

文章编号:1007-2780(2015)01-0137-06

固态体积式真三维立体显示器

杨光磊^{1,2}, 井长龙^{1,2}, 裴治棋^{1,2}, 张应松^{1,2}, 宋志刚^{1,2}, 冯奇斌^{2,*}

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 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, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了追求更加真实的立体显示效果, 实现真正的三维物理空间显示, 合肥工业大学研发了第二代固态体积式真三维立体显示器, 文章介绍了显示器的整机结构及系统设计, 并对显示效果进行了测试。介绍了显示器的各组成部分及作用, 主要包括 LED 光源、方棒积分器、中继系统、全反射棱镜、分色棱镜、三片数字微镜器件、投影镜头、折叠光路、显示体和控制电路等。然后进行了系统设计, 包括液晶光阀制作、光源设计和电路模块设计。搭建了样机并测试了整机显示效果, 亮度达到 123 cd/m^2 , 色彩饱和度达到 78.43% NTSC 色域。显示图像颜色鲜艳, 亮度较高, 立体感较强。

关键词: 固态体积式真三维立体显示器; 数字微镜器件; 显示亮度; 色彩饱和度

中图分类号: TB 858.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20153001.0137

Solid-state volumetric true 3D display

YANG Guang-lei^{1,2}, JING Chang-long^{1,2}, PEI Zhi-qi^{1,2},ZHANG Ying-song^{1,2}, SONG Zhi-gang^{1,2}, FENG Qi-bin^{2,*}(1. *Key Lab of Special Display Technology, Ministry of Education; National Engineering Lab of Special Display Technology; National Key Lab of Advanced Display Technology;**School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering,**Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*2. *Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology,**Hefei 230009, China)*

Abstract: In order to pursue a more realistic visual experience and realize the true 3D physical space display, the second generation of solid-state volumetric true 3D display has been developed by Hefei University of Technology. The whole structure and system design was introduced, and the display performance was tested. First, the composition of the display and the role of various parts are introduced, including LED light source, integrator rod, relay system, total internal reflection prisms, Philips prisms, three digital micro-mirror devices, projection lens, folding mirrors, display cube and the control circuits. Then the display cube, light source and circuit system was designed. Finally, the prototype was built and the display performance was tested. The brightness reaches 123 cd/m^2 and the

收稿日期: 2014-04-15; **修订日期:** 2014-06-04.

基金项目: 国家 863 项目 (No. 2012AA011901); 广东省战略性新兴产业核心技术攻关 (No. 2011A010801003)

* 通信联系人, E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn

color gamut is 78.43% of the NTSC. The images with high brightness, vivid colors and strong stereoscopic impression are displayed.

Key words: solid-state volumetric true 3D display; digital micro-mirror device; display luminance; color gamut

1 引言

立体显示技术分为体视显示技术与真三维显示技术两种^[1]。体视显示技术利用人眼的双目视差原理,通过辅助设备让双眼接收到同一场景不同视角的图像,再经过高级视觉中枢处理后,产生伪三维立体视觉。这种显示方式会导致视觉疲劳,而且对于大景深的图像会出现左右眼图像分离,形成视觉重影。真三维立体显示技术将图像的每一个三维像素点显示到三维物理空间的真实位置,并且每个三维像素点的亮度和色度可以调节,从而产生真正的三维立体图像^[2-3]。真三维立体显示技术中目前比较成熟的是体三维显示技术,可以分为旋转扫描式和固态体积式两种。

合肥工业大学 2010 年开发的第一代固态体积式真三维立体显示器^[4]采用超高压汞灯(Ultra High Pressure Mercury Lamp, UHP)作为光源,利用色轮分色,配置单片数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)进行光调制。由于采用单一白光源且液晶光阀对不同波长的光透过率不同,造成显示白场不平衡;使用色轮,出现能量利用率低、色域窄的问题;单片 DMD 采用时分复用方式进行光调制,限制了显示频率。

