

激光与光电子学进展

基于 Micro-LED 照明的量子点颜色转换特性

王乐然¹, 李富琳², 孙毅轩¹, 刘晓杰², 杨磊^{1*}, 谢洪波¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

²海信视像科技股份有限公司, 山东 青岛 266000

摘要 结合 Micro-LED 的量子点颜色转换具有高亮度、高效率 and 宽色域的优势, 在显示领域具有广阔的应用前景。建立了 Micro-LED 照射下的量子点单体模型和阵列模型, 对量子点颜色转换的出射光谱、发光效率、发光角度等光学特性进行了研究。首先在 Light Tools 中建立 CdSe/ZnS 量子点单体模型, 设置模拟光源面、量子点膜层与探测器, 仿真结果表明紫外 Micro-LED 激发量子点产生的三色光在色域方面优于蓝光光源, 且红色和绿色量子点颜色转换效率更高。同时, 随着激发光源发光角度的增大, 出射光场整体照度分布均匀性提高, 紫外区域漏光减少。建立 6×6 的量子点单体阵列模型, 比较添加微结构和未添加微结构的两种阵列模型发光效果, 通过分析真彩图和照度图发现, 具有微结构的量子点阵列的出射光场边缘清晰、颜色边界鲜明, 适用于高画质屏幕的使用。

关键词 量子点; Micro-LED; 颜色转换; 光学特性; 微结构

中图分类号 TN27

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2325002

Optical Properties of Quantum Dots Color-Conversion Using Micro-LED Illumination

Wang Leran¹, Li Fulin², Sun Yixuan¹, Liu Xiaojie², Yang Lei^{1*}, Xie Hongbo¹

¹Key Lab of Optoelectronic Information Technology of Education Ministry of China, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Hisense Visual Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China

Abstract With the distinct advantages of high-brightness, high-efficiency and wide-gamut, color-conversion with quantum dots and Micro-LED illumination holds great potentials in display domain. On the basis of the single and arrayed quantum dots model, spectrum, efficiency and viewing angle of quantum dots color-conversion procedure are characterized and demonstrated in detail. In Light Tools, simulation models is built up by Micro-LED light source, film layer of quantum dots and detector. The simulated results report color conversion efficiency from the ultraviolet Micro-LED is better than the blue source, and green, red color output light have higher conversion efficiency using corresponding quantum dots. Additionally, with the increase of viewing angle from Micro-LED, the uniformity of illuminance distribution is highly improved and the light leakage in the ultraviolet region is apparently decreased. Utilizing the newly-designed 6×6 quantum dots modality, the arrayed models with and without microstructure are investigated and compared. From the calculated true color map and illumination map, the output light from arrayed quantum dots with microstructure has obvious features of clear edges and sharp color boundaries, which is extremely applicable for high-performance display devices.

Key words quantum dot; Micro-LED; color conversion; optical property; microstructure

OCIS codes 250.5590; 310.6860; 310.6628

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-03-26; 录用日期: 2021-04-01

通信作者: *yanglei@tju.edu.cn

1 引言

当前,社会已经进入了大数据的时代,手机、平板等电子设备正在迅速普及发展,屏幕承担了信息获取和交换的功能。随着技术的进步,人们对屏幕的信息获取效率、信息传递的质量甚至是人的视觉感知效果的要求也在逐步提高。高画质是屏幕显示技术进步的原动力,分辨率、色域以及对比度等参量是判断画质的主要依据。Micro-LED 是尺寸最小的自发光显示器件,有着高效率、低功耗、高集成度、高稳定性等诸多优点,且体积小、灵活性高、易于拆解与合并,能够应用于现有从小尺寸到大尺寸的任何显示应用场合中^[1]。

通过将阵列化的 Micro-LED 等发光器件集成在有源寻址驱动基板上,可以实现对每个器件的单独控制和点亮,从而使显示器输出图像的分辨率达到理论上的最大值^[2-3]。发光方式对于对比度的影响非常明显,主动发光的显示技术,例如有机发光二极管显示(OLED)和 Micro-LED,可以实现每个像素的亮度控制,在理论上可以做到对比度无穷大。而以液晶显示(LCD)为代表的被动发光显示技术性能略低于 OLED 和 Micro-LED。在诸多实际应用中, Micro-LED 显示比 LCD 和 OLED 能发挥出更优异的显示效果^[4]。

在显示器的色域方面,背光以及荧光物质的选择是决定性因素, LCD-TV 的色域基本在 72% 左右,随着 100% 色域 OLED 的出现, LCD-TV 开始逐步改进 LED 荧光粉来提高色域,由 YAG 粉到 RG 粉再到 KSF 粉, LCD 电视的色域提高到了 96%,但一直未超过 OLED 的色域。为了在色域指标上赶超 OLED, SONY 公司和 TCL 公司均推出了量子点技术电视。相较于荧光粉发光,量子点激发光谱窄且对称、杂光少、激发颜色更接近 CIE 规定的三原色,采用量子点的显示器色域可达 110%^[5-7]。

量子点是一类由 II-IV 族或 II-VI 族元素组成的尺寸大约为 1~10 nm 的材料。不同尺寸的量子点有不同的荧光效应,可激发出不同颜色的光场。一般来说,随着粒径的减小,其对应激发光谱主要波长变短^[8]。与传统的荧光染料相比,量子点的尺寸可调,荧光的发射、激发带宽都覆盖了从紫外到红外的光谱区域,发射光谱形状窄且对称,有极好的光稳定性及生物相容性。因此,量子点显示技术在

激光电子^[9-10]、显示屏幕^[11-13]及生物医学等领域研究中有极大的应用前景^[14-16]。

综上,将基于 Micro-LED 的微型主动发光显示技术与量子点颜色转换技术相结合,并构建新型微结构^[17],对于显示技术向高画质方向的发展有着重要的意义。因此,本文建立了基于 Micro-LED 的量子点单体模型和阵列模型,仿真模拟了量子点颜色转换的物理过程,研究分析了量子点颜色转换过程中输出光场的色域、照度等光学特性。

2 量子点薄膜颜色转换原理

量子点颜色转换过程中,材料一般以薄膜的形式存在,入射光照射到量子点薄膜时激发量子点发光,入射光场在薄膜中的传播流程如图 1 所示。当光场离开薄膜前未击中量子点材料,光场会直接透射过量子点薄膜基质且传播方向不变;当光场击中量子点材料但未被量子点材料吸收时,入射光会发生散射,光场改变方向后在薄膜中继续传播;被吸收的入射光,则会参与到量子点的颜色转换进程中。当量子点吸收光子,对应激发能级超过带隙时,材料电子由基态跃迁到激发态,与空穴形成激子,电子-空穴对以辐射复合或无辐射复合的方式将能量释放,在辐射复合过程中产生了光子,在无辐射跃迁的过程中释放热量。不同种类量子点材料的带隙不相同,所以激发反应时所需要吸收的光子能量也不尽相同,这与量子点的材料结构性质有关。图 2 为光在量子点材料中的传输过程示意图, d 为膜层厚度。

