

文章编号: 0258-7025(2010)03-0663-05

# 微光机电系统光栅平动式光调制器的激光投影研究

张智海<sup>1,2</sup>

(重庆大学<sup>1</sup> 光电技术及系统教育部重点实验室,<sup>2</sup> 新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 重庆 400044)

**摘要** 提出了一种新颖的面向激光投影的微光机电系统(MOEMS)光栅平动式光调制器(GMLM),利用衍射原理对光进行动态调制,具有较简单的工艺和投影光学系统。介绍了 GMLM 的光调制原理和以 GMLM 阵列为核心器件的投影光学系统的构成。建立了 GMLM 的等效光学模型,用标量衍射方法推导出了 GMLM 经过投影光学系统成像的夫琅禾费衍射图样复振幅分布。搭建了 GMLM 投影演示系统,进行了静态投影和动态投影实验。实验验证了上述公式的正确性,并且验证了 GMLM 光调制原理和投影成像原理。

**关键词** 微光机电系统;光栅平动式光调制器;标量衍射;激光投影显示

**中图分类号** TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0663

## Study of Laser Projection Display Based on Micro-Opto-Electro-Mechanical System Grating Moving Light Modulator

Zhang Zhihai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Opto-Electronic Technology and System, Ministry of Education,  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** A novel micro-opto-electro-mechanical system(MOEMS)-based light modulator for laser project display is proposed, which is called grating moving light modulator (GMLM). It can modulate light by diffraction, and has a simple fabrication process and projection optical system. The light modulation theory and the projection optical system of GMLM are introduced. The optical model of GMLM is found to deduce the Fraunhofer diffraction pattern through the projection optical system based on the scalar diffraction method. The static and dynamic projection experiments of GMLM array are completed by the projection demo system. The results demonstrate the operation and projection principle of GMLM.

**Key words** micro-opto-electro-mechanical systems; grating moving light modulator; scalar diffraction; laser projection display

## 1 引言

在 20 世纪 90 年代中后期,微机电系统(MEMS)技术和光学技术融合产生了微光机电系统(MOEMS)技术。基于 MOEMS 技术制造的光调制器具有微型化、集成化、智能化、重量轻、成本低、可靠性高、寿命长、可批量生产等突出优点,其得到了迅速的发展。在这类器件中,以数字式微反射镜器件(DMD)及光栅光阀(GLV)为代表。DMD 是由 MOEMS 技术制造的上百万个可偏转的反射微镜构成的调制器阵列<sup>[1,2]</sup>,其在投影市场中所占有

的份额已经超过 LCD<sup>[3]</sup>,但由于其铰链式微镜在加工中使用了三层铝合金薄膜的复杂工艺,导致成品率偏低。GLV 是利用衍射原理制造的可动光栅线阵<sup>[4]</sup>,其商业投影机已经由 SONY 和 Evans & Southerland 公司开发出来并投入市场应用。GLV 由于使用激光光源有更丰富的色彩表现力,其独特的结构使显示像素间没有间隙,形成真正的无缝显示。但 GLV 的结构、材料和工艺限制其只能形成线阵,必须附加光学扫描机构才能展开画面,这使其体积偏大,光路复杂。

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-09

基金项目: 重庆市院士基金(CSTC2008BC3002)资助课题。

作者简介: 张智海(1975—),男,博士,讲师,主要从事仪器科学与技术方面的研究。E-mail: zzhincq@163.com

本文提出了一种新颖的可以用于激光投影显示的光栅平动式光调制器(GMLM),这是基于MOEMS技术,在硅片上分层构造而成的器件,GMLM阵列比DMD制造工艺简单,而又克服了GLV只能形成线阵、必须附加光学扫描机构的弱点<sup>[5~7]</sup>。

## 2 GMLM结构与光学调制原理

GMLM每个像素大小为 $52\ \mu\text{m}$ ,结构如图1所示。在底层反射面正上方,制作一个四角用悬臂梁支撑的顶层反射面,悬臂梁呈旋臂方式布局。在顶层反射面上,蚀刻出镂空的光栅。顶层反射面和底层反射面之间的间距可变。光栅平动式光调制器的工作状态在反射和衍射之间切换,从而在出光方向形成亮态或暗态。考虑其光学原理,实际上是利用中心有效光学区域中镂空光栅的上下平动,与相对不动的底部反射面形成一个相位可调的矩形槽光栅,其等效光学模型如图2所示。

