中国光学 Chinese Optics 核心期刊

量子点背光技术的研究进展

叶芸，喻金辉，林淑颜，陈恩果，徐胜，郭太良

引用本文:
叶芸, 喻金辉, 林淑颜, 陈恩果, 徐胜, 郭太良. 量子点背光技术的研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 14-27. doi: 10.3788/CO.20201301.0014
YE Yun, YU Jin-hui, LIN Shu-yan, CHEN En-guo, XU Sheng, GUO Tai-liang. Progress of quantum dot backlight technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 14-27. doi: 10.3788/CO.20201301.0014

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/CO.20201301.0014

文章编号 2095-1531(2020)01-0014-14

量子点背光技术的研究进展

叶 芸,喻金辉,林淑颜,陈恩果,徐 胜*,郭太良
(福州大学 物理与信息工程学院,福建 福州 350108)

摘要:量子点材料因具有发光波长可调,色度纯,量子效率高等优异特性而受到广泛关注,在光致发光高色彩显示方面有着巨大的应用潜力。本文综述了量子点背光技术的研究进展,主要对比了 QDs On-Chip、QDs On-Surface 及 QDs On-Edge 3 种量子点背光主流技术的基本原理及结构,并分析了它们在液晶显示领域的应用,未来前景及面临的挑战;然后介绍了几种新型的量子点背光技术,并对两种量子点背光新技术进行重点说明:一种是采用低温注塑成型工艺将量子点与高分子材料均匀混合为一体,用于制备直下式背光的量子点体散射型结构扩散板;另一种新技术是采用丝网印刷或喷墨打印工艺将量子点转印至导光板表面,形成应用于侧入式背光的量子点网点微结构导光板。这两种背光都具有制备工艺简单、成本低、生产效率高等特点,对高色域液晶显示的研究及发展意义深远。

关 键 词:量子点背光;丝网印刷;量子点网点导光板;注塑成型;量子点体散射扩散板;高色域
中图分类号:O482.31 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20201301.0014

Progress of quantum dot backlight technology

YE Yun, YU Jin-hui, LIN Shu-yan, CHEN En-guo, XU Sheng*, GUO Tai-liang
(*College of Physics and Information Engineering*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *xusheng*06090@163.*com*

Abstract: Quantum dots (QDs) have received widespread attention because of their adjustable emitted wavelength of light, color purity and high quantum efficiency, which have great potential in applications requiring high-color-quality displays with photoluminescence. In this paper, the progress of QD backlights based on each QDs on-chip, QDs on-surface and QDs on-edge are reviewed, including their principle, structures and current applications. Then, several other novel QD backlight structures are also introduced, prompting a proposal for two novel QD backlight technologies. One is the QDs scattering diffusion plate, which is prepared by injecting molding with a mixture of QDs and polymer at a low temperature. The other is a QD microstructure light guide plate, which is fabricated by transferring QDs on the surface of a light guide plate through screen printing or inkjet printing. Both of these two QD plates can achieve high color gamut while being simple to process, being low in cost and holding high production efficiency. These have wide applications in high color gamut liquid crystal displays.

Key words: quantum dot backlight; screen printing; quantum dots microstructure light guide plate; injection molding; quantum dots scattering diffusion plate; high color gamut

---

收稿日期:2019-07-03;**修订日期**:2019-08-20
基金项目:国家重点研发计划(No. 2017YFB0404604);福建省自然科学基金(No. 2018J01802)
Supported by National Key R&D Program(No. 2017YFB0404604);Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(No. 2018J01802)

1　引　言

随着显示技术的发展,液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)已成为众多平面显示器件中发展最为成熟,应用面最广并仍在迅猛发展着的一种显示器件[1]。LCD 具有轻薄化、能耗小、画面柔和、散热好等优势[2],随着 LCD 制造成本的不断下降[3],其被大量运用于手机、平板、电视等显示产品中[4]。作为一种被动式显示器件,液晶显示需要依靠白光背光源及彩色滤光片(Color Filter, CF)实现全彩显示。由于荧光粉实现白光的技术已相当成熟且制造成本较低,目前背光源多数采用 InGaN 蓝光 LED 芯片激发 YAG:Ce^{3+} 黄荧光粉实现白光[5],然而荧光粉材料半峰宽较宽,颜色纯度低,在 CF 的作用下,不仅降低了出光透过效率,而且色域也不高(约为 75% NTSC)[6]。相比于荧光粉材料,纳米半导体量子点(Quantum Dots, QDs)材料半峰宽窄,色纯度高,透过 CF 的比例大大增加,且光谱可调,可以实现更高的色域(>100% NTSC),极大提高了显示器件的色彩还原力,且发光效率更高,使用寿命更长[7-10]。基于 QDs 优越的发光和色彩性能,越来越多研究机构及显示厂商将 QDs 应用到光致发光的 LCD 背光技术上。2010 年 JANG 等[11]将红绿量子点封装在蓝光 LED 芯片中获得白光 QD-LED,并首次将该 QD-LED 成功运用在 46 英寸的 LCD 背光样机中。2012 年 CHEN 等[12]介绍了一种采用蓝光 LED 芯片结合量子点增强膜实现 109% NTSC 高色域的 LCD 背光。2013 年,继 SONY 研发出了第一款名为 Triluminos 的量子点电视之后[13],TCL、海信、三星等国内外厂商也陆续加入研发量子点显示技术的行列中,并且先后研发出了量子点显示的相关产品,覆盖了电视机、显示器、手机等产品种类[14-16]。2014-2016 年量子点成为显示行业热门关键词[17]。《2017 年全球量子点显示器市场发展现状及未来趋势》数据显示,2016 年全球量子点显示器市场规模为 10.4 亿美元,预计到 2021 年将达到 38.9 亿美元,年增长率为 30.82%,由此可见未来必将是量子点显示的时代[18]。

本文首先简要介绍量子点应用于 LCD 背光的 3 种主流技术:QDs On-Chip,QDs On-Surface 以及 QDs on-Edge,并分析其在 LCD 显示领域的应用情况,未来的应用前景和面临的挑战,然后介绍了几种其它的新型量子点背光结构,并重点说明本课题组提出的量子点体散射型结构扩散板的直下式背光和量子点网点微结构导光板的侧入式背光两种新型背光技术。

2　量子点背光技术进展

按照量子点在 LCD 背光源结构中的不同位置,量子点背光技术主要分为 3 种:第一种是将量子点取代荧光粉材料,直接与蓝光 LED 芯片封装在一起的 QDs On-Chip 结构[19-20];第二种是将量子点夹在两层隔水隔氧膜中间,形成“三明治”形式的量子点膜,并贴合在导光板正上方的 QDs On-Surface 结构[21];第三种是在绝水绝氧环境下,将量子点封装在专用的玻璃管内并安装在背光 LED 入射处的 QDs On-Edge 结构[22-23]。下面具体分析 3 种量子点背光结构产生白光的基本工作原理、存在的不足以及未来的应用前景。

2.1　QDs On-Chip 结构

QDs On-Chip 多数是把合成技术较为成熟的金属半导体量子点材料封装在蓝色 LED 芯片上,被称为 QD-LED[24],它是将传统白光 LED 中荧光粉材料用红、绿量子点替代,通过蓝光 LED 激发红、绿量子点产生红、绿光并与剩余蓝光混合产生白光,色域一般在 82% ~90% NTSC 之间,背光源结构如图 1(a)所示,其剖面结构如图 1(b)所示。该结构需要的量子点最少,达到了节约成本的目的,并且它能很好地与传统 WLED 侧入式背光源的每个单元都兼容,不需要添加其它任何组件,从而使得光学设计结构更为简单[11,20]。然而,虽然该结构对量子点材料需求量最小,生产成本最低,但是基于 QDs On-Chip 结构的商业化量子点背光产品至今还没有被推向市场,主要是由于 QDs On-Chip 结构对量子点的稳定性要求高,受高温影响较大,其与 LED 的接触面温度可达 150℃,在一定程度上降低了量子点的寿命和稳定

