

文章编号: 0253-2239(2006)08-1121-6

光栅平动式光调制器结构参量的优化分析*

张 洁 黄尚廉 闫 许 陈伟民 张智海 付红桥

(重庆大学光电工程学院教育部光电技术及系统重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 提出的光栅平动式光调制器是一种基于微机电系统(MEMS)工艺的光调制器,利用其表面具有的变形部分(可动光栅)提供衍射光栅,通过控制可动光栅的位移实现光调制器的两种工作状态,即亮态和暗态。根据衍射理论和傅里叶光学对光栅平动式光调制器工作状态的光学特性进行了详细的理论分析和仿真。重点讨论了可动光栅占空比、长度 L_1 、垂直光栅周期方向上边框长度、光栅栅条宽度、整个器件的光栅周期数等对光调制器工作性能的影响。结果表明,可动光栅与反射镜的距离为入射波长的一半时,调制器工作在暗态;而当可动光栅向反射镜方向下移入射波长的 $1/4$ 时,光调制器工作在亮态;要达到最佳的衬比度,需满足可动光栅的栅条宽度为光栅周期的一半, L_1 应该为光栅周期的整数倍;在不满足 L_1 为光栅周期 d 的整数倍时,可动光栅在垂直于光栅周期方向上的边框越小越好;光栅栅条越宽、光栅周期数越多,衬比度越高。

关键词: 傅里叶光学; 衍射; 光栅; 光调制器; 微机电系统

中图分类号: TN761 文献标识码: A

Optimization and Analysis for Structural Parameters of Grating Moving Light Modulator

Zhang Jie Huang Shanglian Yan Xu Chen Weimin Zhang Zhihai Fu Hongqiao
(Key Laboratory for Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: The proposed grating moving light modulator is based on micro-electromechanical system, the diffraction grating is provided by the deformed part on its surface, movable grating, and the two working states, on and off, are realized by controlling the displacement of movable grating. Detailed theoretical analysis and simulation for the optical properties of grating moving light modulator at working state are carried out, and the effects of duty ratio, length, frame length perpendicular to the grating period direction, grating stake width and period number of the movable grating on the working performance of grating moving light modulator are discussed with emphasis. The result shows that, the modulator is off when the distance between the movable grating and the mirror is half of the wavelength of incident light, and when the above distance is shortened to a quarter of the wavelength, the modulator is on. For the optimal contrast, it requires that, the stake width is half of the grating period and the length of the movable grating is integral times of the grating period. When the latter condition is not fulfilled, a high contrast can be obtained with short frame, narrow stake and large period number.

Key words: Fourier optics; diffraction; grating; light modulator; micro electro mechanical system

1 引 言

随着微光机电系统技术(MOEMS)的发展,利用微光机电系统技术开发的器件可以广泛应用于高清晰度数字电视技术、投影仪、打印机、光纤通信等

器件设备上,已成为当前研究的热点^[1~3]。基于微光机电系统技术的投影显示器的基本方案有两种:反射器件,德州仪器公司的方案称为数字微镜(DMD);衍射器件,最先由 Silicon Light Machines

* 国家自然科学基金(60578023)和重庆市院士基金(8883)资助课题。

作者简介: 张 洁(1980~),女,四川人,重庆大学光电学院博士研究生,主要从事微机电系统器件及系统方面的研究。
E-mail: zhangjie@cqu.edu.cn

导师简介: 黄尚廉(1936~),男,四川人,中国工程院院士,重庆大学光电工程学院教授,博士生导师,主要从事光学工程、仪器与科学、MEMS器件及系统的研究。E-mail: slhuang@cqu.edu.cn

收稿日期: 2005-09-01; 收到修改稿日期: 2005-11-08

提出的光栅光阀(GLV)。DMD 是利用微反射镜的偏转实现光路切换,复杂的多层结构导致制作过程复杂,良品率低下。光栅光阀具有结构简单的优点,但是其工作原理导致了工作面积小,只能作线阵,需和水平扫描镜结合使用来产生一个全二维显示,这就增加了机构的复杂性和装配难度,增大了整机的成本^[4~6]。所以有必要寻求一种有效工作面积大,易于集成面阵、工艺简单的光调制器。光栅平动式光调制器就是基于这样的目的而出现的,它基于光的衍射理论,衍射会导致能量的泄漏,所以有必要对光栅光调制器的光学特性进行分析,同时为了对加工进行指导,并对其结构参量进行优化分析。

