

文章编号: 0253-2239(2005)11-1452-5

光栅光阀的光学特性分析和仿真*

张 洁 黄尚廉 付红桥 闫 许 陈伟民

(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 400030)

摘要: 光栅光阀是一种基于微型机电系统(MEMS)工艺的光调制器,利用其表面具有的可选择的变形部分(可动光阀),提供衍射光栅,被应用于投影显示等领域。光栅光阀的光学性能决定其在投影显示系统中应用的成败。依据多光束干涉理论和衍射理论对光栅光阀工作状态的光学特性进行了详细的理论分析和计算机仿真。结果说明,光栅光阀在工作中处于“开”态时,可动光阀下降的距离应该是入射波长的 $1/4$ 倍;设计时选择 $h=\lambda_0/2, \delta=\lambda_0/4$;当间隙处的反射率不同时,占空比对光栅光阀的光学特性有着不同的影响,给出了占空比与反射率的最佳组合值。

关键词: 衍射; 光栅; 光栅光阀; 微型机电系统

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Optical Characteristics Analysis and Simulation of Grating Light Valve

Zhang Jie Huang Shanglian Fu Hongqiao Yan Xu Chen Weimin

(The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System of Education Ministry of China,
Institute of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: The grating light valve (GLV), and optical modulator based on microelectromechanical systems (MEMS), with the changable components mobile ribbons on its surface, can serve as a diffractive grating, and be used in projection and display fields. The optical performance of GLV is analyzed in details and simulated with interference and diffraction theory. All these indicate that when the GLV is in on state, the mobile ribbons should drop a quarter of the incident wavelength. When the reflectivity of the air gap is different, the effect of the duty ratio on the optical properties is different. The best matching value of duty ratio and reflectivity is presented.

Key words: diffraction and gratings; grating light valve; microelectromechanical systems

1 引 言

在投影机产品技术的发展中,随着液晶技术的发展及产业制造技术的成熟^[1,2],液晶技术已被市场看好,逐渐成为投影机市场中的主流技术,正逐渐取代传统的阴极射线管(Cathode ray tube, CRT)投影机。但这些液晶技术的投影机目前都有较大的遗憾,那就是液晶面板产品合格率偏低,量产有瓶颈,使用中灯源寿命偏短。针对液晶技术投影机的这些不足,美国斯坦福大学和 Silicon Light Machine 公司研发的专利技术“光栅光阀”^[3~5],正逐渐受到业界的关注,有可能发展成下一代数字投影机的主流技术之一。

光栅光阀是光线反射元件,由一条条带状的反射面所组成,反射面在静电力的作用下进行上下移动,使得光栅光阀形成衍射光栅,工作在“开”态和“关”态,再加上其反射装置的超高切换速度,以达成影像的再生。衍射的作用使得光栅光阀在“开”、“关”态存在一定的光能量的泄漏,降低以光栅光阀为核心器件的投影机的投影性能,所以有必要对光栅光阀的光学特性进行分析。目前已有学者^[6~8]利用标量衍射理论、角谱理论等对光栅光阀进行了一些简单的理论分析,本文将在此基础上,建立一个比较完善的模型,综合考虑光栅光阀结构参量的影响,利用多光束干涉理

* 重庆市院士基金(8272)资助课题。

作者简介: 张 洁(1980~),女,四川彭州人,重庆大学光电学院博士研究生,主要研究方向为微型机电系统器件及系统的研究。E-mail: jiezhang1980@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-12-08; 收到修改稿日期: 2005-04-05

论对光栅光阀进行理论分析和仿真。

2 工作原理

光栅光阀利用光反射原理,其结构如图 1 所示,一个像素由彼此隔开的多个可动带状物和固定带状物组成,这些带状物上表面镀上具有高反射效率的膜。当可动带状物(光阀)和固定带状物在同一高度时,如图 2(a)所示,该像素成为一个平面,此时光栅光阀起到一个平面镜的作用,当后续光能收集系统放置在如图 2 所示的位置,这时没有光进入光能量收集系统显示为“关”态;当静电力开始作用,可动带状物向下弯,形成一个衍射光栅,显示为“开”态,如图 2(b)所示,亮度会随着可动带状物下弯深度的不同来控制反射光与折射光的比例变化而变化,从而

