SPF film to different incident angles; (c) Reflectivity of LPF film to different incident angles.

的红绿光具有超过 98% 的高反射率有助于向下出射红绿光的回收, LPF 对 400~500 nm 的蓝光也具有超过 94% 的高反射率可减少向上出射蓝光的串扰。然而, 随着光线入射角度的增大, 反射率也随之降低。

3.2 量子点膜层属性分析

当量子点彩膜不配以外结构时, 自下而上的蓝光主要被量子点膜层吸收和反射。蓝光光束的强度将随着入射深度的增加而逐渐减弱。由比尔(Beer)定律可得, 蓝色光束在均匀量子点膜层中沿 x 向传播, 通过膜厚为 dx 的膜层后, 光强由 I 变为 $I-dI$, 光强的减少量 dI 比光强 I 与通过的介质厚度 dx 成正比, 即

$$\frac{dI}{I} = -\alpha dx, \quad (1)$$

其中: α 是与光强无关的比例系数, 称为介质吸收系数^[16]。 α 吸收系数与量子点膜层中的量子点比重 C 成正比, 即 $\alpha = \beta C$ 。因此出射光强 I 可以表示为

$$I = I_0 e^{-\beta Cl}, \quad (2)$$

其中: l 为膜层厚度, I_0 为初始光强, β 为比例系数。如图 3 所示为仿真实验得到膜层厚度 l 在 0~10 μm 的范围内蓝光透过膜层的光通量变化情况。设置蓝光初始光通量为 10 lm, 以实验中常用的量子点质量分数 10%, 20%, 30% 作为三因素。仿真结果表明, 随着膜层厚度及量子点比重的增加, 透过的光通量也随之降低。红绿量子

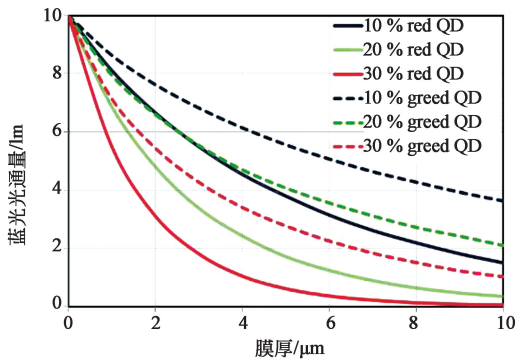


图 3 以 10%, 20%, 30% 作为三因素的红绿量子点膜蓝光的透过率

Fig. 3 Blue light transmittance of the red-green quantum dot film with 10%, 20%, 30% as a three-factor

点对蓝光的吸收效率不一样, 红色量子点吸收系数大于绿色量子点。通过对图 3 中数据的拟合, 分别得到红/绿量子点膜层对蓝光的出射强度 I_{rb}/I_{gb} , 可以表示为:

$$\begin{aligned} I_{rb} &= I_0 e^{-1.93Cl}, \\ I_{gb} &= I_0 e^{-0.88Cl}. \end{aligned} \quad (3)$$

透过膜层的蓝光占初始蓝光一小部分, 大部分蓝光被膜层中量子点吸收进行能量下转换, 发出对应颜色的光。能量转换后的光线以散射方式传播, 导致大部分光线无法向正方向出射。如图 4 所示为不同膜厚下, 转换后的光线在正/反方向上的相对强度变化情况。当膜层厚度增加时颜色发生改变, 且总的光通量也随之增加; 但反向出光强度约是正向出光强度的 2.1 倍, 表明大量转换后的光线没有得到有效利用。因此, 需对反向出射的光线进行高效的回收。