性[11,23,25]；并且该结构对封装要求也高，目前技术成熟度较低，可靠性需要进一步验证[25-26]。2014年 JUANITA K 等[20]研究报道了在辐射照度为 52 W/cm^2，温度为 85℃，相对湿度为 85% 的环境条件下，采用该结构的量子点正常工作了 3000 h 的成果。上述研究所使用的量子点多数是 CdSe 类型的量子点材料。但是，有毒元素 Cd 的存在限制了 CdSe 量子点材料的发展。2013 年，欧盟颁布的《电器电子产品有害物质限制使用管理办法》中，Cd 元素的含量质量比要求低于 1 × 10^{-4}[27]，2016 年 1 月，中国也颁布了相关条例[15]。因此寻找无 Cd 或少 Cd 元素的量子点材料成为未来发展的必然趋势。国内北京理工大学钟海政教授课题组在 ABX_3 型绿色无毒的钙钛矿 QDs 的研究中取得了卓有成效的成果。2015 年该课题组采用配体辅助再沉淀的工艺制备了一种无毒绿色的 $CH_3NH_3PbX_3$（X = Br，I，Cl）钙钛矿量子点。通过调配组成组分，其发光光谱可以覆盖整个 400 ~ 800 nm 的可见光区域，并且在常温下其荧光量子产率可达 70%，对其进行优化设计后可以得到具有超过 90% 高荧光量子点产率的钙钛矿量子点[28]。在此基础之上，研究人员将一种红光 $K_2SiF_6:Mn^{4+}$ 荧光粉与绿光钙钛矿量子点均匀混合，并封装在蓝光 LED 芯片结构中（QDs On-Chip），在 CIE1931-NTSC 标准下得到了色域为 130% 的白光 LED 器件[29-30]。2018 年该课题组发展出一种氢溴酸辅助的常温溶液降温制备技术，成功制备出一种厘米尺寸的绿色发光的 Cs_4PbBr_6 单晶体。该单晶体的荧光量子效率高达 97%。研究人员使用该单晶材料与一种红光 $K_2SiF_6:Mn^{4+}$（KSF）荧光粉混合封装在蓝色 LED 芯片结构中，制备了流明效率为 151lm/W、在 Rec. 2020 标准下色域达 90. 6% 的高效率、高显色的白光 LED 器件，这是目前报道的面向 LCD 显示背光应用的 LED 器件的实验室最优结果[31]。

若要大力推动基于 QDs On-Chip 结构的量子点背光技术向前发展，并使其能够走向商业化的应用，其一可以考虑生产出工作温度较低的蓝光 LED 芯片，但这一技术路线难度很大；其二可以从 QDs 材料本身出发，优化设计出抗高热辐射和光辐射的性能稳定的 QDs 材料。除了从通过改变合成量子点结构（核壳结构、合金化结构等）来提升其稳定性外，也可以通过将量子点与无机材料复合的方式来优化量子点的稳定性。相关研究在季红雷等[15]发表的综述文章中进行了较为详细的介绍。

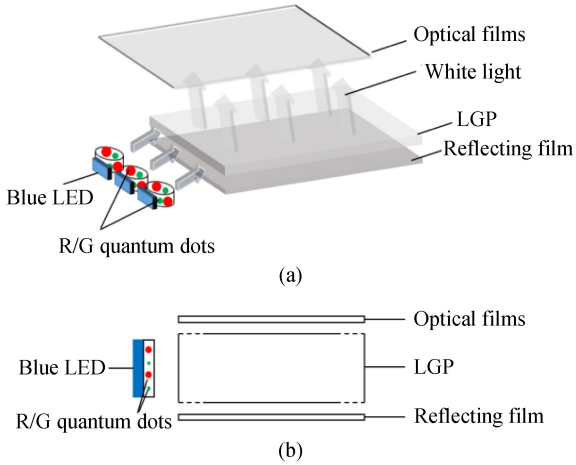

图 1　（a）QDs On-Chip 背光结构图及其（b）剖面结构图

Fig. 1　（a）Structure scheme and（b）profile structure scheme of QDs On-Chip backlight

2.2　QDs On-Surface 结构

QDs On-Surface 多数是把金属半导体量子点材料夹在两层隔水隔氧薄膜中间，形成“三明治”结构的量子点薄膜，被称为量子点色彩增强膜（Quantum Dots Enhancement Film，QDEF）[32]。以 3M 和 Nanosys 公司推出的 QDEF 为例，QDEF 厚度大约为 210 μm 左右，其中上下两片隔水氧层（Barrier film）就占了 110 μm 左右[18]，QDEF 膜片结构如图 2（a）所示。将这种 QDEF 膜片贴合在背光模组导光板的正上方，使用蓝光 LED 侧边进入导光板产生均匀分布的蓝光面光源来激发导光板上方的 QDEF 膜均匀发出红、绿光并与剩余蓝光混合产生白光，其色域一般可达到 110% NTSC 左右，背光源结构如图 2（b）所示，其剖面结构如图 2（c）所示。在采用该结构的背光源中，QDEF 独立成膜，置于导光板出光表面，因为与 LED 光源非直接接触，所以其温度接近室温，因此量子点的使用寿命和稳定性得到了显著提高。

2016 年,THIELEN 等[33]通过老化测试实验,验证了 QDEF 能正常工作 30 000 小时以上。从而证明了在较低的工作温度下 QDEF 具有高可靠性。在无 Cd 量子点光学膜的研究方面, ZHOU 等[34]发明了一种基于溶液加工工艺的钙钛矿量子点光学膜的“原位制备技术”,并将制备的钛矿量子点光学膜集成到 QDs On-surface 的背光结构中,获得了 CIE1931-NTSC 标准下色域 124% 的背光源。显而易见的是该结构对量子点需求量最大,生产成本最高,所以适合用于小尺寸面板的显示器。为了降低量子点膜片中量子点的用量,2017 年,KIM 等[35]在如图 2(b)所示的“QDs On-Surface”结构上进行了改进,改进后的结构如图 3 所示。借助 Light tools 进行仿真,在 QDEF 膜上增加了一种由高折射率和低折射率组合的多层介质层构成的具有透射光谱和反射光谱选择性的二向色滤光片,由它反射的蓝光可以在导光板内循环利用,使得色彩转换效率得到了提升。他们还首次证明,在保持色坐标、色域和背光输出相同的情况下,QDEF 膜层上的二向色滤光片可以根据其蓝光发射透射率进行优化,从而使所需的红绿量子点材料减少 30% 左右。该仿真结果可以为后期制造此类背光器件提供理论数据支撑。目前,QDEF 膜片的技术专利主要掌握在国外的 3M 和 Nanosys 公司手中,国内诸如纳晶、普加福、波尔等量子点企业也都在开发各自的 QDEF 膜片技术。基于 QDs On-Surface 结构的背光源产品已经大量被投入市场中得到了商业化运用,国内外包括 TCL、三星等企业多数量子点背光产品都是采用该背光结构生产。

