

二维光栅光调制器阵列的光学分析与实验

孙吉勇 黄尚廉 张 洁 张智海 王 宁

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 基于标量衍射理论分析了二维光栅光调制器的衍射特性,提出了投影系统的光学处理方法,利用 Matlab 软件进行了仿真分析。分析结果表明,二维光栅光调制器的衍射光强分布是单个像素衍射光强的干涉叠加,其分布趋势与单个光调制器的衍射光强分布类似;通过反傅里叶变换可将各个调制器的衍射光重新分开而成像。如果用 ± 1 级衍射光的成像,相位为 $2k\pi$ 的调制器在投影面得到一个明亮的像,而相位为 $(2k-1)\pi$ 的调制器在投影像面上得到一个黑暗的像。通过一个基于静态微光电系统光栅光调制器的投影光学系统得到了一幅明暗调制的像,证明了光栅光调制器用于投影显示的可行性。

关键词 微机电系统; 光栅光调制器; 衍射; 投影显示

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

Optical Analysis and Experiments of Two-Dimensional Grating Light Modulator Array

Sun Jiyong Huang Shanglian Zhang Jie Zhang Zhihai Wang ning

(Key Laboratory for Opto-Electronic Technology and System, Ministry of Education, College of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Diffraction characteristic of a two-dimensional (2D) grating light modulator is analyzed with scalar diffraction theory, the optical analysis method of the projection system based on grating light modulator is proposed. The processing is simulated with Matlab software. Diffraction light distribution of the 2D modulator is the coherent superposition of diffraction light distribution of modulators, and the distribution is similar to that of a single modulator. The diffraction light can be divided and imaged by the projection lens based on the anti-Fourier transform process. If the first-order diffraction light is used as the projection light, the modulator with $2k\pi$ phase difference shows a bright pixel in the image plane, but the modulator with $(2k-1)\pi$ phase difference shows a black pixel. A projection system based on a static micro-electromechanical system (MEMS) grating light modulator array was setup, and a static image is gotten. The result proves the feasibility of grating light modulator for projection display.

Key words micro-electromechanical system; grating light modulator; diffraction; projection display

1 引 言

微机电系统 (Micro-electro-mechanical systems, MEMS) 技术的不断发展,为显示技术的发展注入了新的活力^[1-7],基于 MEMS 的光调制器在投影显示领域的应用是其中一个主要方向。利用 MEMS 技术,人们提出了各种各样的光调制器,其中最据代表性的是德州仪器公司的数字微镜 (Digital micro-mirror devices, DMD)^[8] 和斯坦福大

学的 D. M. Bloom 等^[9] 提出的光栅光阀 (Grating light valve, GLV)。DMD 利用反射微镜的偏转实现对光路的调制,其多层结构工艺导致了制作过程十分复杂。光栅光阀具有结构简单的优点,但由于器件本身是一个线阵结构,因此需要通过一个扫描装置来产生二维的图象显示,增加了系统的复杂性和装配难度。重庆大学张洁等^[10] 提出了一种面阵型光栅光调制器,其加工工艺较 DMD 简单,同时解

收稿日期: 2007-10-15; 收到修改稿日期: 2007-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(60708017)、重庆市院士基金(8883)、全国博士后基金(20070410773)和重庆市自然科学基金(20070410773)资助课题。

作者简介: 孙吉勇(1975—),男,博士研究生,主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: stoiker@163.com

导师简介: 黄尚廉(1936—),男,教授,中国工程院院士,从事光电技术及系统、仪器科学与技术等方面的研究。

E-mail: slhuang@cqu.edu.cn

决了 GLV 难于形成面阵的缺点,具有良好的应用前景。文献[10,11]对单个光栅光调制器的相关特性进行了详细的分析和研究。但最终用于显示的光栅光调制器是由 $N \times N$ 个光栅光调制器单元组成的二维阵列,因此有必要对二维光栅光调制器的衍射光学特性做进一步的分析。

本文简单介绍了单个光栅光调制器的工作原理,讨论了二维光栅光调制器的衍射特性,利用 Matlab 软件分析了二维光栅光调制器的 ± 1 级衍射光的成像特性。通过实验对理论分析进行了验证。

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

式中 a 为光栅条的宽度, d 为光栅常量, h 为下反射镜和可动光栅上表面之间的光程差, λ 为波长, L 为调制器沿光栅周期方向的宽度, W 为光栅条的长度。对(1)式作傅里叶变换可得调制器在满足夫琅禾费衍射条件下的传输函数^[12]:

$$T_s = \frac{aLW}{d} \text{sinc}(Wf_y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}[L(f_x - n/d)] \left\{ 1 + \exp\left[j\left(n\pi + \frac{4h\pi}{\lambda}\right)\right] \right\}, \quad (2)$$

式中 f_x, f_y 为空间频率, $f_x = x/(\lambda z), f_y = y/(\lambda z)$ 。衍射面上的光强分布 $I_s \propto |T_s|^2$ 。

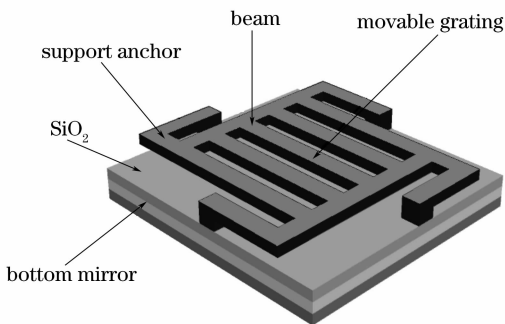


图1 光栅光调制器结构图

Fig. 1 Grating light modulator

如果令光栅的上表面和下反射镜之间的相位差 $\phi = 4h\pi/\lambda$, 由(2)式可见, 对于 $\phi = 0$ 的情形, 当 n 为奇数时 $1 + \exp(jn\pi + \phi) = 0$, 当 n 为偶数时, $1 + \exp(jn\pi + \phi) = 2$, 因此衍射光强在 $f_x = \pm 1$ 处取得极小值, 在 $f_x = 0$ 处取得极大值; 对于 $\phi = \pi$ 的情形, 当 n 为奇数时, $1 + \exp(jn\pi + \phi) = 2$, 当 n 为偶数时, $1 + \exp(jn\pi + \phi) = 0$; 衍射光强在 $f_x = \pm 1$ 处取极大值, 在 $f_x = 0$ 取极小值。

ϕ 由可动光栅与上反射镜之间的光程差 h 决定, 当 $h = k\lambda/2$ (k 为整数) 时, 衍射光集中在零级, 当 $h = (2k+1)\lambda/4$ 时, 衍射光主要集中在 ± 1 级。图2为通过(2)式计算得到的当光程差 h 分别为 $\lambda/2, \lambda/4$ 时的衍射光强分布, $a = 4 \mu\text{m}, d = 8 \mu\text{m}, L$ 和 W

最后给出了一个基于静态 MEMS 光栅光调制器的投影光学系统实验。

2 单个光栅光调制器光学原理

单个光栅光调制器的结构如图1所示, 它主要由下层反射镜和上层的可动光栅组成。入射到调制器上下两个表面的光被反射后, 发生衍射。在忽略调制器周围的边梁和支撑腿影响的情况下, 调制器的透射率函数可表示为:

均为 $36 \mu\text{m}$ 。

如果在反射镜和可动光栅上外加一个电场, 通过静电力改变反射镜和光栅之间的距离, 使得反射镜与光栅之间的光程差分别为 $k\lambda/2$ 和 $(2k+1)\lambda/4$, 衍射光的能量将在零级和 ± 1 级之间转换, 可以实现对光的调制。如果在衍射光路上放置一个空间滤波器, 只让 ± 1 级通过, 则当 $h = k\lambda/2$ 时, 投影面上显示为暗点, 当 $h = (2k+1)\lambda/4$ 时, 投影面上显示为亮点, 从而实现显示的功能。

