

# 基于硅基液晶微显示立体投影光学引擎的设计

孙辉岭<sup>1,2</sup> 赵宇<sup>1,2</sup> 高志强<sup>1,2</sup> 程炎<sup>3</sup> 杨伟梁<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 南京邮电大学江苏省平板显示和固体照明工程中心, 江苏 南京 210046  
<sup>2</sup> 南京邮电大学材料科学与工程学院, 江苏 南京 210046  
<sup>3</sup> 广景科技有限公司, 中国 香港

**摘要** 从平衡两路图像对比度的角度,采用双硅基液晶(LCoS)芯片设计了一种实用的微型立体投影光学引擎。光学引擎中双 LCoS 芯片分别用于调制左右眼的图像,一个白光 LED 作为投影光源,两个标准的 MacNeille 偏振分光棱镜(PBS)用于产生两路偏振方向相互垂直的高偏振度光束。整个引擎设计简单,结构紧凑,其尺寸约为 105 mm×28 mm×25 mm。测量了本设计中光学引擎的各部件的实际参数值,根据所测量的数据通过理论计算得到:左右两光路的对比度完全平衡且均为 64:1,光效率均为 3.61%,整机的光通量为 20 lm。

**关键词** 光学设计;立体投影显示;硅基液晶(LCoS)芯片;对比度;光效率

**中图分类号** TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0222004

## Optical Engine Design of Stereoscopic Projection Based on LCoS Micro-Display

Sun Huiling<sup>1,2</sup> Zhao Yu<sup>1,2</sup> Gao Zhiqiang<sup>1,2</sup> Cyan Cheng<sup>3</sup> Steve Yeung<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Engineering Centre for Flat-Panel Displays and Solid State Lighting,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China

<sup>2</sup> School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing, Jiangsu 210046, China

<sup>3</sup> iView Limited, Hong Kong, China

**Abstract** From the view of balancing the contrast of two imaging optical paths, a practical mini-optical engine of liquid crystal on silicon (LCoS) stereoscopic projector is designed. The engine is composed of two LCoS panels to modulate the left and right images respectively, with a white LED as light source and two standard MacNeille polarization beam splitter (PBS) to generate two linear polarized beams with orthogonal polarized state. The whole optical engine has a simple design and compact structure with the size of 105 mm×28 mm×25 mm. Actual parameters of every part in our optical engine are measured. Based on these values, the calculated contrast and the light efficiencies of the right and left eye paths are 64:1 and 3.61% respectively, and the total light flux is about 20 lm.

**Key words** optical design; stereoscopic projection display; liquid crystal on silicon (LCoS) panel; contrast; light efficiency

**OCIS codes** 220.4830; 350.4600; 230.3720; 100.6890

## 1 引 言

立体投影显示因其能产生身临其境的视觉感受而受到人们的广泛欢迎。实现立体投影显示的技术有许多种<sup>[1,2]</sup>,借助于液晶快门眼镜的主动式立体

投影技术<sup>[3]</sup>由于液晶快门眼镜造价高而不适合人多的普通家庭使用。借助于偏光眼镜的双光学引擎立体投影技术<sup>[4~6]</sup>,其偏光眼镜成本低,可以多人同时观看,但是却因整机体积庞大,生产成本低而只适用

收稿日期: 2011-07-21; 收到修改稿日期: 2011-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(61076016, 61077021)资助课题。

作者简介: 孙辉岭(1984—),女,硕士研究生,主要从事 LCoS 立体投影显示方面的研究。E-mail: suzannah@163.com

导师简介: 高志强(1967—),男,教授,主要从事三维及平板信息显示、有机电子材料及器件等方面的研究。

E-mail: iamzqgao@njupt.edu.cn(通信联系人)

于广大电影院。因此,研究基于偏振技术的单光学引擎立体投影显示技术,寻求适合多人同时观看,方便移动,价格低的立体投影显示技术十分必要。

对基于偏振技术的单光学引擎立体投影技术,人们研究较多的,主要是采用 4 个偏振分光棱镜(PBS)和多片(不少于 2 片)硅基液晶(LCoS)芯片组成的 LCoS 立体投影光学引擎<sup>[7,9]</sup>,可同时产生两束方向相互垂直的偏振光来分别携带左右眼的图像信息,当配以相应方向的偏光眼镜后,观看者即可体验到立体效果。这种 LCoS 立体投影光学引擎光利用率高,对比度好,但是采用 4 个 PBS 使得光学引擎结构复杂并加大了生产成本。基于此,在保证光学引擎对比度的基础上,本文设计了一种基于两片 LCoS 芯片和两个 PBS 的微型 LCoS 立体投影光学引擎,通过理论计算得出,两光路的对比度均为 64:1,光效率均为 3.61%,两光路之间的串扰为零,输出总光通量为 20 lm。光学引擎的整体尺寸为 105 mm×28 mm×25 mm,体积较小,非常方便携带。

## 2 光学引擎结构设计

LCoS 属于反射式液晶显示(LCD),因此同 LCD 一样,LCoS 只对偏振光产生调制作用,被调制后的偏振光偏振方向相对于原来的方向旋转 90°后,反射出 LCoS 芯片。PBS 可将入射的照明光分成偏振方向相互垂直的两束线偏振光,一束偏振方向与入射面平行——P(Parallel)偏振光,另一束与入射面垂直——S(Senkrecht)偏振光,并使其从不同的位置出射。因此,LCoS 立体投影系统光学引擎的设计思想主要为:光源的照明光经过 PBS 产生两路偏振光,并分别入射到两片 LCoS 芯片上,被 LCoS 芯片调制后由一个投影镜头投射至屏幕。当三维视频中的左右图像信息被硬件电路分别输入至两片 LCoS 芯片时,投影镜头中便会投射出具有不同偏振状态的左右眼图像。本工作聚焦于微型 LCoS 立体投影光学引擎的设计,从平衡左右图像光路对比度的角度入手,分析了两种传统 LCoS 立体投影光学引擎的对比度特性,针对其存在的问题设计了一种结构简单,对比度好的微型 LCoS 立体投影光学引擎,并分析了其性能特点。

### 2.1 传统 LCoS 立体投影光学引擎对比度的分析及存在问题

立体投影系统最主要的光学特性就是它的两个光路之间的对比度平衡和光效率接近。在 LCoS 立体投影系统中由于没有起偏器和检偏器,所以系统

的对比度主要由 PBS 的消光比和 LCoS 芯片的消光比等决定。光效率则与 PBS 的透射率/反射率、LCoS 芯片的工作模式、以及各镜片的效率有关。

设 PBS 对 p 偏振光和 s 偏振光的透射率分别为  $T_p, T_s$ ,对 p 偏振光和 s 偏振光的反射率分别为  $R_p, R_s$ ,则 PBS 的透射与反射消光比分别可表示为

$$\epsilon_T = \frac{T_p}{T_s}, \quad (1)$$

$$\epsilon_R = \frac{R_s}{R_p}. \quad (2)$$

文献[7]中的一种 LCoS 立体投影光学引擎结构如图 1 所示,即从一个 PBS 出射的 P 偏振光和 S 偏振光分别被 LCoS 芯片调制后直接进入投影镜头。若不计 LCoS 芯片的消光比,则两光路的对比度(以下计算中若无说明,则均为不计 LCoS 芯片消光比时的对比度)可由下式推算出:

$$C_1 = \frac{T_p R_s}{T_s R_p} = \frac{T_p}{T_s} = \epsilon_T, \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{R_s T_p}{R_p T_s} = \frac{R_s}{R_p} = \epsilon_R, \quad (4)$$

式中  $C_1$  和  $C_2$  分别为光程 path 1 与光程 path 2 的对比度。需要指出的是,LCoS 立体投影系统中最后出射的 p 偏振光和 s 偏振光是由偏光眼镜区分开而分别进入人的双眼,所以单光路对比度的计算值应为 LCoS 亮态时出射 p 偏振光(s 偏振光)的光通量与 LCoS 暗态时出射 p 偏振光(s 偏振光)光通量的比值,而不是 LCoS 亮态时所有出射光的光通量与 LCoS 暗态时所有出射光光通量的比值。

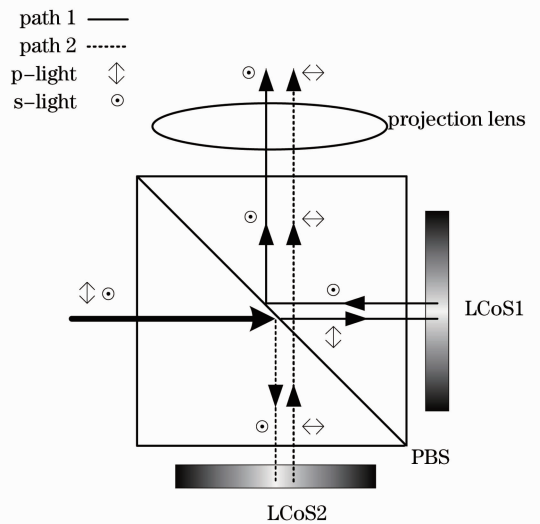


图 1 含有一个 PBS 的 LCoS 立体投影光学引擎结构  
Fig.1 Architecture of LCoS stereoscopic projection optical engine with one PBS

由以上结果可以看出,这种设计的 path 1 与 path 2 的对比度分别等于所采用 PBS 的透射消光比与反射消光比的值。由于在 PBS 的偏振分光膜表面,会有部分 p 偏振光被反射,因此对于普通的 MacNeille PBS 其反射光的消光比(约为几十比一)要远小于透射光的消光比(可大于 1000:1),即  $\epsilon_R < \epsilon_T$ 。所以,这种设计的两成像光束若使用 MacNeille PBS 作为偏振光分光器件,最终所得图像的对比度将会非常不平衡,严重影响最后图像的立体效果。

为了平衡并提高两路出射光的对比度,可以采用将两束成像光多次经过 PBS 的偏振分光膜的方法。通过对多种光学引擎结构的研究,发现必须使每一路光束进入 LCoS 芯片前和从 LCoS 芯片出射后经过偏振分光膜的次数相等并且被透射和反射的次数相等,才能使两光路的对比度完全相等,将光路展开,则应该具有如图 2 所示的形式。

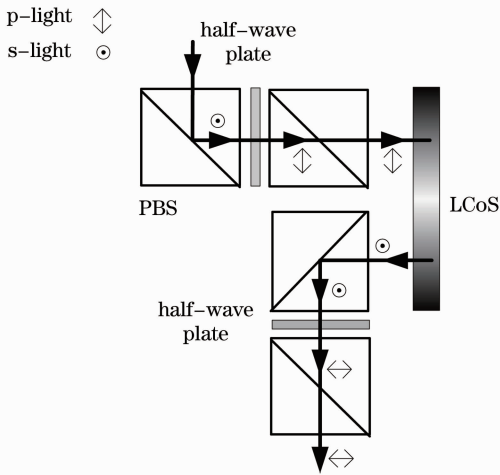


图 2 理想成像光束光路展开图

Fig. 2 Unfolded drawing of ideal optical imaging beam

符合此设计原则的一种含有 4 个 PBS 的 LCoS 立体投影光学引擎结构<sup>[7~9]</sup>如图 3 所示,对这种结构的理想对比度做了推算,结果如下:

$$C_1 = \frac{T_P R_S T_P R_S}{T_P R_S T_S R_P} = \left(\frac{R_S}{R_P}\right) \left(\frac{T_P}{T_S}\right) = \epsilon_R \epsilon_T, \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{R_S T_P R_S T_P}{R_S T_P R_P T_S} = \left(\frac{R_S}{R_P}\right) \left(\frac{T_P}{T_S}\right) = \epsilon_R \epsilon_T. \quad (6)$$

可以看到,这种 LCoS 立体投影光学引擎的两路出射光对比度值理论上相同,都等于所采用 PBS 的透射消光比与反射消光比的乘积,两路对比度值不仅非常平衡而且比 1 个 PBS 结构的结果( $\epsilon_R$  或  $\epsilon_T$ )提高很多。但是这种光学引擎采用 4 个 PBS 使得整机的体积很大,成本很高。针对这一问题,在以上光路对比度设计思想的基础上,设计了一种由 2

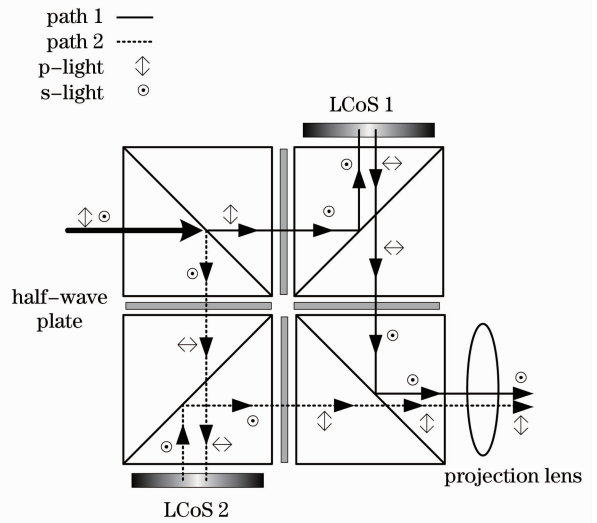


图 3 4 个 PBS 和 2 片 LCoS 芯片组成的立体投影光学引擎结构

Fig. 3 Architecture of stereoscopic projection optical engine with four PBSs and two LCoS panels

个 PBS 和 2 片 LCoS 芯片构成的微型 LCoS 立体投影光学引擎。通过计算表明:本设计的基于 2 个 PBS 的 LCoS 立体投影光学引擎,其性能与上述基于 4 个 PBS 的等同,但体积大大减小。

## 2.2 微型 LCoS 光学引擎结构的设计

本结构主要由以下部件组成:白光 LED 光源,带有彩色滤光片的 LCoS 芯片(2 片),PBS(2 个),半波片,贴有 1/4 波片的反射镜以及投影镜片等,各部件排列结构以及光路方向如图 4 所示。从 LED 光源入射的全光经过 PBS1 被分成偏振方向相互垂直的两束偏振光 path 1(实线光路)和 path 2(虚线光路),每一路光在入射到 LCoS 芯片之前和从 LCoS 芯片出射之后都分别两次经过 PBS 的偏振分光膜,并且一次为反射一次为透射,这和 4 个 PBS 结构的光学引擎达到的功能相同。其中贴有 1/4 波片的反射镜的作用是使入射光偏振方向旋转 90°后被反射出去,两 PBS 交接面之间 1/2 波片的作用是使透过它的偏振光方向旋转 90°。

设 LED 光源出射光的光通量为  $I$ ,则当 LCoS 1 处于亮态时 path 1 出射的 s 偏振光和 p 偏振光的通量分别为:  $1/2IT_P R_S T_P R_S, 1/2IT_S R_P T_S R_P$ ;处于暗态时分别为:  $1/2IT_S R_P T_P R_S, 1/2IT_P R_S T_S R_P$ 。当 LCoS 2 处于亮态时 path 2 出射的 p 偏振光和 s 偏振光的通量分别为:  $1/2IR_S T_P R_S T_P, 1/2IR_P T_S R_P T_S$ ;暗态时分别为  $1/2IR_P T_S R_S T_P, 1/2IR_S T_P R_P T_S$ 。可见,从 path 1 出射的 s 偏振光、p 偏振光与从 path 2 出射的 p 偏振光、s 偏振光的通量在理论上是完全相等的。从以

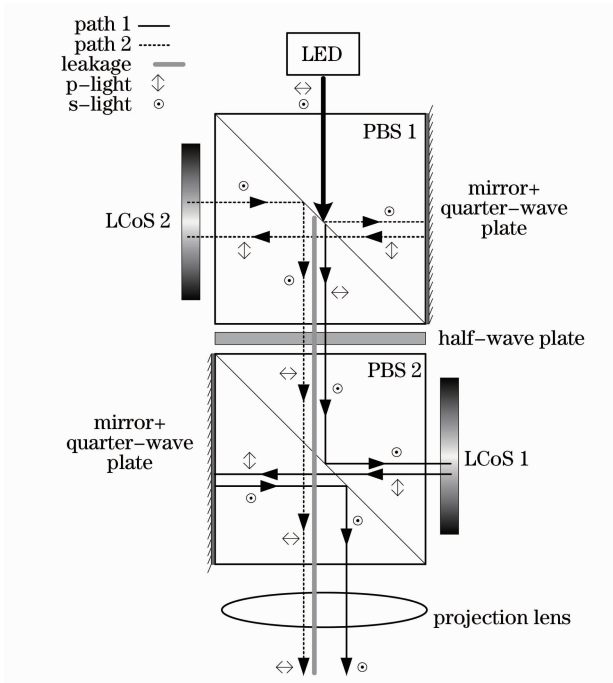


图 4 便携式 LCoS 立体投影光学引擎结构

Fig. 4 Architecture of portable stereoscopic LCoS projector optical engine

上的分析可以很容易得出两路的对比度,结果与表达式(5),(6)式是相同的,即

$$C_1 = C_2 = \epsilon_R \epsilon_T. \quad (7)$$

### 2.3 本光学引擎的漏光及串扰分析

通过仔细分析光路还可以发现,在这种 LCoS 立体投影光学引擎结构中可能会出现一小部分光未经过 LCoS 芯片调制而直接投射出投影镜头产生漏光,如图 4 中灰色线所示光路。这部分漏光中 p 偏振光和 s 偏振光的通量分别为:  $1/2IT_s T_p$ ,  $1/2IT_p T_s$ , 它们使得两路的对比度变为

$$C'_1 = C'_2 = \frac{T_p R_s T_p R_s + T_p T_s}{T_s R_p T_p R_s + T_p T_s} = \frac{T_p R_s^2 + T_s}{T_s R_p R_s + T_s}. \quad (8)$$

因为  $T_p$ ,  $T_s$ ,  $R_p$ ,  $R_s$  的值都小于 1, 则有  $T_p T_s > T_s R_p T_p R_s$ , 即漏光的光通量大于 LCoS 暗态时出射光的光通量, 所以会对图像的对比度产生一定的影响。在本结构中漏光无法彻底消除, 但是可以采用  $T_s$  和  $T_p$  非常小的 PBS 使影响降低到最小。

以上关于对比度的计算, 均没有考虑 LCoS 芯片的消光比,  $1/2$  波片和  $1/4$  波片的转换效率等。 $1/2$  波片和  $1/4$  波片的转换效率一般为 98% 以上, 对系统对比度的影响可以忽略不计。投影系统中, 光学引擎的整体对比度与光路对比度和 LCoS 显示器件的消光比的关系可由下式表示<sup>[10]</sup>:

$$\frac{1}{C_{OE}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{\epsilon_{LCoS}}, \quad (9)$$

其中  $C_{OE}$  是光学引擎的整体对比度,  $\epsilon_{LCoS}$  为 LCoS 芯片的消光比。则本 LCoS 立体投影光学引擎的单路对比度即可表示为

$$C_{1OE} = C_{2OE} = \frac{1}{\frac{T_s R_p R_s + T_s}{T_p R_s^2 + T_s} + \frac{1}{\epsilon_{LCoS}}}. \quad (10)$$

串扰是指立体显示设备的左右图像通道没有完全互不干扰, 而使一路通道的图像漏到了另一路通道中<sup>[11]</sup>。在图 4 所示的 LCoS 立体投影系统中, path 1 光路中的出射光主要为 s 偏振光, 但仍有极小一部分的 p 偏振光掺杂在其中, 这部分 p 偏振光则会被与 path 2 对应的偏光镜片所接受而造成串扰, 对 path 1 中串扰的分析同理。对图 4 中光学引擎的串扰公式, 也做了相应的推算, 结果如下:

$$C_1 = C_2 = \frac{R_p^2 T_s^2}{T_p^2 R_s^2 + T_p T_s} = \frac{1}{\left(\frac{T_p}{T_s}\right)^2 \left(\frac{R_s}{R_p}\right)^2 + \left(\frac{T_p}{T_s}\right) \frac{1}{R_p^2}}. \quad (11)$$

因为  $T_p/T_s$  的值通常在几百或一千以上, 而  $R_s/R_p$  的值也一般在几十以上, 那么它们乘积的平方的值将会非常大, 所以将有

$$C_1 = C_2 \approx 0, \quad (12)$$

即两光路中的串扰约为零, 可以忽略不计。

## 3 本光学引擎的部件参数测量与性能分析

测量了组成光学引擎的各个部件的相关参数, 并根据前面所述公式, 计算了本光学引擎的两路对比度、光通量和光效率的值。

### 3.1 各光学部件的参数获得

#### 1) 照明部分

采用 Cree 公司的 Xlamp XP-G LED 做为光源, 其光效率约为 120 lm/W, 照明部分采用复眼透镜照明方案<sup>[12~14]</sup>, 主要由准直透镜, 复眼透镜和会聚透镜组成, 如图 5 所示, 经过实验测得这部分透镜的光效率为 68.86%。

#### 2) PBS 部分

PBS 采用的是普通 MacNeille PBS, 通过实验测得了它的透射率和反射率等的实际值, 如表 1 所示。由 PBS 的各个参数, 计算得到的对比度值也列于表 1。

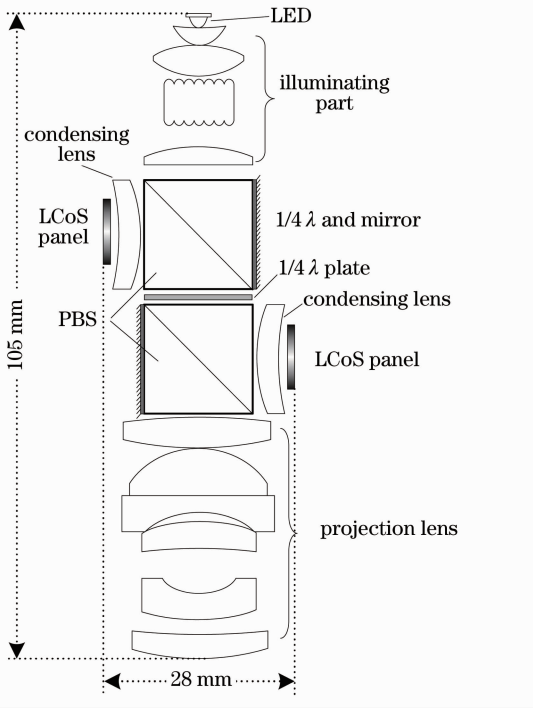


图 5 光学引擎的具体设计结构

Fig. 5 Specific designing architecture of optical engine

表 1 PBS 的参数值及对对比度计算结果

Table 1 PBS parameters and calculation results of contrast

F/No. =	Mac Neillel PBS /%			
	$T_P$	$T_S$	$R_S$	$R_P$
2.5	90.44	0.44	96.44	6.44
	$\epsilon_T = 205.5$		$\epsilon_R = 15$	
	Path1		Path2	
C	3078:1		3078:1	
C'	181:1		181:1	
C'OE	97:1		97:1	
COE	64:1		64:1	

在单光路中由于成像光束分别经过了 4 次 PBS 的偏振分光膜,且为两次透射、两次反射,所以光学引擎中 PBS 部分的光效率为

$$B = T_P^2 R_S^2 \quad (13)$$

将  $T_P, R_S$  的值代入表达 (13) 式,得到  $B$  的值为 76.07%。

### 3) LCoS 显示器件

LCoS 显示芯片采用 Himax 的 0.44 英寸彩色滤光型显示芯片,显示芯片的每个像素通过贝叶编码掩膜实现彩色显示,这种混色方式的显示芯片不需要分光合光装置<sup>[15]</sup>,其型号为 HX7027,其  $F$  数为 2.5,消光比为 100,光效率为 19%。

### 4) 投影物镜

采用的投影物镜是一种典型的反远距物镜<sup>[16,17]</sup>,各镜片结构如图 5 所示,其  $F$  数是 2.2,焦距为 25.4 mm,投影距离为 1 m 时投影画面为 17.3 inch (1 inch=25.4 mm),这部分的光效率的实验值为 98.86%。

### 5) 波片部分

贴有 1/4 波片的反射镜和半波片的光效率实验值分别为 77%,98%。

### 6) 整机性能

光学引擎整机光学收集率为 80%,设计尺寸为 105 mm×28 mm×25 mm。

由以上各部件的实验值,计算得到光学引擎的总效率如表 2 所示。

表 2 光学引擎的各部件效率计算

Table 2 Parts efficiency calculation of optical engine

	Path 1 efficiency /%	Path 2 efficiency /%
LED	50	50
Illuminating part	86.86	86.86
PBS	76.07	76.07
Condensing lens	96.43	96.43
LCoS panel	19	19
Projection lens	98.86	98.86
(1/2)λ & mirror	77	77
(1/2)λ plate	98	98
Geometrical efficiency	80	80
Total	3.61	3.61

## 3.2 结果分析与讨论

由表 1 的理论计算结果可知,在采用普通 MacNeille PBS 时,若不计漏光,本设计的 LCoS 立体投影光学引擎单路对比度均为 97:1( $C'_{OE}$ ),当计入漏光时降低为 64:1( $C_{OE}$ ),即漏光使得系统的对比度下降 34%。由光学引擎对比度计算 (9) 式可得,当光路对比度  $C$  很大时,光学引擎的对比度将主要由 LCoS 芯片的消光比决定,而本结构采用带彩色滤光片的 LCoS 芯片,其对比度为 100:1,所以单路光学引擎的对比度值不可能大于 100:1,这也是本设计对比度不太高的原因之一。若采用时序 LCoS 芯片,并对应红绿蓝三原色的 LED 作为光源,则系统对比度会大大提升,而且图像颜色也会更加鲜艳。此外,关于对比度的计算均是假设入射光是理想入射角度,在实际光学引擎中,宽角度入射光或斜射光在 PBS 偏振分光膜上会产生偏振状态的几何旋转,为了校正这一效应,还可以在 PBS 和 LCoS 芯片间插入 1/4 波片,以保证系统的对比度。



从表 2 中可以看出, LCoS 立体投影光学引擎的单光路光效率为 3.61%, LED 对应的 path1 与 path2 为 50% 的原因是假定 LED 光源被 PBS 分成两束光强相等的 p 偏振光和 s 偏振光, 且各占 50%。本文采用的 LED 所产生的光效率约为 120 lm/W, 当 LED 驱动功率为 5 W 时, 由单光路光效率为 3.61%, 可得出单路出射光在屏幕上的通量约为 10 lm, 所以整机光通量约为 20 lm。

## 4 结 论

对传统 LCoS 立体投影光学引擎的对比度做了推算, 从平衡两路图像对比度的角度入手, 设计了一种只含有两个 PBS 的微型 LCoS 立体投影光学引擎, 该引擎采用两片 0.44 英寸彩色滤光型 LCoS 微显示芯片分别调制左右眼的图像, 采用白光 LED 作为照明光源, 并引入了贴有四分之一波片的反射镜和二分之一波片来改变偏振光的偏振态, 整个引擎结构设计紧凑简单, 尺寸仅为 105 mm × 28 mm × 25 mm。对组成光学引擎的各部分元件进行了实验测量, 根据所测的实际数据进行理论计算得出, 光学引擎的单光路的理论对比度和光效率分别为 64:1 和 3.61%, 整机光通量约为 20 lm。

## 参 考 文 献

- 1 J. Son, B. Javidi, K. Kwack. Methods for displaying three-dimensional images[J]. *Proc. IEEE*, 2006, **94**(3): 502~523
- 2 N. Holliman. 3D Display Systems[M]. //J. P. Dakin, Robert G. W. Brown. Handbook of Optoelectronics, London: Tolyor & Francis, 2005, **38**(8): 31~36
- 3 A. J. Woods, T. Rourke, K. L. Yuen. The compatibility of consumer displays with time-sequential stereoscopic 3D visualization[C]. Proc. K-IDS, 2006. 7~10
- 4 S. C. Kim, E. S. Kim. A new liquid crystal display-based polarized stereoscopic projection method with improved light efficiency[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **249**(1-3): 51~63
- 5 S. C. Kim, J. W. Moon, D. W. Lee *et al.*. A new configuration of LCD projectors for polarized stereoscopic projection with improved light efficiency[C]. *SPIE*, 2005, **5908**:

348~359

- 6 S. C. Kim, E. S. Kim. A novel configuration of LCD projectors for efficient orthogonal polarization of two projected views[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**(1): 55~66
- 7 J. X. Shao. A colorful projection display device[P]. China. WO2005/008617A1, 2005-01-27  
邵剑心. 一种彩色投影显示装置[P]. 中国. WO2005/008617A1, 2005-01-27
- 8 L. Bogaert, Y. Meuret, B. V. Giel *et al.*. Projection display for the generation of two orthogonal polarized images using liquid crystal on silicon panels and light emitting diodes[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1535~1542
- 9 L. Bogaert, Y. Meuret, J. Vanderheijden *et al.*. Stereoscopic projector for polarized viewing with extended color gamut[J]. *Displays*, 2010, **31**(2): 73~78
- 10 X. J. Yu, H. S. Kwok. Application of wire-grid polarizers to projection displays[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2004, **19**(4): 253~258  
于兴杰, 郭海成. WGP 偏振片在投影显示中的应用研究[J]. 液晶与显示, 2004, **19**(4): 253~258
- 11 A. J. Woods. How are crosstalk and ghosting defined in the srtereoscopic literature[C]. *SPIE*, 2011, **7863**: 78630Z
- 12 Zhou Jie, Lin Yuxiang, Zhou Ping *et al.*. Method for improving the performance of wide screen projection display illumination system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 224~227  
周 杰, 林宇翔, 周 平等. 改进宽银幕投影显示照明系统的设计方法[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 224~227
- 13 B. V. Giel, Y. Meuret, L. Bogaert *et al.*. LED projector with two liquid crystal on silicon light valves and a fly's eye integrator[J]. *Displays*, 2008, **29**(5): 464~470
- 14 Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang *et al.*. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 587~591  
周 平, 陆 巍, 林宇翔等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 587~591
- 15 H. F. Gao, Q. X. Liu, P. Liu *et al.*. Illuminating system for single color filter LCoS panel micro-projector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(3): 100~104  
高慧芳, 刘钦晓, 刘 鹏等. 单片式微型滤色膜 LCoS 的照明系统设计[J]. 光电工程, 2011, **38**(3): 100~104
- 16 S. M. Marchuk. Wide-angle projection lens for image projection system[C]. Proceedings of the 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, 2004, **26**: 114~115
- 17 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 913~918  
赵 星, 方志良, 崔继承等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 913~918

栏目编辑: 谢 婧