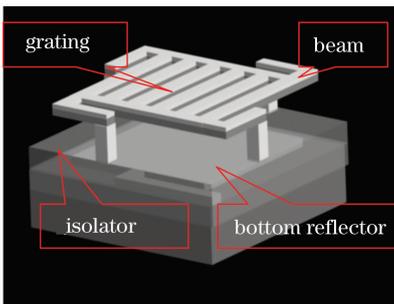


图1 GMLM单像素结构图

Fig.1 Structure of GMLM pixel

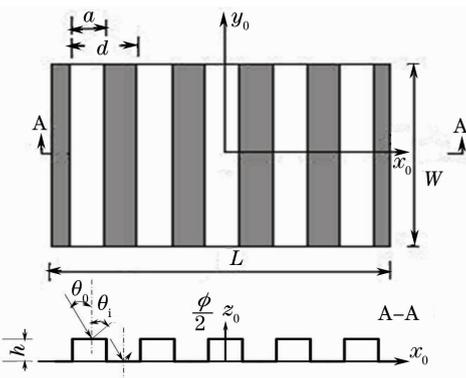


图2 GMLM等效光学模型

Fig.2 Optical model of GMLM

因为现有设计的光栅常数满足标量衍射的理论<sup>[8]</sup>,所以下推导都是基于标量衍射理论的。针对这里使用的有限面积光栅,其复振幅反射率函数为<sup>[9]</sup>

$$t(x_0, y_0) = \left\{ [\exp(j\phi) - 1] \text{rect}\left(\frac{x_0}{a}\right) \times \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_0}{d}\right) + 1 \right\} \text{rect}\left(\frac{x_0}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_0}{W}\right), \quad (1)$$

式中 $a$ 为顶层光栅的条宽, $d$ 为光栅周期, $L$ 为一个像素的长度, $W$ 为一个像素的宽度。利用卷积定理,可求出光栅的频谱为

$$T(f_x, f_y) = [\exp(j\phi) - 1] \frac{aLW}{d} \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[L\left(f_x - \frac{n}{d}\right)\right] \text{sinc}(Wf_y) + LW \text{sinc}(Lf_x) \text{sinc}(Wf_y), \quad (2)$$

式中 $\phi$ 表示一个周期内矩形相位光栅顶层反射面和底层反射面相干光线的相位差,经推导得

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ h(\cos \theta_0 + \cos \theta_i) + \frac{d}{2} \cdot (\sin \theta_i - \sin \theta_0) \right], \quad (3)$$

式中 $\lambda$ 为入射光波长, $\theta_0$ 为入射角, $\theta_i$ 为衍射角, $h$ 为矩形相位光栅深度,即上下反射面间距。 $\theta_i$ 可由 $\sin \theta_i - \sin \theta_0 = \frac{m\lambda}{d}$ 得出,其中 $m$ 为衍射级次。由此在GMLM的衍射光路上,以光阑进行适当的过滤有两种选择,即收集0级或收集 $\pm 1$ 级衍射光,而且这两种方法都能在之后的投影成像面上形成亮态或暗态。当 $h = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}$ 时,收集 $\pm 1$ 级衍射光的光能利用率为81%。

## 3 GMLM经过投影光路的成像

GMLM的相干成像滤波系统如图3所示。其中,L1为准直透镜,L2是焦距为 $f$ 的傅里叶变换透镜(投影透镜),P1,P2和P3分别为物面、谱面(衍射光滤波平面)和像面。在物面放置GMLM,用来照明的光源S采用激光。各级衍射光在衍射光滤波