2 基本原理

光栅平动式光调制器如图 1(a)所示^[7],它主要包括一个可动光栅和下面的反射面。具体结构为:硅基底 1,其上淀积刻蚀有绝缘层 3 和负电极 4;镀于负电极之上的底层反射面 5;位于底层反射面之上,四边与悬臂梁连接而被支撑的顶层反射面 6,顶层反射面是在弹性基底上镀上金属反射物形成的,该顶层反射面被均匀蚀刻出镂空矩形槽,形成可动光栅;两反射面之间留有合适的间距,顶层光栅上的反射面为正电极;使顶层反射面悬浮于底层反射面上方的悬臂梁 7,该悬臂梁下部支撑在硅基底上,位于在顶层反射面的四边外侧,以四角旋转对称支撑的形式与顶层反射面四边相连接,将顶层反射面支

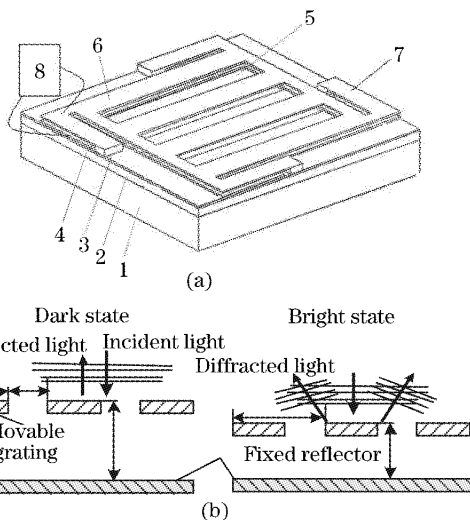


图 1 光栅平动式光调制器示意图。(a)基本结构, (b)两种工作状态,暗态和亮态

Fig.1 Schematic of grating moving light modulator. (a) Structure overview, (b) reflective (off) and diffractive (on) states

撑在底层反射面之上;在顶层反射面与底层反射面之间的激励装置 8,可使得光调制器中可动光栅下降。基本调制原理如图 1(b)所示,当不加激励装置时,入射光反射回光源;当加上激励装置以后,可动光栅向反射面的方向平行移动,入射光以一个特定的角度衍射出去,衍射投影示意如图 2 所示^[8],入射光通过一个反射镜直接照射到光调制器的像素上。当像素被激励后,在一定的空间立体孔径和镜子之间的衍射光被聚集,通过透镜聚焦直接照射在屏幕上,定义此时调制器处于亮态。反之,屏幕是黑的,因为入射光被沿着它的入射路径反射回去了,定义此时调制器处于暗态。

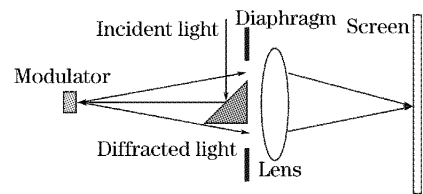


图 2 光栅平动式光调制器用于投影显示系统
Fig.2 Schematic of projection display with grating moving light modulator

3 理论分析

3.1 理想光学模型

入射光照射到可动光栅,由于可动光栅栅条之间的间隙的存在,入射光通过间隙也入射到下面的反射面,光入射到可动光栅和入射到下面的反射面存在一个相位差。忽略边缘效应,光栅平动式光调制器主要基于矩形相位光栅的衍射原理,通常矩形相位光栅就是各处振幅透射率相同,但相位呈矩形函数变化,这种光栅可以充分抑制 0 级衍射光,而明显地增强两侧对称的 1 级或者更高级次的光强。光栅平动式光调制器的理想模型如图 3 所示,其中 a 为可动光栅栅条宽度, d 为可动光栅周期, h 为可动光栅和下反射面的距离。

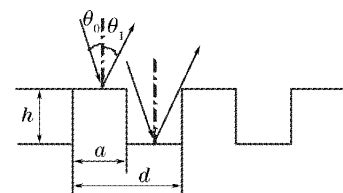


图 3 光栅平动式光调制器的理想光学模型
Fig.3 Ideal optical model of grating moving light modulator

光栅平动式光调制器的透射率函数为

$$t(x) = \{ \text{comb}(x/d) + \exp(i\phi) \text{comb}[(x + d/2)/d] \} \cdot \text{rect}(x/a), \tag{1}$$