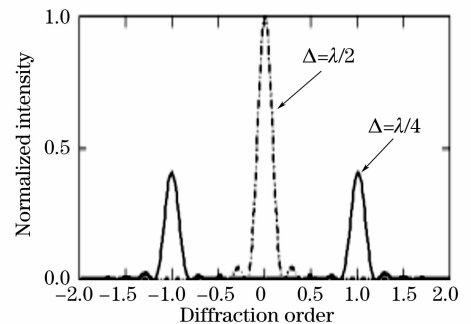


图2 相位光栅的衍射光强分布图

Fig. 2 Diffraction light distribution of the phase grating

3 二维光栅光调制器的衍射光学特性

用于投影系统的光栅光调制器是由 $N_x \times N_y$ (N_x 和 N_y 分别为在 x 和 y 方向的调制器个数) 个光栅光调制器单元组成的二维阵列, 此时调制器的透射率函数为

$$t(x, y) = t_s(x, y) \otimes \left[\frac{1}{D_x} \text{comb}\left(\frac{x}{D_x}\right) \frac{1}{D_y} \text{comb}\left(\frac{y}{D_y}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{N_x D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{N_y D_y}\right), \quad (3)$$

式中 D_x 和 D_y 分别为单个光栅在 x 和 y 方向的尺寸。对 $t(x, y)$ 进行傅里叶变换得

$$T(f_x, f_y) = T_s(f_x, f_y) \text{comb}(D_x f_x) \text{comb}(D_y f_y) \otimes N_x D_x N_y D_y \text{sinc}(N_x D_x f_x) \text{sinc}(N_y D_y f_y), \quad (4)$$

由(4)式的可见, T 是 T_s 被梳状函数抽样后再被 sinc 函数卷积平滑。(4)式可以改写为

$$T(f_x, f_y) = N_x N_y \left\{ \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} T_s\left(\frac{u}{D_x}, \frac{v}{D_y}\right) \text{sinc}\left[N_x D_x \left(f_x - \frac{u}{D_x}\right)\right] \text{sinc}\left[N_y D_y \left(f_y - \frac{v}{D_y}\right)\right] \right\}. \quad (5)$$

对于不考虑调制器边梁和支撑腿影响的简单情形,由讨论得 T_s 可用(2)式表示,将(2)式代入(5)式得

$$T(f_x, f_y) = N_x N_y \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{aLW}{d} \text{sinc}\left(W \frac{v}{D_y}\right) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[L \left(\frac{u}{D_x} - \frac{n}{d}\right)\right] \left\{ 1 + \exp\left[j\left(n\pi + \frac{4\pi h}{\lambda}\right)\right] \right\} \right\} \right\} \times \text{sinc}\left[N_x D_x \left(f_x - \frac{u}{D_x}\right)\right] \text{sinc}\left[N_y D_y \left(f_y - \frac{v}{D_y}\right)\right]. \quad (6)$$

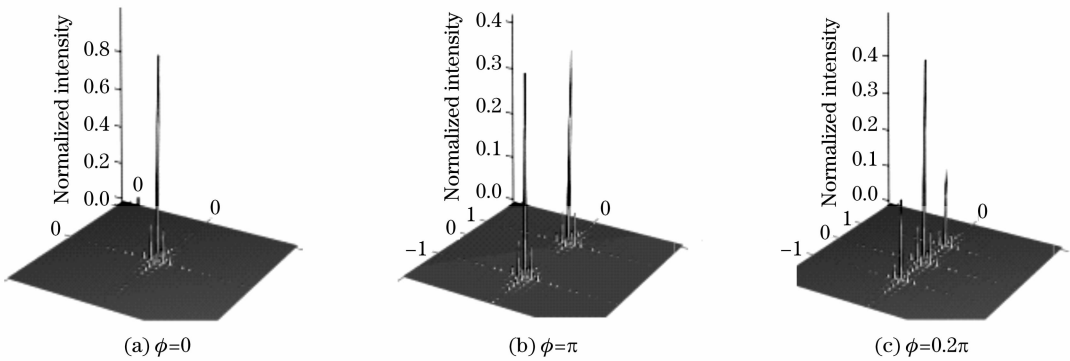


图3 光栅光调制器的衍射光强分布

Fig. 3 Diffraction light distribution of the grating light modulator

图3为根据(6)式计算得到的 5×5 光栅光调制器阵列的衍射光强归一化分布,其中 $a = 4 \mu\text{m}$, $d = 8 \mu\text{m}$, L 和 W 为 $36 \mu\text{m}$, D_x 和 D_y 为 $48 \mu\text{m}$ 。