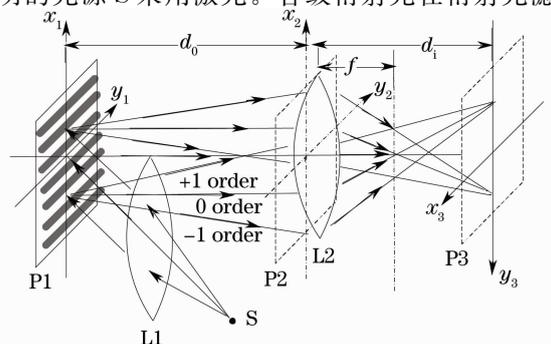


图3 GMLM成像滤波系统

Fig.3 Imaging and filter system of GMLM

平面上经过适当的狭缝滤波,再经 L2 变换成不同方向的平面波分量,在 P3 平面重新相干叠加,产生 GMLM 的像。

该投影系统光路属于衍射受限系统,可以用阿贝(Abbe)于 1873 年提出的衍射成像理论来分析其成像过程<sup>[10]</sup>。设  $f_x = \frac{x_2}{\lambda d_0}$ ,  $f_y = \frac{y_2}{\lambda d_0}$ 。采用单位振幅平面波垂直照明,几何光学理想像的场分布正比于 GMLM 的反射率函数,即

$$U_g(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1) = \frac{1}{M} \left\{ [\exp(j\phi) - 1] \text{rect}\left(\frac{\tilde{x}_1}{Ma}\right) * \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{\tilde{x}_1}{Md}\right) + 1 \right\} \text{rect}\left(\frac{\tilde{x}_1}{ML}\right) \text{rect}\left(\frac{\tilde{y}_1}{MW}\right), \quad (4)$$

式中  $M$  为系统的放大倍率,  $M = \frac{d_1}{d_0}$ 。推导系统输入频谱为

$$G_g(f_x, f_y) = M [\exp(j\phi) - 1] \frac{aLW}{d} \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[LM\left(f_x - \frac{n}{Md}\right)\right] \text{sinc}(WMf_y) + LWM \text{sinc}(LMf_x) \text{sinc}(WMf_y). \quad (5)$$

在 P2 面上放置下述不同的光阑,作频域处理,将给出不同的输出像。

1) 选择适当宽度为  $l$  的狭缝,仅让 0 级谱通过,挡掉其他频率部分。此时系统的相干传递函数为

$$H_c(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{\lambda d_1 f_x}{l}\right) = \text{rect}\left(\frac{f_x}{2f_0}\right) = \begin{cases} 1 & |f_x| < f_0 \\ 0 & |f_x| \geq f_0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $f_0$  是沿  $x$  方向的截止频率。输出频谱为

$$G_i(f_x, f_y) = G_g(f_x, f_y) H_c(f_x, f_y) = M \left\{ [\exp(j\phi) - 1] \frac{a}{d} + 1 \right\} \times LW \text{sinc}(WMf_y) \text{sinc}(LMf_x). \quad (7)$$

P3 像面上的强度分布为

$$I(x_3, y_3) = \frac{1}{M^2} \left[ \frac{2a^2}{d^2} (1 - \cos \phi) + \frac{2a}{d} (\cos \phi - 1) + 1 \right] \text{rect}^2\left(\frac{x_3}{ML}\right) \text{rect}^2\left(\frac{y_3}{MW}\right). \quad (8)$$

当光栅条宽  $a$  为光栅周期  $d$  的 1/2, 并且  $\phi = \pi$  时,最小值为  $I(x_3, y_3) = 0$ , 为完全暗场; 在  $\phi = 0$  时,最大值为  $I(x_3, y_3) = \frac{1}{M^2} \text{rect}^2\left(\frac{x_3}{L}\right) \text{rect}^2\left(\frac{y_3}{W}\right)$ , 为均匀的矩形亮块。投影成像系统经过空间零级频谱滤波后再成像的过程如图 4 所示。

2) 选择适当宽度  $l$  和距离  $2c$  的双狭缝,仅让

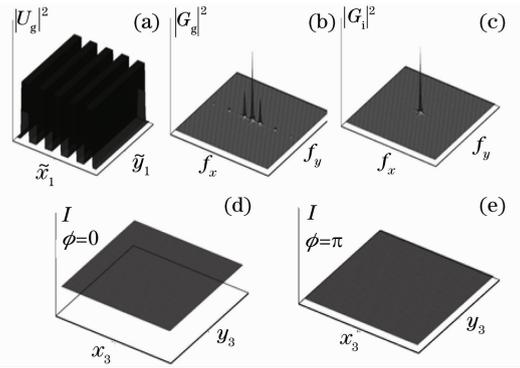


图 4 0 级光收集成像。(a)理想像  $U_g$ ; (b)输入频谱  $G_g$ ; (c)输出频谱  $G_i$ ; (d)  $\phi=0$  时的像; (e)  $\phi=\pi$  时的像  
Fig. 4 0th order imaging. (a) perfect image  $U_g$ ; (b) input spectrum  $G_g$ ; (c) output spectrum  $G_i$ ; (d) image with  $\phi=0$ ; (e) image with  $\phi=\pi$

±1 级谱通过,挡掉其他频率部分。此时系统的相干传递函数为

$$H_c(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_x}{f_1 - f_0} - \frac{f_1 + f_0}{f_1 - f_0}\right) + \text{rect}\left(\frac{f_x}{f_1 - f_0} + \frac{f_1 + f_0}{f_1 - f_0}\right) = \begin{cases} 1 & f_0 < |f_x| < f_1 \\ 0 & |f_x| \leq f_0 \text{ or } |f_x| \geq f_1 \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $f_0, f_1$  是沿  $x$  方向的截止频率。输出频谱为

$$G_i(f_x, f_y) = M \left\{ [\exp(j\phi) - 1] \frac{aLW}{d} \text{sinc}\left(\frac{a}{d}\right) \times \text{sinc}\left[LM\left(f_x - \frac{1}{Md}\right)\right] \text{sinc}(Wf_y) + [\exp(j\phi) - 1] \frac{aLW}{d} \text{sinc}\left(\frac{a}{d}\right) \times \text{sinc}\left[LM\left(f_x + \frac{1}{Md}\right)\right] \text{sinc}(Wf_y) \right\}. \quad (10)$$

P3 面上强度分布为

$$I(x_3, y_3) = \frac{1}{M^2} \text{rect}^2\left(\frac{x_3}{LM}\right) \text{rect}^2\left(\frac{y_3}{WM}\right) \times \frac{8a^2}{d^2} (1 - \cos \phi) \text{sinc}^2\left(\frac{a}{d}\right) \cos^2\left(\frac{2\pi x_3}{dM}\right). \quad (11)$$

最小值发生在  $\phi = 0$  时,  $I(x_3, y_3) = 0$ , 为完全的暗场; 而当  $\phi = \pi$  时,像面的整体光强最大,为

$$I(x_3, y_3) = \frac{1}{M^2} \text{rect}^2\left(\frac{x_3}{LM}\right) \text{rect}^2\left(\frac{y_3}{WM}\right) \times \frac{16a^2}{d^2} \text{sinc}^2\left(\frac{a}{d}\right) \cos^2\left(\frac{2\pi x_3}{dM}\right). \quad (12)$$

投影成像系统经过空间±1级频谱滤波后再成像的过程如图 5 所示。说明用±1级滤波的投影方式也可以达到像素成像的亮态和暗态的调制。对比用零级滤波的方法,可以看出其调制的亮态和暗态

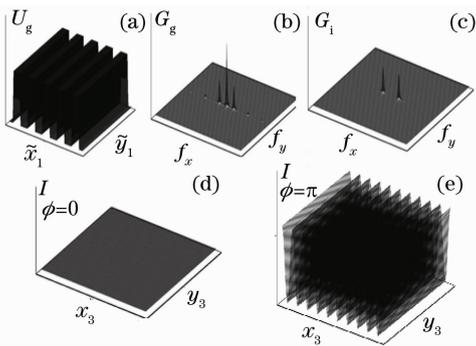


图5 ±1级光收集成像。(a)理想像  $U_g$ ; (b)输入频谱  $G_g$ ; (c)输出频谱  $G_i$ ; (d)  $\phi=0$  时的像; (e)  $\phi=\pi$  时的像

Fig. 5 ±1 order imaging. (a) perfect image  $U_g$ ; (b) input spectrum  $G_g$ ; (c) output spectrum  $G_i$ ; (d) image with  $\phi=0$ ; (e) image with  $\phi=\pi$

与相位  $\phi$  的关系正好相反。

### 4 GMLM 阵列激光投影原理性验证实验

图6为实际加工的  $16 \times 16$  点阵的 GMLM 阵列局部 SEM 图。构建 GMLM 的投影演示系统如图7所示。在 PC 机上的控制程序将动态显示图像

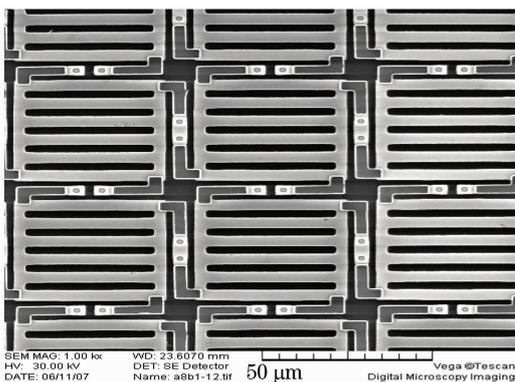


图6 GMLM阵列 SEM图

Fig. 6 SEM photo of GMLM array

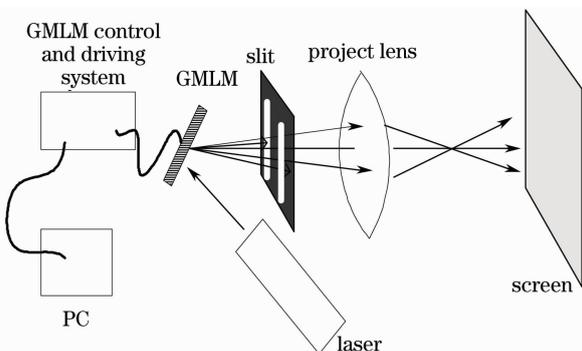


图7 GMLM 投影演示系统

Fig. 7 Projection demo system of GMLM

实时地传送到 GMLM 的控制与驱动系统板, GMLM 根据图像信息改变阵列中每个像素的状态, 从而调制入射激光, 经投影系统将图像成像于屏幕上。

#### 4.1 静态投影实验

图8显示了使用0级光波投影成像的情况。可以看出, 0级衍射光波成像的特点是低频部分特征突出,  $16 \times 16$  点阵的阵列中每个像素的像基本为光场均匀分布的方形亮块, 光强分布与(8)式给出的特征一致。

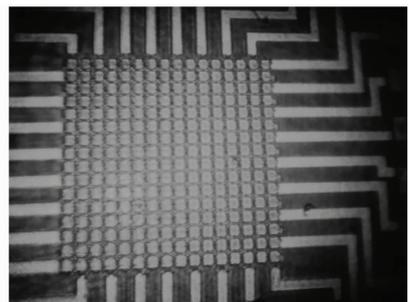


图8 GMLM阵列0级衍射光波成像

Fig. 8 GMLM array projection image with 0 order diffraction light

图9显示了使用±1级光波投影成像的情况。可以看出, ±1级衍射光波成像过程中狭缝的使用, 相当于对图像进行了一次空间带通滤波, 这使得低频部分的信息被滤掉, 如引线部分只显示出轮廓。进一步经过图像放大观察可以看清像素内部光强分布与(11)式给出的特征吻合。

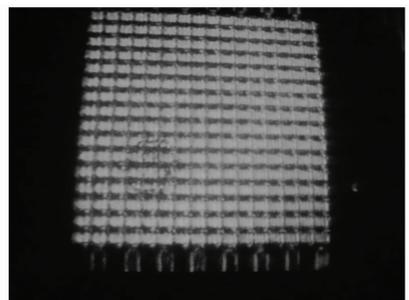


图9 GMLM阵列±1级衍射光波成像

Fig. 9 GMLM array projection image with ±1 order diffraction light

经过多次实验比较, 可得出以下结论: 使用0级衍射光波成像光能利用效率较高, 但是不能滤除一些干扰信号; 而使用±1级衍射光波成像, 可以滤除很多不必要的干扰信号。针对不同应用场合的要求, 可以灵活选择滤波方式。

#### 4.2 动态投影实验

经过 GMLM 阵列静态投影实验结果的分析,

决定使用±1级衍射光波成像的方式进行动态投影实验。由于这种滤波方式相比于0级滤波可以更多地滤除干扰信号,以获得更高的对比度,便于观察GMLM阵列动态投影的光调制效果。

如图7实验系统所示,在PC机上使用GMLM控制软件输出行扫描信号,通过USB2.0接口传给

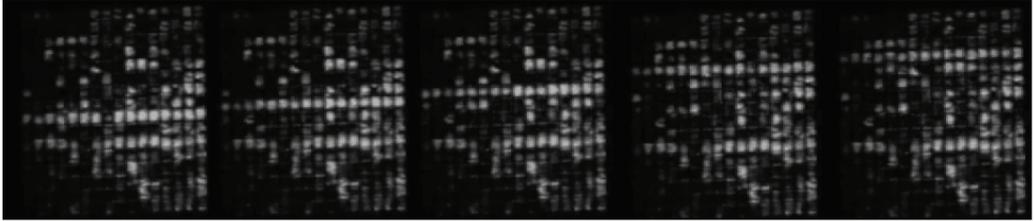


图10 GMLM阵列动态行扫描投影

Fig. 10 Projection image of GMLM array with dynamic row scan drive signal

每一帧的激光显示图像由 $16 \times 16$ 的点阵组成。在截取的5帧图像中,GMLM显示的单行亮条自整幅图像中部开始,逐行向图像顶部扫描。单行亮条扫描后GMLM像素位置又复归于暗态,实现了光的动态开关调制。另一方面,由于一些像素不均匀性、交叉效应和失效,导致阵列中始终有一些未按行扫描指令工作的点,影响了整体显示效果。但是,动态行扫描的效果还是非常明显的。这验证了GMLM软件、控制和驱动系统的相应功能可以协调工作,也验证了GMLM激光投影系统可以正常工作。

## 5 结 论

提出了一种新颖的面向激光投影的MOEMS光栅平动式光调制器,利用衍射原理对光进行动态调制,具有较简单的工艺和投影光学系统。建立了GMLM的等效光学模型,并提出适合GMLM投影成像的最简光学投影系统构成。用标量衍射方法推导了GMLM经过投影光学系统成像的夫琅禾费衍射图样振幅分布。最后,搭建了GMLM投影演示系统,进行了静态投影和动态投影实验。实验验证了上述公式的正确性,验证了GMLM光调制原理和投影成像原理的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 L. J. Hornbeck. Digital light processing for projection displays: a progress report[C]. SID EuroDisplay 96, Proceedings of the 16th International Display Research Conference, 1996, 67~71
- 2 Wu Xiang, Liao Wei, Liu Jin'gao. A naked-eye stereoscopic

下位机的现场可编程门阵列(FPGA)中央控制单元,FPGA再经过数据格式转换和灰度调制后输出给行、列驱动器,最终驱动GMLM阵列做行扫描。通过投影系统在屏幕上可以看到明显的动态结果,图10是显示结果录像中的几帧截图。

- display system based on digital light processor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 417~420
- 吴翔,廖薇,刘锦高.基于数字光处理器的裸眼立体显示系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 417~420
- 3 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 491~495
- 蔡冬梅,杨慧珍,凌宁等.液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 491~495
- 4 D. M. Bloom. The grating light valve: revolutionizing display technology[C]. *SPIE*, 1997, **3013**: 165~171
- 5 Huang Shanglian, Zhang Zhihai, Yan Xu *et al.*. Grating Moving Light Modulator and Array[P]. China, ZL200510020186.8, 2007
- 黄尚廉,张智海,闫许等.光栅平动式光调制器及阵列[P].中国, ZL200510020186.8, 2007
- 6 Shi Lingna, Huang Shanglian, Sun Jiyong *et al.*. Analysis and experiment of surface bending of grating light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 869~873
- 史玲娜,黄尚廉,孙吉勇等.光栅调制器的表面弯曲度分析及实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 869~873
- 7 Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu *et al.*. Optimization and analysis for structural parameters of grating moving light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1121~1126
- 张洁,黄尚廉,闫许等.光栅平动式光调制器结构参数的优化分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1121~1126
- 8 Stephen D. Mellin, Gregory P. Nordin. Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(13): 705~722
- 9 Zhang Zhihai. Study on Some Key Technologies of MOEMS-based Grating Moving Light Modulator Array [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. 17~20
- 张智海.基于MOEMS技术的光栅平动式光调制器阵列若干关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2008.17~20
- 10 Lü Naiguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 111~113
- 吕乃光.傅里叶光学[M].北京:机械工业出版社,2006.111~113