入射量子点薄膜的激发光源主要采用蓝光和紫外光,其激发光的中心波长分别为 450 nm 和 395 nm。由于量子点颗粒的平均尺度远小于激发光波长的十分之一,因此光源打在量子点薄膜上所产生的散射主要为瑞利散射^[18]。瑞利散射的物理过程可表示为

$$I = \frac{24\pi^3 N \nu^2}{\lambda^4} \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 I_i, \quad (1)$$

其中 I 为散射光强, I_i 为入射光强, λ 为入射波长, n_1 、 n_0 为粒子和分散介质的折射率, ν 为单个粒子体积, N 为单位体积内粒子数目。(1) 式说明量子点散射光强与入射光波的频率的四次方成正比。另一方面,瑞利散射光强也随着观察方向而变化,其空间光强分布可表示为

$$I(\alpha) = I_0(1 + \cos^2\alpha), \quad (2)$$

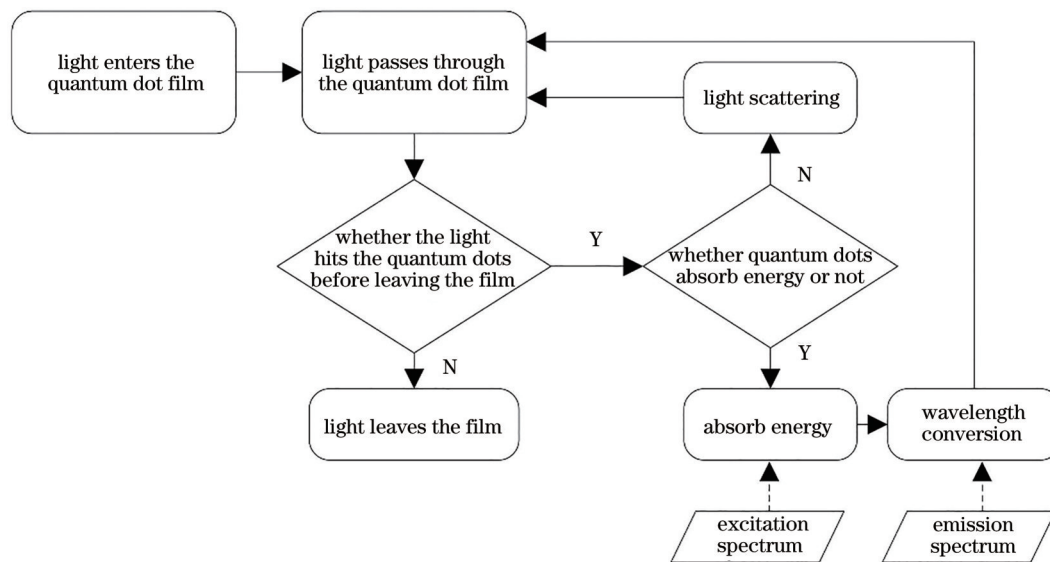


图 1 光源入射量子点薄膜流程图

Fig. 1 Flow chart of light source incident to quantum dot film

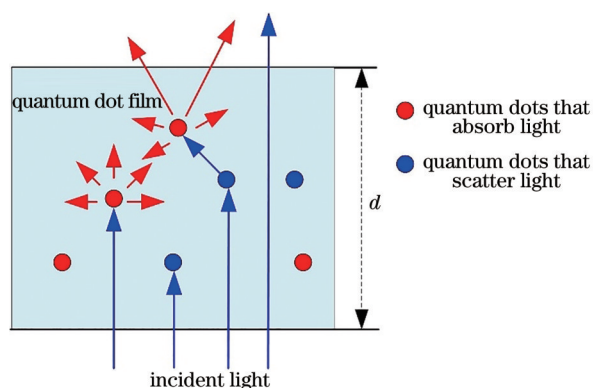


图 2 光在量子点材料中的传输过程示意图

Fig. 2 Diagram of light transmission process in quantum dot materials

式中 I_0 是 $\alpha = \pi/2$ 方向上的散射光强。(2) 式表明不同方向上所获得散射光强不同, 瑞利散射特性的仿真模拟如图 3 所示。

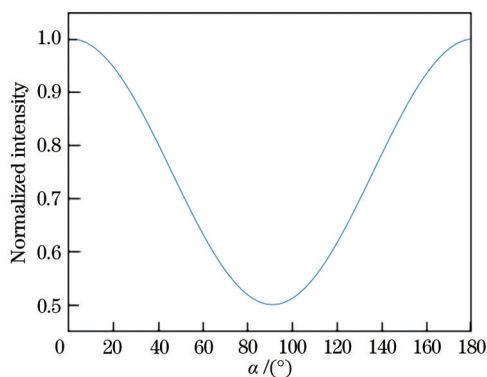


图 3 量子点散射属性

Fig. 3 Scattering properties of quantum dots

3 基于 Micro-LED 的颜色转换模型

课题组基于电视屏幕背光项目进行研究, 主要选材为市场中较为常见的量子点材料 CdSe/ZnS, 采用 Light Tools 软件构建上述的量子点模型。在量子点材料模拟中, 量子点的激发光谱及发射光谱可以通过用户自定义材料模块进行导入, 在模拟不同量子点材料时, 需要设置新的用户材料, 将量子点对应参数导入到材料属性中, 包括粒子大小, 激发、发射光谱等参数。出射光为三原色的量子点粒子半径分别为 4.6 nm (可激发红色光), 3.1 nm (可激发绿色光), 1.25 nm (可激发蓝色光), 图 4(a)~(c) 分别为红、绿、蓝三种颜色的激发光谱曲线, 图 5(a)~(c) 为其对应的发射光谱曲线, 图 6 为量子点参数设置示意图。在 Light Tools 中将薄膜的材料设置为对应的量子点材料, 完成量子点薄膜的建立。

光源 Micro-LED 模型则采用近朗伯光型的虚拟面光源进行模拟, 并选用紫外光与蓝光两种波长作为对照, 图 7 为两种光源的激发光谱图。将两种光源的光谱数据导入光谱区域选项卡中完成光源波长的设置, 图 8 为光源参数设置示意图。

最后在 Light Tools 中选择米散射模式进行模拟, 在该模式下散射模式会随着粒子大小在米散射和瑞利散射之间自动切换。利用以上所述方法构建 Micro-LED 与量子薄膜的单体和阵列颜色转换模型, 并进一步探究光源、结构和量子点材料等参数对于屏幕发光特性的影响。

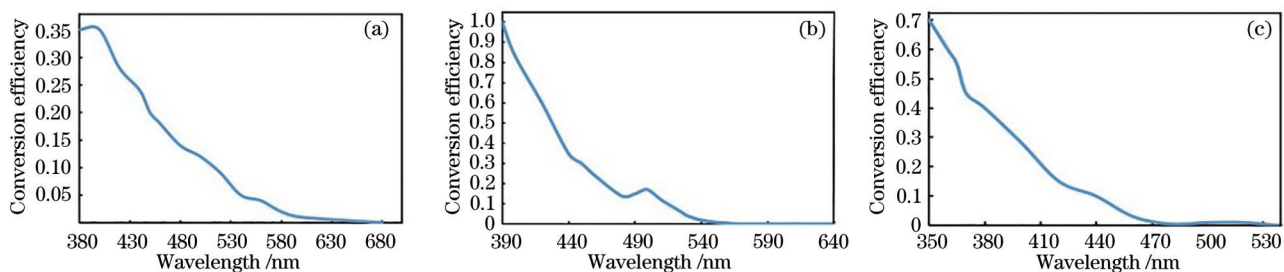


图 4 激发光谱。(a)红色量子点激发光谱;(b)绿色量子点激发光谱;(c)蓝色量子点激发光谱

Fig. 4 Excitation spectrum. (a) Excitation spectrum of red quantum dots; (b) excitation spectrum of green quantum dots; (c) excitation spectrum of blue quantum dots

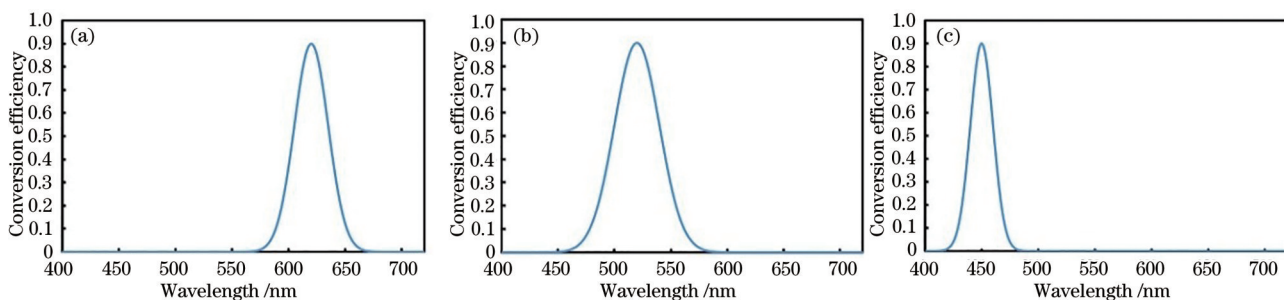


图 5 发射光谱。(a)红色量子点发射光谱;(b)绿色量子点发射光谱;(c)蓝色量子点发射光谱

Fig. 5 Emission spectrum. (a) Emission spectrum of red quantum dots; (b) emission spectrum of green quantum dots; (c) emission spectrum of blue quantum dots

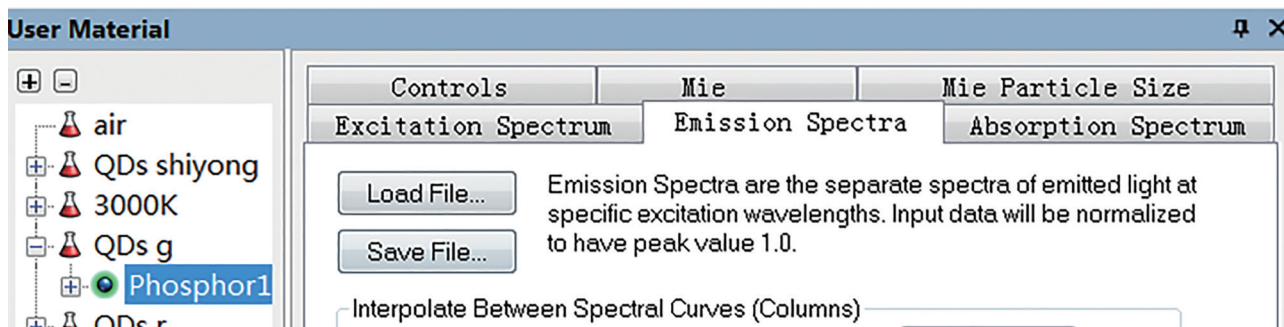


图 6 量子点参数设置示意图

Fig. 6 Diagram of quantum dot parameter setting

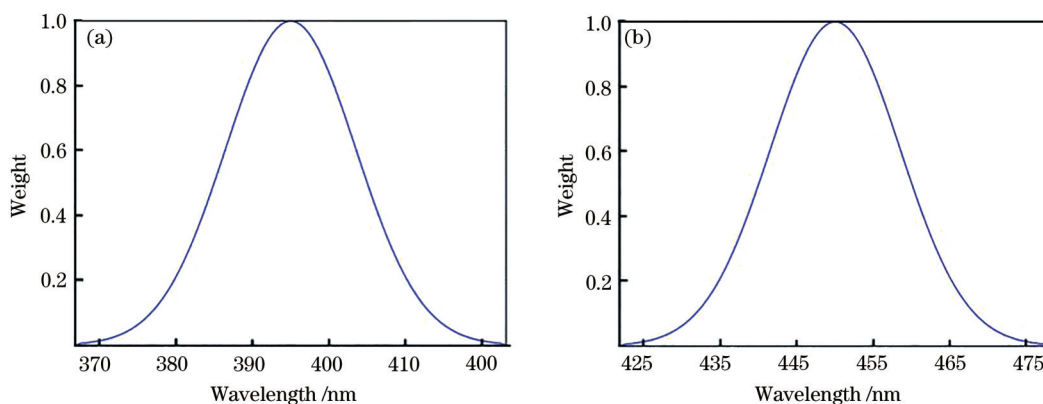


图 7 激发光源光谱图。(a)蓝光光源;(b)紫外光光源

Fig. 7 Spectrum of excitation source. (a) Blue light; (b) UV light

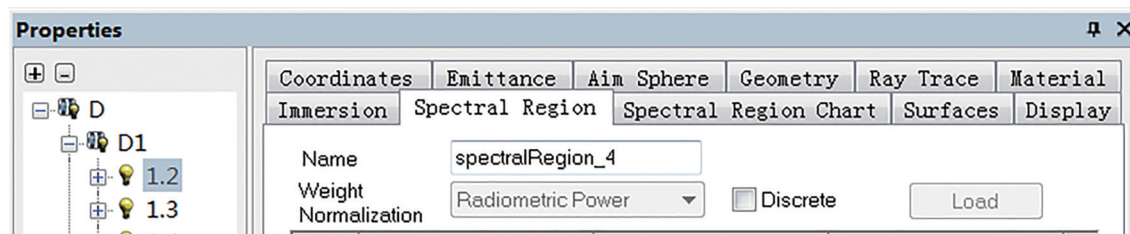


图 8 光源参数设置示意图

Fig. 8 Diagram of light source parameter setting

4 单体量子点模型的发光特性

单体量子点转换模型包括光源、量子点转换膜层和探测器三部分,如图 9 所示。采用单位尺寸为 $35\ \mu\text{m}$ 的正方形虚拟面作为光源出光面,并用侧面积相等的长方体模拟量子点薄膜层,在薄膜层上方设置虚拟平面,采用探测器接收发光数据。为了便于数据分析,设置光源的功率为 $1\ \text{W}$ 。

