

文章编号:1007-2780(2018)07-0606-09

宽色域液晶显示系统的研究

徐梦层¹, 李昌禄^{2*}, 雷志春^{1,3}

(1. 天津大学 微电子学院, 天津 300072;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

3. 鲁尔西应用科学大学 传感与测量研究所, 德国 45479)

摘要:针对普通显示液晶系统在色彩表现方面的不足,在现有色域扩展技术的基础上,设计了一种以白和宝石蓝两种颜色发光二极管作为背光源的宽色域液晶显示系统。本文通过分析普通显示系统的色域,以色域覆盖率最大化为准则,选择主波长为 501 nm 的宝石蓝发光二极管作为扩展背光源,扩展普通显示系统未能显示的青绿色区域。从理论上分析该系统的色域范围,并且详细介绍了系统背光源阵列、数据转发等功能模块的电路实现。实验结果表明:本文所设计的宽色域液晶显示系统的色域扩展了青绿色区域且色域覆盖率可达到 45.65%。相比与其他多原色显示系统,本文设计的宽色域液晶显示系统不仅简化了硬件设计的复杂度,而且能够重现更多青绿色区域的颜色。

关键词:宽色域;色域扩展;混色理论;色域覆盖率;显示

中图分类号:TN942.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183307.0606

Wide color gamut liquid crystal display system

XU Meng-ceng¹, LI Chang-lu^{2*}, LEI Zhi-chun^{1,3}

(1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University,
Tianjin 300072, China;3. Institute of Sensing and Measurement, University of Applied Sciences Ruhr West,
45479, Germany)

Abstract: To overcome the deficiencies in color gamut of the common Liquid Crystal display system, a wide color gamut liquid crystal display system is designed with white and emerald light-emitting diodes as the backlight, which is based on the existing color gamut expansion technology. This paper analyzes the color gamut of the common display system, and uses the emerald light-emitting diode with a dominant wavelength of 501 nm as the extended backlight source to maximize the gamut coverage. It expands the blue-green area that cannot be displayed by common display systems. It analyzes the system's color gamut theoretically. And it describes the circuit implementation of the functional

收稿日期:2018-03-09;修订日期:2018-04-09.

基金项目:天津市科技支撑重点项目(No.16YFZCGX00760)

Supported by Science and Technology Support Program of Tianjin City(No. 16YFZCGX00760)

* 通信联系人, E-mail: changlu@tju.edu.cn

modules in detail, such as, the backlight source array, data forwarding module, etc. Experimental results indicate that the color gamut of wide color gamut liquid crystal display system in this paper expands the blue-green areas and its color gamut coverage can achieve 45.65%. Compared with other multi-primary color display systems, the wide color gamut liquid crystal display system not only simplifies the complexity of hardware design, but also can reproduce the colors of more blue-green areas.

Key words: wide color gamut; gamut expansion; color mixing theory; color gamut coverage; display

1 引言

随着显示技术的发展,液晶显示器(Liquid crystal displays, LCDs)因其清晰度高、使用寿命长、价格低等优势,已成为众多平面显示器中发展最成熟、应用面最广的主流平面显示器^[1-2]。液晶本身不发光,需要依靠背光为其提供光源从而显示图文信息。目前市场上普遍使用的背光源是白光 LED(White LED, WLED),因为 WLED 具有高效、寿命长、低成本和简单器件封装的优势^[3-4]。但是以 WLED 背光的 LCDs 的色域较窄,一般只能覆盖 65%~70% NTSC 色域,与能够实现 100% NTSC 以上色域的有机电致发光显示器^[5](Organic light-emitting diode, OLED)相比, LCDs 的色彩表现明显不佳,远不能满足人眼的需求。近些年来,为了扩展 LCDs 的色域,国内外均开展了大量的研究工作。目前扩展色域的方法主要有以下 3 个方面:(1)采用高饱和的三原色,即通过提高色纯度来扩展显示器的色域范围。例如,Rec.2020 标准^[6]能够真实地重现自然界颜色,并且覆盖 99.9% 的 Pointer 色域^[7]。虽然 Rec.2020 标准可以通过单色光红绿蓝激光源^[8]实现,但是激光源成本高,而且由干涉引起的斑点图^[9]至今无法很好的解决;(2)采用多原色滤光片扩展 LCDs 的色域范围^[10-12]。Cheng 等通过增加黄色滤光片和青色滤光片,实现了一种五原色 LCDs 系统,该系统能够在不牺牲亮度的前提下,色域范围能达到~90% NTSC。但是滤光片的增加也增加了液晶面板(LCD panel, LCP)的成本和制造复杂度^[13];(3)采用多原色背光源^[14-16]扩展 LCDs 的色域范围。Hinnen 等^[16]提出了一种带有五种 LEDs(红绿蓝黄青)背光的液晶显示系统,色域覆盖率能达到 63%,实现了色域扩展。但是每个 LED 背光单元需要驱动电路控制,因此多原色背光源的方法增加了硬件电路设计复杂