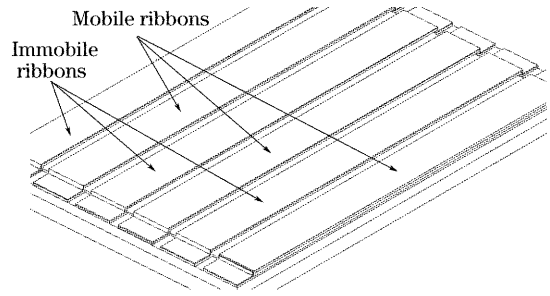


图 1 光栅光阀

Fig.1 Grating light valve

形成不同的灰度层次,也可以靠保持在某种工作状态的时间来实现不同的灰度层次。(图中 1 为一层保护层,2 为反射面,3 为光阀,4 为电极层,5 为绝缘层,6 为基底,7 为 1、2、3 形成的固定带状物,8 为 1、2、3 形成的可动带状物)。

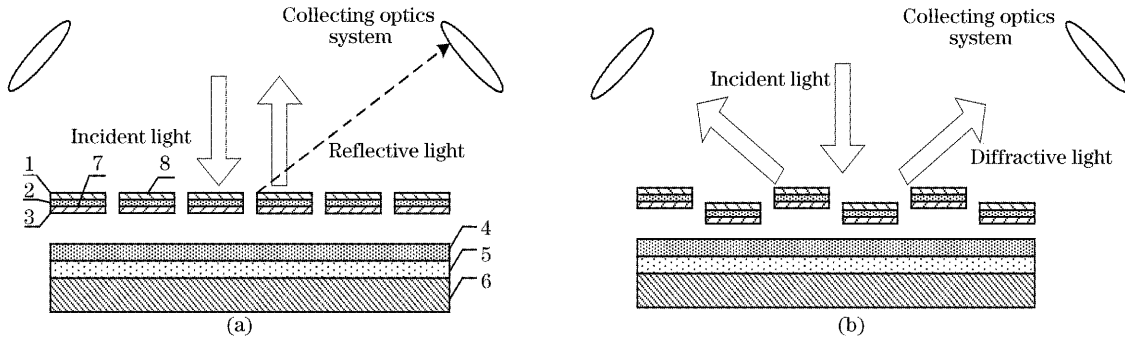


图 2 光栅光阀工作时的两种状态。(a) 关态, (b) 开态

Fig.2 Two working states of grating light valve. (a) Off state, (b) on state

3 理论分析

3.1 光栅光阀在“开”态时的光学分析

当光栅光阀在静电力的作用下,可动光阀将下降,光栅光阀表现为“开”态。设光阀和间隙的宽度分别为 w_r, w_g ; 其表面的振幅反射率分别为 r_r, r_g ; 其表面的强度反射率为 R_r, R_g 。该结构具有周期性,把其作为一个光栅,其周期为

$$d = 2(w_r + w_g), \quad (1)$$

可见,光栅的一个周期有 4 个部分组成,如图 3 所示。利用多光束干涉原理来分析,重要的是获得各个光束相对于参考光束的光程差。任意两个光束之间的光程差的计算如图 4 所示,其中 t, l 分别为两光束在 x, y 轴的距离,光程差计算可由下式表示:

$$\Delta = AD - BF + AE + BG = t(\cos \theta_0 + \cos \theta_i) + l(\sin \theta_i - \sin \theta_0), \quad (2)$$

设 2、3、4 光束与 1 光束相比引起的相位差为 ϕ_g, ϕ_r, ϕ'_g 。根据上面的式(2),可得引起的相位分别为

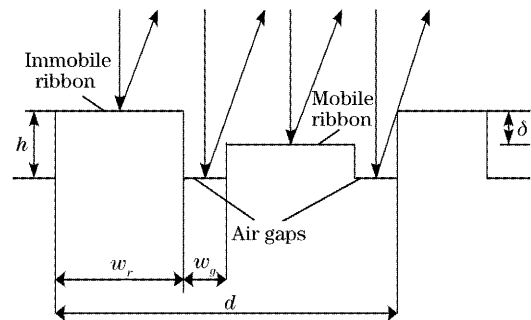


图 3 光栅光阀的光学模型

Fig.3 Optics model of grating light valve

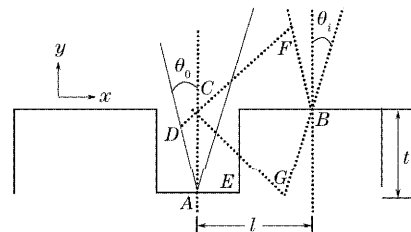


图 4 光程差的几何示意图

Fig.4 Geometry of optical path difference

$$\phi_g = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{1-2} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[h(\cos\theta_0 + \cos\theta_i) + \frac{w_g + w_r}{2}(\sin\theta_i - \sin\theta_0)\right], \quad (3)$$

