

文章编号: 0253-2239(2007)05-0913-6

# 微型投影机光学引擎的研究

赵 星<sup>1</sup> 方志良<sup>1</sup> 崔继承<sup>2</sup> 张 新<sup>2</sup> 母国光<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)  
(<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130021)

**摘要:** 设计了一种针对个人用户使用的微型投影机光学引擎, 系统为单片式数字光线处理器结构, 采用红绿蓝三色大功率高亮度发光二极管作为光源, 使用 X 棱镜作为合色元件, 从而实现 38.1~50.8 cm 的彩色投影显示。对设计结果进行理论分析后可知, 设计结果满足投影显示对颜色的要求, 光学引擎的理论效率为 16.1%。同时利用 Light Tools 仿真软件对系统进行建模分析, 300 万条光线追迹仿真的结果表明, 光学引擎的效率为 14.6%, 与理论分析结果基本符合, 屏幕上光通量为 22.8 lm, 其美国国家标准协会规定的九点照度均匀性达到 91.55% 和 -93.36%, 满足设计要求。

**关键词:** 光学系统设计; 投影显示; Light Tools 软件; 发光二极管  
中图分类号: TB133; TN27; TN312.8 文献标识码: A

## Study on the Optical Engine of the Mini-Projector

Zhao Xing<sup>1</sup> Fang Zhiliang<sup>1</sup> Cui Jicheng<sup>2</sup> Zhang Xin<sup>2</sup> Mu Guoguang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, Ministry of Education, Tianjin 300071

<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022

**Abstract:** An optical engine of the mini-projector suitable for the personal use is designed. It is a single panel digital light processor (DLP) system by using LED as its illuminator and X prism as its mix-color device, which can provide a 38.1~50.8 cm color projection display. The theoretical analysis shows that the design can satisfy the need of the color projection display with the system efficiency 16.1%. The simulation by using the software is LightTools made. After three million rays are traced, it shows that the efficiency of the optical engine is 14.6% with flux 22.8 lm on the screen. The simulation results coincide with the theoretical analysis of the system efficiency. The ANSI nine-point uniformity of the screen is 91.55%, -93.36%, which can reach the specification of the design.

**Key words:** optical design; projection display; software LightTools; LED

## 1 引 言

近年来,商用投影机的发展和普及为各种大中型会议和展览提供了极大的方便。但是现有的商用投影机并不适合于个人消费者使用,如二至三人的微型会议、数码相机照片的显示、个人掌上电脑多媒体信息的显示等。相对于商用投影机,个人投影显示对显示尺寸的要求不高,通常在 0.5 m 的距离内投影出 50~67 cm 的图像完全可以满足使用要求。但个人投影显示需要投影机更加轻巧便于随身携

带,还要求投影机能够快速开关,同时还要具有更低的功耗、更长的使用寿命和相对低廉的售价。因此这种投影机被称为微型投影机或“口袋式”投影机。这些要求对于传统投影机来说是一个极大的挑战,尤其是现在广泛使用的弧光灯光源,它体积大、功耗和发热量高,寿命却很短,限制了其在个人投影领域的应用。

近十年来,发光半导体领域取得了飞速的发展,尤其是大功率高亮度发光二极管(LED)的出现,使

作者简介: 赵 星(1980-),男,北京人,博士研究生,主要从事投影显示和光学系统设计方面的研究。

E-mail: zhaoxingzhx@yahoo.com.cn

导师简介: 母国光(1931-),男,辽宁锦西人,中国科学院院士,教授,博士生导师,主要从事光学信息处理领域方面的研究。E-mail: mugg@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-06-13; 收到修改稿日期: 2006-08-21

其越来越受到人们的关注,并在民用固体照明领域掀起了一场新的革命<sup>[1,2]</sup>。LED 具有体积小、功耗和发热量低、长寿命等显著特点。这正好符合微型投影机的需求,然而 LED 本身所固有的光束发散角大、发光特性受温度影响大等缺点也是其用作投影光源所需要解决的问题。为此,本文针对微型投影机的特点,使用大功率高亮度 LED 作为投影光源,设计了包括照明系统和投影物镜在内的微型投影机光学引擎,并对设计结果进行了分析。

## 2 光学引擎设计

### 2.1 光学系统设计指标和系统结构

对于 50~67 cm 的投影显示,屏幕上至少需要光通量 20 lm,此时屏幕亮度与笔记本电脑的屏幕亮度基本相当<sup>[3]</sup>。另外,屏幕上美国国际标准协会(ANSI)规定的九点照度均匀性要求在 90% 以上,同时要求照明系统的照度均匀性大于 95%,投影物镜的照度均匀性大于 90%<sup>[4,5]</sup>。

光学引擎使用了单片 0.55" 数字光线处理器(DLP)芯片,因此投影物镜的具体指标为:f 数为 2.4,投影距离 0.5 m,投影屏幕对角线 50.8 cm,畸变小于 1%,36 线对的调制传递函数(MTF)值大于 0.5,像面照度均匀性不低于 90%。光学引擎的系统结构如图 1 所示。

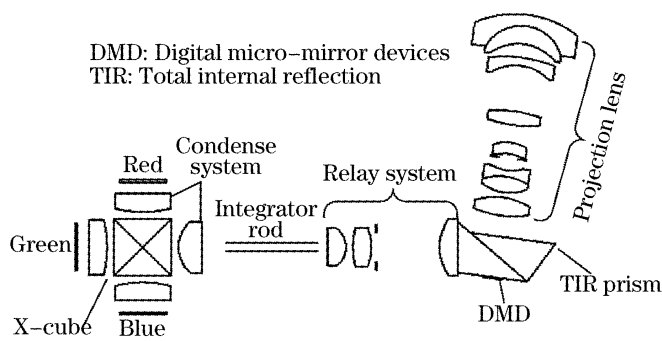


图 1 微型投影机的光学引擎

Fig. 1 Optical engine of the mini-projector

在图 1 中,整个光学引擎由照明系统和投影物镜两部分组成。其中照明系统包括 LED、X 棱镜、会聚系统、匀光方棒、中继系统、全内反射(Total internal reflection, TIR)棱镜和数字微镜器件(Digital micro-mirror devices, DMD)芯片。红绿蓝三色 LED 采用时序脉冲驱动, X 棱镜中的两个对角面能分别反射蓝光和红光,并且都能透过绿色光,因此能将红绿蓝三色光合并到一个共同的光路中; LED 发出的光束经过会聚系统入射中空的匀光方棒中进行匀光,并在方棒的出射端面形成均匀的照明; 中继

系统将方棒出射端面成像至数字微镜器件芯片表面; 全内反射棱镜则将照明光束和投影光束分离,以获得高对比度的图像显示。投影物镜把数字微镜器件芯片上的图像投影到屏幕上实现最终的显示。

### 2.2 照明系统

照明系统的设计结果如图 1 中所示。LED 光源采用美国 Lumileds 公司 Luxeon™ III 系列红绿蓝三色大功率高亮度 LED,其典型参量如表 1 所示。

表 1 Luxeon III 系列 LED 参量

Table 1 Parameters of Luxeon™ III LEDs

Color	Dominant wavelength /nm	Current /mA	Typical lumens /lm	Radiation pattern
Red	627	1400	140	Lambertian
Green	530	1000	80	Lambertian
Blue	470	1000	30	Lambertian

由于 LED 的发散角较大,为了提高会聚系统的收集效率,采用加拿大 Illumination Management Solutions (IMS) 公司的 SO20XA 型 Luxeon 系列 LED 专用准直器对光束进行准直,光束经过准直后 52% 的能量被压缩至  $\pm 6^\circ$  以内。

会聚系统由前后两片透镜组成,将经过准直后的  $\pm 6^\circ$  范围内的光束会聚至方棒入射端面,并在会聚系统中加入了 X 棱镜进行合色。一般来说, X 棱镜通常在液晶显示(LCD)投影系统的投影光路中作为合色器件使用<sup>[6]</sup>,根据它的原理和特点,将其置于照明光路中,与时序脉冲驱动三色 LED 配合使用就可以完全替代传统的白光光源和色轮。由于没有使用高速旋转的色轮,因此这种彩色显示实现方法使光学引擎结构更为简单、稳定,同时也降低了功耗。

中空方棒的尺寸为 4.8 mm × 3.6 mm × 40 mm,其横截面比例与数字微镜器件芯片相同都是 4:3。中继系统是一个远心系统,这是因为系统中的数字微镜器件芯片需要被远心照明。全内反射棱镜是由两块留有几十微米空气间隙的棱镜组成,当照明光束入射后在此空气间隙表面发生全内反射并照射到数字微镜器件表面,在经过数字微镜器件反射调制后成为投影光束,并在空气间隙表面发生折射,最终进入投影物镜。这样就利用全内反射将照明光束和投影光束分离开来,有效地减小了杂散光的影响,提高了像面衬比度<sup>[7]</sup>。

### 2.3 投影物镜

图 1 光学系统中使用的投影物镜是一种典型的反远距物镜<sup>[8]</sup>,根据其设计指标,进行光学设计结果如图 2 所示,其中 T 表示子午光线, S 表示弧午光线。

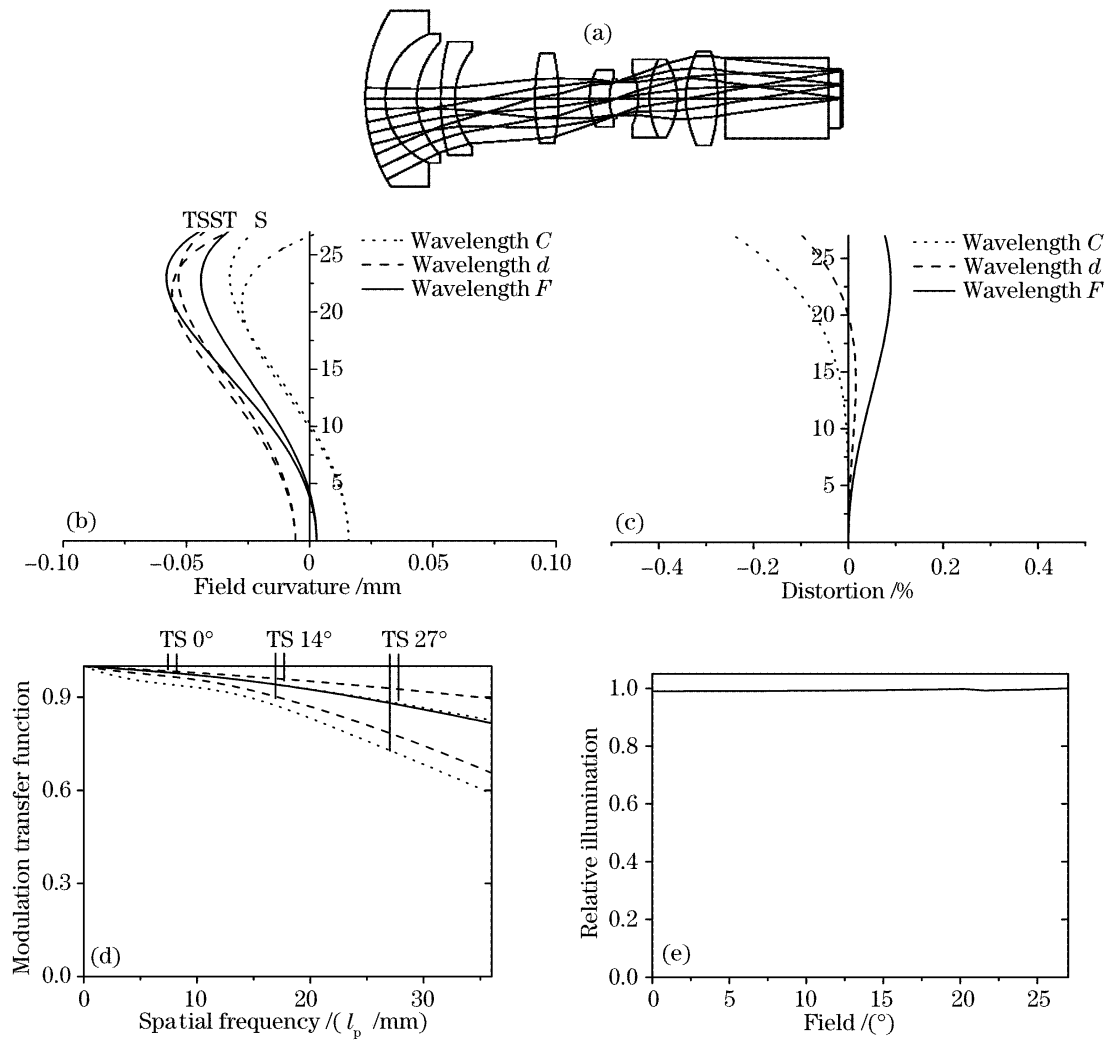


图 2 投影物镜设计结果。(a)结构图,(b)场曲,(c)畸变,(d)调制传递函数曲线,(e)相对照度

Fig. 2 Design results of the projection lens. (a) Layout, (b) field curvature, (c) distortion, (d) modulation transfer function curves, (e) relative illumination

该投影物镜的  $f$  数为 2.4, 焦距为 14 mm, 视场角为  $54^\circ$ , 镜头总长为 120.4 mm, 投影距离 0.5 m, 投影屏幕对角线大小为 50.8 cm。从图 2 的像差曲线可以看出系统的畸变小于 0.5%, 36 线对时最大视场的调制传递函数值可以达到 0.6, 且像面照度均匀性大于 95%, 因此设计结果完全符合设计指标。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 色度特性分析

光学引擎的色度特性主要受 LED 的光谱特性

和 X 棱镜中对角面上的镀膜特性影响。另外驱动 LED 的时序脉冲周期决定了其白场色度坐标和相关色温。为此, 我们从理论上设计了 X 棱镜中的两个膜系特性曲线, 使得其分别反射蓝光和红光, 并且都能透射绿光, 设计的膜系反射率曲线对 LED 的光能损失将不超过 5%。同时通过计算可以确定红绿蓝 LED 的时序脉冲周期比例分别为 42%, 25% 和 33%。将 LED 的光谱特性和膜系的理论设计结果代入色度学的基本理论<sup>[9,10]</sup>, 就可以得到其色度特性如图 3 和表 2 所示。

表 2 光学引擎的色度特性

Table 2 Colorimetric characters of the optical engine

		Illumination system		sRGB	
		$x$	$y$	$x$	$y$
	Red (R)	0.69744	0.30247	0.64	0.33
	Green (G)	0.2404	0.71406	0.30	0.60
	Blue (B)	0.1439	0.034609	0.15	0.06
White	Chromaticity coordinate	0.31064	0.33126	0.3127	0.3290
Field	Correlated color temperature	6605 K		6500 K	

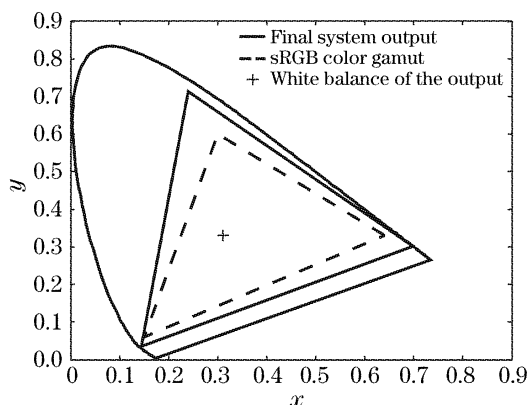


图 3 光学引擎的色度特性

Fig. 3 Colorimetric character of the optical engine

从图 3 中可以看到,最终输出的色三角完全包含了目前数字投影机常用的 sRGB 彩色规范,其面积比 sRGB 色三角大很多,这说明使用 LED 光源的光学引擎能够显示更加丰富的色彩。综合图 3 和表 3 的数据可知,使用 LED 作为投影光源的光学引擎其色度特性能够符合彩色显示的要求。

### 3.2 光学引擎的效率分析

光学引擎中的照明系统是一个典型的非成像系统,因此可以利用非成像理论对其进行系统效率的分析。根据非成像理论,当光束照射到一个光学器件上时,该光学器件的最大光能利用率为光束的光学扩展量与器件本身的光学扩展量的比值<sup>[11]</sup>。而形状为圆形的光源或器件,其光学扩展量表示为  $E = \pi A \sin^2 \theta$ ,其中  $A$  为面积, $\theta$  为发出或者接收到光束的半发散角;而形状为矩形的光源或器件,其光学扩展量的表达式为  $E = \pi A \sin \alpha \cdot \sin \beta$ ,其中  $\alpha$  和  $\beta$  分别为矩形长和宽方向上的光束半发散角。根据照明系统和投影物镜的光学设计结果,可以得到如表 3 所示的计算结果。

表 3 光学引擎的效率分析

Table 3 Analysis of the efficiency of the optical engine

	Étendue /(mm <sup>2</sup> · sr)	Maximum efficiency /%
Condense system		52
Input end of the rod		70.83
Rod		100
Light beam outputting from the rod	13.3	100
Object space of the relay system	21.76	100
Relay system		100
Light beam in image space of the relay system	14.91	85.68
Light illuminated on DMD	12.78	60
DMD		60
Projection lens and TIR prism		85
Total		16.1

表 3 中会聚系统的最大效率是指会聚系统理论上能收集经过准直后的  $\pm 6^\circ$  范围内占 LED 总能量 52% 的光束。方棒入射端的光能收集率是光束经过会聚系统后,在方棒的矩形入射端面内的光斑面积与整个圆形光斑面积的比值。数字微镜器件的效率是指其处于工作状态时由于自身工作原理和结构等因素限制,实际的投影光束与照明光束能量的比值,通常该数值为 60%<sup>[12]</sup>。投影物镜和全内反射棱镜的效率是考虑到其对光束的表面散射和反射以及玻璃对光束的吸收后得到的,其典型值为 85%。

根据 LED 厂商给出的测试结果可知,LED 在脉冲驱动情况下其输出的平均光通量与脉冲周期之间是一种非线性关系<sup>[2]</sup>。根据这一关系,可以得到在上述脉冲周期情况下,红绿蓝 LED 输出的平均光通量分别为 101 lm, 36 lm 和 19 lm,因此理论上屏幕表面可以得到 25.1 lm 的均匀照明,能够满足设计要求。

### 3.3 光学引擎建模与仿真

利用光学仿真软件 LightTools 进行建模与仿真,得到如图 4 所示的系统模型。其中 LED 光源和准直器使用平面光源建模,并根据光束经过准直器后的光强分布曲线设定平面光源模型的发光特性。红绿蓝 LED 的光通量,分别为 101 lm, 36 lm 和 19 lm。数字微镜器件建模为  $16 \times 12$  的微反射镜阵列。对该模型追迹 300 万条光线,得到方棒出射端面以及屏幕上的照度分布如图 5 所示。

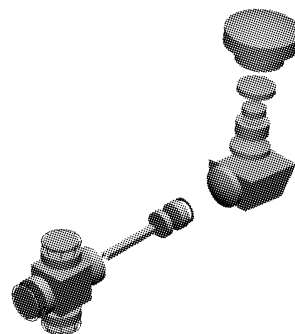


图 4 光学引擎在 LightTools 软件中的建模结果

Fig. 4 Model of the optical engine in software LightTools

图 5 左侧为接收面上照度的分布图,右侧是相应接收面上不同照度数值的分布情况。从右侧的照度分布情况可以看出左侧接收面上的照度分布比较均匀,其中在方棒出射端面上的美国国家标准协会规定的九点照度均匀性为 98.8% 和 97.85%;屏幕上的美国国家标准协会规定的九点照度均匀性为 91.55% 和 93.36%,满足大于 90% 的设计指标。此外,根据追迹结果可以得到光学引擎各主要分系统表面的光能量以及系统效率如表 4 所示。

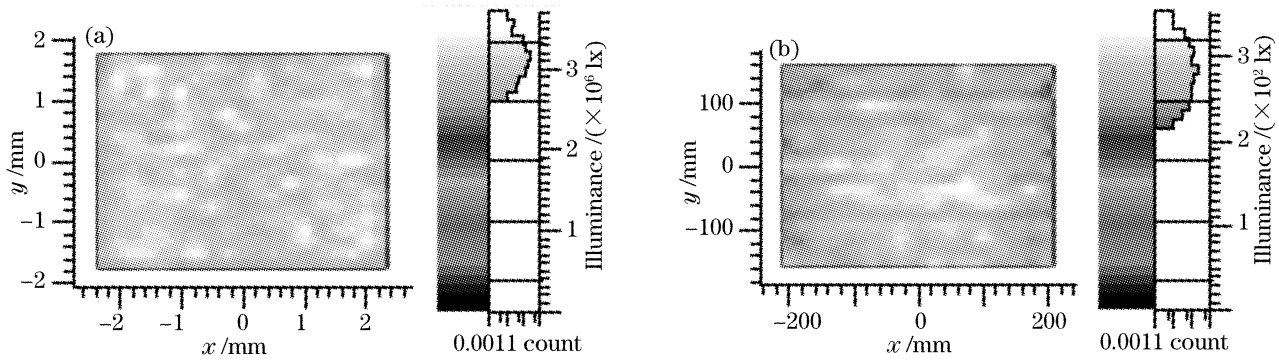


图 5 追迹 300 万条光线后的照度分布。(a) 方棒出射端面, (b) 屏幕

Fig. 5 Illumination distribution by tracing 3 million rays. (a) Output end of the rod, (b) screen

表 4 光线追迹结果的分析

Table 4 Analysis of the ray-tracing results

	Flux /lm	Maximum efficiency /%
RGB LEDs	156	
Condense system		41.5
Input end of the rod	64.8	
Rod		83.3
Output end of the rod	54	
Relay system		81.5
DMD	44	
Input surface of TIR prism in projection light path	26.4	60
Projection lens and TIR prism		86.4
Screen	22.8	
Total		14.6

由表 4 可知光学引擎的总效率为 14.6%, 与非成像理论的分析结果 16.1% 基本吻合。此外屏幕上的光通量为 22.8 lm, 达到了屏幕上光通量不低于 20 lm 的设计要求。

仿真结果与理论分析结果比较, 可以发现二者在会聚系统效率和光棒收集率上有较大差别。这是由于在光源的建模过程中, 其光强分布曲线模型与实际的曲线间存在误差, 同时由于光强集中于较小的角度范围内, 因此模型与曲线间的微小误差将会造成较多的能量降低。此外, 会聚系统自身的散射和吸收以及置于其中的 X 棱镜内反射薄膜对光能的损失都会降低会聚系统整体的效率。至于光棒收集率的差别, 是由于利用非成像理论进行计算的前提是光强均匀分布, 而实际光源的光强分布则是不均匀的, 因此会聚到方棒入射端时所形成的光斑内能量分布将是中心强边缘弱。故光棒的能量收集率将高于理论计算值。这两种误差相互抵消使得整体系统的效率与理论计算结果吻合得较好。

## 4 结 论

设计了一种微型投影机光学引擎, 采用 LED 新型光源使得系统具备体积小、重量轻、功耗低、发热量低以及长寿命等特点, 满足了供个人用户使用的要求。系统采用单片式 0.55" 数字光线处理器显示芯片, 使用了红绿蓝三色大功率高亮度发光二极管作为光源, 并且在照明系统中引入 X 棱镜, 从而替代了传统单片式数字光线处理器光学引擎中的弧光灯和色轮装置。对设计结果进行色度学分析可知, 该设计满足投影显示对颜色的要求。利用非成像理论和 LightTools 光学仿真软件对设计结果进行分析后表明, 光学系统效率的仿真结果与理论分析结果吻合得较好, 仿真结果显示屏幕上的最终光能输出达到 22.8 lm, 其美国国家标准协会规定的九点照度均匀性达到 91.55% 和 93.36%, 完全满足设计指标。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Narukawa. White-light LEDs[J]. *Opt. & Photon. News*, 2004, **15**: 24~29
- 2 Wang Weisheng, Jiang Wei, Dou Xiaoming. A LED light unit for the projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 855~859 (in Chinese)  
王蔚生, 姜 维, 窦晓鸣. 用于投影机的发光二极管照明单元[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 855~859
- 3 Matthijs H. Keuper, Gerard Harbers, Steve Paolini. GRB LED illuminator for pocket-sized projectors [C]. *International Symposium Digest of Technical Papers*, 2004. 943~945
- 4 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 (in Chinese)  
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
- 5 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 (in Chinese)  
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

- 6 Matthew Bone, Mel Francis, Peter Menard *et al.*. Novel optical system design for reflective CMOS technology[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3634**: 80~86
- 7 Simon Magarill. Optical system for projection display[P]. 1996, U. S. Patent, 5,552,922
- 8 Wang Zhijiang. *Handbook of Optical Technology* [M]. Beijing: China Mechine Industry Press, 1987. 1089~1096 (in Chinese)  
王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 1089~1096
- 9 Jing Qicheng, Jiao Shulan, Yu Bailin *et al.*. *Colourometry* [M]. Beijing: Science Press, 1979. 91~98, 279~282, 291~292 (in Chinese)  
荆其诚, 焦书兰, 喻柏林 等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 91~98, 279~282, 291~292
- 10 Li Changjun, Cui Guihua, Zhao Dazun *et al.*. A simple method for computing optimum weighting table for colorimetric tristimulus integration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1346~1353 (in Chinese)  
李长军, 崔贵华, 赵达尊 等. 一种计算色度学三刺激值加权表的新方法[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1346~1353
- 11 R. Winston. Nonimaging optics[J]. *Scient. Amer.*, 1991, **264**: 26~81
- 12 Chongmin Chang, HanPing D. Shieh. Design of illumination and projection optics for projectors with single digital micromirror devices[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(19): 3202~3208

## 中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于 2006 年 10 月 27 日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订,数量有限,欲购从速。四本教材主要内容包括:

### 1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题: 光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述,结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍,立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

### 2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个环节及其相关测控技术,培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术,特种光学元件加工技术,光学检测技术。

### 3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发,讲述光学薄膜在激光系统,光通信系统,显示系统中的应用,介绍极紫外和软 X 射线薄膜,功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

### 教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

### 征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

### 优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值 100 元的期刊阅读卡一张。

### 征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

### 邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 收款人: 光学期刊联合编辑部