基于此,合工大开发了第二代固态体积式真三维立体显示器,采用红绿蓝白光 4 个 LED 代替 UHP 作为光源,利用分色棱镜代替了色轮进行分色,配置 3 片高速 DMD,成功地解决了第一代显示器中出现的问题。

2 固态体积式真三维立体显示系统

固态体积式真三维立体显示器的结构原理图如图 1 所示,主要包括光源、方棒积分器、中继系统全反射(Total Internal Reflection, TIR)棱镜、分色棱镜、DMD、投影镜头、折叠光路和显示体等组成部分。

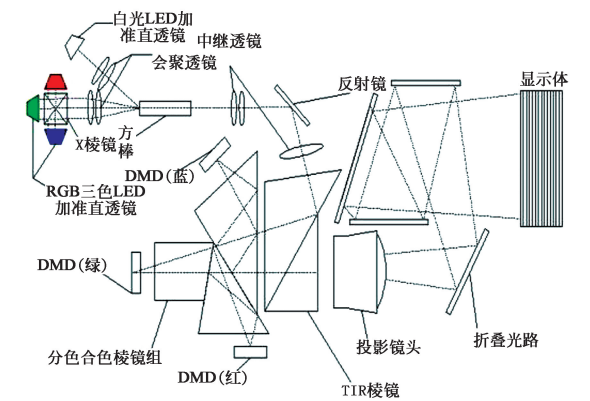


图 1 显示器结构原理图
Fig. 1 Structure diagram

光源选取了红绿蓝白 (Red Green Blue White, RGBW) 4 个颜色 LED。红绿蓝 LED 经 X 棱镜合色垂直入射方棒,单独控制红绿蓝 LED 的驱动电流,可以调节合成白光的色温,从而解决白场不平衡问题;白光 LED 倾斜约 8°入射,光效接近垂直入射,有利于提高显示亮度^[5-6]。

方棒对入射的光进行内部全反射,将圆形入射光斑转换为均匀的矩形^[7]。矩形光斑长宽比与 DMD 的相同,提高了照明均匀性和系统光能利用率。

中继系统用于衔接照明系统与投影系统,将方棒出射端面成像在 DMD 上。分色棱镜位于中继系统和 DMD 之间,将白色照明光分成红绿蓝单色光分别照射到 3 片 DMD 上。DMD 对入射光进行调制,反射红绿蓝单色成像光,经过棱镜合色产生彩色图像,再由投影镜头出射。TIR 棱镜主要用来分离入射照明光与出射成像光。

折叠光路由 4 块高反镜组成,每块高反镜的反射率达到 95%。显示体由 20 层 19 in (1 in = 2.54 cm) 液晶光阀层叠而成,每层光阀可单独通过加电和撤电在透明态和散射态之间快速转换。20 层液晶光阀顺序切换成散射态依次成像,利用人眼的视觉暂留特性,实现真实三维物理空间的立体投影显示。

3 系统设计

3.1 液晶光阀

固态体积式真三维立体显示器的显示体是由 20 层聚合物稳定胆甾相 (Polymer Stabilized Cholesteric Texture, PSCT)液晶光阀组成,它是将胆甾相液晶和液晶性单体(一般<10%)的混合材料注入到没有取向层的液晶盒中,在外加电场使液晶分子垂直排列的条件下用紫外光诱导单体聚合形成的复合材料^[8]。

PSCT 液晶光阀在加电压和不加电压时会分别呈现出透射态和散射态,如图 2 所示(网状曲线代表聚合物,棒状直线代表液晶分子)。加电压时,液晶分子垂直于基板排列,此时液晶层是一个均匀光学介质,光能透过率很高,入射光直接透射,光阀上不会成像;不加电压时,液晶分子呈多畴的焦锥态,此时液晶层是一个非均匀光学介质,光能透过率较低,入射光线经过液晶分子散射,光阀上会成像。PSCT 液晶光阀通过电路控制加电和撤电,可以实现在两种状态间快速切换,并且能在 0.8 ms 内完成一次透明态—散射态—透明态的转换,满足 60 Hz 以上的刷新率,显示画面稳定无闪烁。