$$\phi_r = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{1-3} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\delta(\cos\theta_0 + \cos\theta_i) + (w_g + w_r)(\sin\theta_i - \sin\theta_0)\right], \quad (4)$$

$$\phi'_g = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta_{1-4} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[h(\cos\theta_0 + \cos\theta_i) + \frac{(3w_g + w_r)}{2}(\sin\theta_i - \sin\theta_0)\right], \quad (5)$$

当有光入射到光栅光阀上时,各束反射光的振幅用下面的式子表示:

$$E_1 = r_r E_0, \quad (6)$$

$$E_2 = r_g E_0 \exp(-j\phi_g), \quad (7)$$

$$E_3 = r_r E_0 \exp(-j\phi_r), \quad (8)$$

$$E_4 = r_g E_0 \exp(-j\phi'_g), \quad (9)$$

总的光振幅为

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4, \quad (10)$$

定义占空比为 $u = w_r / (w_r + w_g)$, 经过分析推导可得衍射效率为

$$\begin{aligned} \eta_{\pm 1} = & R_r u^2 \cos^2(\phi_r/2) + \\ & R_g u(1-u) \cos^2\left(\frac{\phi_g - \phi'_g}{2}\right) + \\ & 2\sqrt{R_r R_g} u(1-u) \left[\cos\left(\frac{\phi_g + \phi'_g}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_g - \phi'_g}{2}\right) + \right. \\ & \left. \cos\left(\frac{2\phi_r - \phi_g - \phi'_g}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_g + \phi'_g}{2}\right) \right]. \quad (11) \end{aligned}$$

3.2 光栅光阀在“关”态时的光学分析

理想情况下,当光栅光阀的光阀都处于同一平

面时,相当于一个平面镜,对光束没有衍射的作用。然而由于可动光阀和固定光阀之间的间隙影响,在这种情况下,光栅光阀不能简单地看成一个平面,它实际上是一个光栅,其周期可以表示为

$$d = w_r + w_g, \quad (13)$$

这个周期是“开”态时周期的一半,此时这种结构可以把光栅看成两个黑白光栅的叠加,如图 5 所示。

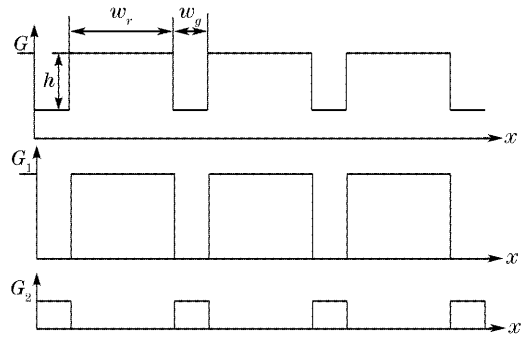


图 5 光栅光阀在暗态时的光学模型

Fig. 5 Optical model of grating light valve in off state
根据衍射理论^[9]可知

$$E_{G_1} = r_r E_0 \frac{\sin\alpha_1}{\alpha_1} \frac{\sin(N\beta_1)}{\sin\beta_1} \exp[j(N-1)\beta_1], \quad (12)$$

$$E_{G_2} = r_g E_0 \frac{\sin\alpha_2}{\alpha_2} \frac{\sin(N\beta_2)}{\sin\beta_2} \exp[j(N-1)\beta_2] \exp(j\phi), \quad (13)$$

其中 $\alpha_1 = \frac{\pi}{\lambda} w_r \sin\theta_i$, $\alpha_2 = \frac{\pi}{\lambda} w_g \sin\theta_i$, $\beta_1 = \beta_2 = \frac{\pi}{\lambda} (w_r + w_g) \sin\theta_i$ 。

