

文章编号:1007-2780(2011)01-0100-05

固态体积式真三维立体显示器的色度学特性

冯奇斌¹, 王小丽², 吕国强¹, 吴华夏¹

(1. 特种显示技术教育部重点实验室, 特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室培育基地;
合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009, E-mail: fengqibin@hotmail. com;
2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 开发了一种真三维显示器样机, 由单片 DMD、200 W UHP 光源、RGBRGB 6 段 4 倍速色轮、20 层液晶光阀组成的显示体、投影镜头、折叠光路、控制电路等部分组成。对该显示器的色度学特性进行了分析, 其色域是 NTSC 标准的 53. 8%, 色温是 5 401 K。色轮是影响色域的主要因素之一, 选择新的色轮后, 色域提升至 NTSC 标准的 69. 7%。

关 键 词: 色度学特性; 真三维立体显示; 色域

中图分类号: TN141 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 3788/YJYXS20112601. 0100

Colorimetric Characters of Solid Volumetric True 3D Display

FENG Qi-bin¹, WANG Xiao-li², LV Guo-qiang¹, WU Hua-xia¹

(1. Key Lab of Special Display Technology, Ministry of Education; National Engineering Lab of Special Display Technology; National Key Lab of Advanced Display Technology;
Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China, E-mail: fengqibin@hotmail. com;
2. School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A kind of solid volumetric true 3D display device was developed in this paper. The sample device consists of a single DMD, a UHP of 200 W power, a color wheel of RGBRGB and 240 Hz, 20 LC shutters, projection lens, folder mirrors, control circuits, etc. The colorimetric characters of the display device were studied. The color gamut reaches 53. 8% of NTSC standard, and the color temperature is 5 401 K. Color wheel is one of key factors affecting the gamut. The color gamut can increase to 69. 7% of NTSC standard with the involvement of a new color wheel.

Key words: colorimetric characters; true 3D display; color gamut

1 引 言

世界是三维的。研究人员最初利用外部附加装置(如偏光眼镜、液晶光阀等)将具有视差的两幅图分别送入左右眼, 形成了三维立体图像。但是, 额外装置会带来行动不便、长时间观看头疼、

不能多人同时观看等问题, 因此, 自由立体显示技术应运而生^[1]。由于自由立体显示技术是将图像显示在平面上, 无法提供深度调节信息(Accommodation depth cue)^[2], 因此立体感不强。随之出现的真三维立体显示技术将图像显示在具有一定物理深度的空间内, 可提供给观看者更真切的

立体感。目前真三维立体显示技术主要包括激光全息显示和体积式真三维立体显示两种类型。其中体积式真三维立体显示技术又包括旋转体积式和固态体积式两种方式^[3-4]。美国 LightSpace 公司开发的固态体积式真三维立体显示使用了三片数字微镜装置 (Digital micro-mirror device, DMD)。由于目前 DMD 技术被美国德州仪器公司独家掌握,价格昂贵,因此为了降低成本,我们开发了基于单片 DMD 的固态体积式真三维立体显示器。该显示器需要使用色轮进行分色,对色轮转速和电路运行速度的要求较高。

2 固态体积式真三维立体显示器

我们开发的真三维立体显示器主要包括 UHP 光源、色轮、方棒、中继系统、DMD、折叠光路、投影镜头、显示体、控制电路等组成部分。显示体由 20 层聚合物分散型液晶光阀 (Polymer Dispersed Liquid Crystal, PDLC) 组成。为了实现 24 Hz 的刷新率,液晶光阀的开关时间(液晶完成一次透明态-散射态-透明态转换的时间)必须小于 2 ms。显示体的对角尺寸为 25.4 cm (10 in),亮度要求为 120 cd/m²。折叠光路由 4 块正面镀膜的反射镜组成。假设液晶光阀透明态透过率为 75%,折叠光路反射镜反射率为 90%,光学引擎效率为 20%,则投影光源发出的总光通量至少应该达到 9 200 lm。设计时采用了 200 W 的超高压汞灯 (Ultra High Performance, UHP) 作为投影光源,UHP 的光效约为 60~65 lm/W,