由图3可见,二维光栅光调制器的衍射光强分布趋势和单个光调制器的衍射光强分布类似,但其每一级的衍射光强里同时又包含了细微的频率成分,根据(4)式可知,这些细微的频率成分反映了像素和像素之间的空间频率信息;总的衍射光强是每个像素衍射光强的干涉叠加,在衍射的谱面上各个像素的衍射光强叠加一起,在空间上是不能分开的,

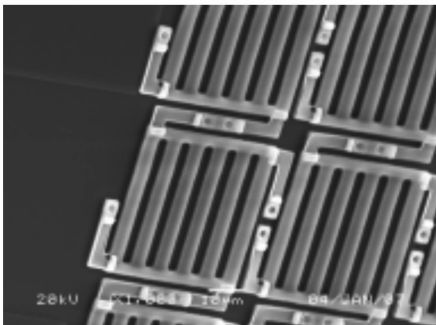


图4 二维调制器阵列

Fig. 4 Two-dimensional grating light modulator array

因此要实现成像的功能,必须经过进一步的处理使各个调制器的衍射光能被分开。

图4为通过 MEMS 工艺加工得到的二维光调制器阵列,调制器的初始相位差为 π 。图5为通过实验得到的调制器阵列的衍射光强分布图。对比图5和图3发现,实验得到的衍射图样更接近于图3(c),而不是图3(b),这是由于工艺误差,使得加工得到的器件初始相位偏离了 π 所致。

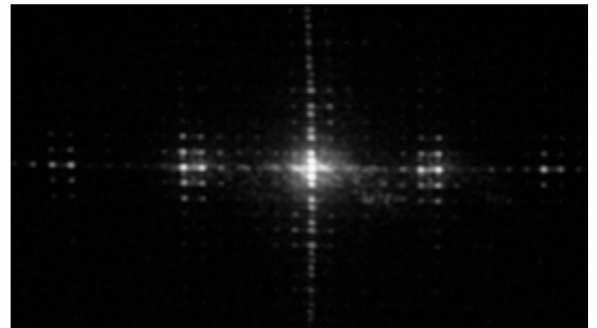


图5 实验得到的调制器阵列的衍射光强分布

Fig. 5 Experimental diffraction light distribution of modulator array

4 二维光栅光调制器的光学信息处理分析

对于光栅光调制器阵列,各个像素的衍射光强是叠加在一起的。要使得各个像素独立实现明暗显示的功能,通过滤波取出 ± 1 级衍射光能量之后,必须将叠加在一起的衍射光强分开。根据信息光学的知识^[12],衍射光强分布可以看作是光栅光调制器经傅里叶变换后得到的功率频谱,它反映的是像素内部以及像素与像素之间的空间频率信息。如果对频谱再进行一次反傅里叶变换就又可以得到光栅的像,即实现了各单个像素衍射光的分离。

因此,在(6)式的基础上加上滤波函数,滤得 ± 1 级衍射光之后再进行一次反傅里叶变换可以求得像面上的光强分布及像的特性。通过这种方法所得到的计算公式复杂,而且运算量比较大。如果直接对(3)式进行傅里叶变换,得到的功率谱分布应该和通过(6)

式得到的衍射光强分布是一致的,对谱进行滤波之后,再进行反傅里叶变换,就可得到像面上的光强分布特征。而该分析过程可以用 Matlab 软件中图像处理模块比较容易实现。

图 6(a)为根据(3)式,利用 Matlab 软件建立的 2×2 光栅光调制器模型,图中用灰度表示了反射镜与可动光栅的相位差,设器件的初始相位差为 π ,器件对应为亮态。图 6(b)为利用 Matlab 软件进行傅里叶变换之后得到的功率谱分布,和图 3(b)相比较可见,对图 6(a)中的模型进行傅里叶变换之后得到的功率谱和计算得到的衍射光强分布基本一致,但仿真得到的功率谱除了集中在 ± 1 之外,在零级和其他级次也有分布,这是由于光栅光调制器周围的边梁和支撑腿的影响引起的。由此可知,光栅光调制器边沿的梁和支撑腿会引起衍射光能量的分布发生变化。对图 6(b)中的功率谱进行滤波,获取 ± 1 级谱,进行反傅里叶变换得到的结果如图 6(c)所示。

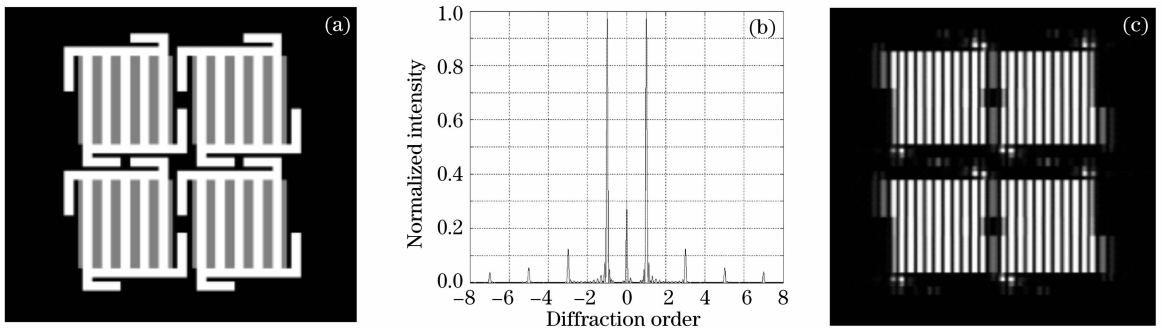


图 6 二维光栅光调制器光学信息处理的仿真。(a)模型,(b)衍射光强分布,(c) ± 1 级衍射光的成像

Fig. 6 Simulation of the light information processing to two-dimensional grating light modulator. (a) Model, (b) diffraction light distribution, (c) $\pm 1^{\text{st}}$ order diffraction light image

由图 6(c)看出, ± 1 级所成的像,其强度分布不是均匀的,而是类似于余弦分布。在所成的像中缺少了梁的信息,只是在像面上留下间隙,降低了像素的填充率,因此在进行器件的设计时,应该尽可能减小梁的宽度。由图 6(c)还可知,支撑腿继续成像在

像面上,由于支撑腿可动范围很小,无论调制器是明态还是暗态,腿的像都将保留在投影面上,这将会降低器件的对比度。对于支撑腿,不但应该降低其宽度,而且应该考虑通过 MEMS 加工工艺降低其表面的反射率。图 7 为通过实验得到的图(4)中所示器件的 ± 1 级衍射光在投影面上的像,可见梁被滤波器滤除之后像素的填充率降低,而支撑腿的像则保留在像面上。对比图 6(a)和图 7 可得,仿真结果和实验结果基本一致。

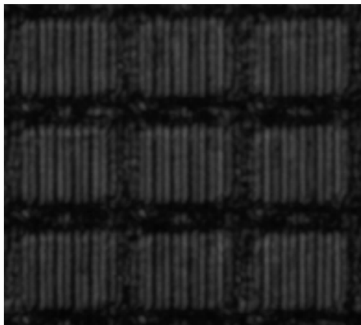


图 7 实验得到的 ± 1 级衍射光的成像

Fig. 7 ± 1 order diffraction light image by experiment

5 投影光学实验

为了验证光栅光调制器用于投影系统的可行性,利用 MEMS 工艺加工了一个静态的光栅光调制器,如图 8 所示。B 部分是光程差为 π 的二维矩形槽相位光栅,如果用 ± 1 级衍射光成像,B 对应于光

栅光调制器中状态为亮态的像素。由于光栅是静止的,因此加工时省掉了支撑腿和梁。A 是铝反射镜,等效于光栅光调制器中光程差为零的相位光栅,对应于光栅光调制器中状态为暗态的像素。所用实验装置示意图如图 9 所示。图 10 为利用静态光栅光调制器得到的 ± 1 级衍射光成像,可见,所得到的像明暗态与理论分析一致。