其中 ϕ 为入射到光栅一个周期内相邻反射面的相位差, 即

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

根据傅里叶光学可得

$$T(f_x) = a \left[1 + \exp(i\phi) \exp\left(i2\pi \frac{d}{2} f_x\right) \right] \sum_n \text{sinc}(af_x) \delta\left(f_x - \frac{n}{d}\right), \tag{2}$$

其中 $f_x = n/d, n$ 为衍射级次。最后可得光强为(基于单色光入射, 振幅为 1)

$$I = T(f_x) \cdot T^*(f_x) = a^2 [2 + 2\cos(\phi + \pi n)] \cdot \sum_n \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right). \tag{3}$$

仿真时选择 $d = 2a$, 光栅强度随衍射级次的分布如图 4 所示。

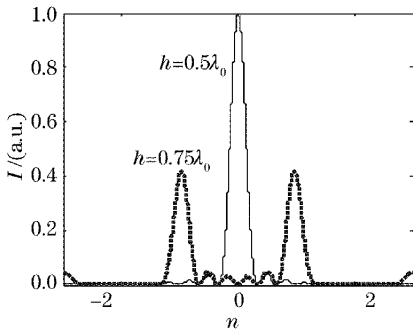


图 4 调制器在两种状态下的光能量分布
Fig. 4 Light energy distributions in both states

可以看出, 当 $h = 0.75\lambda_0$, 衍射效率在 ± 1 级最大, 为 81%; 在暗态情况下, $h = \lambda_0$, 光能量集中在 0 级, ± 1 级衍射效率为 0, 根据图 3, 屏幕上将没有光能量, 这样就达到了对光的调制作用。根据式(3), 定义占空比为 $u = a/d$, 衍射光强度随不同占空比下

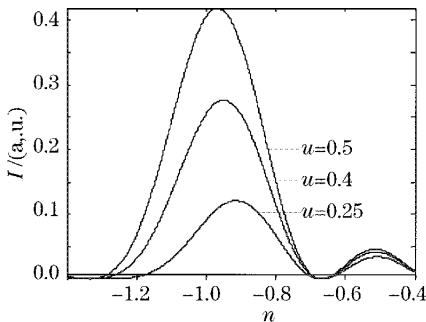


图 5 不同占空比下光能量的分布(亮态)
Fig. 5 Light energy distributions in different duty ratio (on state)

的分布如图 5 所示, 可以看出, 当 $h = 0.75\lambda_0$, 占空比为 0.5 时, 光栅在 -1 级的衍射效率达到理想值 40.4% (对称分布)。依据这个分析, 我们可以初步确定光栅平动式光调制器中可动光栅与反射面的距离在亮、暗态分别为 $h = 0.75\lambda_0, h = 0.5\lambda_0$ 以及可动光栅的最优占空比为 0.5。

3.2 实际光学模型

由于初步设计的工艺影响, 可动光栅的顶层镀上的反射膜除了中间的光栅栅条以外, 与栅条两端平行的支撑面上也镀有反射膜, 如图 6 所示, 所以光栅平动式光调制器的光学原理与理想的矩形相位光栅有点不同。以器件中心为原点建立直角坐标, 在 x, y 方向存在一个矩形窗函数, 即长度为 L_1, L_2 , 其中 $L_1 = md - d/2, m$ 为每个像素的光栅周期数, 对光栅进行调制, 同时在 y 方向存在两个边框 Δy 的调制作用。可动光栅的光栅周期为 d , 栅条宽度为 a 。根据预计加工光栅光调制器的光栅周期 d 为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$, 大于 5 倍波长, 可以采用标量衍射理论进行分析^[9]。

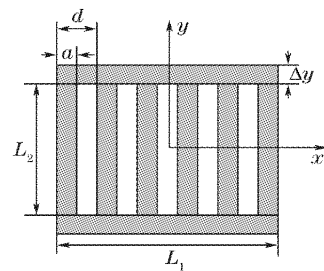


图 6 光栅平动式光调制器的实际光学模型
Fig. 6 Actual optical model of grating moving light modulator

