

硅基液晶投影系统的LED光源照明系统设计

赵斌¹ 张国玉^{1,2} 陈启梦¹ 张健¹ 王国名¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 硅基液晶(LCOS)空间光调制器件的特点是反射光成像,要求照明光束发散角小,均匀性好。对此,设计了由抛物型反光碗、复眼透镜、偏振分光棱镜、聚光镜等组成的用于LCOS的照明系统,对抛物反光碗以及复眼透镜各参数的设计原理做了详细分析,具体包括光源出射角度,光源的总体长度,所需均匀照亮的尺寸,抛物反光碗各参数对出射角度的影响,其实现原理主要包括复眼透镜匀光理论。设计要求光源出射角度小于 10° ,总体长度为220 mm,均匀照明面积为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,最后给出聚光透镜组的设计结果,使光线聚焦到LCOS表面,照度值要达到 0.35 lx/m^2 ,其不均匀度在15%以内。进一步使用Lighttools软件,对其进行仿真,由照度曲线图和照度栅格图可知,设计结果满足设计要求。

关键词 光学设计;抛物反光碗;复眼透镜;硅基液晶

中图分类号 V249.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.072201

Design of Illuminating System for Liquid Crystal on Silicon Projection System on LED Light Source

Zhao Bin¹ Zhang Guoyu^{1,2} Chen Qimeng¹ Zhang Jian¹ Wang Guoming¹

¹College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract It is liquid crystal on silicon (LCOS) micro-projector's characteristic that an image is formed by the reflected light from the LCOS' surface, and the illuminating beam angle of divergence needs to be small, the uniformity error of illuminating should be fairly well. According to these requirements, an illuminating system on LCOS is designed, the projection device consists of a parabolic reflector, fly's-eye lens, a polarizing beam splitter, condenser lens and so on. The parameters of the parabolic reflector and the fly's-eye lens are analyzed in detail. It includes the beam angle of divergence, the total length for the light source and the intended square to be uniform illuminated. Based on the theory of fly's eye's inform illuminating and the relationship between parameters of the parabolic reflector and the beam angle of divergence. The design requirements are that the beam angle of divergence should be smaller than 10° , the total length of the light source should be 220 mm, the area to be illuminated is $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$. Finally collimating lens is designed to collimate the rays on the LCOS, the illuminance should be as large as 0.35 lx/m^2 . And it is demanded that the uniformity error on the surface of LCOS should be limited in 15%. Simulation results are achieved by Lighttools. Based on the line charts and the grid charts, it has satisfied the design requirements.

Key words optical design; parabolic reflector; fly's eye lens; liquid crystal on silicon

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 230.3670; 230.3720; 230.5440

1 引言

硅基液晶(LCOS)在硅芯片上加工而成。LCOS的像素尺寸可以达到 $7\sim 20\text{ }\mu\text{m}$,所以其解析度非常高。

收稿日期: 2013-12-13; 收到修改稿日期: 2014-03-03; 网络出版日期: 2014-06-25

作者简介: 赵斌(1989—),男,硕士研究生,主要从事航天器地面标定方面的研究。E-mail: 1017837497@qq.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测与航天器模拟技术等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

LCOS采用反射式投射,光能利用率可达到40%,具有体积小、开口率高、制造技术较成熟等特点。利用半导体制作的驱动面板,在电晶体上通过研磨技术磨平,并镀上铝膜当作反射镜,形成CMOS基板,然后将CMOS基板与含有透明电极的玻璃基板贴合,再灌入液晶,进行封装测试。目前,LCOS投影机已经成为影院投影机等产品所采用的主要技术^[1-2]。

LCOS中的液晶分子被视频信号调制,排列方向发生变化,产生双折射等效应。每个像素点对光线的反射率发生变化,排列成为所需图像,当入射到LCOS表面的光线按照特定方向偏振时,将被调制为垂直方向偏振光并反射回来成像。要产生偏振光,就需要使用偏振光束分离器(PBS)。偏振分光界面由高折射率透明介质薄膜和低折射率透明介质薄膜组成,光线以布儒斯特角入射到分界面,其中的p偏振光可直接通过分界面,而s偏振光会被反射。反射的s偏振光投射到LCOS上被调制为p偏振光,后被反射回来由投影镜头投射到图像接收面成像^[3]。

本文设计了一种用于LCOS的LED照明系统,其中包括抛物反光碗、复眼透镜、聚光镜组等的设计与优化。

2 LCOS照明系统原理

LCOS照明系统总体结构简图如图1所示。主要由抛物反光碗、复眼透镜组、聚光镜组和PBS等组成。光源发出的光,经过复眼透镜组匀光,再通过聚光镜组整形后经过PBS,照射在LCOS上,形成均匀亮斑,照亮LCOS。

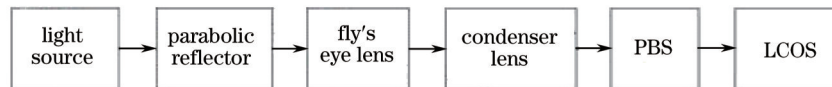


图1 LCOS照明系统的工作流程图

Fig.1 Process diagram of LCOS illuminating system

3 光学系统的设计

3.1 PBS分光棱镜的选取

根据结构需要,选用如图2所示的PBS。入射光线被分成两束光,分别照亮两片LCOS,最后从镜头射出,投影出光斑图像。其中,s光将由分光面反射,照射到LCOS上,p光将透过分光面,射向另一个LCOS,光线会经过四分之一波片偏振片,以s光入射到LCOS表面,经过LCOS调制,以p光反射回PBS分光棱镜,最终从透镜组射出光线。

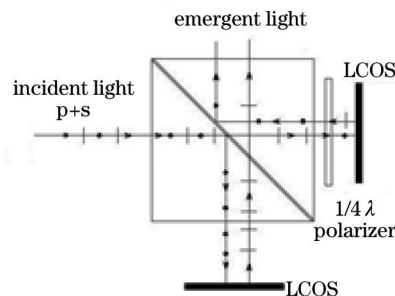


图2 PBS入射射出光线偏振态分析

Fig.2 Analysis of polarizing state for the PBS

光线透过PBS到达LCOS表面,形成符合LCOS需要的小角度均匀照明光斑^[3-5]。

3.2 抛物反光碗设计

抛物反光碗可以有效提高系统的光利用率。对于反光碗的设计,可以先对其截面进行设计,再旋转得到模型,为了便于理解,先以椭球反光碗设计为基础,抛物线可以看成是(两焦点相聚无穷远的时)椭圆,因此便可推导出抛物反光碗的设计方法。图3是椭圆参数示意图。图中p点为反光碗上一点,a角为光源出射光线与水平方向夹角,r为光源到p点距离,r'为p到另一焦点的距离。s为两焦点距离。f为焦点到边缘距离。

根据余弦定理:

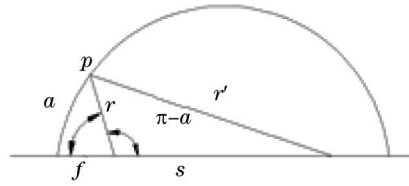


图3 椭圆的各参数示意图

Fig.3 Sketch of ellipse's parameters

$$(r')^2 = r^2 + s^2 - 2rs\cos(\pi - a). \quad (1)$$

根据定义:

$$r + r' = s + 2f, \quad (2)$$

由(1)式和(2)式得

$$r = \frac{2f}{1 + \frac{1 + E \cos a}{1 + E}}, \quad (3)$$

式中 E 是焦点弯曲系数 $E = s/f$ 。

如图4所示,当 $s \rightarrow \infty$, 可得到抛物反光碗:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos a}, \quad (4)$$

$$R = r \times \sin a, \quad (5)$$

设光源到抛物镜边沿连线与水平方向夹角为 a , 焦距为 f , 则 $r = \frac{2f}{1 + \cos a}$, 则口径为 $D = 2 \times r \times \sin a$ 。光源尺寸的大小影响着发散角的大小, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 以内, 随着 a 角度的变大, 发散角也会逐渐变大, 90° 时最大。系统要求发散角小于 10° , 如图5所示, 当 $a = 90^\circ$ 时, $h = 2f$, $\tan \theta_{1/2} = \frac{d}{4f}$, 根据所选用美国科锐公司生产的贴片式 LED, XPG-R5, 光通量为 139~148 lm, 发光角度为 125° , 尺寸为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 。发光面直径 d 约 1.3 mm , $f = 5 \text{ mm}$, 经过计算, $\theta_{1/2} = \arctan(0.065) = 3.719^\circ$, 扩张光源的尺寸影响照明系统的发散角, 发出的光束并非都平行出射, 经过计算, $\theta_{1/2} < 10^\circ$ 。可以满足设计要求。

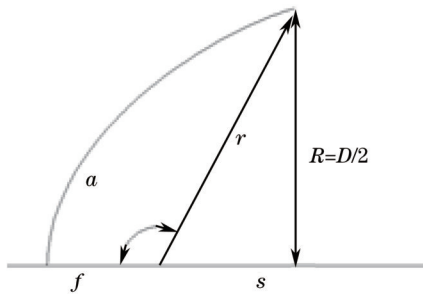


图4 抛物线参数示意图

Fig.4 Sketch of parabolic's parameters

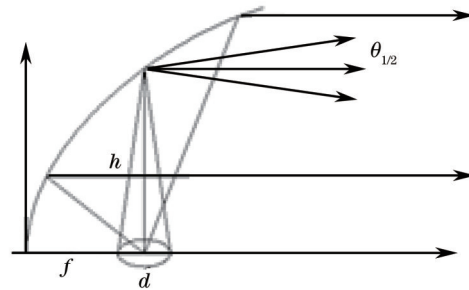


图5 光源尺寸与发散角的关系

Fig.5 Relationship between the size of the source and its angle of divergence

按要求设计一个 $a = 120^\circ$, 焦距为 5 mm 的抛物反光碗, 口径为 $D = 5 \times 2 \times 2 \div (1 + \cos 120^\circ) \times \sin 120^\circ = 34.64 \text{ mm}$, 长度为 $f + \frac{D/2}{\tan(\pi - a)} = 35 \text{ mm}$ 。

按工程要求, 需要照亮的 LCOS 尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 正方形区域。系统总长为 220 mm , 口径 $D = 35 \text{ mm}$ 。符合设计要求。

3.3 复眼透镜设计

复眼透镜材料的选取一般为有机玻璃 (PMMA) 或光学玻璃, 但是用光学玻璃制作复眼透镜价格较为昂贵, 为节约成本, 通常选用 PMMA。PMMA 具有较好的抗冲击特性, 优良的光学特性及耐气候变化特性。由

于PMMA表面硬度不高、易擦毛、抗冲击性能低、成型流动性能差等,所以在要求苛刻的匀光系统中,还是选用光学玻璃。对于LCOS微投影系统,LED功率低,发热量小,系统工作环境振动不强,可以选用PMMA塑料^[6]。

系统对于LCOS的照明均匀性要求很高。采用复眼透镜对光源进行匀光。复眼透镜是在平板玻璃上粘贴微透镜,仿生苍蝇复眼。复眼透镜用于投影系统的照明,能够使照度均匀,并保持高亮度,如图6所示,使用两组复眼透镜,其实质是应用了柯勒照明的原理,第一组复眼透镜可以收集从光源发出的光线,相当于柯勒照明系统中的集光镜,每一个复眼成像到第二组所对应的复眼上,第二组的每个复眼相当于场镜,控制接收表面接收的能量^[7]。复眼与单眼相比有很大的优势,单眼只能在一定范围内有较好的分辨率,而复眼180°都有较高分辨率。为了达到较好的匀光效果,又兼顾成本,至少需要64通道的复眼透镜。

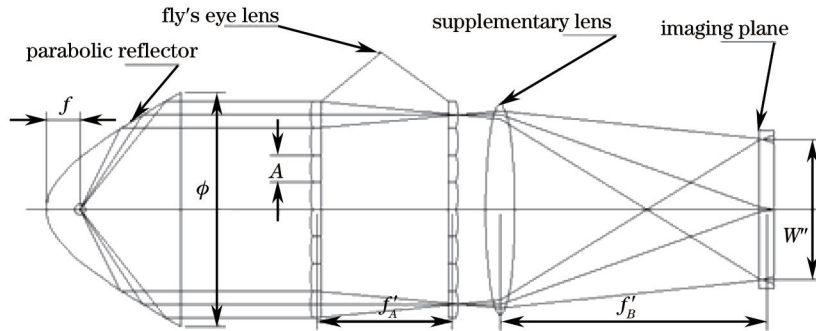


图6 后附加镜聚光光路图

Fig.6 Light path chart for the supplementary lens

复眼透镜规格为:8×8通道整列分布。其边长应小于34.64 mm,所以每个小复眼被定义为4 mm×4 mm正方形,厚度为1.5 mm,焦距为18.86 mm。这样就可以匹配抛物反光碗的口径^[8]。

3.4 后附加镜的设计

如图6所示。由相似三角形原理可得

$$\frac{A}{f'_A} = \frac{W''}{f'_B}, \quad (6)$$

式中 $f'_A + f'_B \leq 220 \text{ mm} - 35 \text{ mm}$, $B < 220 \text{ mm} - 35 \text{ mm}$, $A = 4 \text{ mm}$, $W = 30 \text{ mm}$, 取 $W = 35 \text{ mm}$ 。 $f'_A = 18.86 \text{ mm}$, 经计算得 $f'_B = 165.025 \text{ mm}$ 。加上PBS后,相当于引入平行平板。将会使LCOS接收面后移 $\Delta l = d \times \left(1 - \frac{1}{n}\right) = 13 \text{ mm}$ 。

后附加镜即聚光镜组,其参数如表1所示。光线通过复眼透镜组后,将由后附加镜组对其进行准直。再透过PBS分光,照亮LCOS液晶显示器件。初步设计时,将光路展开,再初设各透镜为薄透镜,利用透镜光焦度与曲率半径之间的关系式:

$$\frac{-1}{f_1} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (7)$$

$$\frac{1}{f_2} = (n-1) \left(-\frac{1}{r_3} \right), \quad (8)$$

式中 f_1, f_2 为透镜焦距, r_1, r_2, r_3 为各面曲率半径, n 为折射率。

表1 聚光镜组参数

Table 1 Parameters of the supplementary lens

Surfaces	r / mm	d / mm	n_d	v	D_0 / mm	Glass
1	38.84	5.623	1.5168	64.1673	38.14	BK7
2	478.16	1				
3	22.657	3.243	1.5168	64.1673	38.24	BK7
4	18.6	59.133				
5		35	1.5168	64.1673	76.62	BK7

经过手动优化,添加透镜组,导入仿真软件,并在优化之前,对 r_1, r_2 曲率设置变量与容限,在接收面设置

评价函数后,系统自行优化。最终形式如图 7 所示。图 7 中,焦距为 104.00517。

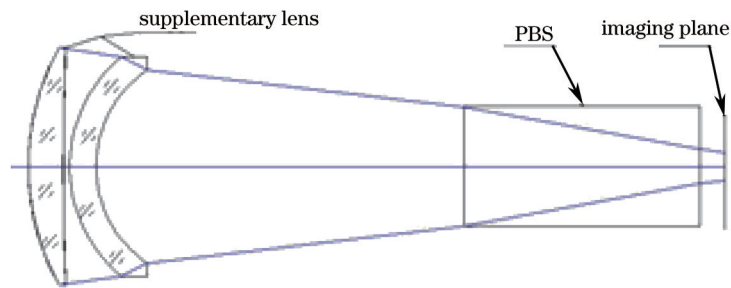


图 7 优化后聚光镜组的示意图

Fig.7 Sketch of the optimized supplementary lens

3.5 总体结构图

由之前设计的抛物反光碗,复眼透镜,聚光镜组,可以得到总体的示意图和其仿真图,如图 8 所示。

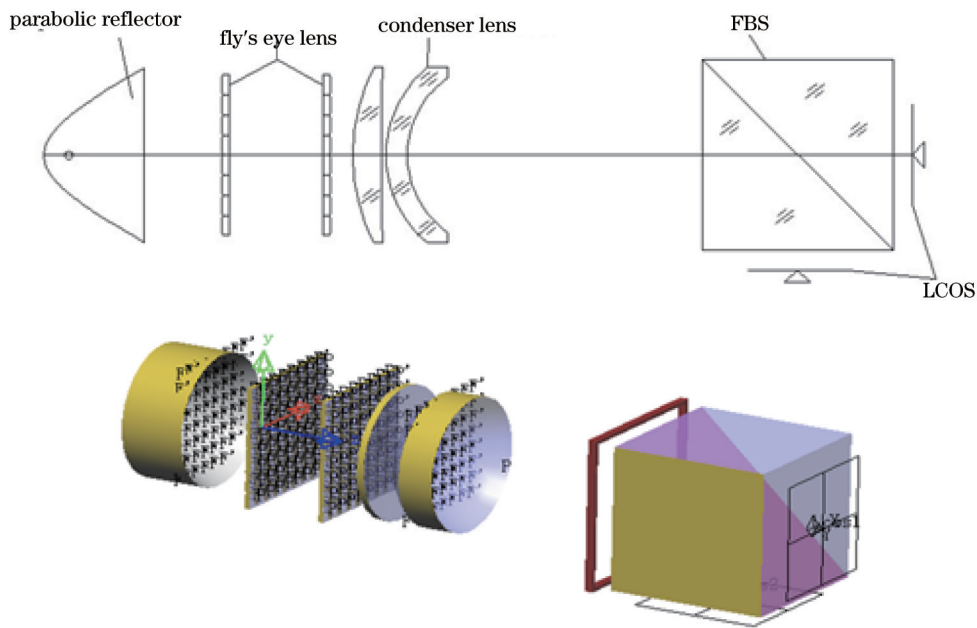


图 8 总体结构的示意图和仿真图

Fig.8 Sketch and simulation diagram for the overall structure

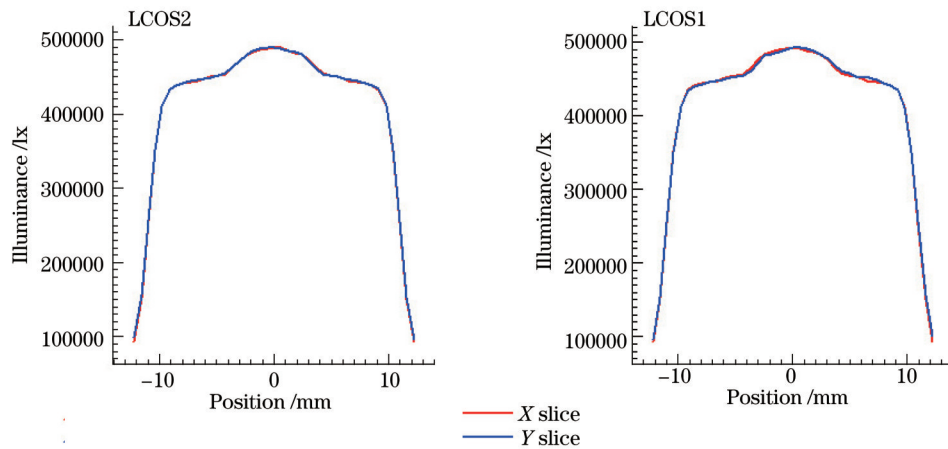


图 9 LCOS 表面照度值曲线图

Fig.9 Curves diagram of the surface illumination

4 仿真均匀性结果

经过Lighttools建模仿真,可得到LCOS表面的照度值。仿真结果如图9~11所示。

LCOS1和LCOS2的矩形接收区的照度分布线图较为平滑,横坐标表示接收面以正中心为原点相对的距离;纵坐标表示该接收面位置上的照度值。在-10~10 mm像面范围内,照度为0.44~0.48 lx/m²。说明表面照度的最大值和最小值接近,不均匀度经计算满足要求。

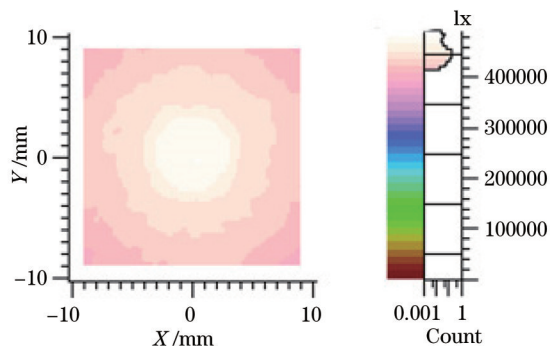


图10 LCOS1表面照度栅格图

Fig.10 LCOS1's surface illumination grid map

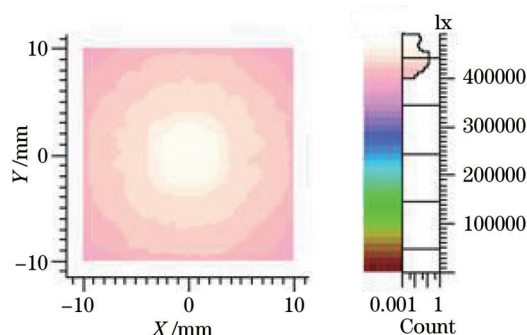


图11 LCOS2表面照度栅格图

Fig.11 LCOS1's surface illumination grid map

分析其栅格图。X,Y坐标表示相对于接收面正中心的距离,不同颜色表示不同照度值。栅格图中心附近照度均匀,由参数要求,LCOS显示表面区域为边长20 mm的矩形,所示区域正好可以满足光照均匀度需要。

表2 LCOS1表面照度结果

Table 2 Result of illumination for LCOS1's surface

Min	4.1201×10^5 lx
Max	4.9382×10^5 lx
Average	4.4896×10^5 lx
Uniformity error	9.03%

表3 LCOS2表面照度结果

Table 3 Result of illumination for LCOS2's surface

Min	3.97×10^5 lx
Max	4.9048×10^5 lx
Average	4.4116×10^5 lx
Uniformity error	10.53%

5 结论

光源和显示芯片等投影显示技术发展非常迅速,其应用中需要均匀度良好的照明系统。介绍了对于给定参数的LCOS照明系统的光源设计,其中着重介绍了抛物面反光碗、聚光镜组等设计。并对设计结果进行仿真分析,受照明的表面不均匀度小于15%,满足设计要求。

参考文献

- Hao Lifang. The Designing and Testing of New LCoS Type and Application Research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. 6-11.
- 郝丽芳. 新型LCoS芯片设计测试及应用研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2012. 6-11.
- Liu Kun. Stray Light Analysis of CF-LCoS Projection Optical Engine, Thermal Designing and Testing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- 刘 昆. CF-LCoS投影光引擎杂散光分析、散热设计及测试[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Song Jiajun, He Ping'an, Zhang Hongbo, et al.. The Color LED Illumination System Design of LCoS Light Engine of only One Chip [M]. Optoelectronic technology, 2006. 10.
- 宋家军, 何平安, 张红波, 等. 单片LCOS光学引擎中彩色LED照明系统设计[M]. 光电子技术, 2006. 10.

- 4 Zhao Shuang. Study on the Optical Engine of the Mini-Projector [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
赵爽. 基于LED的微型投影仪光学引擎关键技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- 5 He Xiaomin, Guo Huafu. Design and simulation for a fly's eye illuminating applied in LCOS optical mechanical system [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2008, 6(6): 61-63.
何晓敏, 郭华福. 一种应用于LCOS光机的复眼照明系统仿真设计[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(6): 61-63.
- 6 Gong Xianwei, Yu Weixing, Zhang Hongxin, *et al.*. Progress in design and fabrication of artificial compound eye optical systems [J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 34-45.
巩宪伟, 鱼卫星, 张红鑫, 等. 仿生复眼成像系统设计及制作的研究进展[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 34-45.
- 7 Liu Zhenjie. The CF-LCoS Micro Optical Engine with LED Illumination [D]. Hangzhou: ZheJiang University 2012. 7-15.
刘振杰. 高光效LED光源照明CF-LCoS微型光引擎[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 7-15.
- 8 Chen W B, Zheng Z R, Gu P F, *et al.*. Performance measurement of broadband, wide-angle polarizing beam splitter [J]. J Zhejiang University Science A, 2007, 8(2): 176-179.