由于 QDEF 膜片的 QDs 用量大以及制备工艺繁琐使得其生产成本居高不下,导致商业化的 QDs On-Surface 结构的背光产品并没有得到大众化的推广使用。要实现 QDs On-Surface 结构背光产品的普及化应用,需要降低其成本。一方面可以简化 QDEF 膜的制备工艺,另一方面可以发展更加适合 QDEF 膜的 QDs 材料。这一直都是学术界与工业界研究人员关注的前沿热点。相关研究同样在季红雷等[15]发表的综述文章中进行了较为详细的介绍。

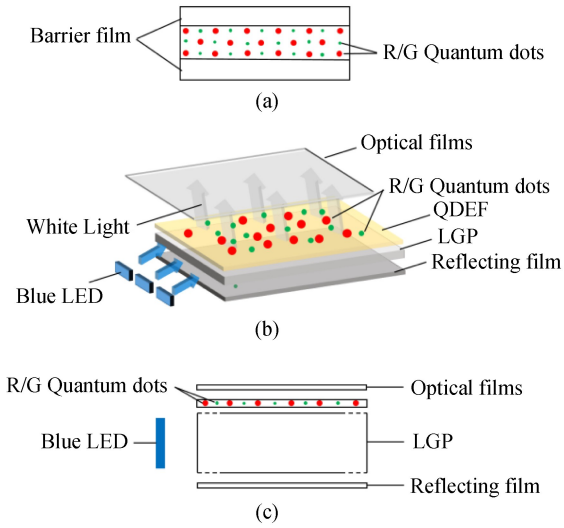

图 2　(a)QDEF 膜结构图;(b)QDs On-Surface 背光结构图;(c)QDs On-Surface 背光剖面结构图

Fig. 2　(a) Structure scheme of QDEF film; (b) structure scheme of QDs On-Surface backlight; (c) profile structure scheme of QDs On-Surface backlight

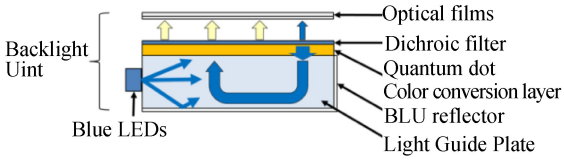

图 3　模拟用量子点膜和二向色滤光片制作的背光结构的剖面示意图

Fig. 3　Profile structure scheme of a backlight unit with QDEF and dichroic filter used in simulation

2.3　QDs On-Edge 结构

QDs On-Edge 是将红、绿金属半导体 QDs 密封在专用玻璃管中形成量子点管,并安装在导光板的 LED 光入射处,也被称为 QDs Tube[36-37]。通过侧边 LED 发射的蓝光激发玻璃管中的红、绿 QDs 产生红、绿光并与剩余蓝光混合产生白光,色域一般在 100% NTSC 左右,背光源结构如图 4(a)所示,其剖面结构如图 4(b)所示。早在 2013 年,美国的 QD Vision 公司携手 Sony 开发并推出了第一款量子点电视[13],其采用的量子点背光结构便是 QDs On-Edge 技术,2014 年,国内的 TCL、海信也使用该背光结构生产了各自的第一台量子点电视。该结构是上述两种结构的折中方式,对

量子点需求较小,但是由于玻璃管在组装过程中容易破碎,对器件组装有一定的要求,并且需要和蓝光 LED、导光板两端严格对齐,同时光效率和颜色一致性的平衡也需要进一步考虑,量子点的分散浓度,QDs Tube 与导光板之间的距离等参数,都会影响该器件的光学性能,较难做成色彩均匀度非常高的显示器件。目前工业界基本已达成共识,基本放弃了采用该结构的量子点背光技术路线,且在 2016 年,三星收购了 QD Vision 公司,已暂停了对该背光结构的光学器件的研究。

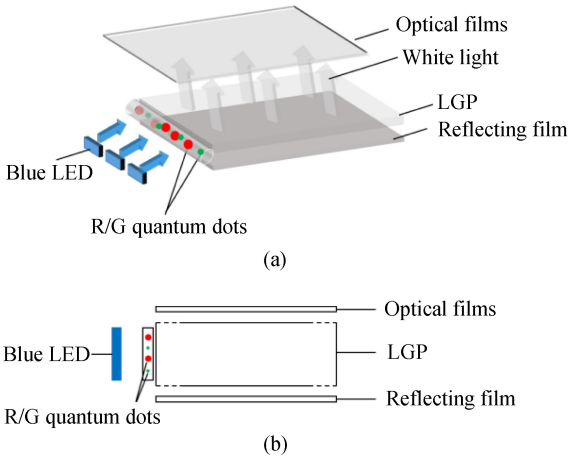

图 4 (a) QDs On-Edge 背光结构图及其(b)剖面结构图

Fig. 4 (a) Structure scheme and (b) profile structure scheme of QDs On-Edge backlight

3 量子点背光新技术

除了以上介绍的 3 种主流量子点背光结构外,显示领域相关研究者们另辟蹊径,开拓出了其它新型的量子点背光应用结构与应用形式。

3.1 量子点槽背光结构

基于目前 QDs On-Surface 结构中 QDEF 膜存在光学效率不高和 QDs 材料用量多的缺点。上海交通大学的顾宝[38]等提出了直接在导光板上制作量子点微结构的一种新型量子点槽结构的侧入式背光。先使用激光切割机在对应于 LED 导光板的入光侧切割出梯形的槽结构,然后将红、绿 CdSe QDs 与一种 LED 封装胶按一定比例均匀混合得到一种 QDs 与封装胶的混合物,将该混合物填充到梯形槽结构中,背光源结构如图 5 所示。蓝光 LED 侧光激发梯形槽中红、绿 QDs 发出红绿光,并与蓝光混合形成白光,形成的白光在导光板下表面导光网点的作用下破坏全反射,使得白光在垂直导光板出光方向形成面光源。通过 Light-tools 进行仿真分析,表 1 对比了采用同尺寸背光模组的 QDEF 膜和量子槽结构的两种不同背光方式的光学参数和 QDs 用量。通过对比表 1 的两组数据可得,若要得到色坐标相同的白光,QDEF 膜结构的量子点用量是量子点槽结构的 130 倍左右,并且量子点槽结构的发光强度是 QDEF 膜结构的 2 倍左右。由此可见,量子点槽结构是一种高效率和低成本的背光方式,其较好地弥补了现有 QDs On-Surface 背光结构的一些不足。

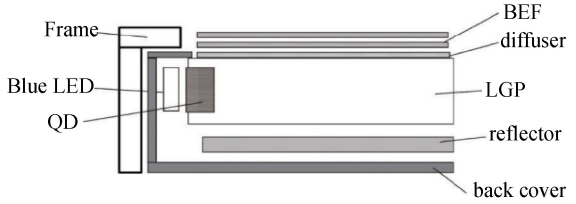

图 5 量子点槽背光结构图[38]

Fig. 5 Structure scheme of QDs slot backlight[38]

表 1 量子点槽结构与量子点膜片结构背光对比表[38]

Tab. 1 Backlight contrast table of QDs slot structure and QDEF structure[38]

Structure	CIE(X,Y)	CCT/K	Lum/nit	QDs Usage/num
Film-a	(0.354 09,0.296 48)	4 226.8K	3 235.3	4.78×10^{19}
Slot-b	(0.359 32,0.304 66)	4 070.7K	6 765.7	3.58×10^{17}

在上述仿真条件下,使用与仿真相同结构的 10.1 英寸背光模组样品来进行实验,对比了量子点槽背光结构和 QDEF 膜结构两种背光方式下亮度和色温随时间的变化,如图 6 所示。可见,采用量子点槽结构的背光亮度随时间的延长产生了一些衰减,色温方面则均较为稳定,其主要原因跟

