

文章编号: 0253-2239(2010)11-3283-06

基于光栅光调制器的投影物镜设计

史玲娜¹ 潘英俊² 董光先³

(¹重庆交通大学理学院, 重庆 400074; ²重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)
³重庆市计量质量检测研究院, 重庆 400020)

摘要 设计了一种在发光二极管(LED)光源照明下,基于 $4f$ 信息处理系统的光栅光调制器的投影物镜。对经光栅光调制器的衍射光进行滤波处理,实现对调制后像的投影放大显示。设计结果表明:该物镜总长 70.71 mm,最大口径 12.40 mm;整体像差控制在理想范围之内,可以满足成像要求。根据设计结果搭建实验系统,实验结果与理论分析一致,说明了设计的可行性。

关键词 光学设计;投影显示;光栅光调制器; $4f$ 信息处理;发光二极管

中图分类号 TH741.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3283

Projection Objective Design of Grating Light Modulator

Shi Lingna¹ Pan Yingjun² Dong Guangxian³

(¹College of Science, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)
²School of Opto Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China
³Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing 400020, China)

Abstract The projection objective of grating light modulator based on $4f$ signal processing system is designed, which uses LED as light source. By filtering the diffracted light via grating light modulator, the modulated image is amplified and projected. The design result shows that the total length of projection objective is 70.71 mm, and the biggest caliber is 12.40 mm. The whole aberration is controlled within an ideal range, which can satisfy the image-forming requirement. The experimental system is built based on the design result, and the experimental result is in according with theoretical analysis, which shows the feasibility of the design.

Key words optical design; projection display; grating light modulator; $4f$ information processing; LED

1 引言

随着信息产业的迅速发展,投影仪的应用领域越来越广,便携化、微型化成为目前投影仪发展的必然趋势,对各种应用于投影显示的新型光调制器及光学系统的研究成为这一领域的研究热点^[1~4],如对德州仪器公司的数字微镜(DMD)及数字化光处理(DLP)光学系统的研究^[5~7],对硅基液晶(LCOS)及相应的投影显示系统的研究等^[8,9]。重庆大学在比较了各种用于投影显示的光调制器及相应光学系统的优缺点之后,研制出了具有自主知识产权的光栅光调制器(GLM)^[10,11],同时结合发光二极管

(LED)光源的优势研制新型投影仪,不仅结构简单、易形成面阵,并且调制对比度高,响应速度快,可以达到系统的微型化和低成本化,具有良好的应用前景。

在对光栅光调制器的投影物镜设计上,由于光栅光调制器是基于衍射原理设计,其投影物镜的设计必须考虑空间滤波的信息处理,并且在采用 LED 作为照明光源时,需根据 LED 照明下光栅光调制器的信息处理特点设计合适的投影物镜,这对光栅光调制器最终走向产业化及提高我国在投影显示领域的核心竞争力有着极为重要的意义。本文在使用大

收稿日期: 2009-12-02; 收到修改稿日期: 2010-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(60976084)和重庆市自然科学基金(CSTC,2009BB3352)资助课题。

作者简介: 史玲娜(1977—),女,讲师,主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: sln1013@163.com

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)。

功率 LED 作为光栅光调制器照明光源的情况下,设计了基于 4f 信息处理系统的光栅光调制器的投影物镜,并对设计结果进行了分析。

2 技术原理

2.1 光栅光调制器工作原理

图 1 是已加工出来的光栅光调制器,该器件主要包括一个上层的可动光栅面和下层的反射面。光射到调制器的上下表面被反射后,发生衍射。在忽

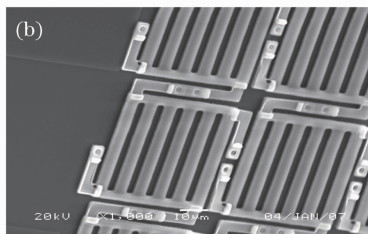
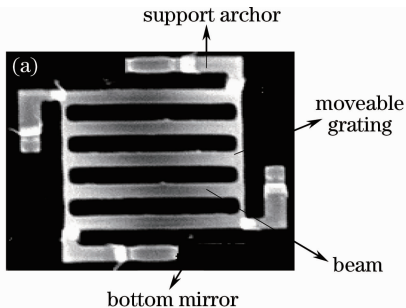


图 1 光栅光调制器结构(a)及光栅光调制器阵列(b)

Fig. 1 Grating light modulator (a) and 2D grating light modulator array (b)

该调制器的光程差 h 可通过施加电压加以改变。在未加电压时,可动光栅面与下反射面之间的光程差为 $h_1 = k\lambda/2$,相位差 $\phi_1 = 2k\pi$,频谱面上能量主要集中在 0 级,施加电压后,支撑梁在静电力作用下做垂直上下运动,带动光栅面作相同运动,从而使上下反射面之间的光程差变为 $h_2 = (2k+1)\lambda/4$,相位差 $\phi_2 = (2k+1)\pi$,频谱面上能量主要集中在 ± 1 级,如果在频谱面上放置一个空间滤波器,只让 0 级光通过,则当 $h = k\lambda/2$ 时,投影面上显示为亮点,当 $h = (2k+1)\lambda/4$ 时,投影面上显示为暗点,从而实现明暗调制的效果,达到显示的功效。

略调制器周围的边框和支撑梁对衍射影响的情况下,器件的透射率函数可表示为

$$t_p(x,y) = \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x+md}{a}\right) + \exp\left(\frac{j4\pi h}{\lambda}\right) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x+md+d/2}{a}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W}\right), \quad (1)$$

式中 a 为光栅条的宽度, d 为光栅常数, h 为下反射镜和上光栅面之间的光程差, L 为调制器沿光栅周期方向的宽度, W 为光栅条的长度。

2.2 LED 光源照明下光栅光调制器投影系统工作原理

根据光栅光调制器的调制原理,需要在器件的频谱面上滤出 0 级衍射光用于投影显示,这里采用典型的 4f 信息处理系统进行分析。如图 2 所示,采用 LED 光源时,设光源芯片为矩形状且均匀发光,长和宽分别为 l 和 w ,位于 x_0y_0 平面,所发出的光沿 z 方向传播,其光强在 x_0y_0 平面内的分布为 $I(x_0, y_0)$,这样由冯·西特-泽尼克定理^[12]可得 x_1y_1 平面(即器件所在平面)上 P_1 点和 P_2 点的互强度为

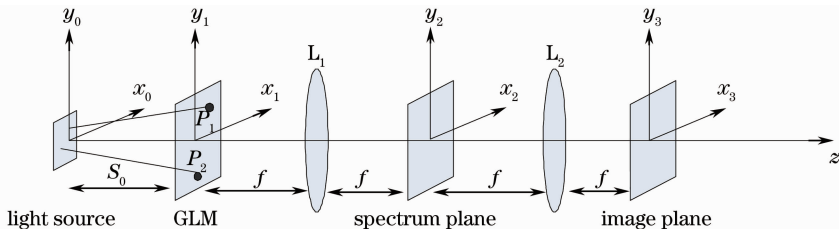


图 2 GLM 的信息处理系统光路图

Fig. 2 Information processing system of GLM

$$J_1(x_1, y_1; x'_1, y'_1) = \frac{\exp\left[\frac{j\bar{k}}{2S_0}(x_1^2 + y_1^2 - x'^2_1 - y'^2_1)\right]}{\bar{\lambda}^2 S_0^2} I_0 l w \text{sinc}\left[l \frac{(x_1 - x'_1)}{S_0 \bar{\lambda}}\right] \text{sinc}\left[w \frac{(y_1 - y'_1)}{S_0 \bar{\lambda}}\right], \quad (2)$$

式中 $\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\bar{\lambda}$ 是入射光平均波长, S_0 是从光源到 GLM 的距离。根据互强度传输理论,可得器件频谱面上衍射光强分布为^[13]

$$I(x_2, y_2) = \frac{I_0}{\lambda^2 S_0^2} \left| T\left(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}\right) \right|^2 \otimes \text{rect}\left(\frac{x_2}{l}\right) \text{rect}\left(\frac{y_2}{w}\right). \quad (3)$$

(3)式说明在 LED 光源照明下,光栅光调制器的衍射光强分布是调制器透射率函数傅里叶变换模的平方与入射光源光强分布的卷积,每级衍射光都包含有光源的像。当频谱面上 0 级和±1 级衍射光可以区分时,在频谱面上设置空间滤波器只允许零级衍射光通过,即可进行空间滤波。

频谱面的互强度通过透镜后,到达观察屏的互强度为

$$J_3(x_3, y_3; x'_3, y'_3) = \exp\left\{j \frac{k}{2f} [(x_3^2 + y_3^2) - (x_3'^2 + y_3'^2)]\right\} t(-x_3, -y_3) \times t^*(-x_3', -y_3') J_1(-x_3, -y_3; -x_3', -y_3'). \quad (4)$$

当两点重合时,即 $x_3 = x'_3; y_3 = y'_3$,即可得观察屏的光强分布为

$$I_3(x_3, y_3) = \frac{I_0 l w}{\lambda S_0^2} t(-x_3, -y_3) t^*(-x_3, -y_3). \quad (5)$$

(5)式说明最终在观察屏上可以重新得到调制器的像,并且对于 4f 系统而言,像的大小与调制器的大小是一比一的关系,当在投影系统频谱面上设置空间滤波器,将零级衍射光作为投影光时,(5)式中的 t 只包含调制器的零频成份,也即观察屏上得到的只是零级衍射光所成的像,当对器件进行明暗调制时,即可在观察屏上得到所需的明暗显示。

从以上分析可以看出,采用 LED 作为光栅光调制器的照明光源,利用 4f 信息处理系统进行投影成像,在器件频谱面上得到经扩展的衍射光场分布,在观察屏上依然得到调制器的像,通过设计合适的投影物镜,即可在屏幕上得到高效的投影显示像。从而可以实现在 LED 光源照明下利用光栅光调制器作为光调制器件的投影成像,这对突破国外产品的技术垄断,提升我国在投影显示技术的水平和核心竞争力方面具有重要的科学意义。

3 基于 4f 信息处理系统的投影物镜设计与分析

在光学信息处理中,用于光学傅里叶变换和 4f 光学信息处理系统的透镜称为傅里叶变换透镜^[14]。傅里叶变换透镜的设计需要同时考虑两对共轭位置的像差,并且根据频谱关系透镜还须满足正弦条件。

而对应光栅光调制器的 4f 光学信息处理,只是对衍射零级或±1 级进行滤波,用于光栅光调制器的傅里叶变换透镜,只是将衍射光重新变换成像,用普通的投影透镜就可以替代。因此,在光栅光调制器的投影物镜设计中,主要是利用 4f 信息处理系统的思想来设计投影物镜。

当光栅光调制器的照明聚光系统的像方孔径角被设计成 20°时,其数值孔径为 0.34。根据光能利用率要求,设计中将投影物镜的数值孔径设定为 0.34,再根据光栅光调制器阵列的尺寸为 0.064 mm,光学系统的调制传递函数(MTF)设计只要达到 7.81 lp/mm 即可。此外,对于投影成像系统而言,最终在屏幕上得到的是一个放大的经滤波后的光栅光调制器的像,根据屏幕尺寸和观看距离之间的关系将投影物镜的垂轴放大率 β 设为 50。由于系统的相对孔径较大,并且根据系统总体要求,焦距不能过长,此时透镜厚度的影响不能忽略,这种物镜相对比较复杂。设计中先采用如图 3 投影物镜组部分所示的两组完全相同的 4 片式 F 数为 1.6、焦距为 15.00 mm 的 4f 系统透镜组实现图像信息的空间频谱转换与滤波成像,再经过一组 4 片式焦距为 8.50 mm 的放大透镜组将经滤波后的器件像放大 50 倍成像于距投影透镜组 1.5 m 处的屏幕上。根据成像要求及像差质量优化得到 4f 系统中每组透镜组的参数和放大透镜组的参数分别如表 1 和表 2 所示。该投影物镜组中每个透镜均采用球面设计,避免了非球面设计在加工上可能导致的高成本。利用 Code-V 光学软件设计,整个透镜组系统前焦距 4.97 mm,后焦距 13.74 mm,最大口径 12.40 mm,组成的投影物镜系统总长 70.71 mm。图 3 为光栅光调制器的整体投影系统结构,从 LED 光源发出的光经照明聚光系统后均匀照射到光栅光调制器表

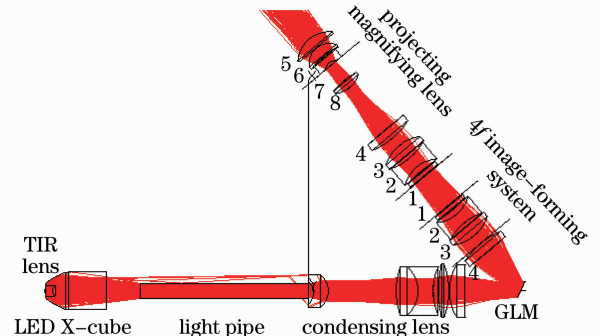


图 3 基于 4f 信息处理结构的 GLM 光学投影系统
Fig. 3 Optical projection system of GLM based on 4f information processing structure

面,经过光栅光调制器调制后的衍射光经过该投影物镜组后,先通过空间频谱滤波与转换,再经过投影放大物镜进行放大,最终在像面上得到较为满意的成像效果,可以满足投影系统的性能指标要求。

表 1 $4f$ 信息处理系统中投影透镜组的结构参量

Table 1 Configuration parameter of battery of projecting objective for $4f$ information processing system

Lens	Material	Radius / mm	Distance between lens /mm	Refractive index
Lens1	LaF2	-137.94 20.04	1.64	1.74795
Lens2	SK10	15.13 -11.00		
Lens3	SF1	-9.38 15.13	4.11	1.7231
Lens4	SF4	71.92 -25.82		

表 2 投影放大透镜组的结构参数

Table 2 Configuration parameter of battery of projecting magnifying objective

Lens	Material	Radius / mm	Distance between lens /mm	Refractive index
Lens5	PSK3	8.39 0	0.05	1.5544
Lens6	SK16	5.39 15.24		
Lens7	SF4	0 5.21	6.00	1.76166
Lens8	SF4	19.66 -7.27		

图 4 为 $4f$ 成像系统投影物镜的设计结果,其中图 4(a)为 MTF 曲线,从图中可见,从轴外 0.3 视场到全视场的 MTF 都在 60% 以上,总体达到了较高水平,体现了较好的成像质量。图 4(b)的光束像差曲线全面反映了光束的成像质量,图中左侧对应子午光束的垂轴像差曲线,右侧对应弧矢垂轴像差曲

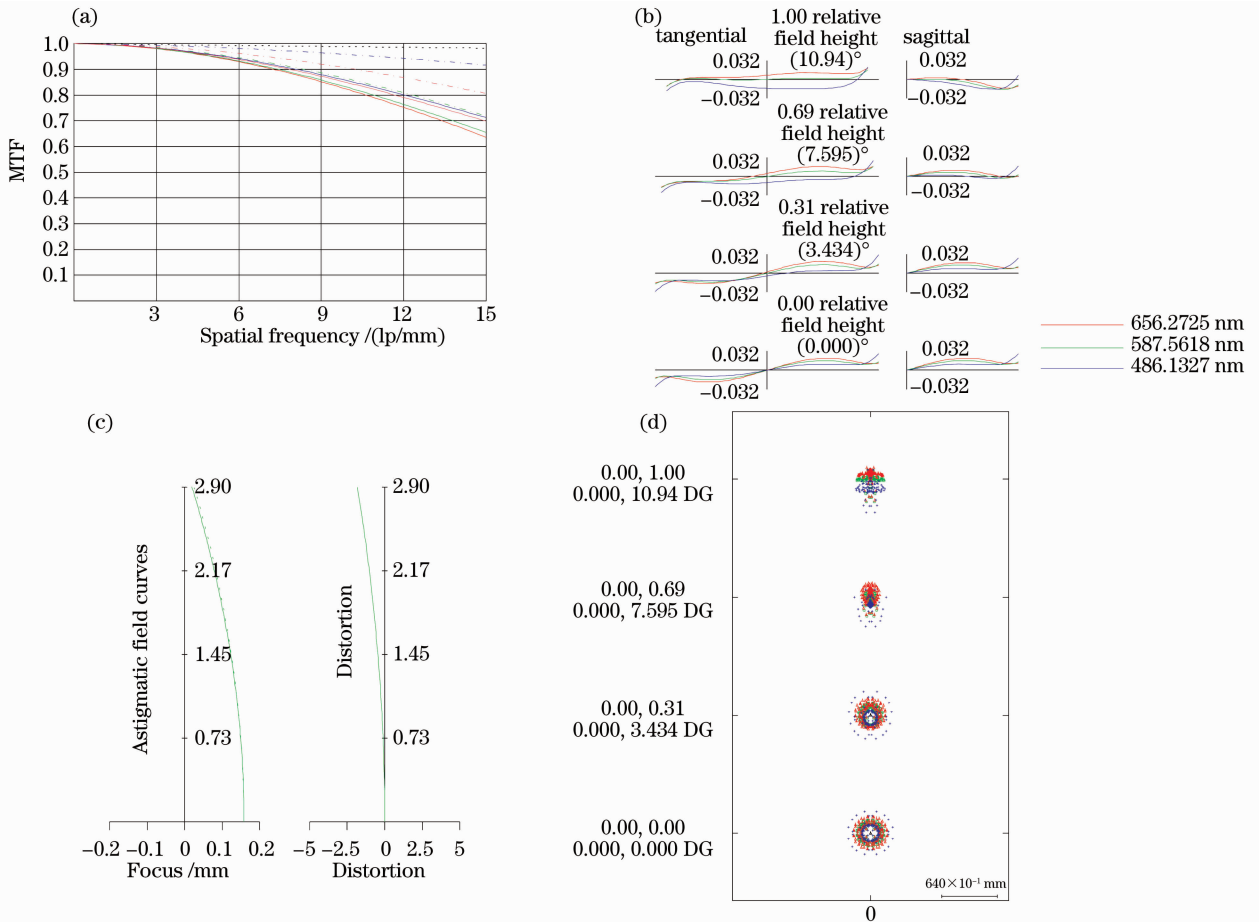


图 4 投影物镜设计结果。(a)MTF 曲线,(b)光束像差、色差曲线,(c)像散、畸变曲线,(d)点列图

Fig. 4 Design results of the projection objective. (a) MTF curve, (b) ray aberration and chromatism curve,

(c) astigmatic and distortion curve, (d) plot diagram

线,从上到下分别为 1.0,0.69,0.31,0 不同视场的子午和弧矢垂轴像差曲线,不同颜色表示不同波长的光线,即该图亦可表示出垂轴色差的大小。图中纵坐标代表像差,横坐标代表口径,每一条曲线代表一个视场的子午光束或弧矢光束在像平面上的聚焦情况。该曲线越接近横坐标,表示所有光线在像平面上越集中于一点,成像质量越好。从图中可见,所有子午光束和弧矢光束的垂轴像差都在 0.032 mm 以内,说明系统轴外光束的成像质量较好。图 4(c)和图 4(d)的光线像差、畸变和点列图的仿真分析结果表明,该投影物镜点列图尺寸小于光栅光调制器像素尺寸,全视场像差比较小,同时保持视场畸变小于 2.50%,足以满足成像系统的要求。

4 实 验

为了验证理论分析的正确性和仿真设计的合理性。根据设计结果搭建了红绿蓝三色 LED 光源的彩色光栅光调制器投影成像实验系统,该实验所用 LED 光源的中心波长分别为 625,530 和 455 nm,芯片尺寸均为 1.1 mm×1.1 mm,器件阵列为 64×64 的光栅光调制器阵列,其尺寸为 2 mm×2 mm。

在该实验装置中,从三色 LED 发出的光经由 X 棱镜合色的照明系统后均匀照射到光栅光调制器阵列上,经过光栅光调制器阵列的衍射光通过根据上述设计结果搭建的投影物镜组后,在与光源满足物像共扼关系的位置形成光栅光调制器的衍射图样,根据理论分析结果,各级次的衍射图样都包含有光源的像。图 5 正是利用该装置得到的光栅光调制器的衍射图样,图中除零级衍射光外,±1 级衍射光由于三色入射光波长不同,在空间位置上依次分开,并且各级衍射图样与光源芯片形状一致,与理论分析的结果相同。由于成像所需的衍射光为零级衍射光,光栅光调制器对不同波长入射光的色散性不会对空间滤波带来不利影响。

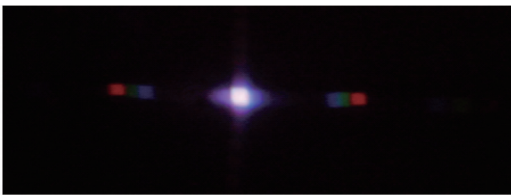


图 5 LED 照明的光栅光调制器衍射图样

Fig. 5 Diffracted pattern of the grating light modulator illuminated by LED

实验中在光栅光调制器的衍射频谱面位置进行空间滤波,只允许零级光通过,则在像面上出现被调

制后的光栅光调制器的像,图 6 为利用零级衍射光投影成像得到的实验结果。从图中可以清楚地看出,投影得到的图像中,与调制器相位差满足 $2k\pi$ 部分对应为亮态,与调制器相位差满足 $(2k-1)\pi$ 部分对应为暗态,总体成像结果较为理想。该光栅光调制器的图像再现从实验角度验证了用 LED 用于光栅光调制器照明光源时该投影物镜设计的可行性和合理性。

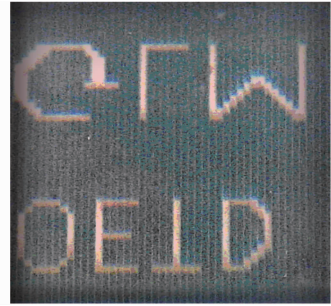


图 6 光栅光调制器零级衍射光的投影成像实验结果

Fig. 6 Projection image of GLM with the zero-order diffraction light

5 结 论

根据光栅光调制器的光学调制原理,设计了在 LED 光源照明下的基于 $4f$ 信息处理的投影物镜组。系统采用两组完全相同的 4 片式透镜组构成 $4f$ 信息处理系统,在完成频谱处理和空间滤波后再采用一组 4 片式放大透镜组将调制后的像投影到目标屏幕上。整个投影物镜组结构紧凑,该物镜组总长 70.71 mm,最大口径 12.40 mm,具有体积小、重量轻的特点,加之 LED 光源的优势使系统功耗低、发热量低,可满足微型投影仪系统的性能指标要求。

对设计结果进行分析可知,经过该投影物镜组后,像差分析均达到较高的水平,总体成像质量较好,足以满足成像系统的要求。利用光学平台对设计结果搭建实验系统,在频谱面和投影屏幕分别得到器件的各级衍射光和器件的像,从实验上验证了在 LED 用于光栅光调制器的照明光源下基于 $4f$ 信息处理系统的投影物镜设计的可行性。

参 考 文 献

- 1 A. Nakano, A. Honma, S. Nakagaki *et al.*. Reflective active matrix LCD: D-ILATM[C]. *SPIE*, 1998, **3296**: 100~104
- 2 C. L. Bruzzone, J. J. Ma, D. J. W. Aastuen *et al.*. High-performance LCOS optical engine using cartesian polarizer technology [C]. *SID Symposium, Digest*, 2003, **34** (1): 126~129
- 3 Jia Wei, Zhou Changhe, Dai Enwen *et al.*. Fabrication of low-density blazed gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (2):

- 183~186
- 贾 伟,周常河,戴恩文等. 低密度台阶形闪耀光栅的制作[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 183~186
- 4 Li Wei, Liang Jingqiu, Li Xiaoqi *et al.*. Design and simulation analysis of a micro optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1151~1154
- 李 伟,梁静秋,李小奇等. 一种微型光开关的设计与仿真分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1151~1154
- 5 J. B. Sampsell. An overview of the digital micromirror device (DMD) and its application to projection displays [J]. *SID Symposium, Digest*, 1993, **24**: 1012~1015
- 6 D. Scott Dewald, D. J. Segler, S. M. Penn. Advances in contrast enhancement for DLP projection displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2003, **11**(1): 177~181
- 7 Wang Dapeng, Wei Sui. Characterization of a digital micromirror device for computer generated holographic video[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 50~55
- 王大鹏,韦 穗. 数字微镜器件在视频全息中的应用[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 50~55
- 8 Chen Chienchung, Tsai Chengmu, Fang Yichin. Optical design of LCOS optical engine and optimization with genetic algorithm [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, **8**(5): 293~305
- 9 Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Mingliang *et al.*. Laser speckle reduction in retina imaging illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 李 抄,姜宝光,夏明亮等. 用于人视网膜成像照明的激光消散斑技术研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 10 Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao *et al.*. Optical characteristics analysis and simulation of grating light valve[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1452~1456
- 张 洁,黄尚廉,付红桥等. 光栅光阀的光学特性分析和仿真[J]. 光学学报, 2005, **25**(11): 1452~1456
- 11 Sun Jiyong, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Optical analysis and experiments of two-dimensional grating light modulator array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1136~1140
- 孙吉勇,黄尚廉,张 洁等. 二维光栅光调制器阵列的光学分析与实验[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1136~1140
- 12 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1981. 671~676
- M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 科学出版社, 1981. 671~676
- 13 Shi Lingna, Huang Shanglian, Sun Jiyong *et al.*. Optical performance analysis and experiment of grating light modulator with LED light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2225~2231
- 史玲娜,黄尚廉,孙吉勇等. LED照明的光栅光调制器光学特性分析与实验[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2225~2231
- 14 Xu Jin, Wang Zhonghou. A new long focal length Fourier transform lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11): 1046~1049
- 徐 进,王忠厚. 长焦距傅里叶变换透镜的小型化[J]. 光子学报, 1998, **27**(11): 1046~1049