度^[17-18]。虽然有很多扩展色域的技术被提出,但是很难平衡系统色域的扩展与系统设计的复杂度之间的关系。

为了扩展 LCDs 的色域范围,本文简化了现有多原色背光源方法中硬件电路的复杂性,实现了一种宽色域(Wide color gamut, WCG)液晶显示系统。本文结构如下:首先,本文分析了普通 LCDs 的色域范围,选择扩展青绿色区域,并以色域覆盖率最大化为准则,优化选择 LCDs 的背光源;其次,根据优化选择的背光源,设计了一种宽色域液晶显示系统,并详细叙述显示系统硬件电路的实现;最后,通过实验测量和对比可知本文提出的宽色域液晶显示系统不仅在色域覆盖率方面优于其他多原色系统,而且能够复现更多青绿色区域的颜色。

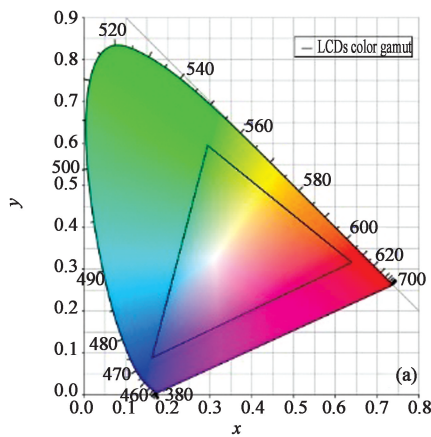
2 LCDs 背光源的优化选择

2.1 WLED 背光的 LCDs 色域

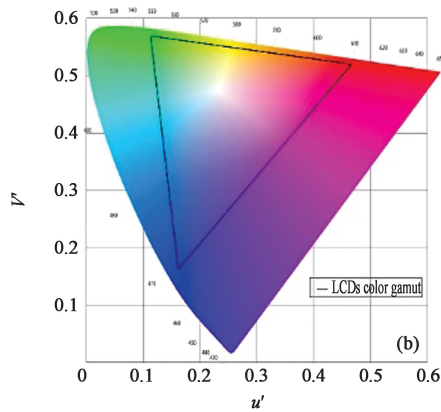
WLED 是通过蓝光 LED 芯片(波长 445~460 nm)激发黄色荧光粉制成的白光 LED。由于荧光粉的黄色发光光谱较宽(>100 nm 的半高峰),导致 LCDs 的色域较窄^[19]。虽然以红绿蓝 LEDs 背光的 LCDs 就色域范围方面远好于 WLED 背光源,但是绿光 LED 发光效率低^[20],并且红绿蓝 LEDs 背光驱动电路复杂且成本高。从低成本的角度,WLED 依然是 LCDs 背光源的最好选择^[21]。

目前以 WLED 背光的 LCDs 大部分能满足 BT.709 标准^[22],所以本文定义 BT.709 标准为 LCDs 的色域。不失一般性,本文分别在 CIE1931-xy 和 CIE1976-u'v' 颜色空间上表示以 WLED 背光的 LCDs 色域。如图 1 所示。

从图 1(a)(b)中可以看出大量的自然界真实颜色在 LCDs 色域范围之外,特别是纯绿色区域和青色区域,这是由于绿色滤光片与红色和蓝色



(a) CIE 1931- xy 坐标下 LCDs 的色域
(a) Color gamut of LCDs in CIE 1931- xy



(b) CIE1976- $u'v'$ 颜色空间下 LCDs 的色域
(b) Color gamut of LCDs in CIE 1976- $u'v'$

图 1 LCDs 的色域

Fig.1 Color gamut of LCDs

滤光片有串扰的缘故^[21]。所以,在扩展 LCDs 色域时,应该尽可能地扩展青绿色区域。在不改变液晶面板的前提下,需要引入其他原色的扩展背光源。

2.2 扩展背光源的优化选择

为了最大化地扩展 LCDs 色域,本文选择色域覆盖率作为评价标准。色域覆盖率是指在 CIE 1976 均匀色度空间($u'v'$),显示设备显示的色域面积占均匀色度空间全部光谱(380~780 nm)面积(0.195 2)的百分数^[23]。色域覆盖率越大,表示显示系统所能显示的色域范围越大。从上文可知,扩展 LCDs 色域,可以通过扩展青绿色区域来实现。所以本文仿真了扩展背光源在 460 nm~540 nm 光波段内色域覆盖率。如图 2 所示。在 460 nm~540 nm 波段内,最优波长为 501 nm,此