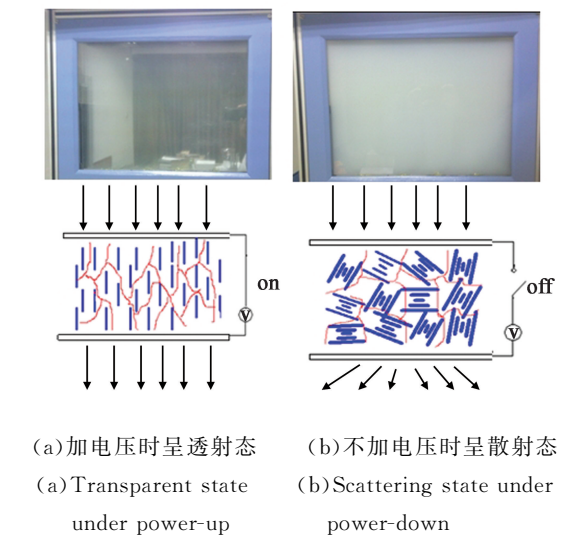


图 2 液晶光阀状态
Fig. 2 Liquid crystal shutter state

3.2 光源设计

19 in、4 : 3 的液晶光阀显示面积为 0.11 m²,

对于 0.5 m 的观看距离、120 cd/m² 的屏前亮度要求,由光通量(Φ)=光亮度(L) $\times$ 显示面积(S) $\times$ 立体角,立体角 $\approx$ 面积(S)/距离(R)的平方,即 $\Phi=L\times(S\times S/R^2)$,估算屏前光通量 $\Phi_1=120\times 0.11\times 0.11/0.5^2=5.8$ lm。采用液晶综合参数测试仪测试了液晶光阀的性能,结果如图 3 所示,液晶光阀的散射态透过率为 10%,透射态透过率为 86%,因此可以计算显示体的光能透过率 $\eta_1=(86\%)^{19}\times 10\%=0.57\%$ 。4 块高反镜组成的折叠光路光效 $\eta_2=(95\%)^4=81\%$,计算投影镜头的输出光通量 $\Phi_2=5.8$ lm/(0.57% $\times$ 81%)=12 56 lm。假设光机的光效为 30%,光源的光通量就需要达到 4 187 lm。

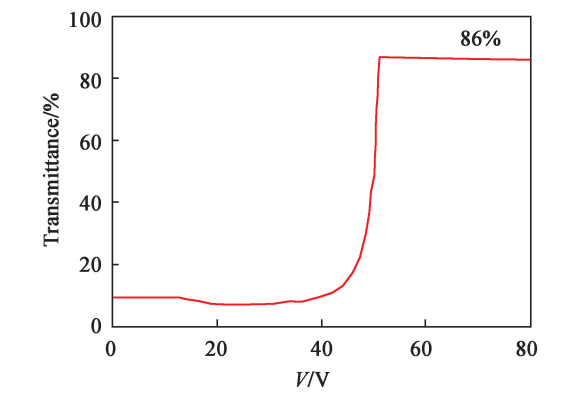


图 3 液晶光阀性能曲线
Fig. 3 Electro-optic property of LC shutter

对于 R : G : B=3 : 6 : 1 的配比,估算需要红光 1 257 lm、绿光 2 513 lm、蓝光 419 lm。考虑到液晶光阀对 RGB 三原色透过率不同,采用红绿蓝单色 LED 进行补色;为了提高显示亮度,增加白光 LED,本文选用的 4 个高亮度的 RGBW LED 参数如表 1 所示。

表 1 LED 参数
Tab. 1 LEDs specifications

参数	尺寸/mm	光通量/ lm	色坐标 (x)	色坐标 (y)
R	4×3	1 800	0.697	0.303
G	4×3	3 500	0.171	0.702
B	4×3	750	0.154	0.024
W	3×3	2 500	0.323	0.316