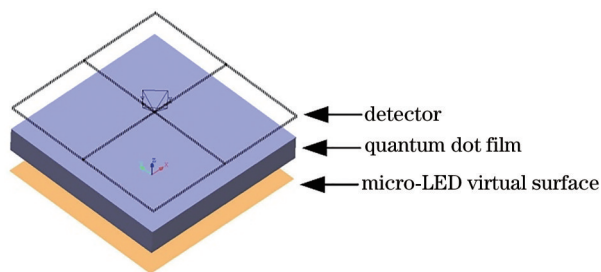


图 9 单体量子点模型分离示意图

Fig. 9 Diagram of separation of monomer quantum dot model

4.1 光源波长的影响

目前在屏幕显示领域,量子点的背光有紫外光和蓝光两种。之所以选择蓝光与紫外光作为激发光源来进行研究,是因为在对量子点激发光谱进行分析时,一般会选择峰值较高的波长作为激发波长来检测发射光谱。可以发现图 7 中两种光源的波长

$395\ \text{nm}$ 和 $450\ \text{nm}$ 都在图 4 所示的激发光谱范围内,且相对于其他波长这两种光源波长的在光谱中的响应度都较高。采用紫外光作为背光光源,需要通过紫外光 LED 激发三种量子点产生三种颜色光,而采用蓝光进行照射则只需要激发两种量子点。采用紫外光的优点是工序统一,激发效率高,模组整齐,便于加工。而采用蓝光则可以减少一种量子点的使用,且不会有紫外光泄露照射人体。为了研究光源对颜色转换的影响,课题组建立理论模型,采用不同光源进行发光模拟,保证在激发过程中量子点薄膜的厚度和质量密度占比相同。

对红色量子点薄膜设置 $395\ \text{nm}$ 紫外光和 $450\ \text{nm}$ 蓝光作对照模拟,观察量子点像素块的发光特性。两组模拟真彩图如图 10(a)和(b)所示,紫外光激发量子点 CdSe/ZnS 薄膜出射光比蓝光激发出射光颜色对比度高,颜色更亮。图 10(c)为两组的探测器光谱分布曲线,在膜厚为 $5\ \mu\text{m}$ 时,紫外光激发红光量子点的功率为蓝光的 1.25 倍左右;而蓝光在激发的同时,有一部分穿过薄膜直接出射,导致激发红光饱和度降低。

对绿色和蓝色的 CdSe/ZnS 量子点薄膜同样设置紫外光和蓝光光源的激发模拟,其真彩图和探测器光谱图如图 11 和图 12 所示。蓝光 LED 照射绿色量子点薄膜,部分蓝光依然可以穿透量子点薄膜,造成光源饱和度降低和透光现象;而紫外光照射绿

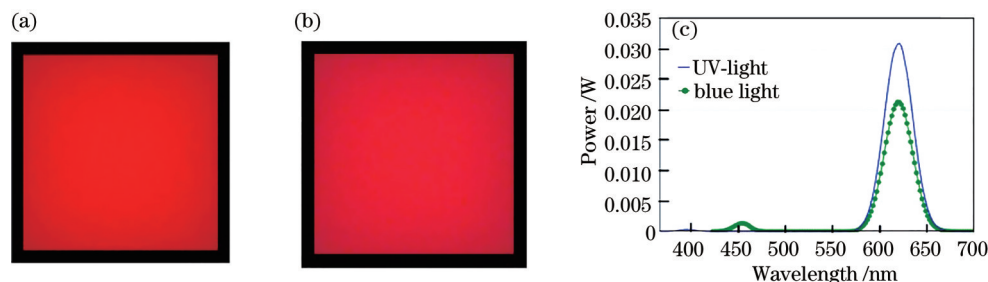


图 10 红色量子点薄膜探测器结果。(a)紫外光激发红光真彩图;(b)蓝光激发红光真彩图;(c)探测器光谱图

Fig. 10 Results for the red quantum dot thin film detector. (a) True color image of red quantum dots excited by ultraviolet light; (b) true color image of red quantum dots excited by blue light; (c) detector spectrum

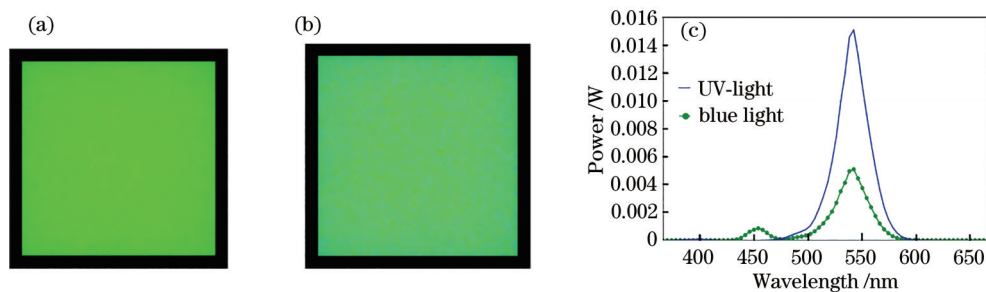


图 11 绿色量子点薄膜探测器结果。(a)紫外光激发绿光真彩图;(b)蓝光激发绿光真彩图;(c)探测器光谱图
Fig. 11 Results for the green quantum dot thin film detector. (a) True color image of green quantum dots excited by ultraviolet light; (b) true color image of green quantum dots excited by blue light; (c) detector spectrum

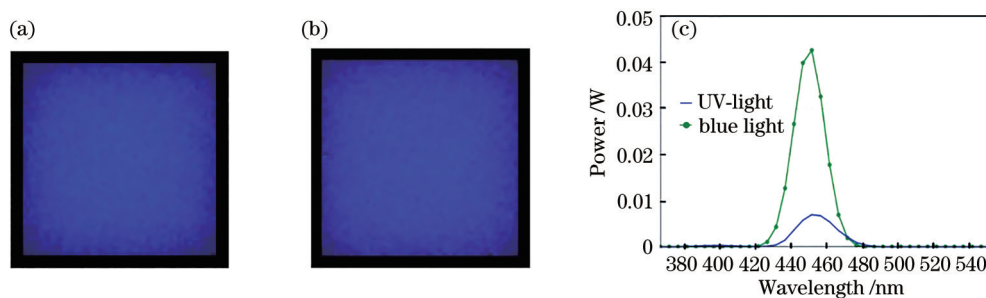


图 12 蓝色量子点薄膜探测器结果。(a)紫外光激发蓝光真彩图;(b)蓝光激发蓝光真彩图;(c)探测器光谱图
Fig. 12 Results for the blue quantum dot thin film detector. (a) True color image of blue quantum dots excited by ultraviolet light; (b) true color image of blue quantum dots excited by blue light; (c) detector spectrum

色量子点薄膜,直接透射光功率小且转化波长功率更大,表现优于蓝光光源。在蓝色量子点薄膜模拟中,蓝色光源由于不存在激发转化出射这一过程,所以探测器检测的蓝光的光谱功率要远大于紫外光照射量子点激发出的光功率。