时显示系统相对应的色域覆盖率为 46.48%。主波长 501 nm 的 LED 所显示的颜色为宝石蓝色(Emerald)或青色(Cyan),本文称主波长 501 nm 的 LED 为宝石蓝光 LED(Emerald LED, ELED)。

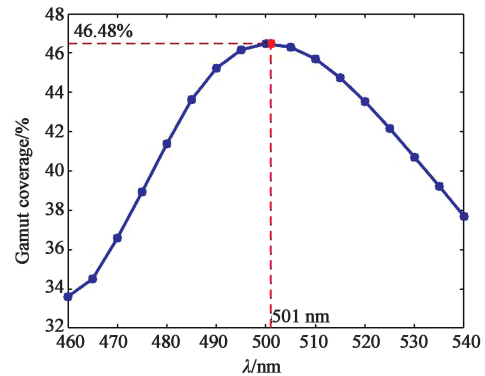


图 2 色域覆盖率

Fig.2 Color gamut coverage

如图 3 所示,根据液晶彩色滤光片的透射光谱可知,主波长为 501 nm 的 ELED 可以透过绿色和蓝色滤光片,可以覆盖从绿色到蓝色的颜色,同时较好的表达高饱和青色^[13]。

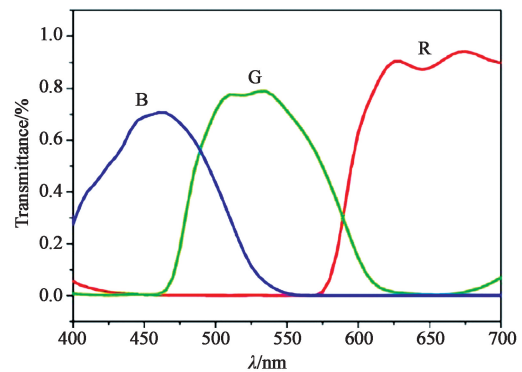


图 3 液晶彩色滤光片的透射光谱^[11]

Fig.3 Transmission spectra of LCD color filters^[11]

综上所述,为了最大化地扩展 LCDs 的色域范围,同时简化现有多原色扩展方法的硬件复杂度,故本文选择 WLED 和主波长为 501 nm 的 ELED 作为 LCDs 的背光源。

3 宽色域液晶显示系统

3.1 显示系统的结构示意图

宽色域液晶显示系统(Wide gamut color

LCDs, WCG LCDs)的结构。如图 4 所示。显示系统面板是由红绿蓝三原色滤光片组成的液晶面板(LCP),尺寸为 50 in(1 in=2.54 cm),分辨率为 4K(3 840×2 160)。LEDs 背光由 36×66 个背光单元组成,每个背光单元包含一个 WLED 和一个 ELED,其中每个 LED 通过恒流驱动电路独立控制。

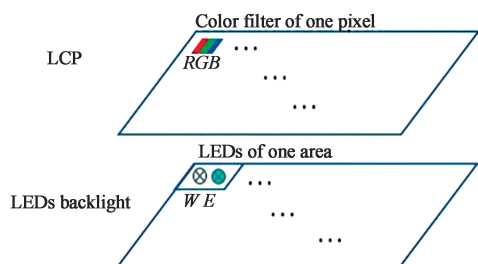


图 4 宽色域液晶显示系统结构示意图
Fig.4 Schematic diagram of WCG LCDs

3.2 显示系统色域的理论分析

若不考虑液晶的漏光效应,以 WLED 背光的 LCDs 的显像模型可由公式(1)描述。

$$F = \begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [R_w] \\ [G_w] \\ [B_w] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: F 为待显示的颜色, R, G, B 分别为红绿蓝 3 种滤光片对应液晶透光率, $[R_w], [G_w], [B_w]$ 分别为红绿蓝显像三原色^[24-25]。同样,若将 LCDs 的背光换成 ELED 背光,用同样的方式可测得 LCDs 的显像三原色为 $[R_e], [G_e], [B_e]$,此时 LCDs 的显像模型可由式(2)表达。

$$F = \begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [R_e] \\ [G_e] \\ [B_e] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

若背光是由 BL_w 单位的白色背光和 BL_e 单位的宝石蓝背光混合而成,根据混色理论^[26],此时 LCDs 的显像模型如公式(3)所示。

$$F = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}^T \left(BL_w \begin{bmatrix} [R_w] \\ [G_w] \\ [B_w] \end{bmatrix} + BL_e \begin{bmatrix} [R_e] \\ [G_e] \\ [B_e] \end{bmatrix} \right). \quad (3)$$

公式(3)表明此时 LCDs 的显像三原色是由 BL_w 单位的白光三原色和 BL_e 单位的宝石蓝光三原色混合而成。表 1 是显示系统显像原色三刺激值及色坐标。