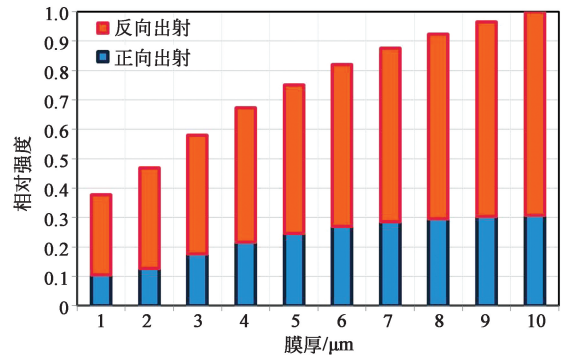


图 4 转换后光线正/反向出射光强对比

Fig. 4 Contrast of positive/reverse exit light intensity after conversion

3.3 结果对比与讨论

如图 5(a) 所示, 为红色量子点膜层配以红色彩色滤光片的光路图, 蓝光激发红色量子点膜层发出红光而多余的蓝光被红色彩色滤光片吸收。由上述推导, 可得出正面红光出光强度 I_{cr} 为:

$$I_{cr} = 0.91 \times I_{cr1} = 0.29 \times I_{b0} (1 - e^{-1.93Cl}), \quad (4)$$

其中: I_{b0} 为初始蓝光光强, I_{cr1} 为透射过量子膜层的红光强度, C 为红色量子点为占膜层中的比重, l 为膜层厚度。由公式(4)所得该种结构对光效利用率小于 29%。以 5 μm 膜层及 30% (质量分数) 红色量子点代入公式(4)进行计算, 光线利用率为 27%。由此可见, 该种结构由于大量光线被反向出射和被 CF 吸收, 导致光效利用率较为

低下。

如图 5(b) 所示为红色量子点膜层配以上下两层 DBR 的光路图。上层的 LPF 膜层将未转换的蓝光反射回来进行多次利用,下层 SPF 膜层将经量子点转换后反向出射的红光进行反射以实现正面出射。出射红光强度 I_r 为:

$$I_r = 0.95 \times (I_{r1} + I_{r2}) = 0.63 \times I_{b0} (1 - e^{-1.93Cl}) \quad (5)$$

其中: I_{r1} 为第一次透过量子膜层的红光强度, I_{r2} 为光线多次利用后透过量子膜层的红光强度。通过双层滤波器使光线在结构中振荡并选择出射,大大提高了膜层光线利用率。同样以 $5 \mu\text{m}$ 膜层及 30% (质量分数) 红色量子点代入公式(5)进行验算,光线利用率为 59%,而透射出膜层的蓝光强度占初始蓝光强度的 0.5%,对于子像素颜色纯度影响较小。

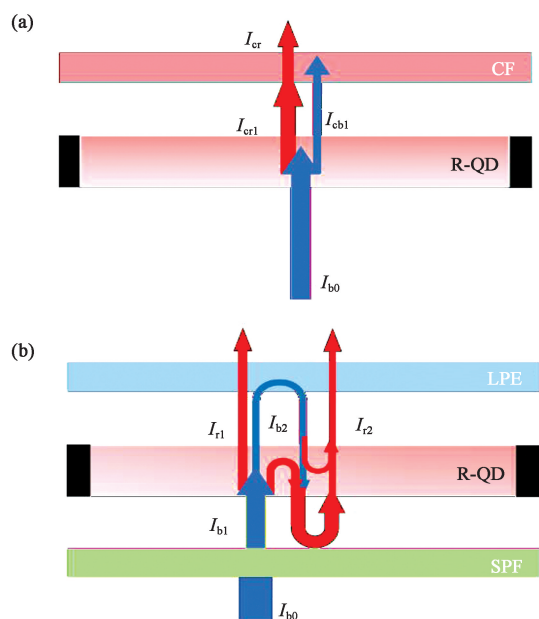


图5 (a) CF 结构量子点彩膜光路图; (b) LPF 和 SPF 膜层结构量子点彩膜光路图。

Fig.5 (a) CF structure quantum dot color film light path diagram; (b) LPF and SPF film structure quantum dot color film optical path diagram.

而相对于红色量子点膜层,绿色量子点膜层转化效率会更为低下。分别对绿色量子点膜层配以 CF 膜层结构和 DBR 膜层结构进行研究,出射绿光的强度 I_{cb} 、 I_b 分别为:

$$I_{cb} = 0.27 \times I_{b0} (1 - e^{-0.88Cl}) ,$$

$$I_b = 0.61 \times I_{b0} (1 - e^{-0.88Cl}) . \quad (6)$$

因为绿色量子点对蓝光的吸收效率比红色量子点低,导致下转换出射的强度相对较低。

为了定量表示红/绿子像素出光强度,通过仿真实验分别测量两种结构出光的红绿光谱。图 6 为量子点彩膜在 CF 膜片以及 DBR 膜片下的光谱图,通过积分分别计算在对应颜色波长范围内红/绿光谱增强的光通量,结果表明,DBR 结构的红/绿子像素光通量分别是 CF 结构的 2.19 和 2.26 倍。

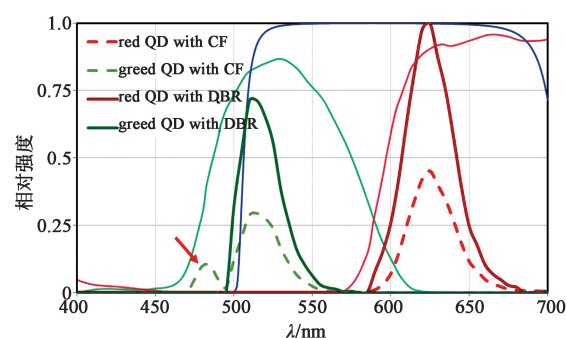


图6 归一化 CF 结构与 DBR 结构在红绿子像素位置光谱

Fig.6 Normalized CF structure and DBR structure in red-green sub-pixel position spectra

基于 CIE 1931 颜色空间面积比来分析 CF 和 DBR 两种结构的色域表现能力。由于影响色域主要因素在于光谱分布对色坐标的改变。如图 6 所示,当使用相同量子点时,两种结构的红色和绿色光谱的中心波长相同,分别为 628 nm 和 515 nm。在使用 LPF 滤波时,带通的波段为 500~670 nm,红光可以无损的通过;而对于在 480~500 nm 波段范围内的绿光被阻隔,但与之同时半峰宽降低至 27 nm。在 CF 结构所匹配的绿色滤光片其带通的波段为 465~610 nm,在所滤波的波段中包含了一部分蓝光波段,绿色子像素位置中会有大量的蓝光会透射出来。如图 6 中红色箭头所示,在绿色光谱中会产生一个副峰,从而导致色域面积减小。因此如图 7 所示,在 NTSC 标准下,加 CF 膜层的量子点膜的色域为 NTSC113%,而 DBR 结构下的量子点膜色域为 NTSC128%。

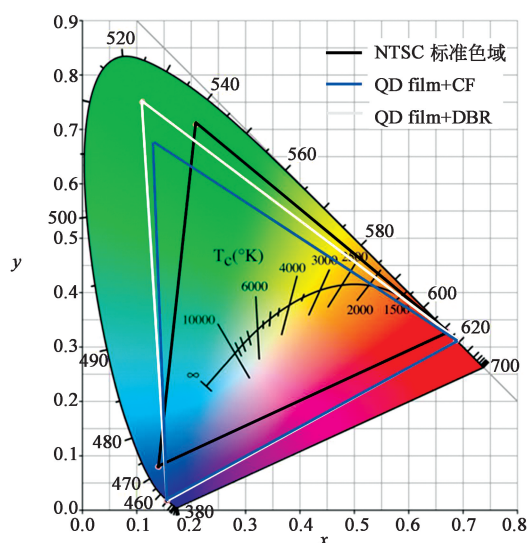


图 7 CF 结构与 DBR 结构的彩膜色域对比图

Fig.7 Comparison of color gamut of CF structure and DBR structure

4 结 论

本文主要针对量子点彩膜结构进行仿真研究,提出了以双层 DBR 替换 CF 的新型量子点彩膜结构方案,并对比了 CF 和 DBR 结构对波段透射率及反射率的影响。通过仿真实验对量子点膜层中量子点占用的比重及膜层厚度进行调节,拟合计算出膜层对蓝光的透过率及利用率。仿真结果表明,相对于 CF 结构,双层 DBR 的量子点彩膜光效增加了 31%,并且红/绿子像素的出光强度也分别增强为 CF 结构的 2.19 倍和 2.26 倍;分析两种结构对色坐标的影响,CF 结构和双层 DBR 结构的量子点彩膜的色域分别为 NTSC116% 和 NTSC128%。