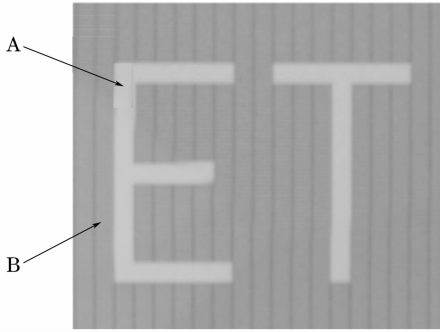


图 7 静态 MEMS 光栅光调制器

Fig. 8 Static MEMS grating light modulator

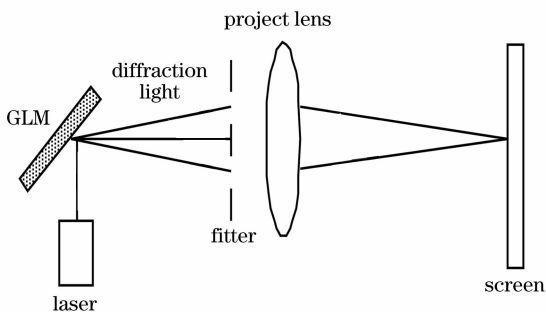


图 9 光栅光调制器投影实验装置示意图

Fig. 9 Experimental projection setup of grating light modulator

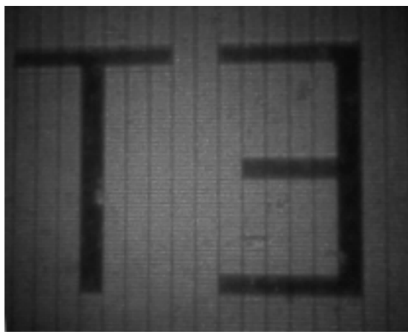


图 10 静态光栅光调制器 ± 1 级衍射光成像

Fig. 10 ± 1 order diffraction light imaging of static grating light modulator

6 结 论

讨论了二维光栅光调制器阵列的衍射光强分布

特性,表明二维衍射光强分布趋势和单个光调制器的衍射光强分布类似,但是每一级的衍射光强里同时又包含了细微的频率成分,它反映了像素和像素之间的空间频率信息。衍射光强是每个像素衍射光强的干涉叠加,因此要实现成像的功能,必须将衍射谱进行一次反傅里叶变换,形成光调制器的像。 ± 1 级衍射光所成的像,其强度分布不是均匀的,而是类似于余弦分布,梁的图像基本被滤除,降低了像素的填充率。支撑腿继续成像在像面上,降低像的对比度。通过基于 MEMS 的静态光栅光调制器投影光学系统实验,证明了光栅光调制器用于投影系统的可行性。

参 考 文 献

- 1 Yusuke Taii, Akio Higo, Hiroyuki Fujita *et al.*. Electrostatically controlled transparent display pixels by PEN-films MEMS optical MEMS and their applications[C]. *IEEE/LEOS International Conference*, 2005. 13~14
- 2 Kerwin Wang. Micro-Optical Components for a MEMS Integrated Display[D]. Doctoral dissertation of University of Washington, 2004. 4~8
- 3 Shen Weidong, Zhu Yong, Huang Biqin *et al.*. Analysis of the micro-optical electro-mechanical system filter's tunable property [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1125~1129
沈伟东,朱勇,黄弼勤等. 微光机电系统滤波器可调节特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1125~1129
- 4 Feng Fei, Jiao Jiwei, Xiong Bin *et al.*. Design and fabrication of optically readable infrared thermal imaging device based on Fabry-Pérot micro-cavity array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1375~1380
冯飞,焦继伟,熊斌等. 基于法布里-珀罗微腔阵列的光读出红外热成像器件设计与制作[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1375~1380
- 5 Xu Yang, Wu Jihong, Liu Litian *et al.*. Design and fabrication of a F-P optical switch based on MOEMS technology[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2002, **23**(8): 841~845
徐杨,吴彩虹,刘理天等. 基于 MOEMS 技术的一种 F-P 光开关的设计与制作[J]. *半导体学报*, 2002, **23**(8): 841~845
- 6 Li Wei, Liu Deming, Yang Chunyong *et al.*. Design and implementation of a novel low cost intelligent optical wavelength cross converter connect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 351~355
李蔚,刘德明,杨春勇等. 一种低成本智能全波长交叉交换连接器的设计和实现[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 351~355
- 7 Jie Li, Haiqing Chen, Hongbin Yu *et al.*. A novel hybrid surface micromachined segmented mirror for large aperture laser applications[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 422~424
- 8 L. J. Hornbeck. Digital light processingTM for high brightness, high-resolution applications[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3013**: 27~40
- 9 D. M. Bloom. The grating light valve; revolutionizing display technology[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3013**: 165~171
- 10 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
- 11 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
- 12 Lü Naiguang. *Fourier Optics* [M]. Beijing: China Mechine Press, 1988
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988