200 W 的 UHP 发出的光能够达到 12 000 lm,可以满足投影显示的亮度要求。样机完成后,使用 BM-7A 色度亮度计进行测量,其亮度达到 237 cd/m²,超过了设计指标。

对于 24 Hz 的显示刷新率,需要色轮产生的红、绿、蓝色场频率为 480 Hz。目前市场上尚无如此标称转速的色轮。考虑到 RGBRGB 6 色段的色轮旋转一周能够产生 2 个 RGB 色场,由此可将转速要求降低 50%,所以我们在设计中采用了 4 倍速 (240 Hz) 的 RGBRGB 六色段色轮,红、绿、蓝各色的开口角度各为 60°。样机及其成像如图 1 所示。

3 色度学特性计算

根据色度学理论^[5-7],某种颜色的三刺激值和色度坐标可由下列公式得出:

$$\begin{cases} X = \sum S(\lambda) \tau(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = \sum S(\lambda) \tau(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = \sum S(\lambda) \tau(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z} \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z} \end{cases} \quad (2)$$

式中, X 、 Y 、 Z 分别为该颜色的三刺激值, $S(\lambda)$ 为光源的相对功率谱分布, $\tau(\lambda)$ 为被测物或滤色片的光谱透过率, $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 分别为 CIE1931 标准观察者光谱三刺激值, $\Delta\lambda$ 为波长取样间隔, x 、 y 、 z 是该颜色在 CIE1931 色度图中的色度坐标。

在普通商业投影显示中,影响显示原色色度的主要因素是光源和色轮。由于本课题开发的真三维立体显示器使用了 20 层液晶光阀,当每层光阀对不同波长光线的透过率有微小变化时,光线通过 20 层液晶光阀后的最终显示颜色就会有较大偏差;因此,在计算色度学特性时,我们计算了考虑液晶光阀和不考虑液晶光阀两种情况下的色坐标,并据此分析液晶光阀对色域的影响。UHP 投影光源的功率谱由 AvaSpec 光纤光谱仪测量得出,如图 2 所示。色轮 RGB 色段的光谱透过率和液晶光阀分别处于透明态和散射态时的光谱透过率由 UV2550 可见紫外分光光度计得出,如图

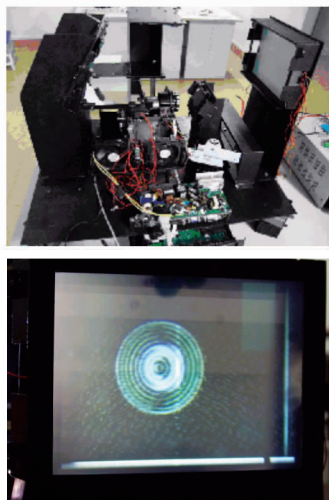


图 1 真三维立体显示器及其成像

Fig. 1 True 3D display

3 所示。

将图 2 和图 3 的测量结果代入式(1)和式(2)中,取波长间隔 $\Delta\lambda$ 为 5 nm。不考虑液晶光阀的因素时,公式(1)中的 $\tau(\lambda)$ 是色轮的透过率。由此计算的 RGB 色坐标如表 1 中(UHP+色轮)栏所示。

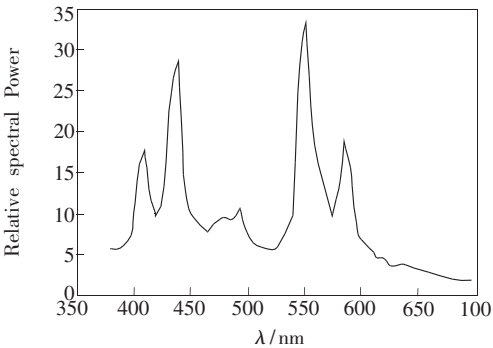


图 2 UHP 光源相对功率谱曲线

Fig. 2 Relative spectrum power of UHP

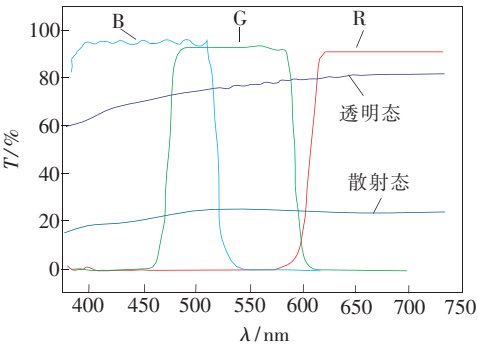


图 3 色轮和液晶光阀光谱透过率曲线

Fig. 3 Transmission of color wheel and LC shutter

考虑液晶光阀的因素时,公式(1)中的 $\tau(\lambda)$ 改写为

$$\tau(\lambda) = \tau_{\text{cw}}(\lambda) \prod_{i=1}^{19} \tau_{\text{Ti}}(\lambda) \tau_{\text{S}}(\lambda) \tag{3}$$