在对量子点等受激发光物质进行检测时,一般会确定物质的发射波长,然后扫描物质的激发光谱,并选择峰值较高的波长作为激发波长对量子点材料进行激发。从图 4 CdSe/ZnS 的激发光谱可以看出,与蓝光相比量子点对于紫外光的响应更高,所以在模拟不同波长的光源照射红、绿量子点时,紫外光对应的探测器照度功率更高。

色域是指某种显示设备所能表达的颜色所构成的范围区域,它表示为色品图中原色坐标点围成的图形的面积,坐标顶点即为显示设备颜色的原色坐标。显示设备中三基色的色坐标不同,会给三原色三角形的位置带来变化,产生色域上的差别,并且三角形的面积越大,色域范围越大。通过 Light Tools 获得两种光源照射量子点发光的三种色坐标,从而得到两种光源的色域,如图 13 所示。紫外光 Micro-LED 作为背光源的量子点单体的出射光色域比蓝光 Micro-LED 的色域范围更

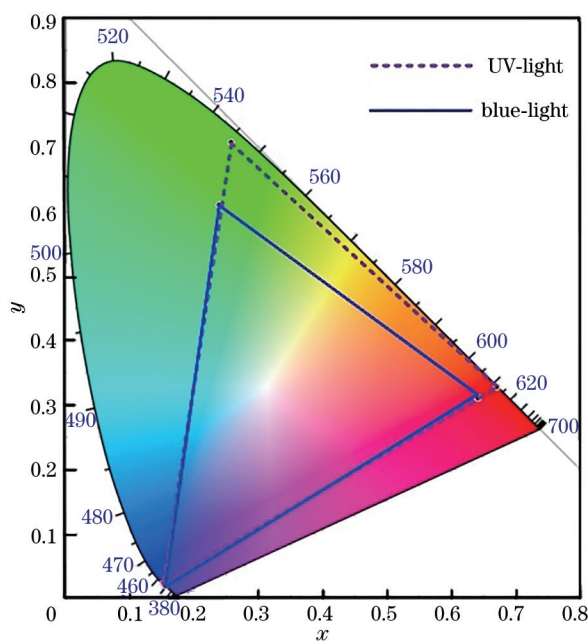


图 13 不同激发光源的量子点色域图
Fig. 13 Color gamut of different light sources

广,尤其是在红色和绿色区域内,紫外光 Micro-LED 的颜色表现力会更加饱满。当采用较薄喷涂薄膜层来进行颜色转换时,为了得到更好的彩色光亮度和纯度,采用紫外光作为激发光更有优势。

4.2 光源发光角度的影响

不同发光角度的 LED 所出射的光在量子点薄膜中的传播过程不同,模拟发光角度不同的光源照射量子点薄膜的情况,对出射光谱和探测器照度分布进行研究。采用紫外光 LED 作为激发光源,功率为 1 W,设置变化间隔为 15°,发光角度 α 大小变化范围为 0°~90°的 LED,此处的 0°采用垂直出射的面光源模拟,观察接收器上不同颜色量子点激发光的光谱特性。

图 14(a)~(c)分别为红、绿、蓝三种颜色量子点薄膜的探测器接收光谱,图 15(a)~(c)为图 14(a)~(c)光谱曲线紫外区域的放大示意图。相同功率的紫外光照射红、绿、蓝三种量子点,其出射光对应光谱峰值功率依次下降。每种量子点材料均有少量紫外光发生透射,且在 0°到 90°范围内,随着发光角度的增大,直接透射的紫外光略有减少。90°发光角度下直接透过光谱功率约为 0°发光角度下透光功率的 80%,由于紫外直接透射的功率数值较小,其随发光角度的变化对总功率以及色域的变化影响不大。

用探测器接收量子点出射光,并对探测器接收的照度数据设置平滑分布,研究发光角度对照度的影响。图 16 为单体量子点薄膜出射光在探测器上的照度示意图,(a)为红色量子点出射光在探测器上的照度分布,从左到右对应的光源发光角度 α 分别为 0°、30°、60°、90°,(b)、(c)分别为绿色和蓝色量子点薄膜的发射光在探测器上的照度分布,对应入射光源发光角度与红色量子点相同。由于平滑处理将数据相近的区域连通,可以发现在各角度光源下探测器中心照度均大于边缘照度。红绿蓝三种量子点在相同功率光源照射下,红色量子点出射光在探测器上的照度最大,蓝色量子点的出射光在探测器上的照度值最小,与图 14(a)~(c)光谱曲线趋势一致。由于入射光功率较小,所以角度变化过程中,照度分布变化并非十分明显,但与光源垂直出射情况相比,发散角为 90°时探测器的中心区域照度分布有相对均匀的趋势。采用不同发光角度的 Micro-LED 照射绿色和蓝色量子点薄膜,其照度分布情况与红色量子点的照度规律一致,中心照度的均匀性随着发光角度增大而增加。

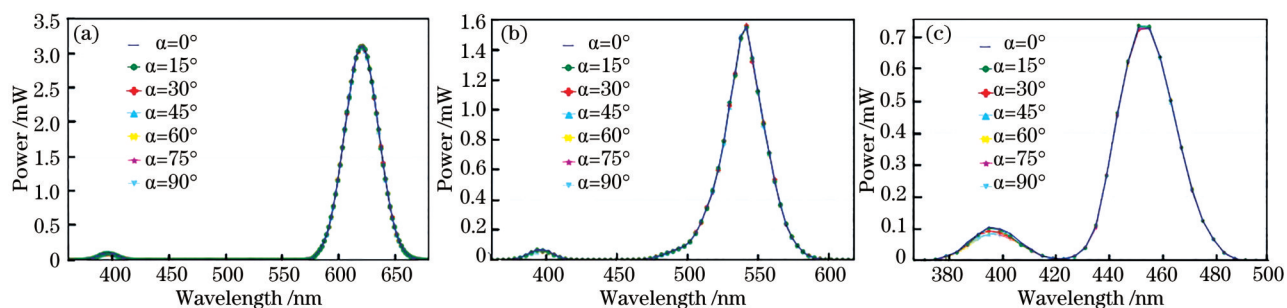


图 14 探测器接收光谱。(a)红色量子点对应光谱;(b)绿色量子点对应光谱;(c)蓝色量子点对应光谱

Fig. 14 Detector receiving spectrum. (a) Spectral curves corresponding to red quantum dots; (b) spectral curves corresponding to green quantum dots; (c) spectral curves corresponding to blue quantum dots