为便于描述,这里引入一个混光比(k)的概

念,其定义如公式(4)所示,其中 $k \in [0, 1]$ 。

$$k = \frac{BL_e}{BL_w + BL_e}. \quad (4)$$

表 1 显示系统原色三刺激值及色坐标

Tab.1 Three stimulus values and color coordinate of display system

	$[R_w]$	$[G_w]$	$[B_w]$	$[R_e]$	$[G_e]$	$[B_e]$
X	0.209 5	0.314 8	0.354 7	0.001 8	0.048 8	0.023 7
Y	0.108 4	0.743 5	0.148 1	0.001 3	0.404 6	0.176 7
Z	0.010 5	0.112 2	1.885 7	0.000 4	0.183 8	0.214 4
x	0.638 0	0.268 9	0.148 5	0.514 3	0.076 6	0.057 1
y	0.329 6	0.635 2	0.062 0	0.371 4	0.635 0	0.426 0

结合公式(3)(4),对于任意混光比 k ,显示系统的显像模型改写成公式(5)。

$$F = \begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [R_k] \\ [G_k] \\ [B_k] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: $[R_k], [G_k], [B_k]$ 是混光比为 k 时的系统显像三原色。根据公式(4)(5)可知。

$$\begin{bmatrix} [R_k] \\ [G_k] \\ [B_k] \end{bmatrix} = \left((1-k) \begin{bmatrix} [R_w] \\ [G_w] \\ [B_w] \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} [R_e] \\ [G_e] \\ [B_e] \end{bmatrix} \right). \quad (6)$$

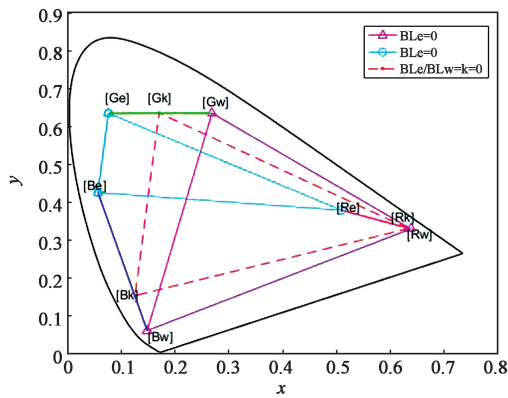
结合表 1 和公式(6)可知,任意混光比为 k 时的系统显像三原色是与混光比 k 有关的线性函数。则混光比为 k 时的系统显像三原色 $[R_k], [G_k], [B_k]$ 的色坐标如表 2 所示。

表 2 混光比为 k 的系统显像三原色色度坐标

Tab.2 Color coordinate of display system at color mixing ratio

	$[R_k]$	$[G_k]$	$[B_k]$
x	$0.2095 + 0.0018k$	$0.3148 + 0.0488k$	$0.3148 + 0.0488k$
	$0.3284 + 0.0035k$	$1.1705 + 0.6372k$	$2.3885 + 0.4148k$
y	$0.1084 + 0.0013k$	$0.7435 + 0.4046k$	$0.1481 + 0.1767k$
	$0.3284 + 0.0035k$	$1.1705 + 0.6372k$	$2.3885 + 0.4148k$

绘制任意混光比 k 下的系统色域,如图 5 所示,以显像红原色为例,当混光比 $k=0$ 时,红原色 $[R_k]=[R_w]$,此时系统仅 WLED 背光;随着 k 不断增大, $[R_k]$ 在直线 $[R_w][R_e]$ 上移动;当 k 增大到 1 时, $[R_k]=[R_e]$,此时系统仅 ELED 背

图 5 混光比 k 下的系统色域Fig.5 System color gamut at color mixing ratio k

光。同理可证绿原色和蓝原色。

综上所述,宽色域液晶显示系统的色域范围是动态变化的,其动态色域范围的最大值是由 $[R_w][G_w][G_e][B_e][B_w]$ 构成的五边形色域。

3.3 显示系统的电路实现及实物图

宽色域液晶显示系统按照功能可划分为 5 个模块:信号处理模块、数据转发模块、背光控制模块、WE LEDs 背光以及液晶面板(LCP)。如图 6 所示。其中,信号处理模块用于对输入的图像或视频数据进行预处理、特征提取、液晶补偿等操作,以系统能耗最低为最优化条件获取背光数据,并将获取的背光数据发送给数据转发模块,将液晶补偿后图像送至液晶面板。为了便于调试及测试多种算法,该模块由自主开发的调试平台完成;数据转发模块将接收到的背光数据打包,并采用总线低压差分(Bus low voltage differential signaling, BLVDS)传输技术进行数据传输;背光控制模块对传输的数据包解析,将背光数据转换脉冲调制信号(Pulse-width modulation, PWM)