式中, $\tau_{\text{cw}}(\lambda)$ 是色轮的光谱透过率, $\tau_{\text{Ti}}(\lambda)$ 是第 i 层处于透明态液晶光阀的透过率, $\tau_{\text{S}}(\lambda)$ 是处于散射态的液晶光阀透过率。显示体处于工作状态时,某一时刻只有 1 层液晶光阀处于散射态,其余 19 层均处于透明态,故 $i=1\sim19$ 。由此计算的 RGB 色坐标值如表 1 中(UHP+色轮+显示体)栏所示。表 1 中同时给出了 NTSC 标准规定的三原色色坐标。对比表中“红”坐标栏,(UHP+色轮)和(UHP+色轮+显示体)的 x 坐标均等于或大于 NTSC 的 x 坐标,其 y 坐标均小于 NTSC 规定的 y 坐标,说明显示器对红色的表现力较好。对

于“蓝”来说,(UHP+色轮)的坐标和 NTSC 基本相同,但考虑液晶光阀的影响后,(UHP+色轮+显示体)的 y 坐标明显大于 NTSC 标准规定值。绿色色坐标的 x 和 y 均与 NTSC 标准色坐标值相差较大。

表 1 RGB 色度坐标

	Table 1 Chromaticity coordinates of RGB color					
	NTSC		UHP+色轮		UHP+色轮+显示体	
	x	y	x	y	x	y
红	0.67	0.33	0.669 4	0.318 4	0.683 9	0.315 3
绿	0.21	0.71	0.331 8	0.569 0	0.382 2	0.578 4
蓝	0.14	0.08	0.143 8	0.079 3	0.120 0	0.226 3

4 色度学特性分析

为了更直观地表示真三维立体显示器的色度学特性,将表 1 中的红绿蓝三原色的色度坐标在 CIE1931 色度图中连接成为色三角,如图 4 所示。不考虑光阀影响时,UHP 光源和色轮决定的色三角面积(UHP+色轮)是 NTSC 标准的 66.4%。由图 4 可以看出,红色及蓝色色坐标和 NTSC 标准

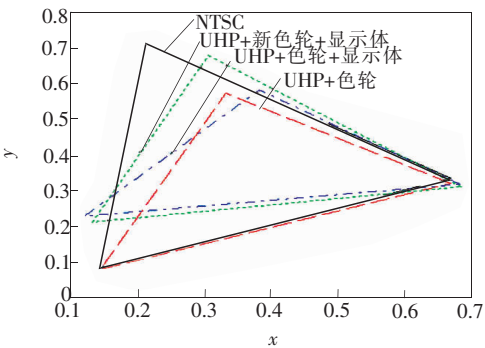


图 4 真三维立体显示器显示色域

Fig. 4 Color gamut of true 3D display

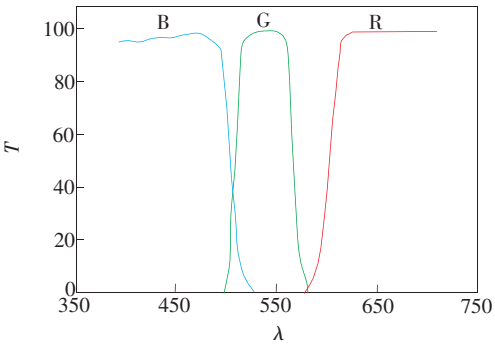


图 5 新色轮透过率曲线

Fig. 5 Transmission of new color wheel

基本符合,绿色相差较大。主要原因为以下两个方面:

(1)选用的色轮的绿色段和蓝色段的透过率曲线有部分相互重叠,造成蓝色和绿色之间的混合部分色彩表现力相对较差;

(2)UHP 光源绿色波段的次峰波正好被色轮滤掉,造成绿色色坐标和 NTSC 标准相差较大。

考虑液晶光阀的影响后,由图 4 可以看出其色三角(UHP+色轮+显示体)的面积比没有考虑光阀影响时减小了 17.5%,只有 NTSC 标准的 53.8%,且部分落于 NTSC 标准色三角之外;相比没有考虑显示体因素的色三角(UHP+色轮),其蓝色表现力变差,主要原因在于液晶光阀对于不同波长的光有不同的透过率。由图 3 可以看出,PDLC 透明态时的光谱透过率曲线随着波长的增加逐渐升高,蓝光约为 70%,绿光约为 75%,红光则约为 80%。考虑 19 层处于透明态的液晶光阀的综合影响,最终达到人眼的红光强度将达到蓝光的 12 倍之多,由此造成了蓝色色坐标与标准值的较大偏差。