为了减少能量损失、缩小光源结构,采用 X-Cube 将红绿蓝 LED 发出的单色光合色。但 X-Cube 要求入射的光是平行光或是小角度范围内的发散光,因此设计了准直透镜对 LED 发出的光线进行准直^[9-10]。LED 准直透镜如图 4 所示,小角度光线通过折射转换为平行光,大角度光线通过全反射转为平行光。在光学软件中建立了准直透镜模型,准直效果如图 5 所示,光线发散角度为 $\pm 13^{\circ}$ 。建立光源模型,设置 RGBW LED 光通量分别为 1 800 lm、3 500 lm、750 lm 和 2 500 lm,仿真结果如图 6 所示,方棒出射光通量为 6 893 lm。

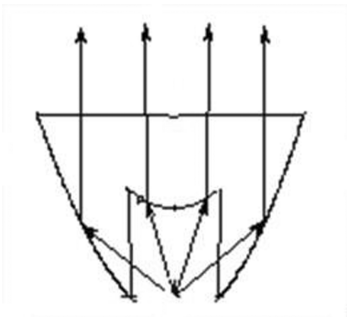


图 4 准直透镜
Fig. 4 Collimating lens

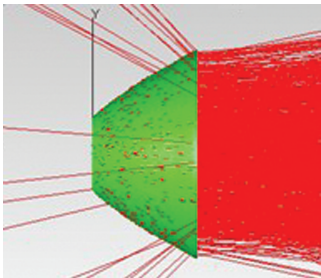
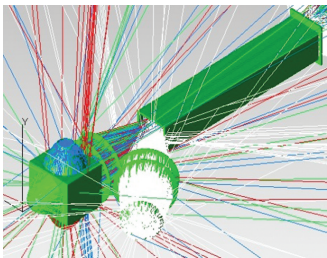
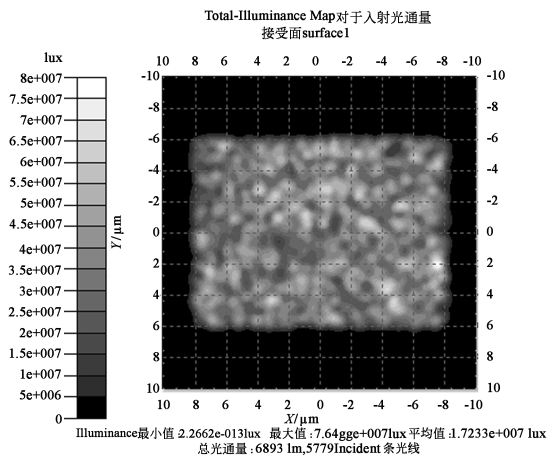


图 5 准直效果
Fig. 5 Collimation result



(a) 光线追迹
(a) Raytrace model



(b) 方棒出光端照度
(b) Illuminance map

图 6 光源仿真

Fig. 6 Light source simulation

3.3 电路模块

电路系统主要包括 1 块视频解码电路板、3 块 DMD 主控电路板、1 块驱动控制电路板、4 块 LED 驱动电路板和 4 块液晶光阀驱动电路板,如图 7 所示。视频解码板通过 DVI 接口与计算机连接,当计算机输出一幅彩色图像时,视频解码板会提取出这幅图像 RGB 颜色信号。DMD 主控板接收 RGB 颜色信号并提取出每种颜色的深度信号,将图像依据深度信息分割成 20 个切片顺序送到 DMD 中。驱动控制板接收主控板的深度信号,通过 LED 驱动板控制 RGBW LED 的亮暗,通过光阀驱动板控制显示体中液晶光阀的加电和撤电。协调 LED、DMD 和显示体的控制,将一幅图像的 20 个深度信息切片快速顺序投影到对应深度的 20 层液晶光阀上,利用人眼的视觉暂留,