根据图 6, 屏函数为

$$t(x, y) = \frac{1}{d} \left[\text{comb}\left(\frac{x}{d}\right) \cdot \exp(j\phi) + \text{comb}\left(\frac{x + d/2}{d}\right) \right] \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{L_1}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_2}\right) + \left[\text{rect}\left(\frac{y + \Delta y/2 + L_2/2}{\Delta y}\right) + \text{rect}\left(\frac{y - \Delta y/2 - L_2/2}{\Delta y}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{L_1}\right), \tag{4}$$

根据傅里叶光学^[10,11]可得

$$T(f_x, f_y) = \frac{1}{d} [d\text{comb}(df_x) \cdot \exp(j\phi) + d\text{comb}(df_x) \cdot \exp(j\pi l f_x)] \cdot \text{asinc}(af_x) \otimes \\ L_1 L_2 \text{sinc}(L_1 f_x) \cdot \text{sinc}(L_2 f_y) + \{\Delta y \text{sinc}(\Delta y f_y) \cdot \exp[i\pi(L_2 + \Delta y)f_x] + \\ \Delta y \text{sinc}(\Delta y f_y) \cdot \exp[-j\pi(L_2 + \Delta y)f_x]\} \otimes L_1 \text{sinc}(L_1 f_x), \quad (5)$$

根据卷积的定义 $I = T(f_x, f_y) \times T^*(f_x, f_y)$, 光强为

$$I = \left\{ \frac{aL_1 L_2}{d} \text{sinc}(L_2 f_y) \text{sinc}(af_x) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[L_1(f_x - n/d)] \right\}^2 \cdot [2 + 2\cos(\phi - \pi d f_x)] + \\ \left\{ \frac{aL_1 L_2}{d} \text{sinc}(L_2 f_y) \text{sinc}(af_x) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[L_1(f_x - n/d)] \right\} \cdot \\ \{L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y \text{sinc}(\Delta y f_y) \cdot 2\cos[\pi(\Delta y + L_2)f_y]\} \cdot [2\cos\phi + 2\cos(\pi d f_x)] + \\ \{L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y \text{sinc}(\Delta y f_y) \cdot 2\cos[\pi(\Delta y + L_2)f_y]\}^2. \quad (6)$$

4 分析与仿真

比较(3)式和(6)式,光栅平动式光调制器的衍射光强又是 $L_1, \Delta y, a, m$ 等的函数,有必要进一步分析。根据图6, x 方向是光调制器主要的色散方向,为简单起见,就只讨论一下 x 方向的光强分布的情况。当 $f_y = 0$ 时,(6)式为

$$I = \left\{ \frac{aL_1 L_2}{d} \text{sinc}(af_x) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[L_1(f_x - n/d)] \right\}^2 [2 + 2\cos(\phi - \pi d f_x)] + \\ \left\{ \frac{aL_1 L_2}{d} \text{sinc}(af_x) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[L_1(f_x - n/d)] \right\} \cdot [L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y] \cdot [2\cos\phi + 2\cos(\pi d f_x)] + \\ [L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y]^2, \quad (7)$$

依据图2的衍射投影示意图和图5的仿真结果,主要考虑光调制器在 ± 1 级上光能量的分布(光能量的对称分布,只考虑1级的光能量)。

当 $n = 1, h = 0.5\lambda_0$, 即光栅光调制器在暗态情况下,根据 $\sum_{x=-\infty}^{\infty} e\text{sinc}(ex) = 1$, (7) 式为

$$I = \frac{4}{\pi^2} \Delta y^2 L_1^2 \text{sinc}^2\left(\frac{L_1}{d}\right) = \frac{4}{\pi^2} \Delta y^2 d^2 \sin^2\left(\frac{\pi L_1}{d}\right), \quad (8)$$

光强与 Δy^2 成正比分布,如图7(a)所示。

当 $n = 1, h = 0.75\lambda_0$, 即亮态

$$I = \left\{ \frac{aL_1 L_2}{d} \text{sinc}(af_x) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[L_1(f - n/d)] \right\}^2 \cdot 4 + \\ \left\{ \frac{aL_1 L_2}{d} \text{sinc}(af_x) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}[L_1(f - n/d)] \right\} \cdot [2L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y] \cdot (-4) + [L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y]^2 = \\ 4a^2 L_2^2 \text{sinc}^2(af_x) + [2aL_1 L_2 \Delta y \text{sinc}(L_1 f_x) \text{sinc}(af_x)]^2 \cdot (-4) + [L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y]^2, \quad (9)$$