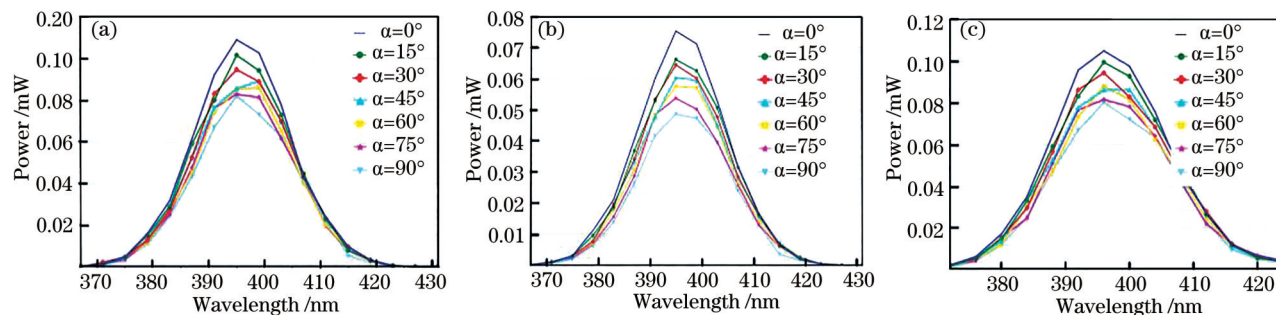


图 15 接收光谱紫外区域。(a)红色量子点对应光谱;(b)绿色量子点对应光谱;(c)蓝色量子点对应光谱

Fig. 15 Ultraviolet region of the receiving spectrum. (a) Spectral curves corresponding to red quantum dots; (b) spectral curves corresponding to green quantum dots; (c) spectral curves corresponding to blue quantum dots

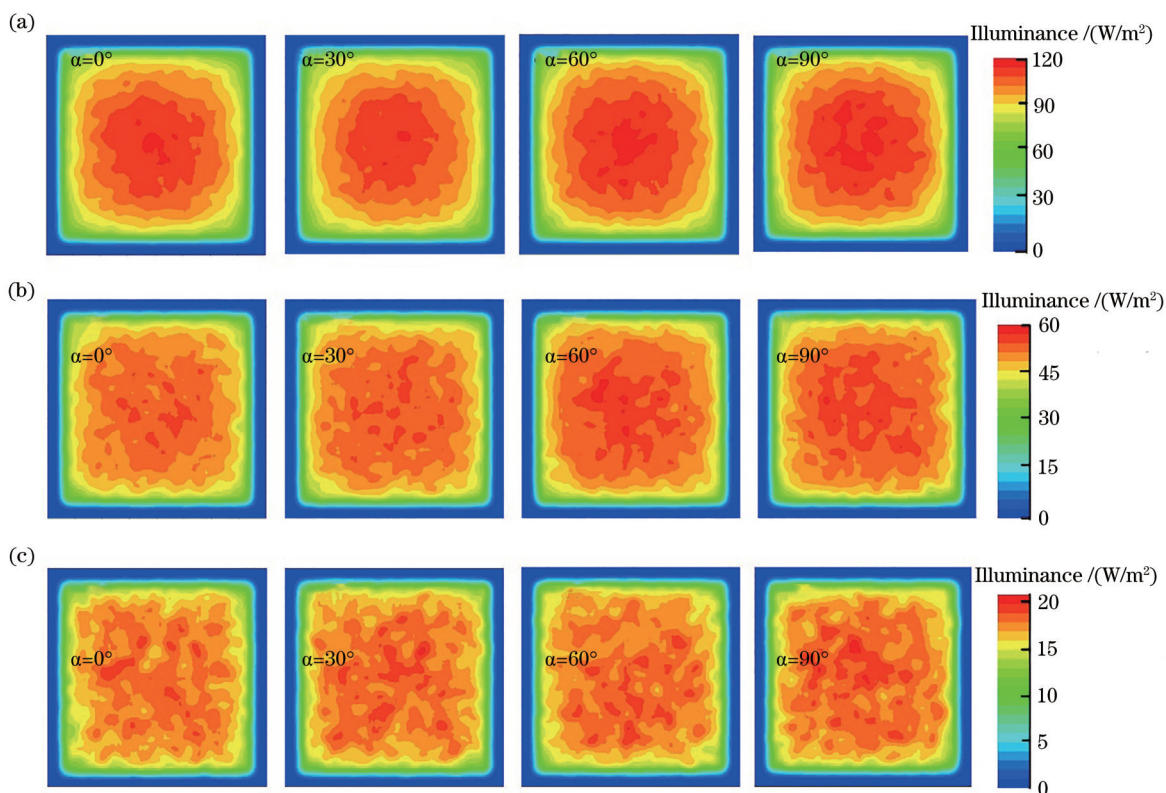


图 16 光源发光角度从 $0^\circ\sim 90^\circ$ 变化时探测器照度图。(a)红色量子点薄膜对应探测器的照度分布;(b)绿色量子点薄膜对应探测器的照度分布;(c)蓝色量子点薄膜对应探测器的照度分布

Fig. 16 Illuminance map of the detector when the light source changes from 0° to 90° . (a) Illuminance distribution of detector corresponding to red quantum dot film; (b) illuminance distribution of detector corresponding to green quantum dot film; (c) illuminance distribution of detector corresponding to blue quantum dot film

5 阵列微结构量子点的发光特性

阵列模型是单个模型的重复排布,采用单位尺寸为 $35\ \mu\text{m}$ 正方形模拟,建立 6×6 光源矩阵及量子点薄膜模型,在矩阵中心位置放置探测器接收量子点薄膜阵列的出射光,如图 17(a)所示。对于量子点材料薄膜,可以采用放置网格微结构

的方式进行颜色分隔,如图 17(b)所示。在显示屏分布中,将三种原色依次间隔排列,可以确保显示屏色彩趋向标准化、提高细腻度,避免文字和图标边缘出现锯齿感、彩边现象以及屏幕色彩偏移。所以设置阵列模型,将不同颜色的量子点的像素按照条纹形状依次间隔排列,如图 17(c)所示。

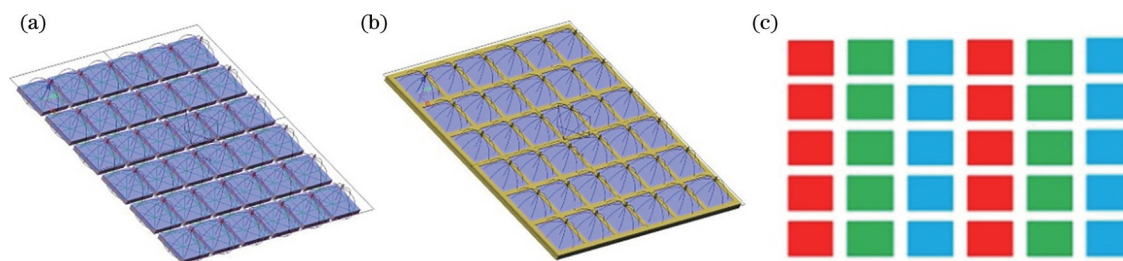


图 17 量子点薄膜阵列模型示意图。(a)未加微结构的阵列;(b)带有微结构的阵列;(c)阵列条纹排布方式

Fig. 17 Schematic diagram of quantum dot film array model. (a) Array without microstructure; (b) array with microstructure; (c) array arranged in a striped pattern