QDs 与 LED 封装胶的材料选择及调配比例等相关。目前该量子点槽背光结构只处于实验室研究阶段,若要使该结构的背光技术得到商业化应用还需对其进一步优化及验证。

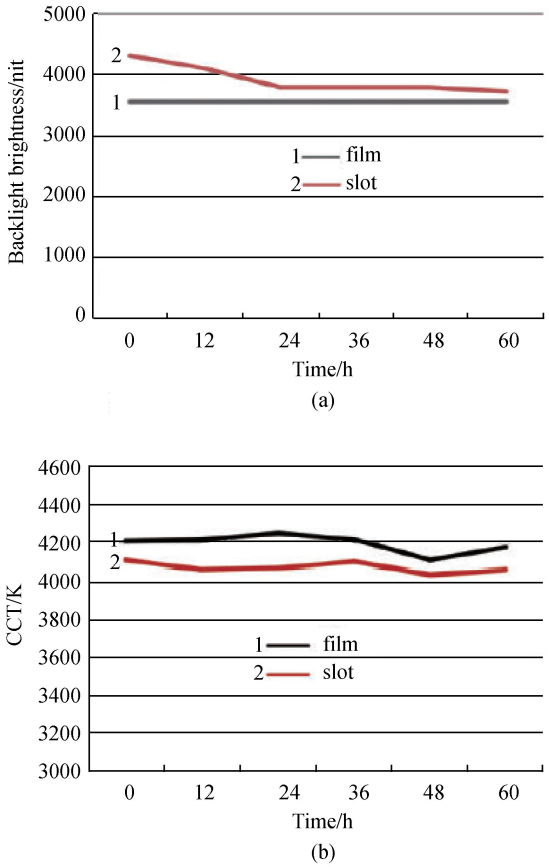

图 6　量子点槽结构与 QDs On-Surface 结构背光亮度(a)和色温(b)随时间变化图[38]

Fig. 6　Backlight brightness (a) and CCT (b) of QDs slot structure and QDs on-surface structure change with time[38]

3.2　量子点棒背光结构

由于量子点发射光具有各向同性和非极化的性质,为量子点发射光在进入液晶层时,超过 50% 的发射光会被线性偏振片吸收。量子棒(Quantum Rods, QRs)的发射光是部分线性偏振的[39-40],为 QRs 技术提供了一个可以提高光学效率的可行方案。将其耦合到液晶背光时,通过偏振片的透射率会增加,而增加的程度取决于偏振比,这吸引了学术界与工业界相关研究人员的注意。2016 年 SRIVASTAVA 等[41]将 CdSe 量子棒排列分散在聚合物薄膜中,偏振比高达 67%,使得制成的 QREF 膜的偏振效率相比传统的 LCD 器件提高了 20% 左右。同时分析对比了不同 LCD 结构的总光学效率,如图 7(彩图见期刊电子版)所示,可以看到采用 QRs 技术的背光结构的总光学效率从原来的 5% 提升到 8%。

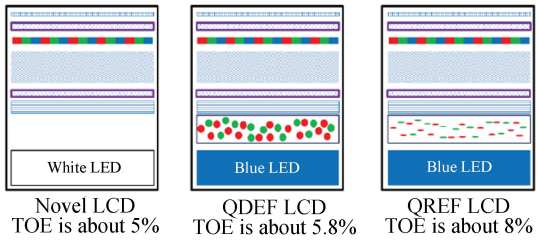

图 7　不同 LCD 的背光结构及各自不同的总光学效率[41]

Fig. 7　Contrast of the backlight structures of different LCDs and different total optical efficiencies (TOE)[41]

2016 年,Masaki Hasegawa 等[42]提出将 CdSe 量子棒应用在 LCD 显示背光应用中,其结构如图 8(彩图见期刊电子版)所示。量子点棒整齐地排列在纤维薄膜中,纳米纤维膜片中的偏振比为 0.6,量子点棒纳米纤维束的偏振比则高达 0.74,并且具有极高的输出耦合效率。

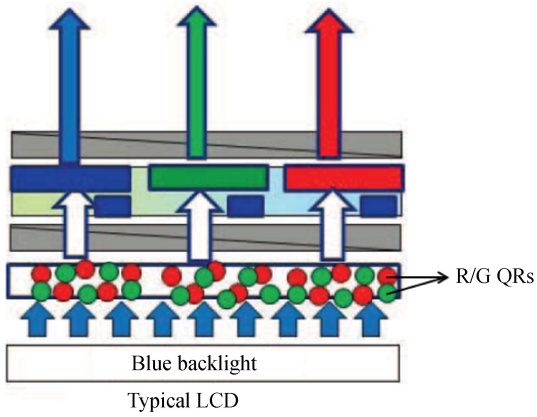

图 8　量子棒应用于背光的结构图[42]

Fig. 8　Structure scheme of backlight applications using quantum rods[42]

尽管利用 QRs 的各向异性发射特性可以提高偏振效率,但其各向异性吸收特性却限制了应用。如图 9 所示[43],非极化的蓝光通过激发整齐排列的绿色和红色 QRs,产生了部分线性极化

的绿光/红光。假设 QRs 纳米颗粒的较大偶极矩在 X 轴上对齐,与此同时,X 轴的吸收也比 Y 轴强得多,导致蓝光出现部分线性偏振光,偏振方向与发出的绿光/红光垂直。在这种情况下,线性偏振片很容易通过吸收蓝光或绿光/红光来破坏色彩平衡。因此,根据现有 QRs 技术,要将 QRs 正式投入到商业化的背光应用中,还有一些问题亟待解决。

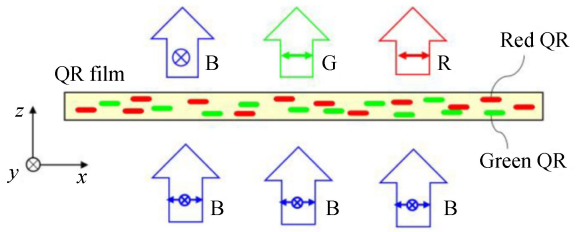

图 9　非极化蓝光激发的整齐排列的 QR 薄膜示意图[43]

Fig. 9　Schematic diagram for a neatly arranged QR film excited by unpolarized blue light[43]

3.3　量子点体散射扩散板

体散射是一种新颖的导光板或扩散板设计方案。它利用体内填充其它粒子的光散射材料来制备导光板或扩散板。通过控制填充粒子的种类、粒径和浓度,一方面达到入射光的均匀定向出射,另一方面可以完全取消各种光学膜片,其光能利用效率是传统背光系统的两倍[44-46]。从科学的研究角度,有关体散射导光板或扩散板的研究由来已久。2006 年,叶勤等[47]自行开发了一种体散射导光板专用程序,并对该类型导光板进行了光线追迹模拟计算与仿真设计。2015 年,宋孟夏[48]等提出了一种利用共挤方法生产双层复合微结构体散射导光板的设计方案。该实验以 PMMA 为基材,散射母粒为添加剂,利用连续共挤压印的方法制备出双层复合微结构体散射导光板,并利用 Light tools 建模分析了散射粒子的折射率、浓度和直径对该类型导光板的光学性能的影响。