参 考 文 献:

- [1] 李宏彦,杨久霞,吕艳英,等.TFT-LCD 用彩色滤光片[J].现代显示,2005(6):41-44.
LI H Y, YANG J X, LV Y Y, *et al.* Color filter for TFT-LCD [J]. *Advanced Display*, 2005(6): 41-44. (in Chinese)
- [2] SABNIS W. Color filter technology for liquid crystal displays [J]. *Displays*, 1999, 20(3): 119-129.
- [3] LIU Y K, LAI J, LI X N, *et al.* A quantum dot array for enhanced tricolor liquid-crystal display [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 6900207.
- [4] VENKATARAMAN K, DUPARRE J, MULLIS R. Array camera architecture implementing quantum dot color filters; US, United States Patent Application 20150312455 [P]. 2014-03-12.
- [5] 张丽蕾.量子点彩色滤光片、液晶面板及显示装置:中国,CN102944943A[P].2013-02-27.
ZHANG L L. Quantum dot color filter, liquid crystal panel and display device; CN, CN102944943A [P]. 2013-02-27. (in Chinese)
- [6] 谢相伟,孙贤文,濮怡莹,等.一种量子点彩色滤光片及液晶显示装置:中国,CN103605234A[P].2014-02-26.
XIE X W, SUN X W, PU Y Y, *et al.* Quantum dot color filter and liquid crystal display device; CN, CN103605234A [P]. 2014-02-26. (in Chinese)
- [7] KIM J S, KIM H J, KIM S E, *et al.* Enhancement of optical efficiency in white OLED display by applying an air-gap structure on the patterned quantum dot film [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1799-1801.
- [8] 齐永莲,王丹,邱云,等.超高色域图案化量子点彩膜的研究[J].液晶与显示,2017,32(3):169-176.
QI Y L, WANG D, QIU Y, *et al.* Ultra-high color gamut and patterned color filter based on quantum dot photoresist [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 169-176. (in Chinese)
- [9] LIEN J Y, CHEN C J, CHIANG R K, *et al.* 39-3: patternable color-conversion films based on thick - shell quantum dots [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 2017, 48(1): 558-561.
- [10] LIEN J Y, CHEN C J, WENG R J, *et al.* Color conversion film; US, United States Patent Application 20140044924 [P]. 2014-02-13.
- [11] KIM H J, SHIN M H, LEE J Y, *et al.* Realization of 95% of the Rec. 2020 color gamut in a highly efficient LCD using a patterned quantum dot film [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10724-10734.

- [12] KIM H J, SHIN M H, KIM Y J. Optical efficiency enhancement in white organic light-emitting diode display with high color gamut using patterned quantum dot film and long pass filter [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(8S3): 08RF01.
- [13] 郑树文,范广涵,章勇,等.基于LED应用的分布布拉格反射器研究进展[J].*激光与光电子学进展*,2006,43(12): 29-35.
ZHENG S W, FAN G H, ZHANG Y, *et al.* Progress in distributed Bragg reflector for light-emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(12): 29-35. (in Chinese)
- [14] HONG Q, LEE K C, LUO Z Y, *et al.* High-efficiency quantum dot remote phosphor film [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4617-4622.
- [15] 任尚书,周树道,王敏,等.基于超表面的可见光波段布拉格反射波导研究[J].*激光与光电子学进展*,2018,55(3):032301.
REN S S, ZHOU S D, WANG M, *et al.* Study of Bragg reflection waveguide based on Metasurface in visible light band [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 032301. (in Chinese)
- [16] 娄本浊,庞桥.一种改进的 Beer 吸收定律及其实验验证[J].*光散射学报*,2010,22(3):207-210.
LOU B Z, PANG Q. A modified beer law for absorption [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2010, 22(3): 207-210. (in Chinese)

作者简介:



郭太良(1963—),男,福建莆田人,博士生导师,研究员,研究方向为新型显示材料与器件,E-mail:gtl@fzu.edu.cn



徐胜(1974—),男,江西抚州人,硕士生导师,助理研究员,研究方向为量子点发光显示、新型显示材料与器件,E-mail: xusheng06090@163.com