相位差可由下式表示:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\left[h(\cos\theta_0 + \cos\theta_i) + \frac{w_g + w_r}{2}(\sin\theta_i - \sin\theta_0)\right], \quad (14)$$

经过分析,可得衍射效率为

$$\begin{aligned} \eta = & R_r \left[\frac{\sin\alpha_1}{\alpha_1} \frac{\sin(N\beta_1)}{\sin\beta_1} \right]^2 + R_g \left[\frac{\sin\alpha_2}{\alpha_2} \frac{\sin(N\beta_2)}{\sin\beta_2} \right]^2 + \\ & 2\sqrt{R_r R_g} \left[\frac{\sin\alpha_1}{\alpha_1} \frac{\sin(N\beta_1)}{\sin\beta_1} \right] \left[\frac{\sin\alpha_2}{\alpha_2} \frac{\sin(N\beta_2)}{\sin\beta_2} \right] \cos\phi. \quad (15) \end{aligned}$$

4 计算机仿真

为了说明光栅光阀在“开”、“关”态时的工作效

率,定义开光系数为

$$V = \eta_{on} / \eta_{off}, \quad (16)$$

仿真时的各个参量值如表 1 所示^[10]。

表 1 仿真时各个参量取值

Table 1 Value of parameters in simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
$w_r/\mu\text{m}$	4.25	$\lambda_0/\mu\text{m}$	0.5145
$w_g/\mu\text{m}$	0.65	$h/\mu\text{m}$	$\lambda_0/2$
R_r, R_g	1	$\delta/\mu\text{m}$	$\lambda_0/4$

根据前面的分析可以知道,光栅光阀的周期满足 $d_{\text{on}}=2d_{\text{off}}$ 。当接受光学系统放置在“开”态时的 1 级衍射角度处^[10],即

$$\theta = \arcsin\left[\frac{\lambda}{2(\tau w_r + w_g)}\right], \quad (17)$$

此时,接收“关”态时的光就是其在 $k=0.5$ 时的光能量,其中 k 为衍射级次。“开”态的衍射效率(归一化衍射效率)在 $k=1$ 和“关”态时 $k=0.5$ 的衍射效率如图 6,7 所示。当入射波长为设计的波长 λ_0 时, $\eta_{\text{off}}(k=0.5)=6.3526 \times 10^{-14}$,可见在参量值理想情况下,开关系数 $V=1.5741 \times 10^{13}$ 。

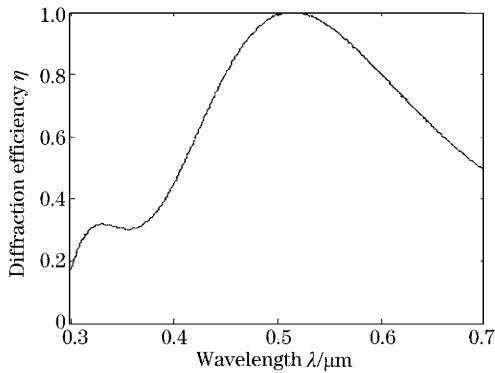


图 6 1 级衍射效率随波长的分布(开态)

Fig. 6 Diffraction efficiency of the first-order of GLV in on state

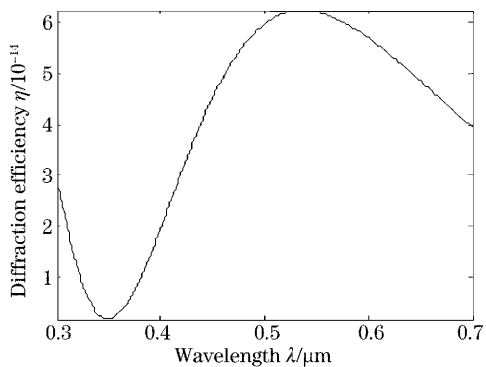
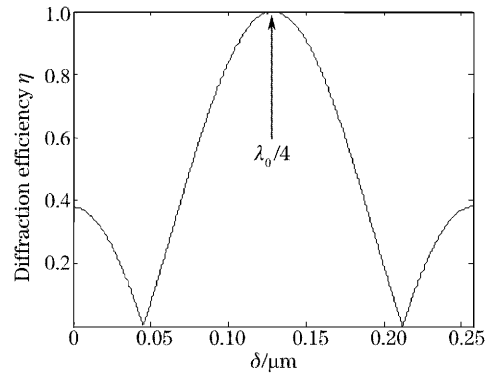
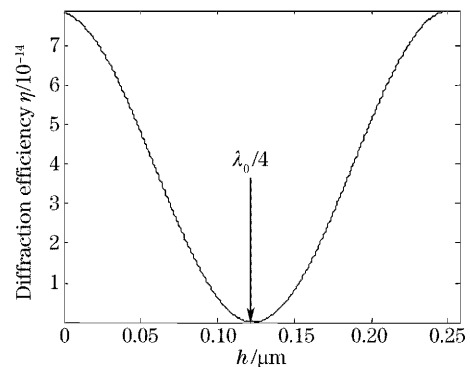