基于上述有关体散射的研究,本课题组提出了一种量子点体散射扩散板的设计方案。量子点体散射扩散板是将 QDs 与高分子材料均匀混合并通过热注塑挤压所形成的扩散板,具有类似 QDEF 膜的功能。将适当比例耐温性能较好的 CdSe QDs 配制成 QDs 溶液,再将此溶液均匀分散在扩散板原料中如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)中,得到 QDs-PMMA 高分子材料的混合物。通过低温注塑法[49-52]制备的量子点体散射扩散板,主要用于直下式背光源。量子点体散射扩散板的背光源结构如图 10(a)所示,其剖面结构如图 10(b)所示。该背光模组从上至下主要包括:光学膜片、量子点体散射扩散板、蓝光 LED 阵列、反射膜等。由图 10 可知,量子点体散射扩散板结构产生均匀白光的基本工作原理和 QDs On-surface 背光源产生白光的原理有点类似:蓝光 LED 阵列发出蓝光直上入射并进入扩散板内,蓝光光线碰撞和激发扩散板内红、绿 QDs 发出红、绿光并与剩余蓝光混合产生白光。

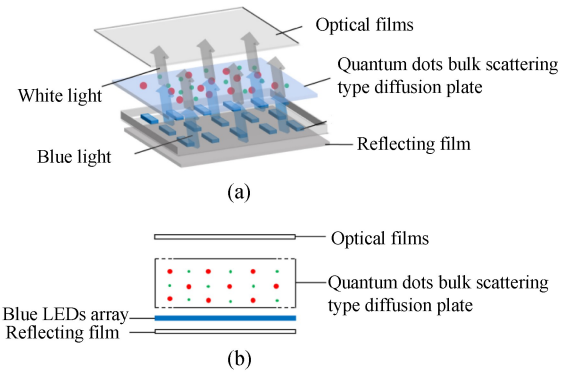

图 10　(a)量子点体散射扩散板背光结构图及其(b)剖面结构图

Fig. 10　(a) Structure scheme and (b) profile structure scheme of QDs scattering diffusion plate backlight

通过注塑成型工艺制备量子点扩散板的流程中,有一道工序是将均匀混合的 QDs-PMMA 固体混合物经加热器加热为熔融态,其温度为 160 ~ 180℃(PMMA 材料的熔融温度),时间为 5 ~ 10 s。但 QDs 材料的稳定性差,在该高温下可能容易猝灭失活,这是量子点体散射扩散板背光技术路线的关键问题所在。后面将结合量子点体扩散板背光结构的仿真模型,研究不同的扩散板材料(如聚苯乙烯 PS、聚碳酸酯 PC 等)与 QDs 混合制成的量子点扩散板对背光相关参数的影响,并研究不同的扩散板材料与 QDs 混合后在不同温度下

量子点效率的变化情况。

该背光技术工艺简单、成本低且生产效率高,对高色域液晶显示的研究及发展有着深远的意义。在未来有望开发基于注塑成型工艺的新一代量子点体散射扩散板背光新技术,并将其运用到液晶显示、照明应用等领域中。

3.4　量子点网点微结构导光板

制备导光板微光学结构的方法有激光雕刻法、注塑成型、热压印、喷墨打印、丝网印刷等工艺,其优缺点各不相同[53]。目前,由于喷墨打印工艺的众多优势,其在打印网点微结构导光板方面也得到了不少研究学者的研究。如图 11 所示,WANG 等[54]利用 Tracepro 仿真软件设计了一块直径为 3 μm、高为 26 μm 网点大小的 3 英寸导光板,并通过喷墨打印技术成功打印出一块平均亮度为 1 012.58 cd/m^2,亮度均匀性为 83.85% 的 3 英寸的导光板。证明了通过喷墨打印技术打印网点微结构导光板的可行性。

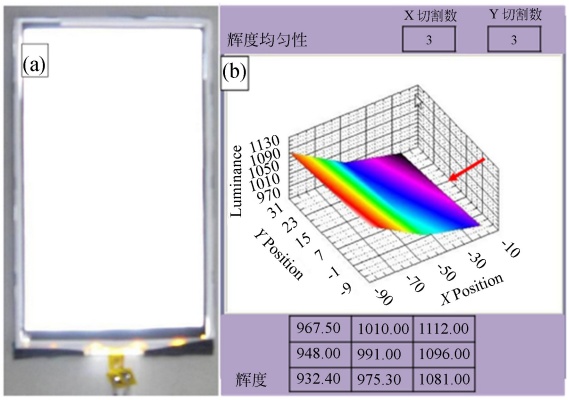

图 11　(a)喷墨打印微网点的 3 英寸导光板照片;(b)通过九点测试法测试的九点辉度(箭头指向为光入射处)[54]

Fig. 11　(a) Photograph of the 3-inch LGP with inkjet printed microlens; (b) luminance distribution measured by nine-point test (arrow is light incidence side)[54]

针对目前量子点背光结构的优点,以及考虑导光板微结构制备工艺的可行性。本课题组提出了一种可实现高色域和低成本的量子点网点微结构导光板的侧入式背光新技术。即采用丝网印刷或喷墨打印工艺将配制的 CdSe 量子点浆料或 CdSe 量子点墨水转印在导光板表面,形成量子点网点微结构。该背光技术将量子点印刷或打印在导光板上,再将其引入传统的侧入式 LED 背光源结构,而不需要增加任何其它组件。量子点网点微结构导光板背光源结构如图 12(a)所示,其剖面结构如图 12(b)所示,从上至下主要包括:光学膜片、量子点网点微结构导光板、反射膜以及侧边的蓝光 LED。

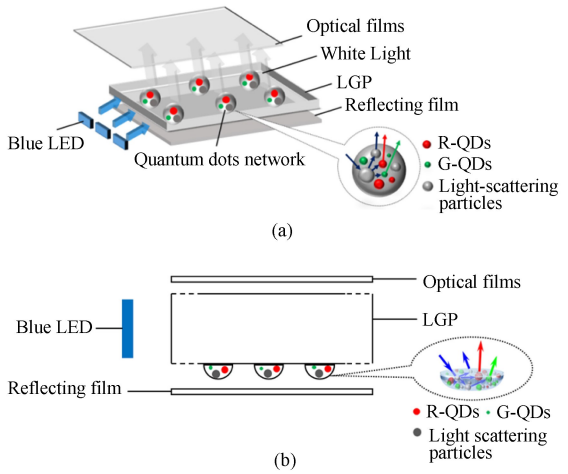

图 12　(a)量子点网点微结构导光板背光结构图及其(b)剖面结构图

Fig. 12　(a) Structure scheme and (b) profile structure scheme of QDs microstructure light guide plate backlight

如图 12 所示,量子点网点微结构导光板产生均匀白光的基本原理[55-63]:蓝光 LED 发出蓝光从侧边入射进入量子点导光板内,量子点导光网点破坏了入射蓝光的全反射,使得部分蓝光散射碰撞量子点网点,并激发网点内的红、绿量子点产生红、绿光,其余蓝光经过多次散射传播,一部分蓝光会继续激发网点内红、绿量子点发出新的红绿光,而剩下的蓝光经过多次散射传播后,最终与多次激发出的红、绿光混合产生白光。通过调配量子点导光板网点微结构内红、绿量子点的比例,可以实现不同色温的均匀白光和单色面光源;通过设计量子点导光网点的图案,可以实现简单的字符图案。图 13(a)和 13(b)分别为本课题组制作的 5.5 英寸的蓝光 LED 激发红、绿量子点导光板的单色面光源和 5.5 英寸白光面光源及“FZU”字符图案[58]。图中 5.5 英寸白光面光源的中心点色坐标为(0.326 6,0.332 1),极其接近 D65 光源