设置三种颜色量子点的紫外光源强度,使三种量子点出光照度基本一致,图 17(a)结构下的真彩

图和探测器照度如图 18-19 所示。图 18 为未加结构网格的阵列时三种颜色量子点薄膜发光的真

彩图,其通过薄膜的出射光的出射角度较大。红、绿色量子点在材料边缘产生相同颜色的模糊,而蓝色对应量子点材料边缘不仅有蓝光模糊,还存在相邻两侧量子点发出的红绿两种颜色的模糊光。图 19 为三种颜色量子点的探测器照度图,可以看出每一个单体的发光边缘都连接在一起,且边缘宽度较大。

图 20 和图 21 为图 17(b)结构下的探测器真彩图和照度分布图,当采用微结构网格来分隔量子点

材料时,每一个材料单元出射光的颜色都分界鲜明。图 20 中三种量子点的出光都不存在杂光,尤其是蓝色量子点薄膜周围区域不再有存在颜色混杂的情况,这可以使蓝光的色坐标向远离红绿色坐标方向移动,略微扩大色域范围。由图 21 可知,添加微结构后每一个单体量子点发光边缘清晰,单元间存在间隔。采用微结构分隔量子点材料使发光像素更规整,由此可见,网格的使用可以让屏幕的画质在各方面都有一定提升。

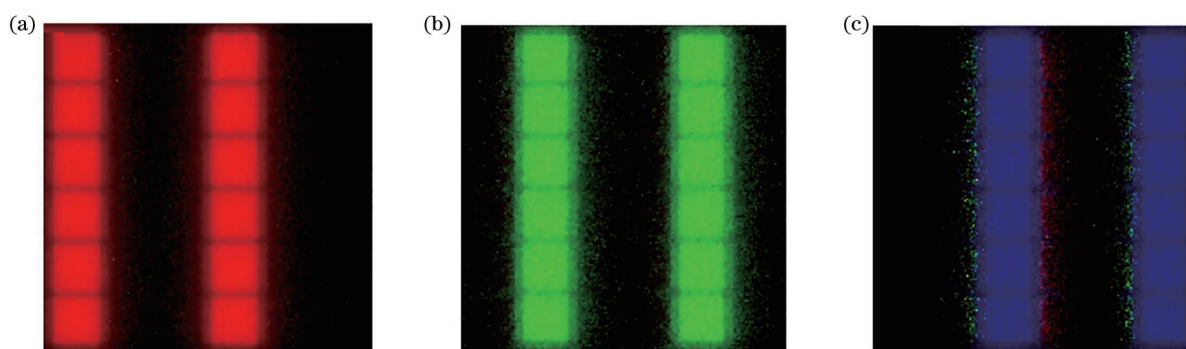


图 18 未加微结构的阵列真彩图。(a)红色量子点;(b)绿色量子点;(c)蓝色量子点

Fig. 18 True color image of array without microstructures. (a) Red quantum dots; (b) green quantum dots; (c) blue quantum dots

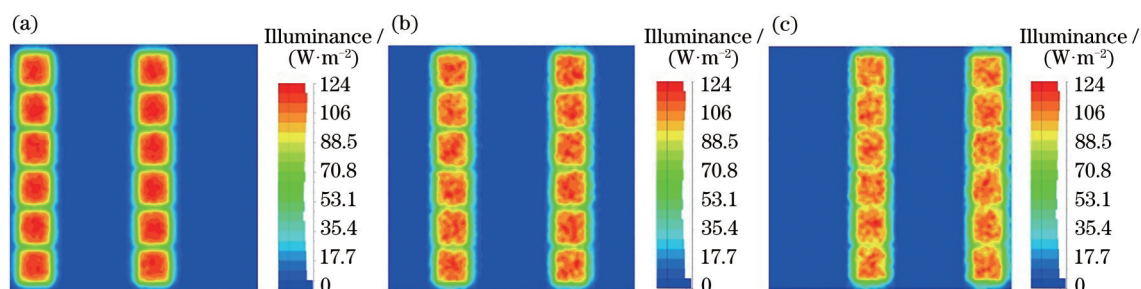


图 19 未加微结构的照度分布图。(a)红色量子点;(b)绿色量子点;(c)蓝色量子点

Fig. 19 Illuminance map of array without microstructures. (a) Red quantum dots; (b) green quantum dots; (c) blue quantum dots

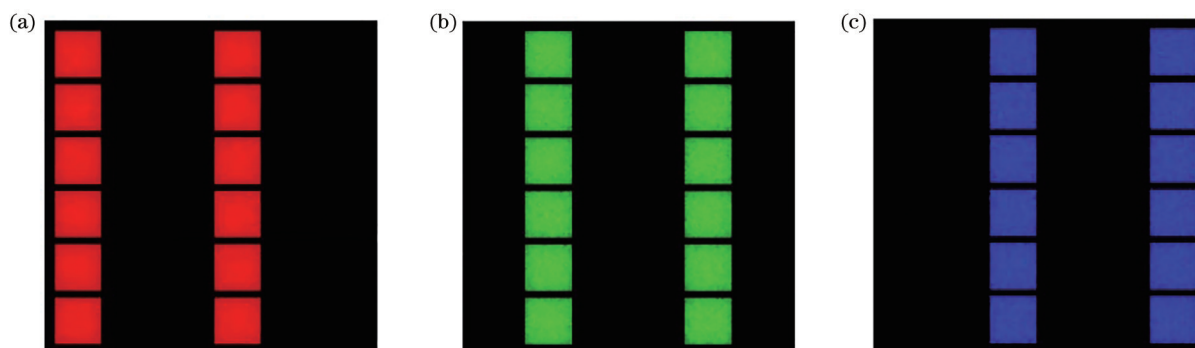


图 20 带有微结构的阵列真彩图。(a)红色量子点;(b)绿色量子点;(c)蓝色量子点

Fig. 20 True color image of array with microstructures. (a) Red quantum dots; (b) green quantum dots; (c) blue quantum dots

由以上模拟可以看出,微结构的使用对于量子点阵列的光场分布有改良作用。图 22 为未添加微

结构和添加微结构时量子点阵列的光场分布示意图。未加微结构的情况下,探测器的真彩图显示

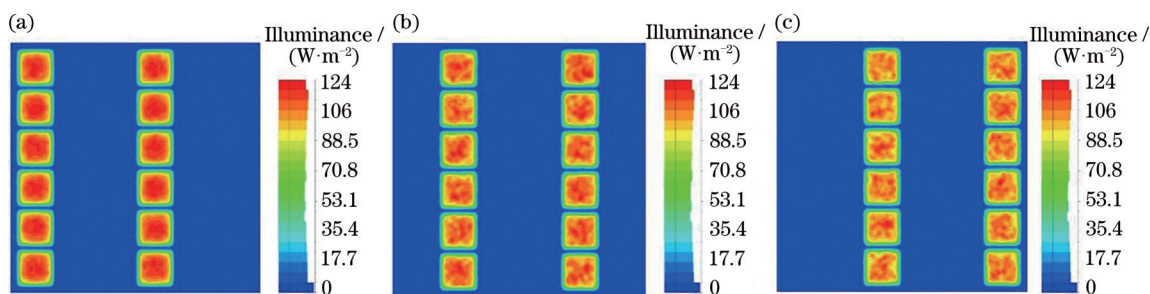


图 21 带有微结构的照度分布图。(a)红色量子点;(b)绿色量子点;(c)蓝色量子点

Fig. 21 Illuminance map of array with microstructures. (a) Red quantum dots; (b) green quantum dots; (c) blue quantum dots

红、绿色量子点的单体薄膜边缘有相同颜色的模糊,这是由于量子点薄膜受紫外光激发后,出射光的光场分布范围超出了薄膜尺寸。同时,蓝色量子点的薄膜周围有蓝、红、绿三种颜色的模糊光,这是由于蓝光的波长依然处于红绿两种量子点的激发光谱范围内,所以当紫外光激发蓝色光以后,出射的蓝光再入射进相邻颜色的量子点材料中,对红绿量子点进行了二次激发,如图 22(a)所示。微结构之所以可以改善量子点阵列的发光情况,使阵列的颜色更清晰,是因为微结构采用的吸收材料或反射材料将不同颜色的量子点薄膜在所处平面中分离开来,如图 22(b)所示。网格结构让量子点单体的发光范围尽可能约束在其本身尺寸内,避免不同量子点单体的发光区域重叠,减少蓝光进入相邻量子点产生二次激发,从而改善量子点阵列中不同颜色之间亮度不均匀以及颜色掺杂的情况。

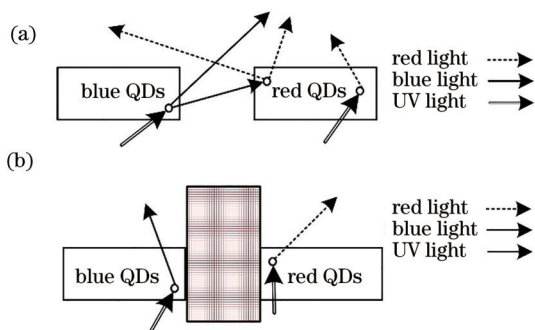


图 22 量子点阵列的光线分布。(a)未加微结构;(b)带有微结构

Fig. 22 Light distribution of quantum dots arrays. (a) Without microstructure; (b) with microstructure

6 结 论

采用 Micro-LED 作为光源,基于量子点的发光特性,根据实际参数设计了单体和阵列的量子点颜色转换模型。通过改变光源特性和机械结构等参

数,对量子点薄膜的出光特性进行模拟仿真。仿真结果表明,对于单体的量子点薄膜在不同光源照射下,紫外光对于红色和绿色量子点的激发功率更高,同时采用紫外光作为直下式背光的屏幕比蓝光背光屏幕的色域更广。以相同功率光源照射量子点,红绿蓝三种量子点的激发功率依次减小,并且随着发光角度增大,量子点薄膜出光照射到探测器的中心平均照度更强,整体照度分布更均匀,光源透过功率更小。对于阵列光源,机械微结构对量子点薄膜的发光形状起到了一定的限制作用,应用于屏幕显示中可以避免颜色混杂,使屏幕的每个像素块颜色分界鲜明、边界清晰。

参 考 文 献

- [1] Wierer J J, Jr, Tansu N. III-nitride micro-LEDs for efficient emissive displays[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(9): 1900141.
- [2] Lin J Y, Jiang H X. Development of microLED[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(10): 100502.
- [3] Wu T Z, Sher C W, Lin Y, et al. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1557.
- [4] Jiang F L, Xu F F, Liu Z J, et al. Development of GaN-based micro-LED display technology[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(11): 2013-2023. 蒋府龙, 许非凡, 刘召军, 等. 氮化镓基 Micro-LED 显示技术研究进展[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(11): 2013-2023.
- [5] Ji H L, Wang D Q, Qiang K W, et al. Research on the application of quantum dots in TV display technology [J]. Information Recording Materials, 2019, 20(1): 1-3. 季洪雷, 王代青, 强科文, 等. 量子点在 TV 显示技术中的应用研究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(1): 1-3.
- [6] Hou Y, Ren B, Qin L, et al. Review on the applications of quantum dots phosphor in illumination

- and display[J]. *Materials Review*, 2016, 30(15): 30-38.
- 侯艳, 任博, 秦璐, 等. 量子点荧光材料在照明和显示领域的研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(15): 30-38.
- [7] Tan G J, Huang Y G, Li M C, et al. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [8] Zrazhevskiy P, Sena M, Gao X. Designing multifunctional quantum dots for bioimaging, detection, and drug delivery[J]. *Chemical Society Reviews*, 2010, 39(11): 4326-4354.
- [9] Qian F, Li Y, Gradecak S, et al. Multi-quantum-well nanowire heterostructures for wavelength-controlled lasers[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(9): 701-706.
- [10] Zhang X S, Yan C Y, Wu T H, et al. Fabrication of CsPbBr₂ quantum dots and its photodetector performance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0123002.
- 张喜生, 晏春榆, 吴体辉, 等. CsPbBr₂量子点制备及其光探测器性能[J]. *光子学报*, 2020, 49(1): 0123002.
- [11] Mashford B S, Stevenson M, Popovic Z, et al. High-efficiency quantum-dot light-emitting devices with enhanced charge injection[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 407-412.
- [12] 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.
- [13] Lei X X, Ye Y, Lin N, et al. Morphology controlling of quantum dots thin films prepared by inkjet printing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(6): 0616001.
- 雷霄霄, 叶芸, 林楠, 等. 喷墨打印量子点薄膜的形貌控制[J]. *光子学报*, 2019, 48(6): 0616001.
- [14] Li P C, Li Y, Pang D W. Applications of quantum dots in biological imaging[J]. *International Journal of Biomedical Engineering*, 2007, 30(5): 310-314.
- 李鹏程, 李雁, 庞代文. 量子点技术在生物成像方面的应用[J]. *国际生物医学工程杂志*, 2007, 30(5): 310-314.
- [15] Zhang X, Zheng J, Li Z R. A study of the trends of printed OLED innovation based on patent analysis[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2012, 22(12): 1316-1321.
- 张旭, 郑佳, 李志荣. 基于专利分析的印刷OLED技术创新趋势研究[J]. *高技术通讯*, 2012, 22(12): 1316-1321.
- [16] Xie B, Cheng Y H, Hao J J, et al. Precise optical modeling of quantum dots for white light-emitting diodes[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 16663.
- [17] Lin H Y, Sher C W, Hsieh D H, et al. Optical cross-talk reduction in a quantum-dot-based full-color micro-light-emitting-diode display by a lithographic-fabricated photoresist mold[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 411-416.
- [18] Michael M L, Travis L D, Larcis A A. Scattering, absorption, and emission of light by small particles[M]. Wang J A, Wu R H, Ma Z G, et al., Transl. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- 米先科 .M.L, 特拉维斯 .L.D, 拉齐斯 .A.A. 微粒的光散射、吸收和发射[M]. 王江安, 吴荣华, 马志国, 等, 译. 5版. 北京: 国防工业出版社, 2013.