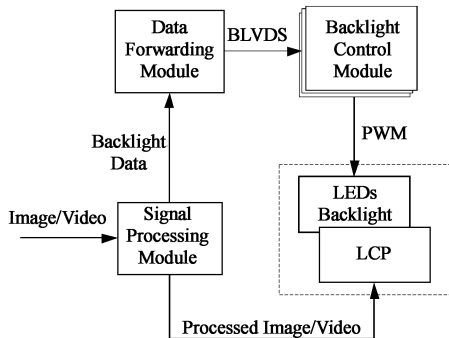


图 6 显示系统结构图

Fig.6 Structure diagram of display system

输出,实现对 WE LEDs 背光阵列的控制;WE LEDs 背光阵列由 WLED 和 ELED 背光单元组成,为液晶面板提供可靠的光源;液晶面板(LCP)则主要由液晶及其驱动电路构成。

3.3.1 WE LEDs 背光阵列

本显示系统的 WE LEDs 背光阵列,共分为 36×66 单元,每个单元包含一个 WLED 和一个 ELED。采用恒流驱动输出电路,保证 LEDs 的亮度均匀性。其中每个 LED 根据系统需要可独立控制,从而增加了系统的分辨率。

3.3.2 背光控制电路

由于 WE LEDs 背光阵列中的每个 LED 是独立控制的,本系统将背光控制模块设计成了 DDR4 内存条结构便于电路的连接。使用硬件描述语言对传输的数据包进行解析并输出 PWM 调光信号,通过 PWM 调光信号控制 LED 的明暗程度。如图 7 所示。

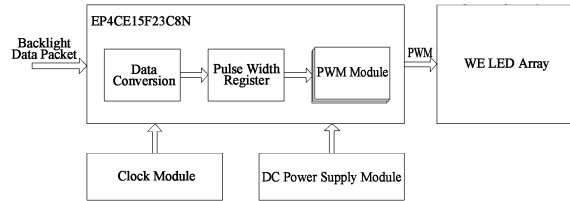


图 7 背光控制电路

Fig.7 Backlight control circuit diagram

PWM 调光信号是通过设置周期和占空比来控制 LED 亮度。PWM 调光使得输出电流始终是恒定的,从而保证 LED 色温恒定。PWM 调光信号控制如图 8 所示。以 WLED 的 PWM 调光信号为例,每个 WLED 的背光数据将被转化为一

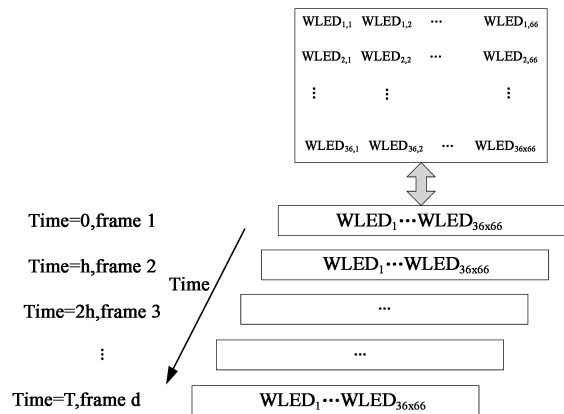


图 8 PWM 调光控制过程

Fig.8 Control processing of PWM dimming

系列串行数据。如果串行数据第 n 位为“1”(“0”),相应的 WLED(第 n 个 WLED)将打开(关闭)。其中,时间 t 表示 PWM 调光信号的周期,时间 h 表示 PWM 生成单元的分辨率。为了避免闪烁,本文结合背光控制电路的时钟信号和 PWM 的分辨率,将 PWM 平率设为 200 Hz, PWM 的分辨率为 8 bits。

3.3.3 数据转发电路

如果背光数据直接由背光控制电路处理,会增加背光控制的芯片 I/O 口数目及功能要求,不仅增加了背光控制电路的复杂度,而且影响数据传输速率及准确度。为了简化背光控制电路,实现背光数据快速无误地传输,本系统在信号处理模块和背光控制模块之间增加了数据转发模块,用于实现数据的接收、反馈以及转发功能。数据转发模块的电路图如图 9 所示,当上电时,该模块通过 USB 通信模块获取背光数据后,将背光数据打包成自定义的背光数据包,采用高速率低功耗的 BLVDS 传输技术,按设备地址递增顺序依次发送地址置零、数据解锁、写数据、数据上锁和显示更新 5 条指令,实时地将背光数据分配到各个背光控制模块。