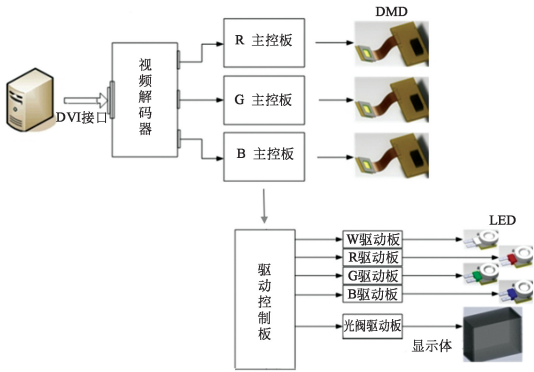


图 7 电路系统框图
Fig. 7 Circuit systems

实现真三维立体显示。

4 样机测试

根据设计,制作了固态体积式真三维立体显示器样机,如图 8 所示。

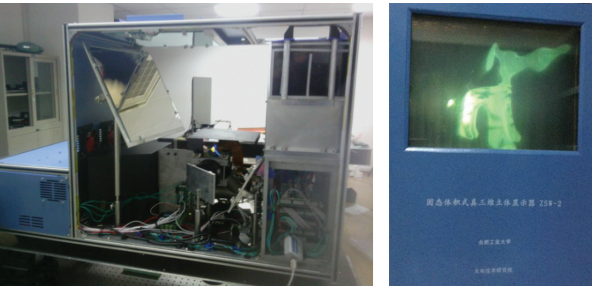


图 8 固态体积式真三维立体显示器系统及显示效果
Fig. 8 Prototype of solid-state volumetric true 3D display

采用 TES 1332A 照度计测量投影镜头出射的 ANSI 流明,测得 60 in 白场的 9 点照度数据如表 2 所示。

表 2 照度测试数据

Tab. 2 Illumination test data

照度/lx	1	2	3
1	1 190	1 330	1 210
2	1 250	1 380	1 240
3	1 170	1 290	1 200

由表 2 得到 9 点平均照度为 1 251 lx,已知 60 in 白场面积为 1.1 m²,计算得到投影镜头出射光通量为 1 376 lm,高于理论值 1 256 lm。

使用法国 ELDIM 公司的 Umaster 面成像仪测试了显示亮度和色度,测试结果分别如图 9 和图 10 所示,平均显示亮度为 123 cd/m²,色三角面积为 0.123 8,达到 78.43% 的 NTSC 标准色域。