为了尽量扩大显示色域,我们重新定制了 4 倍速的 RGBRGB 6 色段色轮,其透过率曲线如图 5 所示,RGB 色坐标如表 2 所示,色三角如图 4 中(UHP+新色轮+显示体)栏所示。通过计算可以看出,使用新色轮的色三角面积(UHP+新色轮+显示体)比使用原有色轮的色三角面积(UHP+色轮+显示体)增加了 35.6%,达到 NTSC 标准的 69.7%。

设置真三维显示器样机投射白场,使用 BM-7A 亮度色度计进行测量,白场色坐标如表 2 所示。根据经验公式可以算出其色温为 5 401 K,低于国标 GB936-89 规定的 6 500 K。主要原因在于液晶光阀对蓝光的衰减比其他颜色大,造成白场的不平衡。对于现今开发的液晶光阀,有两个方法可以改善色温:

参 考 文 献:

[1] Dodgson N A. Autostereoscopic 3D display [J]. *IEEE Trans. of Computer*, 2006, 38(8):31-36.
[2] Feng Qibin. 3D display: from autostereoscopic to true 3D [C]//*IMID* 2008, Seoul, Korea:IMID ,2008, 8(II): 139-142.
[3] Favalora G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure [J]. *IEEE Trans. of Computer*, 2005, 38

表 2 使用新色轮的 RGB 色度坐标
Table 2 Chromaticity coordinates of RGB color with new color wheel

	UHP+新色轮+显示体	
	<i>x</i>	<i>y</i>
红	0. 684 5	0. 307 5
绿	0. 305 5	0. 674 2
蓝	0. 131 4	0. 210 1
白场	0. 326 1	0. 530 7

(1)改变 DMD 对各色的开启时间。DMD 采用脉宽调制(Pulse Width Modulation,PWM)的方法进行控制,PWM 占空比由要显示的图像决定。通过适当降低显示红色时 DMD 的占空比,可以减少红光数量以改善白场,但由此会降低显示亮度。

(2)使用 R、G、B 彩色 LED 光源,通过增加蓝光 LED 的发光亮度以弥补液晶光阀对蓝光的衰减。目前我们正在开发用于固态体积式真三维立体显示器的 LED 光源。

5 结 论

使用单片 DMD 开发了一种固态体积式真三维立体显示器,研究了显示器的色度学特性。影响显示色度的因素主要有 UHP 光源、色轮和液晶光阀等。由于所用色轮的绿色段和蓝色段的透过率曲线有部分相互重叠,造成蓝色和绿色之间的混合部分色彩表现力相对较差,所以显示样机色域只有 NTSC 标准的 53.8%。采用新的 4 倍速的 RGBRGB 6 色段色轮后,色三角面积提升了 35.6%,达到 NTSC 标准的 69.7%。如能在满足速度要求的基础上使液晶光阀对不同光谱的透过率保持一致,则显示器色域能得到进一步提升。样机的色温为 5 401 K。下一步将开发用于真三维立体显示器的彩色 LED 光源,在提升色域的同时改善白场平衡。

(8):37-44.

- [4] Sullivan A. Depth cube solid-state 3D volumetric display [J]. *Proc. SPIE*, 2004, 5291:279-283.
- [5] 荆其诚,焦书兰. 色度学[M]. 北京:科学出版社, 1979:91-98,279-282,291-292.
- [6] 高竹青,范正修,李如凤. 光学薄膜的色度分析[J]. 光子学报, 2000,29(9):838-842.
- [7] 赵星,方志良,宋丽培,等. 数字光处理背投电视色度学特性的研究[J]. 光子学报, 2007, 36(2):355-358.

《发 光 学 报》

——EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊,曾于 1992 年,1996 年,2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于 2000 年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年;美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文;2008 年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010 年被美国“EI”确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002 年获中国科学院 2001~2002 年度科学出版基金“择重”资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊, A4 开本, 144 页, 国内外公开发行。国内定价: 40 元, 全年 480 元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路 3888 号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org