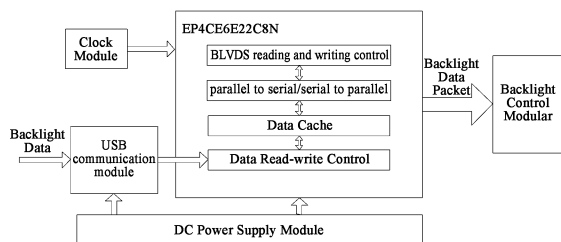


图 9 数据转发模块电路图

Fig.9 Circuit diagram of data forwarding module

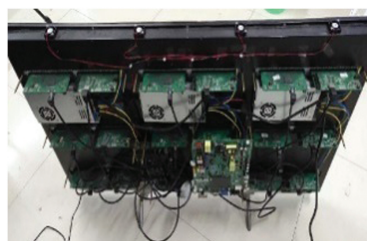
3.3.4 显示系统实物图

图 10(a)(b)是显示系统的实物图。采用 WE LEDs-LCD 的双屏显示结构,液晶面板尺寸为 50 in,屏幕比例为 16 : 9,背光面板分区数为 2 376 个,由 18 个背光控制模块驱动控制。



(a)显示系统正面图

(a)The front of the display systems



(b)显示系统反面图

(b)The back of the display systems

图 10 显示系统实物图

Fig.10 Physical map of the display system

4 测量实验与结果分析

4.1 WCG LCDs 色域的测量

测量系统色域时,在液晶面板上分别显示 100%全红场、100%全绿场、100%全蓝场,通过设置不同混光比 k 进行测量。表 3 列出了测试中的 8 组数据。

表 3 测量不同混光比的数据

Tab.3 Measured data of different light mixing ratios

Test Signal	$k = 0$		$k = 0.05$		$k = 0.1$		$k = 0.2$	
	x	y	x	y	x	y	x	y
100% All Red Square	0.638 0	0.330 1	0.637 3	0.330 4	0.636 6	0.330 7	0.635 3	0.331 2
100% All Green Square	0.268 9	0.635 2	0.227 8	0.635 2	0.201 1	0.635 2	0.168 6	0.635 1
100% All Blue Square	0.148 5	0.062 0	0.141 2	0.091 1	0.135 0	0.115 8	0.125 0	0.155 8

Test Signal	续 表							
	$k = 0.5$		$k = 0.66$		$k = 0.72$		$k = 1$	
	x	y	x	y	x	y	x	y
100% All Red Square	0.631 4	0.332 7	0.619 2	0.337 4	0.605 1	0.342 7	0.509 1	0.379 5
100% All Green Square	0.128 2	0.635 1	0.096 3	0.635 1	0.087 0	0.635 1	0.076 5	0.635 0
100% All Blue Square	0.106 0	0.231 2	0.081 3	0.329 7	0.071 1	0.370 5	0.057 1	0.426 0

将测量结果在 CIE 1931- xy 色度坐标图上绘图,如图 11 所示。其中 $[R_w],[G_w],[B_w]$ 为系统白光三原色的色度坐标点, $[R_e],[G_e],[B_e]$ 为系统宝石蓝光三原色的色度坐标点。图中各虚线三角形是在不同混光比 k 下的测量结果。

从图 11 中可以看出,当混光比 k 逐渐增大时,LCDs 的显像三原色逐渐由白光三原色沿直线变为宝石蓝光三原色,所以显示系统的色域是动态变化的。在某一时间(帧)时,显示系统实际的色域

范围可以在图 11 的虚线三角形色域中优先选择最佳 k 值,从而在综合最大色域范围时得到提升。显示系统动态色域的最大值是五边形色域 $[R_w][G_w][G_e][B_e][B_w]$,相较于只使用 WLED 背光时的三角形色域 $[R_w][G_w][B_w]$,系统的色域得到了扩展,特别是在青绿色区域获得了显著的扩展。

4.1.2 青绿色彩条图像测试

为了进一步测试本文设计的 WCG LCDs 扩展了青绿色区域,本文分别在 WCG LCDs 和同型号的普通液晶显示器上测试了从青色到红色的彩条图(若彩条图选用从蓝色到红色全段,色域显示效果提升不明显)。彩条图的色坐标点在色度图上的位置如图 12 所示。

如图 13 所示,图 13(a)是在普通 LCDs 上显示的彩条图,图 13(b)是在 WCG LCDs 显示的彩条图,图 13(c)是 WCG LCDs 显示彩条图对应的