分析测试结果:影响显示亮度的因素主要是显示体和显示方式。显示体透光率较低,20 层液晶光阀顺序扫描的特殊显示方式光能损失较多。

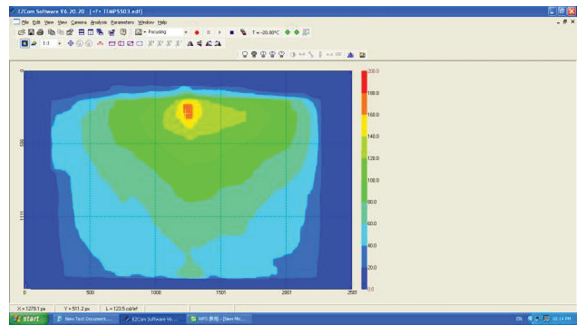


图 9 显示亮度测试
Fig. 9 Display brightness test

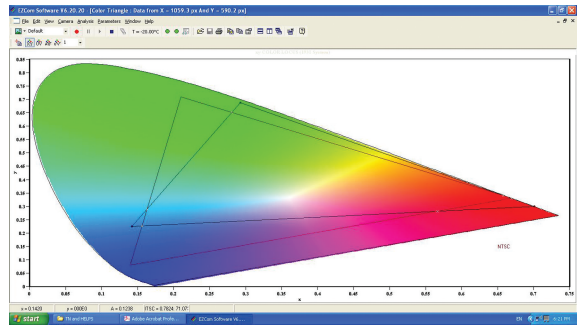


图 10 显示色域测试
Fig. 10 Color gamut test

影响显示色域的主要因素是分色棱镜,由于没有将绿光与蓝光较好地分离,导致绿色和蓝色之间混合部分的色彩表现能力较差。

5 结 论

和第一代固态体积式真三维立体显示器相比,合肥工业大学开发的第二代显示器采用 RG-BW 四色 LED 作为投影光源,扩展了显示色域;通过控制红绿蓝三色 LED 的驱动电流,可以调节合成白光的 RGB 配比,进而调节输出白场色温,解决了白场不平衡问题;配置三片高速 DMD,利用棱镜分色合色,再配合纳秒级响应速度的 LED 能够满足 60 Hz 的刷新频率,显示图像无人眼感知的闪烁;设计了准直透镜对 LED 发出光线进行收集,提高了能量利用率。实际测试结果表明显示器的显示亮度达到 123 cd/m²,色彩饱和度达到 78.43% NTSC 色域。

参 考 文 献:

- [1] 刘旭,李海峰.现代投影显示技术[M].杭州:浙江大学出版社,2008:386-391.
Liu X, Li H F. *Modern Projection Display Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008:386-391. (in Chinese)
- [2] 刘涛,吕国强,童浩,等.真三维立体显示技术研究现状与进展[J].现代显示,2010(117):33-40.
Liu T, Lv G Q, Tong H, *et al.* Review on research progress of true-3D volumetric display technology [J]. *Advanced Display*, 2010(117):33-40. (in Chinese)
- [3] Fan Q J, Shen C L, Li L. Research of a high-resolution volumetric 3D display system [C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, Tianjin, China; ICINIS*, 2009: 397-400.
- [4] 冯奇斌,牛红林,华懿魁,等.用于固态体积式真三维立体显示的LED投影照明系统研究[J].光电工程,2011,38(9):93-98.
Feng Q B, Niu H L, Hua Y K, *et al.* LED based illumination system for solid-state volumetric true 3D display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(9):93-98. (in Chinese)
- [5] Peng C H, Li X N, Zhang P, *et al.* RGB high brightness led modules for projection display application [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(8):448-453.
- [6] 缪莹莹.基于LED照明的DLP投影显示系统研究[D].杭州:浙江大学,2007.
Miao Y Y. LED based DLP projection system [D]. Hangzhou: Zhejiang University. 2007. (in Chinese)
- [7] 丁明君,牛萍娟.用于投影的LED光源的特性及发展趋势研究[J].光机电研究论坛,2008,43-47.
Ding M J, Niu P J. Research on characteristics and development tendency of LED-based projection [J]. *OME Research Forum*, 2008:43-47. (in Chinese)
- [8] 牛红林,陆红波,鲁文武,等.快速响应光阀的制备及在真三维立体显示中的应用[J].光电工程,2012,39(8):141-145.
Niu H L, Lu H B, Lu W W, *et al.* Preparation of fast response light shutter for the true 3D display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8):141-145. (in Chinese)
- [9] 赵华龙,梁志毅,石兴春.利用LED的投影系统光源设计[J].光子学报,2007,36(2):244-246.
Zhao H L, Liang Z Y, Shi X C. Design of projection system light source based on LED [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2):244-246. (in Chinese)
- [10] 赵会富,刘华,孙强,等.基于折射/全反射/反射/折射结构的LED准直系统的设计[J].光学精密工程,2011,19(7):1472-1479.
Zhao H F, Liu H, Sun Q, *et al.* Design of RIXR LED collimation system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7):1472-1479. (in Chinese)

作者简介:杨光磊(1990—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要从事固态体积式真三维立体显示方面的研究。E-mail: yg1582893552@163.com

冯奇斌(1970—),女,天津市人,副教授,硕士生导师,主要从事立体显示、LED背光等方面的研究。E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn