

文章编号 1004-924X(2014)05-1113-07

## 固态体积式真三维立体显示发光二极管投影光源

冯奇斌<sup>1</sup>, 杨光磊<sup>2</sup>, 井长龙<sup>2</sup>, 吕国强<sup>1\*</sup>

- (1. 合肥工业大学 光电技术研究院 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 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对固态体积式真三维立体显示对高亮度和色温可调的要求, 设计了采用大功率、单芯片发光二极管(LED)的投影光源。理论计算了投影光源的亮度, 结合液晶光阀对不同波长透过率的影响, 对理论设计结果进行了修正。考虑寿命、散热等影响因素, 提出了采用大功率红绿蓝 LED 加白光 LED 的投影光源方案。针对选取的 LED 发光特性, 采用混合集光方法设计了准直器, 并进行了仿真和实际测试。测试结果表明: 采用准直器后, LED 的发散角从  $\pm 75^\circ$  减小为  $\pm 20^\circ$ 。搭建了真三维显示系统样机, 测试其屏前亮度达到  $149 \text{ cd/m}^2$ , 且无闪烁, 立体感强, 但存在视角较小的问题。实验显示, 设计的投影光源满足固态体积式真三维立体显示的要求。

**关键词:**真三维立体显示; 固态体积式显示; 发光二极管; 投影光源

**中图分类号:** TN27; TH741.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142205.1113

## LED-based projection light source for solid-state volumetric true-3D display

FENG Qi-bin<sup>1</sup>, YANG Guang-lei<sup>2</sup>, JING Chang-long<sup>2</sup>, LÜ Guo-qiang<sup>1\*</sup>

- (1. Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. School of Instrumentation and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\* Corresponding author, E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

**Abstract:** According to the needs of solid-state volumetric true-3D display for high brightness and adjustable color temperatures, a projection light source with high power and single chip Light Emitting Diodes(LEDs) was designed. The brightness of the projection light source was computed theoretically. The results were then corrected according to the spectrum curve of a Liquid Crystal(LC) shutter. With the considerations of life and heat dissipation, the projection light source with high-power RGB LEDs and a white LED was put forward. Based on the optical characteristics of the chosen LEDs, the refraction-and-reflection mixed method was applied to the design of collimating lens. Both simulation and practical test were performed on the projection light source. The experimental results show that

收稿日期: 2013-10-22; 修订日期: 2013-12-12.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA011901); 广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(No. 2011A010801003)

the divergence angle of the LED has been reduced from  $\pm 75^\circ$  to  $\pm 20^\circ$  after applying the collimating lens. A 3D display prototype was developed. The practical luminance on the LC shutter close to observers reaches  $149 \text{ cd/m}^2$ . The prototype presents the merits of no perceived flickers and strong 3D feeling, as well as the shortcoming of a smaller viewing angle. The proposed light source satisfies the requirements of solid-state volumetric true-3D display.

**Key words:** true-3D display; solid-state volumetric display; Light Emitting Diode(LED); projection light source

## 1 引言

立体显示技术主要分为立体镜技术、自动立体镜技术<sup>[1]</sup>、立体显示技术、全息技术<sup>[2]</sup>。前两种技术由于焦距固定,成像不具有真实的深度感<sup>[3-5]</sup>。立体显示技术主要包括旋转体积式<sup>[6]</sup>和固态体积式<sup>[7]</sup>两种显示系统。其中,固态体积式显示系统是依据显示信息表面各点深度不同,将三维目标体信息通过高速投影系统投影到对应深度的显示体上来完成该目标体的真三维空间立体投影显示的。显示体由多层液晶光阀层叠构成,每片光阀通过施加不同电场工作在散射和透射状态。在可见光照射下,散射态光阀呈乳白色,是较为理想的投影屏,而透射态光阀则呈透明态。控制显示体在任意时刻只有一片光阀为散射态,其它光阀为透明态,以使来自高速投影光学系统的显示信息按不同深度成像在物理位置不同的液晶光阀上。2010年,合肥工业大学成功开发了基于单片数字微镜装置(Digital Micro-mirror Device, DMD)的真三维立体显示器,该显示器包括超高压汞灯(Ultra High Pressure Mercury Lamp, UHPML)、反光碗、色轮、方棒、中继系统、DMD、折叠光路、投影镜头、显示体(10 inch, 25.4 cm)、控制电路等<sup>[8-9]</sup>。在此基础上,合肥工业大学继续快速响应液晶材料和高速高亮度投影机的研究,开发了由3片DMD、19 inch(48.2 cm)液晶光阀、发光二极管(Light Emitting Diode, LED)投影光源组成的真三维显示系统。

不同于普通的投影照明系统,固态体积式真三维立体显示的照明系统要求出射亮度高,由于显示体由20层液晶光阀组成,以每层光阀透明态85%、散射态10%计算,20层光阀的总体透过率只有镜头出射亮度的0.5%;该系统同时要求色温可调。由于液晶光阀对不同波长光线的透过

率不同,从而造成白场色偏,故需要根据液晶光阀实际的透过率曲线进行色温调节。

LED具有响应速度快、色纯度高、光效高的特点<sup>[10-11]</sup>。采用RGB单独控制LED光源可以实现液晶光阀的色温调节,但LED是面光源,光线发散角度约 $160^\circ$ ,很难对全部光线进行有效收集。本文基于LED的发光特点,理论分析并修正了其光源亮度,提出了一种采用大功率红绿蓝白光的投影光源方案,并成功将该LED光源应用到固态体积式真三维立体显示器中。

## 2 LED投影光源设计

### 2.1 整体光路设计

如图1所示,固态体积式真三维立体显示器主要由高速投影光学引擎和显示体组成,具体包括LED投影光源、方棒、中继透镜、3片DMD、分色合色系统、折叠光路和20层液晶光阀组成的显示体等。

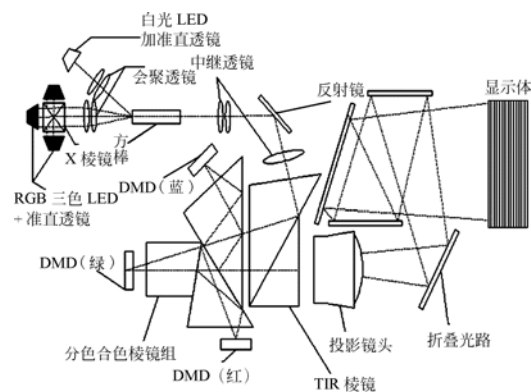


图1 固态体积式真三维立体显示器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of volumetric true-3D display

### 2.2 快速响应液晶光阀性能

对于60 Hz的刷新率,每层液晶光阀需要在 $1/(60 \times 20) = 0.83 \text{ ms}$ 内完成透明态和散射态之

间的转换。采用液晶参数测试仪测试了液晶光阀的性能, 结果如图 2 所示。当施加 100 V、100 Hz 的驱动方波时, 液晶光阀的上升时间为 0.54 ms, 下降时间为 0.18 ms, 满足实际要求。

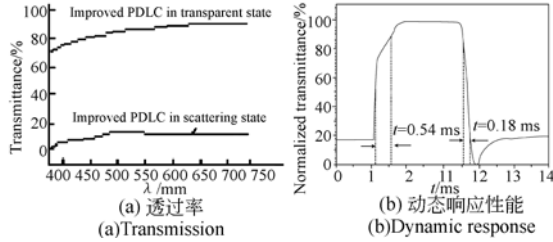


图 2 液晶光阀性能

Fig. 2 Liquid Crystal(LC) shutter property

当 RGB 波长分别为 624, 528, 462 nm 时, 液晶光阀的透过率分别为 88%、86%、80%。以散射态透过率为 10%、透明态透过率为 86% 计算, 则显示体的总体透过率为:

$$\eta = 0.86^{19} \times 0.1 = 0.57\%. \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_R \\ \varphi_G \\ \varphi_B \end{bmatrix} = \varphi_W \begin{bmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{x_W}{y_W} \\ 1 \\ \frac{1-x_W-y_W}{y_W} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Phi_R = \Phi_W \times K_R \\ \Phi_G = \Phi_W \times K_G \\ \Phi_B = \Phi_W \times K_B \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Phi_R, \Phi_G, \Phi_B$  分别表示红、绿、蓝光的光通量,  $\Phi_W$  表示合成白光的光通量;  $(x_R, y_R), (x_G, y_G), (x_B, y_B)$  分别表示红、绿、蓝光的色坐标,  $(x_W, y_W)$  表示合成白光的色坐标;  $K_R, K_G, K_B$  分别表示合成白光中红、绿、蓝光的比例。最终可以得到:

$$\begin{bmatrix} K_R \\ K_G \\ K_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.27 \\ 0.70 \\ 0.03 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

采用红绿蓝单灯 LED, 各灯输出的光通量为:

$$\begin{cases} \Phi_R = 4971.28 \times 0.27 = 1342.25 \text{ lm} \\ \Phi_G = 4971.28 \times 0.70 = 3479.90 \text{ lm} \\ \Phi_B = 4971.28 \times 0.03 = 149.14 \text{ lm} \end{cases} \quad (8)$$

根据液晶光阀透过率曲线修正式(8), 得到

### 2.3 LED 亮度计算

为调节色温, 采用 RGB 彩色 LED, 每个 LED 单独控制, 通过合色棱镜进行合光。对于 48.26 cm(19 inch)、4:3 的显示体, 在观看距离为 0.5 m、屏前亮度为 120 cd/m<sup>2</sup> 时, 屏前光通量为:

$$\varphi_1 = 120 \times (19 \times 0.0254 \times 0.8) \times (19 \times 0.0254 \times 0.6) \times 0.43 = 5.77 \text{ lm}. \quad (2)$$

图 1 中, 折叠光路由 4 块正面镀膜的高反镜组成, 每块反射镜的反射率为 95%, 经过 20 层液晶光阀、4 块高反镜后, 投影镜头的输出光通量为:

$$\varphi_2 = \frac{5.77}{0.95^4 \times 0.0057} = 1242.82 \text{ lm}. \quad (3)$$

假设光学引擎的整体效率为 25%, 可以推出 LED 投影光源的光通量为:

$$\varphi_3 = \frac{1242.82}{0.25} = 4971.28 \text{ lm}. \quad (4)$$

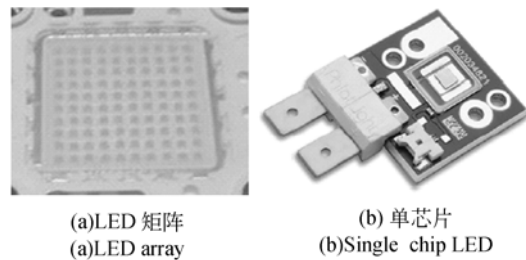
根据色度学理论<sup>[12-14]</sup>, 合成白光的色坐标为 (0.33, 0.33) 时, 合成白光所需要的 RGB 比例为:

每个 LED 最终要达到的输出光通量为:

$$\begin{cases} \Phi_R' = 1342.25 \times (0.86/0.88)^{19} = 867.23 \text{ lm} \\ \Phi_G' = 3479.90 \times (0.86/0.86)^{19} = 3479.90 \text{ lm} \\ \Phi_B' = 149.14 \times (0.86/0.8)^{19} = 589.33 \text{ lm} \end{cases} \quad (9)$$

### 2.4 LED 选型

目前, 能够提供如此高亮度的 LED 有 LED 矩阵和单芯片大功率 LED 两种形式, 如图 3 所示。



(a)LED 矩阵 (a)LED array (b)单芯片 (b)Single chip LED

图 3 高亮度 LED

Fig. 3 High-power LED

LED 的选择除了要考虑发光强度是否满足要求, 还需要考虑整个系统的匹配性。非成像光学理论中的光学扩展量 Etendue 描述了光学系统传输能量的能力<sup>[15-17]</sup>。固态体积式真三维立体显示系统的 Etendue 量受到 DMD 的限制。本系统采用 1.778 cm(0.7 inch)、4:3 的 DMD, 投影镜头的数值孔径 NA 为 0.2, 系统的光学扩展量  $E_s$  为:

$$E_s = \pi A_{\text{DMD}} NA^2 = 3.14 \times 0.7 \times 25.4 \times 0.8 \times 0.7 \times 25.4 \times 0.6 \times 0.2^2 = 19.06 \text{ mm}^2 \text{Sr}. \quad (10)$$

采用方棒结构时, 系统的光学扩展量公式为:

$$E_T = \pi \times L \times W \times \sin^2 \Phi_{\text{max}}, \quad (11)$$

式中:  $L, W$  分别表示方棒截面的长和宽,  $\Phi_{\text{max}}$  表示方棒出射端光束的最大发散角。为匹配 DMD, 方棒截面为 12 mm×9 mm, 长宽比为 4:3,  $\Phi_{\text{max}}$  为 12°。

LED 发出的光线全部进入方棒时, 系统的能量利用率最高。鉴于 LED 的发散角高达 160°, 必须进行光线的准直和聚焦。由于 LED 矩阵的发光面积远大于单芯片大功率 LED, 不利于光线收集, 故本文采用单芯片 LED, 其性能参数如表 1 所示。

$$\begin{cases} \Phi_R' = (4\,971.28 - 1\,500) \times 0.27 \times (0.86/0.88)^{19} = 605.55 \text{ lm} \\ \Phi_G' = (4\,971.28 - 1\,500) \times 0.70 \times (0.86/0.86)^{19} = 2\,429.90 \text{ lm} \\ \Phi_B' = (4\,971.28 - 1\,500) \times 0.03 \times (0.86/0.8)^{19} = 411.50 \text{ lm} \end{cases} \quad (12)$$

彩色 LED 和白色 LED 的实际工作电流如表 3 所示。

表 3 RGB 和白色 LED 实际工作电流

Tab. 3 Operating currents for RGBW LEDs

LED	W	R	G	B
工作电流/A	10.8	10.1	20.8	16.5

### 3 准直器设计

#### 3.1 理论设计

以彩色 LED(发光面积为 4 mm×3 mm)为例设计准直器, 同理可得到白色 LED(发光面积为 3 mm×3 mm)准直器。LED 芯片面积为 4 mm×3 mm, 发出的光线近似朗伯光, 发散角约为 160°, 输出光束的几何形状不利于收集和传输<sup>[18]</sup>, 不能满足合色棱镜入射光是平行光或在一定的小角度范围的要求。目前, 光线收集装置主要有透射式和反射式两种<sup>[19]</sup>。透射式装置收集小角度发散光线的效果较好, 反射式装置利于收

表 1 RGB 彩色 LED 性能参数

Tab. 1 Specifications of RGB single chip LEDs

	发光面积/mm	峰值光通量/lm	驱动电流/A
R	4×3	1 800	30
G	4×3	3 500	30
B	4×3	750	30

考虑寿命、散热等影响, LED 通常需要降额工作, 因此增加一颗大功率白光 LED, 其性能参数如表 2 所示。

表 2 白色 LED 性能参数

Tab. 2 Specifications of white LED

	发光面积/mm	峰值光通量/lm	驱动电流/A
W	3×3	2 500	18

将白灯降额 40% 使用, 可提供  $2\,500 \times 60\% = 1\,500 \text{ lm}$  的能量, 其他光线由 RGB 彩色 LED 提供。根据液晶光阀对不同光线的透过率, 可以得到 RGB 彩色 LED 需要提供的的光通量为:

集大角度发散光线。本文综合透射式和反射式的优缺点, 采取了混合集光方式<sup>[20-21]</sup>, 即小角度光束使用透镜折射转换为平行光, 大角度光束利用反射转换为平行光, 如图 4 所示。

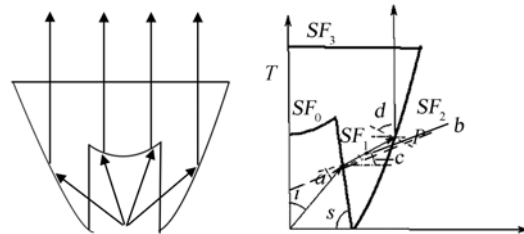


图 4 LED 准直器

Fig. 4 Lens for LED collimation

图 4 中,  $i$  是 LED 光的发散角,  $a$  是角度为  $i$  的光线在  $SF_1$  面的入射角,  $b$  是入射光线在  $SF_1$  面的折射角,  $c$  是  $SF_1$  面的折射光线与水平方向的夹角,  $d$  是入射光在  $SF_2$  面的反射角,  $s$  是  $SF_1$

面与水平方向的夹角,  $T$  是  $SF_0$  面顶点到  $SF_3$  面的距离。

由几何光学可以得到:

$$\begin{cases} a = s - i \\ \sin a = n \sin b \\ c = 90^\circ + b - s \\ d = 90^\circ + \frac{b}{2} - \frac{s}{2} \end{cases} \quad (13)$$

准直器材质选用 PMMA, 折射率  $n=1.49$ 。选定  $i \in [31^\circ, 90^\circ]$  的光束经过全反射转换成平行光,  $[0^\circ, 31^\circ]$  的光束经过透射准直成平行光。由图 4 可知, 曲线  $SF_2$  上的任意一点  $P$  处的切线的斜率为  $f'(x) = \tan d = 1/\tan(s/2 - b/2)$ 。根据点和线的几何关系,  $SF_2$  上的一系列点可由方程组(14)得到。

$$\begin{cases} \frac{y_{s1}' - 0}{x_{s1}' - 0} = 1/\tan i \\ \frac{y_{s2}' - y_{s1}'}{x_{s2}' - x_{s1}'} = \tan c \\ \frac{y_{s2}' - y_{s2}}{x_{s2}' - x_{s2}} = 1/\tan(\frac{s}{2} - \frac{b}{2}) \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $(x_{s_i}, y_{s_i})$  和  $(x_{s_i}', y_{s_i}')$  表示曲线  $SF_i$  上的点, 且有  $\Delta x_i = x_{s_i}' - x_{s_i} \rightarrow 0, \Delta y_i = y_{s_i}' - y_{s_i} \rightarrow 0$ 。

考虑准直器的尺寸和出射后的光线平行, 设初始值  $(x_{s1}, y_{s1}) = (x_{s2}, y_{s2}) = (3.5, 0)$ , 求解常微分方程, 可得出一系列与  $i$  对应的  $a, b, c, d, (x_{s1}, y_{s1}), (x_{s2}, y_{s2})$ , 将点序列  $(x_{s1}, y_{s1}), (x_{s2}, y_{s2})$  导入机械制图软件绘制出曲线  $SF_1, SF_2$ 。

$i \in [0^\circ, 31^\circ]$  的光束经凸面透镜折射后变成平行光, 如图 5 所示。根据等光程原理来设计准直器的折射面。

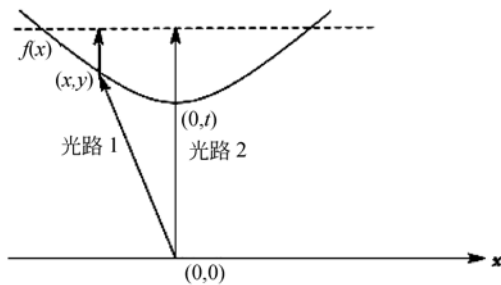


图 5 小角度光线准直

Fig. 5 Collimated lights with small angles

光路 1 和光路 2 的光程相等, 则有:

$$\sqrt{x^2 + y^2} + n(l - y) = t + n(l - t), \quad (15)$$

式中:  $(x, y)$  为曲线  $f(x)$  上的任一点,  $l$  为虚线目标面到  $x$  轴的距离,  $(0, t)$  为曲线顶点坐标,  $n$  为折射率。考虑结构和准直性能, 令  $t = 3.58$  mm, 代入式(15)中可以得到一系列点。将点导入绘图软件中, 绘制出曲线  $SF_0$ , 根据  $SF_0, SF_1, SF_2$  3 条曲线得到准直器实体图。最终确定 LED 准直器的进光面(底面)直径为 7 mm, 出光面直径为 20.3 mm, 高度为 10.2 mm。

### 3.2 软件仿真

将上面设计的准直器模型导入光学软件中, 再根据 LED 参数建立 LED 模型进行光线追迹, 得到光线准直和收集的效果如图 6 所示。

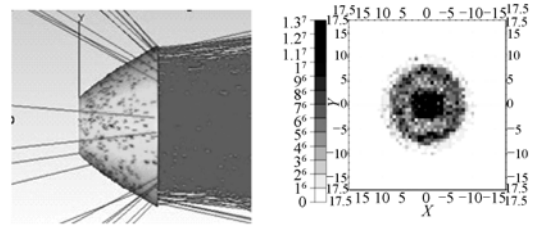


图 6 准直透镜仿真图

Fig. 6 Trace simulation of collimating lens

仿真结果表明, 准直后 LED 光线的发散角约为  $\pm 13^\circ$ 。

### 3.3 实际测试

根据亮度要求购买了 LED; 为降低成本, 根据准直器设计参数购买了市面有售的尺寸近似的产品。配装后的 LED 如图 7 所示。

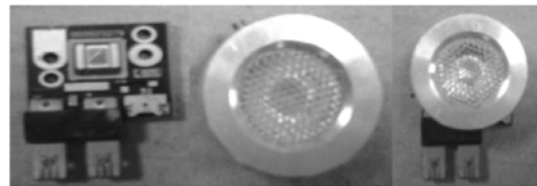


图 7 LED 和准直器

Fig. 7 LED with collimating lens

采用 LED 光色电参数综合测试仪测量了加装准直器前后的 LED 配光曲线, 结果分别如图 8 和图 9 所示。

图 8 和图 9 中左图是 LED 的发光亮度曲线, 横坐标是角度, 纵坐标给出的是以中心最高亮度作为 100% 的相对亮度值, 右图是发光亮度的极坐标曲线。从图中可以看出, 未加准直器时, LED 的光线发散角达到  $\pm 75^\circ$ , 大部分能量在

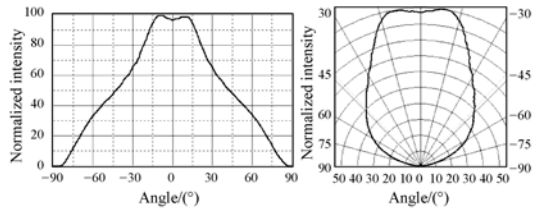


图 8 不加准直器的配光曲线

Fig. 8 Distribution curves of LED without collimating lens

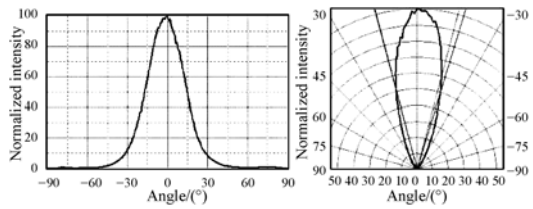


图 9 加准直器的配光曲线

Fig. 9 Distribution curves of LED with collimating lens

$\pm 45^\circ$ 内;加准直器后,光线发散角在 $\pm 20^\circ$ 左右,能量集中在 $\pm 15^\circ$ 内。

与仿真结果相比,实际的光线发散角偏大,能量收集效率不高。其原因主要包括:(1)准直器尺寸和设计不完全相符;(2)实验中存在安装误差,导致光线的发散角度偏大;(3)实际光线经过反射和折射会存在能量耗散(仿真假设反射率为100%),导致能量收集效率不如仿真结果。但该LED投影光源总体满足要求。

#### 4 样机及实际测量结果

根据设计搭建了固态体积式真三维立体显示系统样机,如图10所示。RGB彩色光线和白色光线由方棒进行均光,经中继透镜、全反射棱镜、分色合色棱镜后,分别照射到3片DMD上。经过DMD调制的光线由镜头出射,经折叠光路投影到显示体上。协调DMD的调制时序和20层液晶光阀的扫描时序,在显示体上会产生具有真实物理深度的立体图像。用色度亮度计测得屏前亮度为 $149 \text{ cd/m}^2$ ,图像无闪烁,立体感较强;但当观看角度大于 $30^\circ$ 时,亮度明显降低。

#### 参考文献:

- [1] 刘晓林,谢佳,张永栋,等.基于电控液晶透镜的自由立体显示技术研究及实现[J].液晶与显示,

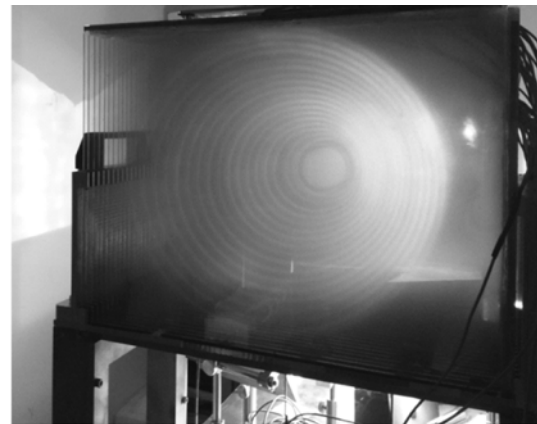


图 10 固态体积式真三维立体显示系统样机

Fig. 10 Prototype of solid volumetric true-3D display system

#### 5 结 论

本文设计了一种用于固态体积式真三维立体显示器的LED投影光源。该光源采用三颗RGB彩色LED配合一颗白光LED的方案,并针对该LED光源设计了准直器。对搭建的固态体积式真三维显示样机进行了测试,屏前亮度达到 $149 \text{ cd/m}^2$ ,图像无闪烁,立体感较强,总体满足固态体积式真三维立体显示的要求。但该显示器存在视角较小的问题,通过使用快速响应液晶材料有望解决此问题,因此这是下一步的工作重点。

2013, 28(4):552-555.

LIU X L, XIE J, ZHANG Y D, *et al.*. Study and realization of auto-stereoscopic display based on electric-field-driven LC lens [J]. *Chinese Journal of*

- Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4):552-555. (in Chinese)
- [2] 姜太平,沈春林,谭皓.真三维立体显示技术[J].中国图像图形学报,2003,8(4):361-366.  
JIANG T P, SHEN CH L, TAN H. Overview of the true three-dimension volumetric display technologies[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(4):361-366. (in Chinese)
- [3] NEIL A D. Autostereoscopic 3D display[J]. *IEEE Trans. of Computer*, 2006, 38(8):31-36.
- [4] OLIVER B. The ultimate display: what will it be [J]. *IEEE Trans. of Computer*, 2005, 38(8):29-30.
- [5] BYOUNGHO L, HEEJIN C, JOOHWAN K, et al.. Status and prospects of autostereoscopic 3D display technologies[C]. *Proceedings of IEEE annual Meeting of Laser and Electro-optics*, 2007: 354-355.
- [6] FAVALORA G E. Volumetric 3D displays application and infrastructure[J]. *IEEE Trans. of Computer*, 2005, 38(8):37-44.
- [7] SULLIVAN A. Depthcube solid-state 3D volumetric display[C]. *Proceedings of Electronic Imaging*, 2004, 5291:279-283.
- [8] FENG Q B, TONG H, LIU T. Single-DMD based solid-state volumetric true 3D display [C]. *International Conference on Audio, Language and Image Processing, Shanghai*, 2010:552-556.
- [9] 冯奇斌,牛红林,华懿魁, et al..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]. *Journal of Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(9):93-98. (in Chinese)
- [10] 刘旭,李海峰.现代投影显示技术[M].杭州:浙江大学出版社,2008.  
LIU X, LI H F. *Modern Projection Display Technology*[M]. Hangzhou: Press of Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [11] 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 ZH Y, SHI X CH. The design of LED using in optical projector[J]. *Journal of Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2):244-246. (in Chinese)
- [12] 荆其斌,焦书兰.色度学[M].北京:科学出版社.1979.  
JIN Q CH, JIAO SH L. *Colorimetry*[M]. Beijing: Press of Science, 1979. (in Chinese)
- [13] 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.  
GAO ZH Q, FAN ZH X, LI R F. Chromic analysis of optical films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(9):838-842. (in Chinese)
- [14] 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.  
ZHAO X, FANG ZH L, SONG L P, et al.. Study on colorimetric characters of digital light processing rear projection television [J]. *Acta Photonica sinica*, 2007, 36(2):355-358. (in Chinese)
- [15] FLORIAN F, ROLLAND J. Design methodology for high brightness projectors[J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(1):86-91.
- [16] YU X J, HO Y L, TAN L, et al.. LED-based projection systems[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(3):295-303.
- [17] HARBERS G, BIERHUIZEN S J, KRAMES M R. Performance of high power light emitting diodes in display illumination applications [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, 3(2):98-109.
- [18] PENG C H, LI X N, ZHANG P. RGB high brightness LED modules for projection display application[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(8):448-453.
- [19] 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.  
LIAO Y Y. *Study on LED based DLP Projection System* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [20] 王小丽.固态体积式真三维立体显示投影光学引擎设计[D].合肥:合肥工业大学,2011.  
WANG X L. *Design of Projector Optical Engine Used in Solid Volumetric True-3D Display*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [21] 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 collimating system [J]. *Journal of Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1472-1479. (in Chinese)

## 作者简介:



冯奇斌(1970—),女,天津人,博士,副教授,1992年于上海机械学院获得学士学位,1995年于华东工业大学获得硕士学位,2006年于维也纳工业大学获得博士学位,主要从事立体显示、LED背光等方面的研究。E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn



吕国强(1962—),男,浙江新昌人,教授,博导,1983年和1986年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn