

量子点应用于液晶显示背光的研究

顾宝^{1,2} 盛欣¹ 叶志成¹

¹上海交通大学电子信息与电气工程学院电子系, 上海 200240

²昆山龙腾光电有限公司, 江苏 昆山 215300

摘要 针对现有的量子点薄膜液晶显示背光技术中存在的材料利用率低和光学效率不高的缺点, 提出了直接在导光板上制备量子点微结构的方法。新的背光架构由蓝光发光二极管(LED)激发量子点形成高显色性的白光。根据搭建显示背光系统模型, 研究光线追踪的仿真模拟和光学参数优化, 证明新结构的量子点背光具有高出光效率和低成本的优点。实验与理论结果相一致。

关键词 光学设计; 微结构导光板; 光线追踪; 量子点

中图分类号 O472+.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.022201

Research on Quantum Dot Apply to LCD Backlight

Gu Bao^{1,2} Sheng Xin¹ Ye Zhicheng¹

¹Department of Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

²Infovision Optoelectronics Co., Ltd., Kunshan, Jiangsu 215300, China

Abstract For low material utilization and low optical efficiency of the quantum dots thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) backlight, a new model is proposed to form quantum dot micro structure in light guide plate. The new structure make the blue light emitting diode (LED) pump into high color rendering index (CRI) white light. The backlight system is built, and the study on ray tracing simulation and parameter optimization shows that the new quantum dots backlight has the advantages of high optical efficiency and low cost. The experimental and theoretical results match well with each other.

Key words optical design; micro structure light guide plate; ray tracing; quantum dot

OCIS codes 160.2100; 220.4830; 240.0310

1 引言

液晶显示作为现今社会各领域主流的显示技术越来越受到人们的青睐。随着生活水平的提高, 人们对液晶显示器的显示品质要求越来越高。尤其是在色域和亮度方面, 液晶显示正在不断被其他显示技术如有机发光二极管(LED)和激光显示所超越。为了提高液晶显示的性能, 近几年LED因体积小、能耗低、发热小等优点已经逐步取代传统的冷阴极荧光灯管(CCFL), 成为新一代的液晶显示器背光光源。目前LED背光的结构是利用蓝光LED去抽运黄色荧光粉形成白光背光源。但是荧光粉效率低、光谱宽、光衰大、颗粒均匀度差, 妨碍了液晶显示器的亮度和色度范围的提高, 因此仍有较大的改善空间。

2 量子点材料在发光显示的应用

目前市场上的白光LED主要是通过氮化镓(GaN)蓝光LED(波长450~470 nm)上覆盖一层黄色荧光粉涂层(主要成份YAG)制成。但是它的发射光谱中缺少有效的红光成份, 发出的是白冷光, 不够自然, 显色

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-09-03; 网络出版日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61370047, 61007025)

作者简介: 顾宝(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事液晶显示器件等方面的研究。E-mail: gubao@sjtu.edu.cn

导师简介: 叶志成(1977—), 男, 副研究员, 主要从事光子晶体发光器件和光伏器件、光波导、表面等离子、纳米光学等方面的研究。E-mail: yzhch@sjtu.edu.cn(通信联系人)

性差(CRI小于75),阻碍了其在高端照明领域和特殊领域的应用。为了获得高显色的LED,常在黄色荧光粉中添加少量红色荧光粉来弥补,并添加少量绿色荧光粉来改变光谱^[1]。然而这种混合荧光粉LED,在发光效率和化学稳定性方面还存在不足,难以得到大规模的推广应用^[2]。纳米量子点作为一种最新型的半导体荧光材料,具有发光效率更高、使用寿命更长和颜色纯度更好等优点,已经成为取代传统荧光粉的研究热点。

量子点(QD)是一种新型的纳米荧光材料,它是由II-VII族或III-V族元素组成的。量子点的晶粒直径只有约2~10 nm,仅相当于10~50个原子的宽度。其电子和空穴位都被量子限域,连续的能带结构变成具有分子特性的分立能级结构,受激发后可以发射荧光^[3]。量子点最大的特点是能级间隙随着晶粒大小而改变,晶粒越大,则能级间隙越小,晶粒越小,能级间隙越大。而量子点越小,发光颜色越偏蓝,反之,量子点越大,发光颜色越偏红。

过去几年,在发光显示领域以硒化镉(CdSe)及其核壳结构量子点的研究最为热门,主要因为其发光波长落在可见光的范围内。CdSe量子点材料属于直接能隙,适合做成可见光区域的QD-LED。QD-LED的器件结构与聚合物发光二极管(PLED)类似,其发光层由半导体量子点胶体溶液旋涂制成,因而具有制备过程简单、成本低及可制成柔性器件等优点^[4]。不过单独的纳米量子点颗粒易受到晶格缺陷和杂质的影响,荧光的量子产率很低。而在包覆更宽禁带的同族量子点如ZnS后,荧光效率则可以提高到50%甚至更高,且抗荧光衰退能力得到极大的增强。表1为CdSe/ZnS量子点的经典参数^[5]。2006年, Li等^[6]首次利用红(618 nm)、绿(540 nm)、蓝(490 nm)三色CdSe/ZnS核壳量子点构成白光LED,该器件的最大光照度为1050cd/m²。2007年, Anikeeva等^[7]利用CdSe/ZnS量子点发红光(620 nm)、ZnSe/CdSe/ZnS量子点发绿光(540 nm)、ZnCdS合金量子点发蓝光(440 nm),复合而成单层发光白光LED。其性能在外量子效率上较Li的结果提高约4倍左右,最大光照度则稍小,为830 cd / m²,演色指数为86,色温(CCT)为5500 K。

表1 核壳结构CdSe/ZnS量子点的参数

Table 1 CdSe/ZnS core/shell quantum dot parameter

Color	Emisison wavelength /nm	FWHM /nm	Diameter /nm	Quantum yield
Green	540±10	<35	~3.4	>50%
Yellow green	560±10	<35	~3.7	>50%
Blue	580±10	<35	~4.2	>50%
Green blue	600±10	<35	~5.0	>50%
Blue green	620±10	<35	~6.1	>50%

进入2010年以来,纳米量子点及其高分子复合材料被更加广泛地应用于液晶显示器件背光模块及固态照明等领域上,例如:Nexus Lighting及NNCrystal公司推出的量子点LED照明灯。QD vision公司开发的量子点技术平台。Nnaosys公司与3M公司共同研发的量子点薄膜(QDEF)。

在无辐射薄膜晶体管有源矩阵液晶显示器(TFT-LCD)应用方面,最具代表性的技术是3M公司提出的将量子点材料成膜后搭配蓝色LED光源的背光模块结构,并开始应用到液晶显示器当中,其结构如图1所示。按照Adobe RGB的标准,一般的液晶显示器(LCD)只能提供70%的色域,而加入量子点膜的LCD则可以提供100%的色域。但是目前量子点薄膜技术主要存在材料利用率不高,成本高昂,光学效率不高的缺

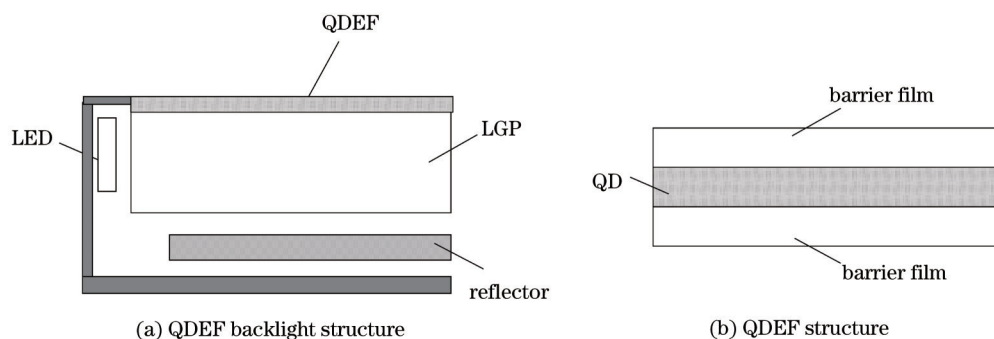


图1 量子点膜技术液晶显示背光结构图

Fig.1 LCD backlight structure of quantum dot film technology

点。根据3M QDEF技术的结构,量子点膜被上下两层阻挡膜阻隔保护,除了LED侧引入的激发光源之外,在QD层中又发生了量子转化而诱发其他波长的光线,而膜材料密度成份变化以及其界面层微结构(粗糙度,界面折射率变化)引起的传输转换都会造成光的损耗。这使得从导光板(LGP)出射的光无法全部透过量子点膜,造成光的浪费。

3 新型量子点背光封装方式

3.1 量子点背光微结构

针对现有量子点成膜背光技术的不足,提出了一种可实现高效率、高均匀度和低成本的量子点LED背光封装方式。具体的技术方案是在背光模组导光板的入光侧切割出图形的结构,再将量子点胶嵌入到导光板中。量子点在蓝光LED的激发下发出黄光和原有的蓝光形成白光,而这些白光在导光板散射网点的作用下,转化为垂直于导光板出光方向的面光源。图2为实施例的量子点显示背光示意图。此结构的优势是可以避免前面所述的量子点薄膜背光的全反射损失。

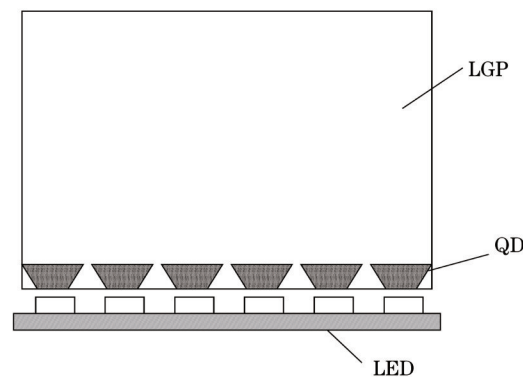


图2 量子点显示背光示意图

Fig.2 Diagram of quantum dot display backlight

3.2 背光结构的仿真模拟

按照新型量子点背光封装方式,使用光学模拟软件LightTools进行仿真模拟,以10.1"液晶显示器背光模组为例来验证结果。

LightTools光学设计软件是一款高精度的三维光学建模工具。该软件自带光学膜片元件库和光源库,其膜片库自带3M公司的所有增亮膜(BEF)和反射式偏光增亮膜(DBEF),其光源库涵盖了4大LED公司(Agilent, Lumileds, Nichia, Osram)的近400种LED光源,可以直接调用来进行液晶显示的背光设计。它利用蒙特卡罗光线追迹的技术做光学与机械结构间的仿真。当光源发射出的光束穿越整个光学系统,光束可以自动地分裂为反射、折射、偏振光及散射的分量。通过对这些光线的统计平均,就可以得到整个光学系统的光学性能评价。

3.2.1 光学仿真的具体步骤:

1) 建立基本的背光几何模型,设定a和b不同结构进行比较。

量子点膜的a背光,结构如图3所示,包括:反射片、导光板、量子点膜、散射片、双层BEF、21颗蓝光LED、胶框、背板,整体尺寸为:224.6 mm×128 mm×4 mm。

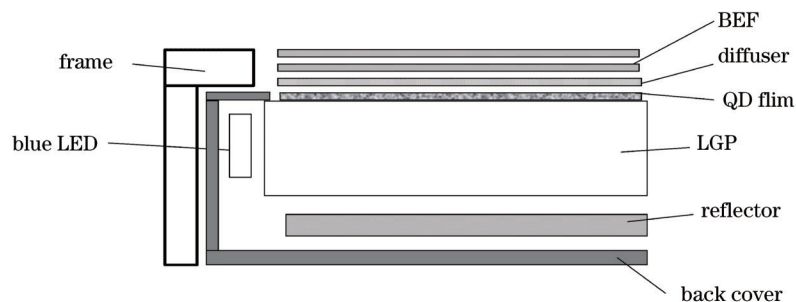


图3 量子点膜背光结构侧视图

Fig.3 Quantum dot film backlight side view drawing

量子点槽的b背光,结构如图4所示,包括:反射片、导光板(刻槽)、散射片、双层BEF、21颗蓝光LED、胶框、背板,整体尺寸为224.6 mm×128 mm×3.7 mm。

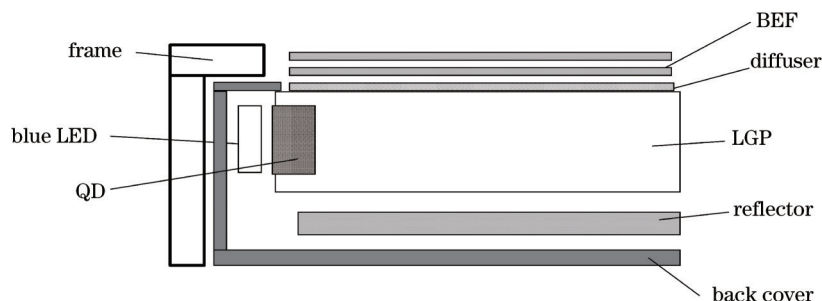


图4 量子点槽背光结构侧视图

Fig.4 Quantum dot slot backlight side view drawing

2) 导入控件,添加导光板组件,设2种背光材质均为相同的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),尺寸为222.52 mm×125.11 mm×3 mm。

导光板网点设计为两组半球形,设X、Y方向排列,其具体分布如图5所示。

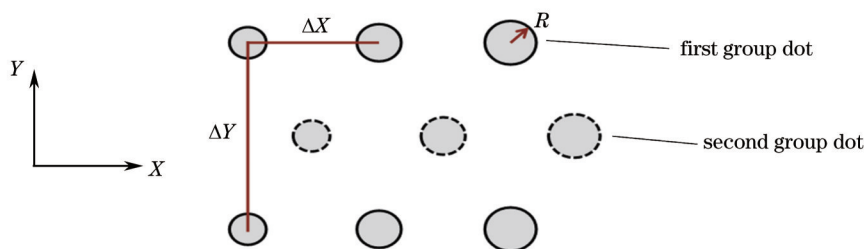


图5 导光板网点设计示意图

Fig.5 Light guide plate dot design drawing

第一组网点: X方向的网点间距 $\Delta X=0.4$ mm, Y方向的网点间距 $\Delta Y=0.69$ mm,网点的半径 R 随 X 变化,公式为 $R=0.0333+0.00155X$, $X \in [-62.5, 62.5]$, 网点高度公式 $H=0.0333+0.00155X$, $X \in [-62.5, 62.5]$ 。

第二组网点: 分布与第一组相同,但是 X 方向设 0.2 mm 的偏移, Y 方向设 0.34 mm 的偏移

3) 扩散片厚度为 0.1 mm,透射率 100%,散射方式为高斯散射。

4) BEF 膜片调用软件自带的 3M 双层膜片,型号设为 BEF90-40。

5) 反射片厚度设为 0.1 mm,透射率 95%。

6) 搭配 a 背光的量子点膜尺寸为 222.52 mm×125.11 mm×0.22 mm,折射率 1.62,透射率 100%。

7) 搭配 b 背光的量子点胶的折射率为 1.543,透射率 100%。

8) 建立光源,2种背光均使用相同的蓝光 LED,光源中心波长 465 nm,半峰全宽(FWHM)15 nm。LED 间距 10.6 mm,出射角 120° ,单颗 LED 亮度 30 lm,尺寸: 2.1 mm×1.6 mm,即发光面积为: 3.36 mm²

9) 量子点材料的选取基于 NNcrystal 公司 CdSe/ZnS 产品,量子效率为 60%,量子点半径为 4 nm,其吸收

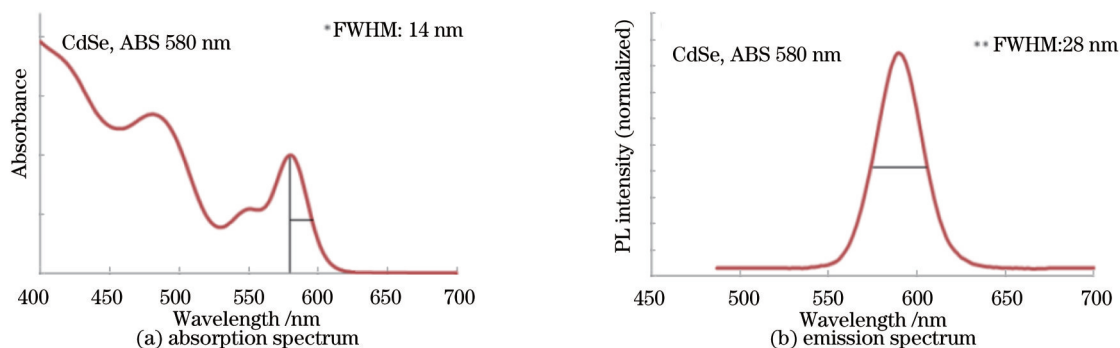
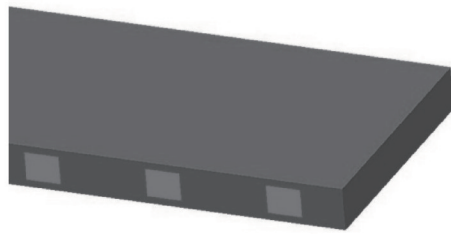


图6 量子点光谱示意图

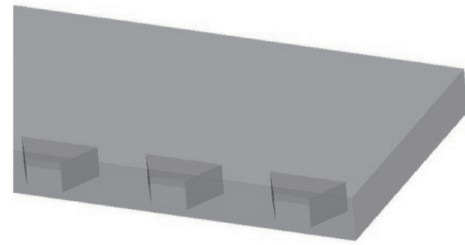
Fig.6 Quantum dot light spectrum chart

发射光谱如图7所示。

10) 背光模组b的导光板入光侧梯形槽设为:上底3 mm 下底6.464 mm 高3 mm 厚度2 mm,其具体结构如图7所示。



(a) trapezoid slot light guide plate entity drawing



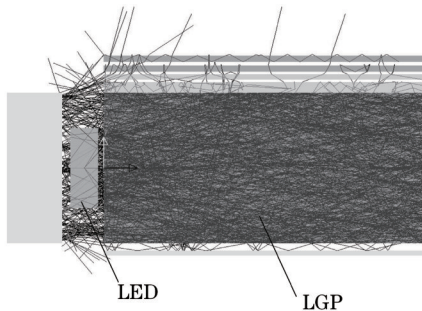
(b) trapezoid slot light guide plate perspective drawing

图7 梯形槽导光板结构示意图

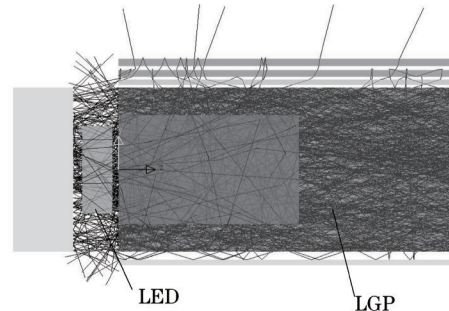
Fig.7 Trapezoid slot light guide plate drawing

3.2.2 光学仿真的结果

2种背光模组的光线轨迹追踪结果如图8所示,都能发出均匀的面光源满足液晶显示器的需要。



(a) film structure backlight local light trajectory



(b) slot structure backlight local light trajectory

图8 2种背光模组局部光线追踪图

Fig.8 Two kinds of backlight local light tracing map

量子点膜结构a背光只有一种形式,无其他变量。而量子点微结构的b背光,由于受梯形槽形状的变化,会影响最终的结果。通过软件仿真,如图9所示,在梯形体积不变,只改变底角 α 角度的前提下,量测相对应的出光效率(光通量)。得到图10的光通量曲线,能够看出:梯形底角 $\alpha=30^\circ$ 不是合理的角度,因为此角度无法通过调节量子点的浓度来达到白光的出射效果。随着角度增大,当梯形底角 $\alpha=60^\circ$ 时,出光率达到最大,达到了19.86 lm。

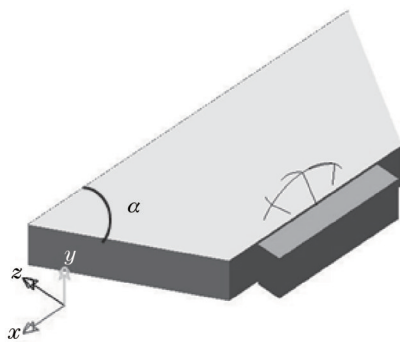


图9 单个梯形槽结构示意图

Fig.9 Single trapezoid slot structure drawing

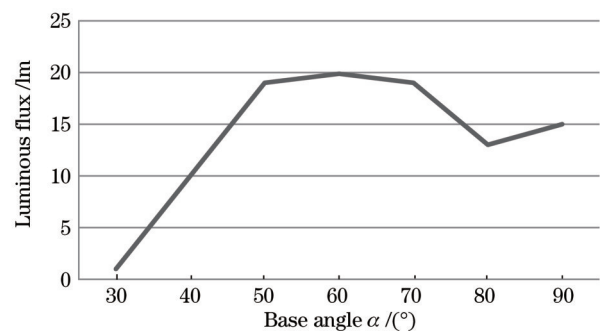


图10 光通量随梯形底角 α 变化曲线

Fig.10 Luminous flux variety chart as base angle α of trapezoid

为了进一步优化量子点在此微结构设计中的出光效率,在梯形槽的两个侧面设置反射膜[厚度100 μm 反射率90%的聚氯乙烯(PVC)薄膜]再嵌入量子点胶。未设反射膜的梯形槽为普通型,具有反射膜的梯形槽称为反射型,LightTools软件仿真测得的数据如下图11所示。

可以得出反射型结构比普通型材料的使用量更少,在出光效率方面,则增加了近1倍。所以,以优化调整后的模型与量子点膜背光进行仿真比较,具体的光学数据结果如表2所示。

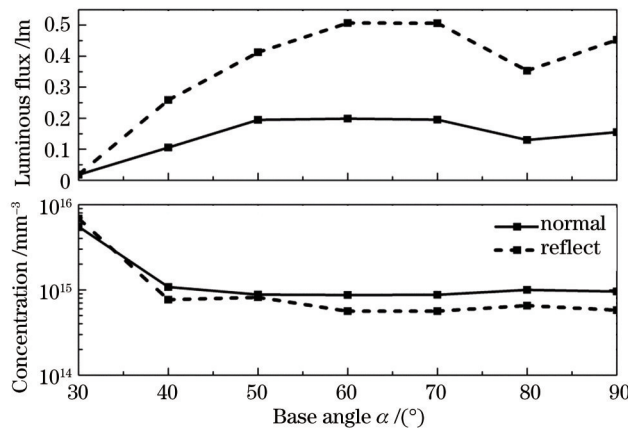


图11 反射型与普通型量子点比较图

Fig.11 Comparison chart of reflection-type and normal-type quantum dot

表2 新结构背光模型与膜结构背光比较表

Table 2 Comparison table of new structure backlight and film structure backlight

Structure	CIE(X,Y)	CCT/K	Lum./nit	QDs Usage /num.
Film-a	(0.35409,0.29648)	4226.8	3235.3	4.78×10^{19}
Slot-b	(0.35932,0.30466)	4070.7	6465.7	3.58×10^{17}

通过两组数据对比,不难发现,要得到相同的白光,量子点膜所需要的量子点数量是梯形槽微结构的133倍。与此同时,梯形槽微结构背光模块的发光亮度是QD膜的2倍。可见,微结构量子点背光比传统的量子点膜背光具有明显优势。

3.3 实验

使用与仿真相同结构的10.1"液晶显示背光模组样品来进行实验,LED芯片为东贝公司的L538SW。先在样品背光导光板的入光侧切割出槽结构图形,其位置正对应于LED发光面。采用NNcrystal公司的CdSe/ZnS量子点材料(10mg,型号:L53-10)与LED封装荧光胶(Dow Corning公司产品,型号OE-6550)以20%的质量比例充分混合。然后用夹具固定导光板,将量子点胶注入入光侧切割槽,静置1h后,再经过恒温炉100℃烘烤1h固化成型,最后组成液晶显示背光模组。光学量测设备采用德国DMS平面显示光学系统,电流设定为60mA。测试在室温状态下进行,对照组为量子点膜片结构的液晶显示背光模组,均取5点平均值,得到的光学测试随时间变化曲线如图12所示。新型微结构的背光亮度随着时间延长产生了一些衰减,色温方面则均较为稳定。原因主要跟量子点及荧光胶的材料选择,调配比例,固化、点胶条件相关,还需要进一步优化。但是总体实际结果与理论一致,新结构的背光需使用的量子点数量更少、发光效率也更高。

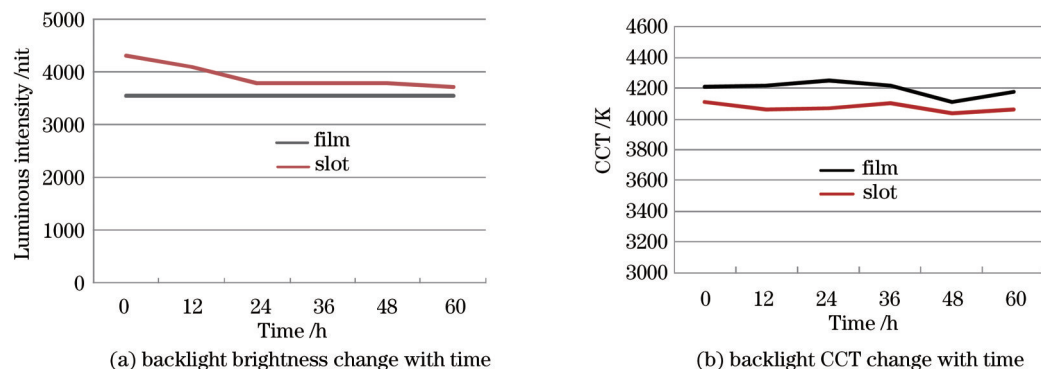


图12 2组背光亮度和色温随时间变化图

Fig.12 Brightness and CCT of two groups of backlight change with time

4 结 论

通过仿真模拟和实验论证,说明与现有量子点成膜背光技术对比,新型微结构量子点液晶显示背光的最大优点是能够提高光学效率的同时极大减少材料的使用量,降低生产成本,有利于量子点材料在液晶显示领域的应用推广。参考软件光学模拟的结果,选择与液晶显示背光所使用LED匹配厚度的微结构导光板,通过调整其尺寸和量子点的浓度,就可以满足液晶显示器产品的亮度、色度特性要求。研究的结果可为量子点材料在液晶显示背光方面的进一步优化应用提供依据。

参 考 文 献

- 1 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1777-1781.
吴海彬, 王昌铃, 何素梅. 涂敷红、绿荧光粉的白光LED显色性研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1777-1781.
- 2 Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.*. Preparation and temperature-variation properties of high color rendering index LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123005.
崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 高显色白光LED的制备及其变温特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0123005.
- 3 Li Xiangmin. The latest LED technology : quantum dot light emitting diodes [J]. *Science and Technology Information*, 2010, (21): 40.
李相敏. LED前沿技术:量子点(Quantum Dot)LED [J]. *科技信息*, 2010, (21): 40.
- 4 Quantum dot light emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(2): 42.
量子点发光二极管[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(2): 42.
- 5 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. Principle of Optical Fiber Amplification and Optimizing Designs of the Devices [M]. Beijing: Science Press, 2011.
程 成, 程潇羽. 光纤放大原理及器件优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 6 Y Q Li, A Rizzo, R Cingolani, *et al.*. Bright white light-emitting device from ternary nanocrystal composites [J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(19): 2545-2548.
- 7 P O Anikeeva, J E Halpert, M G Bawendi, *et al.*. Electroluminescence from a mixed red-green-blue colloidal quantum dot monolayer [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(8): 2196-2200.

栏目编辑: 韩 峰