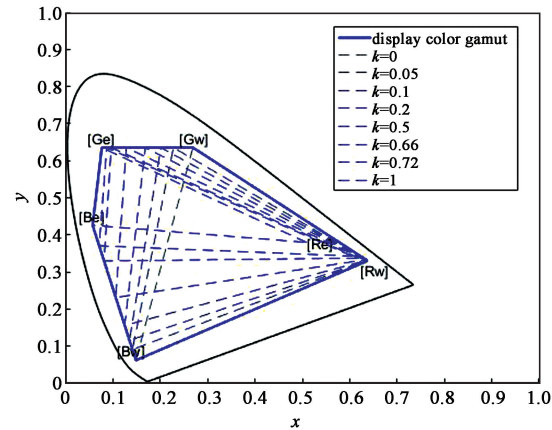


图 11 WCG 显示系统色域

Fig.11 Color gamut of WCG display system

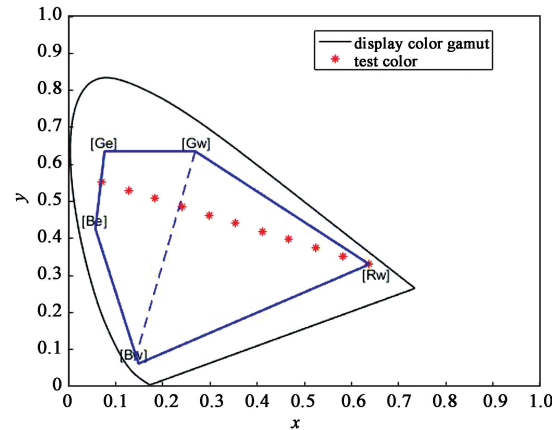
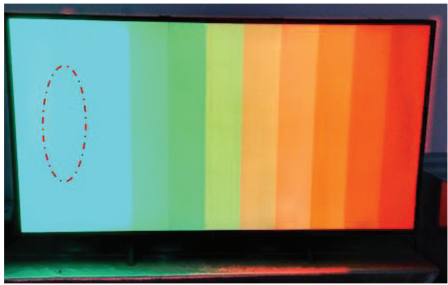


图 12 彩条图的色坐标

Fig.12 Color coordinates of color bars image



(a)普通显示器显示的彩条图

(a)Color bar image on LCDs

(b)宽色域液晶显示系统显示的彩条图

(b)Color bar image on the WCG LCDs

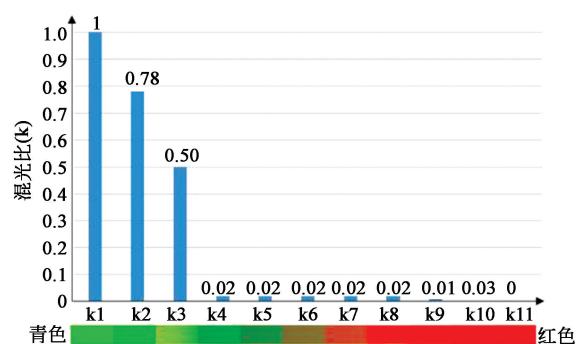
(c) 彩条图对应的 k 值(c) Color bar corresponding to the k value

图 13 彩条图测试

Fig.13 Color bar test

k 值。对比(a)(b)图可知,本文的宽色域液晶显示系统能够较好地显示高饱和度青色。

在后续的研究工作中,笔者会进一步完善系统的色域显示。比如通过图像信息与背光数据对比处理,针对不同帧图像的色彩情况控制不同的 k 值,从而使动态色域范围达到最大。

4.2 系统色域的对比分析

为了评价本文设计的 WCG LCDs,本文与 BT.709 标准,文献[11]的五原色显示系统和文献[15]六原色 LEDs 背光的显示系统在色域覆盖率方面进行了对比。如表 4 所示,WCG LCDs 的色

表 4 色域覆盖率的对比

Tab.4 Comparison of color gamut coverage ratio

Color gamut coverage ratio/%	
BT.709 Standard	33.24
Five primary color LCDs ^[11]	42.40
Six primary LEDs LCDs ^[15]	42.07
The proposed WCG LCDs	45.65

参 考 文 献:

- [1] 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.
ZHOUE 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)
- [2] SCHADTM. Milestone in the history of field-effect liquid crystal displays and materials [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, 48(3S2): 03B001.
- [3] ANANDAN M. Progress of LED backlights for LCDs [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(2): 287-310.
- [4] HUANGH T, HUANG Y P, TSAI C C. Planar lighting system using array of blue LEDs to excite yellow remote

域覆盖率可达到 45.65%,高于其他多原色显示系统的色域。如图 14 所示,相比于其他多原色显示系统,本文设计的 WCG LCDs 能重现更多青绿色区域的颜色。

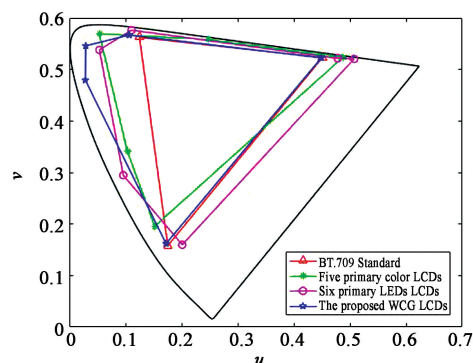


图 14 不同显示系统的色域对比

Fig.14 Color gamut comparison of various displays

5 结 论

本文实现了一种以白光 LED(WLED)和宝石蓝光 LED(ELED)为背光的宽色域液晶显示系统(WCG LCDs)。以色域覆盖率最大化为准则,选择主波长为 501 nm 的 ELED 作为系统的背光源,扩展普通 LCDs 未能重现的青绿色区域。经实验测量和结果对比表明,本文设计的 WCG LCDs 不仅能够重现更多的青绿色区域颜色,而且色域覆盖率可达到 45.65%,比以 WLED 为背光的普通 LCDs 的色域覆盖率提高 10.9%。与现有的多原色显示系统相比,在色域方面,本文设计的 WCG LCDs 在青绿色区域表现方面高于其他多原色显示系统;在硬件实现方面,本文设计的 WCG LCDs 以 WLED 和 ELED 为背光源,电路结构简单,可实现性强。

- phosphor film [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(1): 44-51.
- [5] 马东阁. OLED 显示与照明——从基础研究到未来的应用[J]. 液晶与显示, 2016, 31(3): 229-241.
- MAD G. OLED display and lighting——from basic research to future applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 229-241. (in Chinese)
- [6] Recommendation ITU-R BT.2020, Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange [S]. Geneva: Electronic Publication, 2014.
- [7] POINTER M R. The gamut of real surface colours [J]. *Color Research and Application*, 1980, 5(3): 145-155.
- [8] MASAOKAK, NISHIDA Y, SUGAWARA M. Designing display primaries with currently available light sources for UHDTV wide-gamut system colorimetry. [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19069-19077.
- [9] CHELLAPPANK V, ERDEN E, UREY H. Laser-based displays; a review [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): F79-F98.
- [10] YANGY C, SONG K, RHO S, *et al.* 31.1: Development of six primary - color LCD [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 1210-1213.
- [11] CHENGH C, BEN-DAVID I, WU S T. Five-primary-color LCDs [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(1): 3-7.
- [12] TERAGAWA M, YOSHIDA A, YOSHIYAMA K, *et al.* Review paper: multi - primary - color displays; the latest technologies and their benefits [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(1): 1-11.
- [13] SANJOY, NONAKA R, BABA M. Wide gamut LCD using locally dimmable four-primary-color LED backlight [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(9): 539 - 546.
- [14] HARBERS G, HOELEN C. LP - 2; high performance LCD backlighting using high intensity red, green and blue light emitting diodes [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2001, 32(1): 702-705.
- [15] SUGIURA H, KAGAWA S, KANEKO H, *et al.* Wide color gamut displays using LED backlight - signal processing circuits, color calibration system and multi-primaries [C]//*Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Image Processing*. Genova, Italy: IEEE, 2005.
- [16] HINNENK J G, LANGENDIJK E H A, HAMMER M. 46.3: ultra wide - gamut LCD using a local multi - spectral backlight [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 669 - 672.
- [17] CHIUH J, CHENG S J. LED backlight driving system for large-scale LCD panels [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(5): 2751-2760.
- [18] WUC Y, WU T F, TSAI J R, *et al.* Multistring LED backlight driving system for LCD panels with color sequential display and area control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(10): 3791-3800.
- [19] STECKELJ 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.
- [20] SCHUBERTE F, GESSMANN T, KIM J K. Inorganic semiconductors for light - emitting diodes [M]//MÜLLEN K, SCHERF U. *Organic Light Emitting Devices: Synthesis, Properties and Applications*. New York: Wiley - VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006: 1-33.
- [21] LUOZ Y, CHEN Y, WU S T. Wide color gamut LCD with a quantum dot backlight [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26269-26284.
- [22] Recommendation BT.709-5, Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange [S]. Geneva: ITU, 2002.
- [23] 刘全恩. 色域及色域覆盖率[J]. 电视技术, 2004(11): 49-51, 54.
- LIUQ E. Color domain and color domain coverage ratio [J]. *Video Engineering*, 2004(11): 49-51, 54. (in Chinese)
- [24] BERNS R S. *Principles of Color Technology*[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2000.
- [25] OHTA N, ROBERTSON A R. *Colorimetry: Fundamentals and Applications* [M]. New York: Wiley, 2006.
- [26] 俞斯乐. 电视原理[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- YUS L. *The Principle of Television*[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)

作者简介: 徐梦层(1994—), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 2016 年于安徽大学获得学士学位, 现为天津大学微电子学院硕士生, 主要从事 HDR-WCG 显示方面的研究. E-mail: mengcengxu@tju.edu.cn

李昌禄(1979—), 男, 天津天津人, 硕士, 工程师, 2004 年于天津大学获得学士学位, 2009 年于天津大学获得硕士学位, 从事液晶显示、电子工艺等研究. E-mail: changlu@tju.edu.cn