的色坐标(0.312 7,0.329),采用 ANSI 标准的九点测试法测试的出光亮度均匀性为 91.93%,颜色均匀性为 0.017,通过计算其色域可达 120% NTSC。图 13(c)为本课题组制备的量子点网点导光板和目前商业应用的量子点膜片[58],将两者进行对比可以发现,通过散射网点阵列的设计排布,可以使量子点网点达到良好的出射效果,从而实现整个出光面的均匀出光,这有助于减少量子点的用量。分别采用荧光显微镜 BX51M 和 3D 激光显微镜 OLS4100 对印刷的量子点散射网点进行观察,如图 13(d)和 13(e)所示。散射网点的直径和高度分别为 373.41 μm 和 33.639 μm,网点间距约为 1 140 μm[58]。目前,通过丝网印刷工艺制备一块 5.5 英寸的量子点网点导光板,经过网版定位准备和刮墨印刷,过程大概需要 5 min。而通过喷墨打印工艺制备一块 5.5 英寸的量子点网点导光板,打印一次完整的量子点网点阵列大概需要 8 min,一般需要经过 6 ~ 8 次重复打印才能达到网点高度要求,因此打印一块均匀出光的 5.5 英寸的量子点导光板网点大概需要 40 ~ 60 min。2018 年本课题组[58]通过理论计算和光学仿真初步探索了柔性可弯曲量子点网点微结构导光板的可行性。通过仿真说明了该量子点网点微结构导光板的背光技术可以用在曲面屏中。基于导光板量子点网点微结构的侧入式背光技术因其工艺简单而易于推广,而且量子点以网点微结构的形式覆盖在导光板的表面,减少了量子点的使用。该背光技术未来有望用于平面或曲面的手机、平板或电视等背光产品中。其中表 2 为以上各背光技术对比情况。虽然在量子点网点

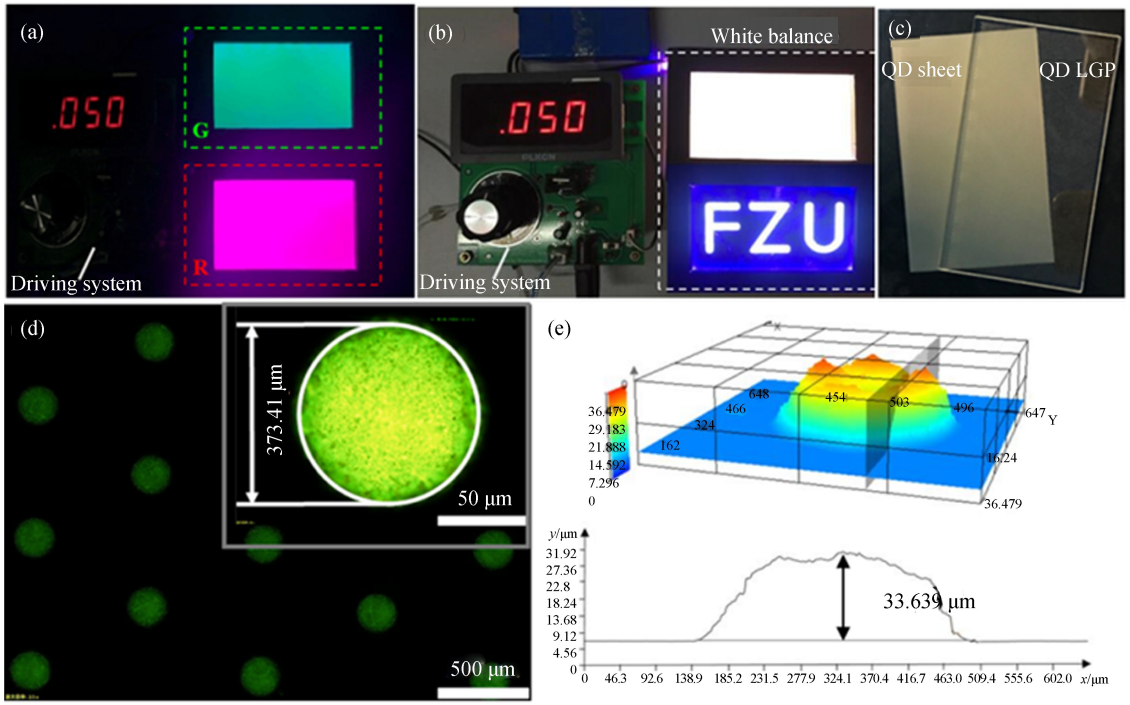

图 13 (a)5.5 英寸红、绿单色量子点导光板背光模型[58];(b)5.5 英寸白平衡量子点背光模组和字符图案背光模型[58];(c)量子点膜片与量子点网点导光板示意图[58];(d)量子点散射网点的荧光显微镜局部放大图[58];(e)单个量子点散射网点的三维图像及其相应轮廓[58]

Fig. 13 (a) Backlight module of 5.5-inch red/green monochromatic QDs[58]; (b) backlight module of 5.5-inch white-balance QDs and the specific partition backlight for the characters "FZU"[58]; (c) shematic diagrams of QD sheet and QD LGP[58]; (d) partial magnification of fluorescence microscope of the quantum dots microstructure array[58]; (e) 3D image and the corresponding profile of a single QD microstructure[58]

导光板中,QDs 被油墨包覆形成网点,但为了使量子点网点导光板获得更长的寿命,可进一步封装量子点网点,防止水氧的侵蚀。后期将尝试采用多种技术对其进行封装研究,并验证其寿命及性能,如采用量子点包覆的内封装技术,或是像 QDEF 膜的外封装技术原理,使用一种隔水隔氧能力较好的材料将量子点网点微结构套印起来。

表 2　LCD 各背光技术对比

Tab. 2　Contrast of different LCD backlight technologies

技术名称 / 指标	YAG 荧光粉技术	On-chip 结构	On-edge 结构	On-surface 结构	量子点槽结构	量子点棒技术	量子点扩散板技术	量子点网点微结构技术
典型结构	光学硅胶 + 荧光粉	光学硅胶 + 量子点	细玻璃管 + 量子点	阻隔膜 + 量子点层 + 阻隔膜	光学封装胶 + 量子点	量子点棒	聚合物 + 量子点	导光油墨 + 量子点
色域(NTSC)	72%	82% ~90%	100%	110%	–	–	>120%	>120%
工作温度	高温(150℃)	高温(150℃)	较高温度	较低温度(室温)	较高温度	较低温度(室温)	较高温度	较低温度(室温)
寿命	较高	低	较高	较高	–	较高	–	–
量子点用量	无	少(10kg/年)	较少(1t/年)	多(100t/年)	少	–	少	少
结构	不改背光结构	不改背光结构	需增加组件	需增加组件	不改背光结构	不改背光结构	不改背光结构	不改背光结构
结构利用率	低	高	中	低	高	高	中	高
成本工艺	低简单	芯片成本高复杂	较低简单	较高简单	较低简单	较高复杂	较高简单	较低简单

4　结　论

量子点作为一种具有独特光学性质的新型发光材料,已经成为显示领域中的明星材料,基于量子点光致发光的应用已经在显示领域得到了商业化应用,尤其在光致发光的液晶显示领域,量子点背光技术的引入使得液晶显示器的色彩还原率和色域覆盖率等光学指标得到了大幅提升。但是目前学术界和工业界所合成的量子点稳定性普遍较差,容易被水氧侵蚀。为了防止量子点被水氧侵蚀,现在的主流背光技术路线是将量子点夹在两层隔水隔氧层中进行保护,使得生产成本居高不下,影响了其进一步的推广使用。因此,若要使量子点背光技术得到普及,需要对不同的背光结构提出不同的解决方案,具体包括:(1)对于 QDs On-Chip 背光结构,除了从 QDs 结构层面上提高材料的稳定性之外,需进一步开展 QDs 材料与无机材料的复合,期望获得满足 QDs On-Chip 背光结构的高稳定性复合发光材料;而对于 QDs On-Surface 背光结构,需进一步优化及改进 QDEF 膜的制备工艺,简化操作流程,降低成本,使得 QDs On-Surface 背光结构的应用产品得到大众化的推广使用;(2)对于量子点槽背光结构,需优化背光模型,并进一步验证其背光技术的可行性;对于量子点棒背光结构,需加快速度研制并解决 QRs 各向异性吸收的问题,使 QRs 技术能早日运用到商业化的量子点背光技术中;对于量子点体扩散板背光结构,需进一步研究制备扩散板的高分子材料,研究 QDs 材料在不同温度下的量子点效率变化的情况;对于量子点网点微结构导光板背光结构,需加快速度采用多种技术对其进行封装测试的研究,验证其寿命性能;(3)除了目前学术界和工业界提出的量子点背光结构外,需进一步研发

更多其它新型的 QDs 背光结构;在量子点材料的研究上,一方面继续优化 CdSe、InP、钙钛矿 3 类技术较为成熟的 QDs 之外,另一方面需进一步研制出更多新型无毒绿色、量子产率更高以及稳定性更好的 QDs 材料(如碳量子点)。

总之,要使 QDs 背光技术得到普及化的推广任重而道远,需要学术界和工业界的齐心协力与不断创新。

参考文献:

[1] PAN J W, HU Y W. Design of a hybrid light guiding plate with high luminance for backlight system application[J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(12): 965-971.

[2] 王海雄, 李积彬. LCD 导光板微结构成型技术及发展趋势[J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 486-492.
WANG H X, LI J B. Molding technologies of micro-structure on light guide plate of LCD and trends[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 486-492. (in Chinese)

[3] REINERT-WEISS C J, BAUR H, AL NUSAYER S A, *et al.*. Development of active matrix LCD for use in high-resolution adaptive headlights[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2017, 25(2): 90-97.

[4] LAI L P, ZHUANG Q R, LIANG D J. Design of an efficient projector for LED flat lamp without light guide plate[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 9(6): 441-445.

[5] SHEN X, ZHANG D F, FAN X W, *et al.*. Fabrication and characterization of YAG: Ce phosphor films for white LED applications[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, 27(1): 976-981.

[6] JI S H, LEE H C, YOON J M, *et al.*. P.91: adobe RGB LCD monitor with 3 primary colors by deep green color filter technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013, 44(1): 1332-1334.

[7] LUO ZH Y, CHEN Y, XU D M, *et al.*. Is quantum-dot LCD ready for prime time? [C]. *Proceedings of IEEE Photonics Conference*, *IEEE*, 2014: 40-41.

[8] LUO ZH Y, CHEN Y, WU S T. Wide color gamut LCD with a quantum dot backlight[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26269-26284.

[9] CHEN J, GENSLER S, YUREK J. Quantum dots for ultra-high color gamuts in LCDs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015: 1-3.

[10] LUO ZH Y, XU D M, WU S T. Emerging quantum-dots-enhanced LCDs[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(7): 526-539.

[11] JANG E, JUN S, JANG H, *et al.*. White-Light-Emitting diodes with quantum dot color converters for display backlights[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(28): 3076-3080.

[12] CHEN J, HARDEV V, HARTLOVE J, *et al.*. A high-efficiency wide-color-gamut solid-state backlight system for LCDs using quantum dot enhancement film[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, 43(1): 895-896.

[13] COE-SULLIVAN S. The quantum dot revolution: marching towards the mainstream[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 239-240.

[14] BOURZAC K. Quantum dots go on display[J]. *Nature*, 2013, 493(7432): 283.

[15] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 666-680.
JI H L, ZHOU Q CH, PAN J, *et al.*. Advances and prospects in quantum dots based backlights[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 666-680. (in Chinese)

[16] 金一政, 彭笑刚. 量子点显示——中国显示行业"换道超车"的曙光[J]. 浙江大学学报(理学版), 2016, 43(6): 635-637.
JIN Y ZH, PENG X G. Quantum-dots based display technology-the opportunity for Chinese display industry[J]. *Journal of Zhejiang University* (*Science Edition*), 2016, 43(6): 635-637. (in Chinese)

[17] 史冬梅, 杨斌. 量子点材料与显示技术发展现状与趋势[J]. 科技中国, 2017(12): 8-10.
SHI D M, YANG B. Current development and trend of quantum dot materials and display technology[J]. *Technology China*, 2017(12): 8-10. (in Chinese)

[18] 马赐强. 2017 全球量子点显示器市场发展现状及未来市场概述[EB/OL]. [2017-06-19]. https://wenku.baidu.

com/view/2bd18dbfbb0d4a7302768e9951e79b89680268d6.html? re = view.

MA C Q, 2017 global quantum dot display market development status and future market overview[EB/OL]. [2017-06-19]. https://wenku.baidu.com/view/2bd18dbfbb0d4a7302768e9951e79b89680268d6.html? re = view. (in Chinese)

[19] KIM S W, IM S H, KIM S W. Performance of light-emitting-diode based on quantum dots[J]. *Nanoscale*, 2013, 5(12): 5205-5214.

[20] KURTIN J, PUETZ N, THEOBALD B, *et al*.. Quantum dots for high color gamut LCD displays using an On-Chip LED solution[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2014, 45(1): 146-148.

[21] GRINOLDS D D, BROWN P R, HARRIS D K, *et al*.. Quantum-dot size and thin-film dielectric constant: precision measurement and disparity with simple models[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 21-26.

[22] TWIETMEYER K, SADASIVAN S. Design considerations for highly efficient edge-lit quantum dot displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(5): 312-322.

[23] STECKEL J S, HO J, HAMILTON C, *et al*.. Quantum dots: the ultimate down-conversion material for LCD displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 23(7): 294-305.

[24] SONG W S, YANG H. Efficient white-light-emitting diodes fabricated from highly fluorescent copper indium sulfide core/shell quantum dots[J]. *Chemistry of Materials*, 2012, 24(10): 1961-1967.

[25] ZHAO Y M, RIEMERSMA C, PIETRA F, *et al*.. High-temperature luminescence quenching of colloidal quantum dots [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(10): 9058-9067.

[26] COE-SULLIVAN S, LIU W H, ALLEN P, *et al*.. Quantum dots for LED downconversion in display applications[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2013, 2(2): R3026-R3030.

[27] COUNCIL of the EU. Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS) Directive 2002/95/EC[R]. Council of the EU, 2003.

[28] ZHANG F, ZHONG H ZH, CHEN CH, *et al*.. Brightly luminescent and color-tunable colloidal $CH_3NH_3PbX_3$ (X = Br, I, Cl) quantum dots: potential alternatives for display technology[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4533-4542.

[29] HUANG H L, ZHAO F CH, LIU L G, *et al*.. Emulsion synthesis of size-tunable $CH_3NH_3PbBr_3$ quantum dots: an alternative route toward efficient light-emitting diodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(51): 28128-28133.

[30] BAI Z L, ZHONG H ZH. Halide perovskite quantum dots: potential candidates for display technology[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(18): 1622-1624.

[31] CHEN X M, ZHANG F, GE Y, *et al*.. Centimeter-sized Cs_4PbBr_6 crystals with embedded $CsPbBr_3$ nanocrystals showing superior photoluminescence: nonstoichiometry induced transformation and light-emitting applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(16): 1706567.

[32] CHEN J, KAN SH H, LEE E, *et al*.. Quantum dot enabled high color gamut LCDs[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2015, 9385: 93850F, doi: 10.1117/12.2086918.

[33] THIELEN J, LAMB D, LEMON A, *et al*.. Correlation of accelerated aging to in-device lifetime of quantum dot enhancement film[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 336-339.

[34] ZHOU Q CH, BAI Z L, LU W G, *et al*.. In situ fabrication of halide perovskite nanocrystal-embedded polymer composite films with enhanced photoluminescence for display backlights[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(41): 9163-9168.

[35] KIM G, SHIH Y C, SHI F G. Optimal design of a quantum dot color conversion film in LCD backlighting[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(5), doi: 10.1109/JSTQE.2017.2677898.

[36] KONG Y L, BOULOGNE F, KIM H, *et al*.. Deposition of quantum dots in a capillary tube[J]. *Langmuir*, 2015, 31(45): 12560-12566.

[37] CHENG M C, SU Y CH, HSIAO V K S. Optically switchable photoluminescence using liquid-crystal dispersed quantum dots in film and capillary tube[J]. *Proceedings of SPLE*, 2011, 8114: 811419.

[38] 顾宝, 盛欣, 叶志成. 量子点应用于液晶显示背光的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 222-228.
GU B, SHENG X, YE ZH CH. Research on quantum dot apply to LCD backlight[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 222-228. (in Chinese)

[39] MOKARI T, ROTHENBERG E, POPOV I, *et al.*. Selective growth of metal tips onto semiconductor quantum rods and tetrapods[J]. *Science*, 2004, 304(5678): 1787-1790.

[40] SHIEH F, SAUNDERS A E, KORGEL B A, *et al.*. General shape control of colloidal CdS, CdSe, CdTe quantum rods and quantum rod heterostructures[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109(18): 8538-8542.

[41] SRIVASTAVA A K, ZHANG W L, SCHNEIDER J, *et al.*. Photo-Aligned quantum rod dispersed liquid crystal polymer films[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 602-604.

[42] SUZUKI M, KISHIMOTO T, HIRAYAMA Y, *et al.*. Quantum rod containing film development for display applications [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 340-343.

[43] CHEN H W, HE J, WU S T. Recent advances on quantum-dot-enhanced liquid-crystal displays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(5), doi: 10.1109/JSTQE.2017.2649466.

[44] OKUMURA T, TAGAYA A, KOIKE Y, *et al.*. Highly-efficient backlight for liquid crystal display having no optical films[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(13): 2515-2517.

[45] OKUMURA T, ISHIKAWA T, TAGAYA A, *et al.*. Optical design of liquid crystal display backlighting with highly scattering optical transmission polymer[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5(5): S269-S275.

[46] TAGAYA A, KOIKE Y. Highly scattering optical transmission polymers for bright display[J]. *Macromolecular Symposia*, 2000, 154(1): 73-82.

[47] 叶勤, 唐振方, 张杰, 等. 体散射液晶导光板的光线追迹模拟[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1627-1631.
YE Q, TANG ZH F, ZHANG J, *et al.*. Ray tracing simulation of volume scattering light guide plate for LCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1627-1631. (in Chinese)

[48] 宋孟夏, 刘颖, 郑秀婷, 等. 双层复合微结构体散射导光板导光性能的分析[J]. 塑料, 2015, 44(2): 52-56, 43.
SONG M X, LIU Y, ZHENG X T, *et al.*. Analysis on light guide performance of double composite volume scattering light guide plate with microstructure[J]. *Plastics*, 2015, 44(2): 52-56, 43. (in Chinese)

[49] DONG P W, CAI H ZH, ZHANG Y J, *et al.*. The study of micro-injection molding of thin-wall light guide plate with hemispherical micro structures[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 562-564: 611-614.

[50] XIE P CH, GOU G, WEN ZH X, *et al.*. Research on the key technology of precision injection molding equipment for light guide plate[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 87-88: 306-310.

[51] DONG P W, ZHAO ZH L, WU D M, *et al.*. Simulation of injection molding of ultra-thin light guide plate with hemispherical microstructures[J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 503: 222-226.

[52] JUNG T S, JANG J H, KIM J S. A study on the filling pattern imbalance in high speed injection molding process for thin light guide plate[J]. *Polymer (Korea)*, 2017, 41(1): 30-38.

[53] YU J C, HSU P K. Integration of stamper fabrication and design optimization of LCD light guides using silicon-based microfeatures[J]. *Microsystem Technologies*, 2010, 16(7): 1193-1200.

[54] WANG M W, PANG D CH, TSENG Y E, *et al.*. The study of light guide plate fabricated by inkjet printing technique [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(3): 1049-1055.

[55] 徐胜, 徐玉珍, 陈恩果, 等. 基于量子点网点微结构的背光源技术研究[J]. 海南大学学报自然科学版, 2016, 34(3): 209-214.
XU SH, XU Y ZH, CHEN E G, *et al.*. LED backlight technology based on micro-dot structures mixed with quantum dots[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2016, 34(3): 209-214. (in Chinese)

[56] 黄炳乐, 郭太良, 陈恩果, 等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 306-312.
HUANG B L, GUO T L, CHEN E G, *et al.*. Study on optimal scale of average netted dot density for light guide plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 306-312. (in Chinese)

[57] 黄佳敏, 陈恩果, 郭太良. 量子点背光源白平衡特性的研究[J]. 液晶与显示, 2017, 32(2): 77-83.
HUANG J M, CHEN E G, GUO T L. White-balance characteristic of quantum-dot backlight[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(2): 77-83. (in Chinese)

[58] CHEN E G, XIE H X, HUANG J M, *et al.*. Flexible/curved backlight module with quantum-dots microstructure array

for liquid crystal displays[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3466-3482.

[59] 黄佳敏, 陈恩果, 郭太良. 量子点背光源颜色特性的理论研究与验证[C]. 中国平板显示学术会议论文集, 2016: 1348-1353.
HUANG J M, CHEN E G, GUO T L. Theoretical study and verification of the color characteristics of quantum dot backlight[C]. *Papers Collection of China Flat Panel Display Academic Conference*, 2016: 1348-1353. (in Chinese)

[60] 汪江胜, 叶芸, 徐胜, 等. 量子点网点导光板的制备及性能研究[J]. 发光学报, 2017, 38(1): 91-96.
WANG J SH, YE Y, XU SH, *et al*.. Fabrication and properties of quantum-dots backlight light guide plate[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(1): 91-96. (in Chinese)

[61] 福州大学. 一种改善喷墨打印量子点网点导光板的方法: 中国, CN201610828845.9[P]. 2016-09-19.
FUZHOU University. A method for improving inkjet printing quantum dots dot light guide plate: CN, CN201610828845.9[P]. 2016-09-19. (in Chinese)

[62] 福州大学. 一种基于量子点导光板的背光模组: 中国, CN201410285691.4[P]. 2014-06-25.
Fuzhou University. A backlight module based on quantum dots light guide plate: CN, CN201410285691. 4[P]. 2014-06-25. (in Chinese)

[63] 福州大学. 一种喷墨打印量子点导光板网点微结构的方法: 中国, CN201810657132.X[P]. 2018-06-25.
Fuzhou University. A method for inkjet printing of dot microstructure of quantum dots light guide plate: CN, CN201810657132. X[P]. 2018-06-25. (in Chinese)

作者简介:

叶　芸(1977—),女,福建福州人,博士,研究员,博士生导师,2002 年、2007 年于电子科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电信息显示技术方面的研究,E-mail:yeyun07@ fzu. edu. cn

徐　胜(1974—),男,江西抚州人,博士,助理研究员,硕士生导师,2006 年、2017 年于福州大学分别获得硕士、博士学位,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