图 7 0.5 级衍射效率随波长的分布(关态)

Fig. 7 Diffraction efficiency of the 0.5-order of GLV in off state

在“开”态的情况下,由式(11)可以看出,衍射效率是波长 λ 、可动带状物与固定带状物之间的高度差 δ 等的函数。图 8 所示为衍射效率与可动光阀与

固定光阀之间的高度差的关系,只有当 $\delta=\lambda_0/4$ 时, $\eta_{\text{on}}(k=1)=1$,达到最大,所以对于一定的入射波长,只有精确控制固定带状物和可动带状物之间的高度才能保证预定角度下衍射效率最优。在“关”态的情况下,由式(15)可知,衍射效率也是 λ 、 h 等的函数。图 9 所示为衍射效率与参量 h 的关系,对于一定的入射波长,只有精确控制固定阀和可动阀之间的高度 h 才能保证预定角度下 $\eta_{\text{off}}(k=0.5)$ 最小。因为要使得开关系数越大,需要尽量满足开态时 $\eta_{\text{on}}(k=1)=1$,关态时 $\eta_{\text{off}}(k=0.5)$ 最小,前者需要 $h=\lambda_0/2$,后者需要 $h=\lambda_0/4$,这是一个矛盾。从图 7 可以看出,当 $h=\lambda_0/2$ 时, $\eta_{\text{off}}(k=0.5)$ 最小 7.8797×10^{-14} ,开关系数仍然很大,所以设计时选取 $h=\lambda_0/2$ 。

图 8 1 级衍射效率随参量 δ 的变化(开态)Fig. 8 Distribution of the first-order diffraction efficiency of GLV with δ in on state图 9 0.5 级衍射效率随参量 h 的变化(关态)Fig. 9 Distribution of the 0.5-order diffraction efficiency of GLV with h in off state

在“开”态的情况下,由式(12),衍射效率与占空比 u 的关系如图 10 所示。当 $R_g=0$ 时,即射入间隙的光不发生反射, u 越大衍射效率越高,也就是说,间隙设计得越小,预定角度收集的光能量越多;当 $R_g=1$ 时,间隙设计要遵循前面的理论分析公式

(11)设计,才能使得预定角度收集的光能量越多。在“关”态的情况下,衍射效率与的关系如图 11 所示。当 $R_g=0$ 时,间隙设计得越小,预定角度收集的光能量越小;当 $R_g=1$ 时,间隙设计要遵循前面的理论分析公式(15)设计,才能使得预定角度收集的光能量越小。达到最优的开关系数,需选择占空比与间隙处反射率的最佳组合值,如表 2 所示。

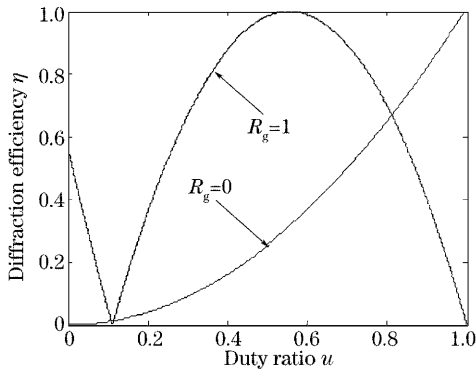


图 10 1 级衍射效率在不同 R_g 的情况下,随占空比 u 的变化(开态)

Fig. 10 Distribution of the first-order diffraction efficiency of GLV with u in on state

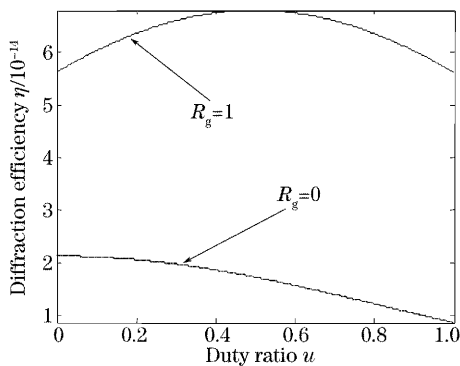


图 11 0.5 级衍射效率在不同 R_g 的情况下,随占空比 u 的变化(关态)

Fig. 11 Distribution of the 0.5-order diffraction efficiency of GLV with duty ratio u in off state

表 2 间隙处反射率与占空比的最佳组合值

Table 2 Best matching value of reflectivity of air gap R_g and duty ratio ratio u

R_g	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.2	0
u	0.557	0.554	0.551	0.548	0.545	0.527	1

4 结 论

从光栅光阀在投影显示系统中的应用背景出

发,通过对光栅光阀的光学特性分析和仿真,得到以下结论:

- 1) 当 $h=(n+1)\lambda_0/2, \delta=2(n+1)\lambda_0/4, n=0, 1, 2, \dots$ 时(考虑到结构尺寸,选择 $n=0$),光栅光阀在开态时的衍射效率只对单一波长 λ_0 最优;
- 2) 当 $h=\lambda_0/4$ 时,光栅光阀在关态时的衍射效率只对单一波长 λ_0 最优;
- 3) 综合分析 δ, h 的影响,设计时选择 $h=\lambda_0/2, \delta=\lambda_0/4$;
- 4) 当间隙处的反射率 $R_g=0$ 时,间隙越小系统的开关系数越好;
- 5) 当 $R_g \neq 0$ 时,要按照特定的表达式来设计间隙的宽度,以使系统的开关系数越好。

参 考 文 献

- 1 Qiu Shenggen, Zhou Jie, Liu Xu *et al.*. Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display's auto-focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 460~464 (in Chinese)
邱胜根,周 杰,刘 旭等. 阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 460~464
- 2 Ruan Shengping, Ma Ji, Liu Yonggang *et al.*. Preparation of novel polymer dispersed liquid crystal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 369~372 (in Chinese)
阮圣平,马 骥,刘永刚等. 新型聚合物分散液晶相位光栅的制备[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 369~372
- 3 Chen Jinlong, Hung Y Y. Large-shear digital speckle interferometry based on liquid crystal phase modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1292~1296 (in Chinese)
陈金龙,洪友仁. 基于液晶体的大错位量散斑相移技术研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1292~1296
- 4 Shigeo Ray Kubota. The grating light valve projector[J]. *Optics & Photonics News*, 2002, (9): 50~53
- 5 Qiu Liangtai, Yang Jiexiong. Project ion displays[J]. *Modern Display*, 1998, (4): 15~28 (in Chinese)
邱亮台,杨界雄. 投影显示[J]. *现代显示*, 1998, (4): 15~28
- 6 R. W. Corrigan, B. R. Lang, D. A. LeHoty *et al.*. An alternative architecture for high performance display[C]. *141st SMPTE Technical Conference and Exhibition*, New York, 1999
- 7 Timothy P. Kurzweg, Jose A. Martinez, Steven P. Levitan *et al.*. System simulation of a GLV projection system[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4985**: 160~170
- 8 Timothy P. Kurzweg, Steven P. Levitan, Jose A. Martinez *et al.*. A fast optical propagation technique for modeling micro-optical systems[C]. *DAC 2002*, New Orleans, Louisiana, USA, 2002
- 9 Zhong Xihua. *Light Wave Diffraction and Transform Optics* [M]. Beijing: Higher Education Publishing Company, 1984. 80~85 (in Chinese)
钟锡华. *光波衍射与变换光学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1984. 82~85
- 10 J. Zhang, H. Q. Fu, S. L. Huang. A method of gaining higher diffractive efficiency of diffractive spatial light modulator[C]. *4th International Workshop on Microfactories*, Shanghai, 2004. 244~249