光强随 Δy 的变化如图7(b)所示。

光栅平动式光调制器主要是面向投影显示领域,光能量的利用率和衬比度都是重要的参量。对于光调制器应用于投影显示,光能量的利用率就直接体现在光调制器的衍射效率上。根据图2的投影示意图,收集 ± 1 级衍射光能量,假设在单色光入射的情况下,衬比度为

$$V = \frac{I_{\text{on}}(n = \pm 1)}{I_{\text{off}}(n = \pm 1)} = \frac{a^2 L_2^2 \text{sinc}^2(af_x) + [2aL_1 L_2 \Delta y \text{sinc}(L_1 f_x) \text{sinc}(af_x)]^2 \cdot (-4) + [L_1 \text{sinc}(L_1 f_x) \Delta y]^2}{(1/\pi^2) \cdot \Delta y^2 d^2 \sin^2(\pi L_1/d)}, \quad (10)$$

要使得衬比度最优,需要暗态时1级的能量为零,亮态时的衍射效率越高越好。这样,得到最优的衬比度的同时,实现了光能量利用率的最佳,所以可以直接把衬比度作为优化目标进行调制器结构参量分析。根据(10)式,需满足 $\Delta y = 0$ 或者 $L_1 = md$, m 为整数。此时光强为

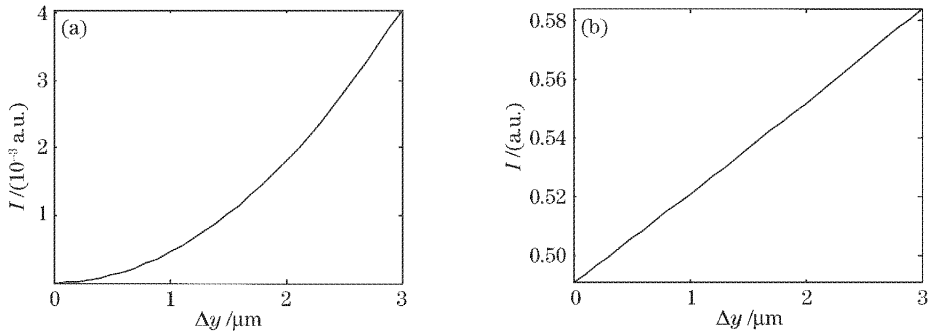


图 7 一级衍射光能量随参数 Δy 的变化。(a)暗态,(b)亮态

Fig. 7 Relation of energy of the first order diffracted light and Δy . (a) off state, (b) on state

$$I = \frac{4}{\pi^2} a^2 L_2^2 \text{sinc}^2(af_x), \quad (11)$$

因为 $f_x = 1/d, d = 2a$, 所以归一化光强在 1 级达到了理想值 40.53%, 与理想情况吻合。从图 7(a) 可以看出, 尽管亮态 1 级的能量随 Δy 的增加而增加, 这是所期望的, 但是从图 7(b) 来看, Δy 的增加导致了暗态下 1 级能量的增加。根据(10)式, 衬比度随 Δy 的变化如图 8 所示, 随着 Δy 的增加, 衬比度急剧下降。在不改变 L_1 的长度的情况下, 我们可以在工艺上做改动, 只是对可动光栅的栅条处进行镀反射膜处理。所以最优的情况为在满足条件 $\Delta y = 0$ 或者 $L_1 = md, m$ 为整数, 此时衬比度为无穷大。

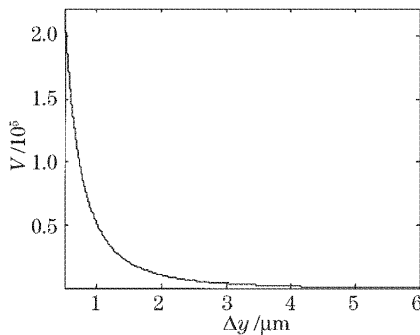


图 8 衬比度随参数 Δy 的变化

Fig. 8 Relation of contrast and parameter Δy

同时可动光栅的栅条的宽度 a , 整个调制器的光栅周期数 m 也是关键的参量, 根据(10)式, 衬比度随栅条宽度 a 的变化如图 9 所示, 可见栅条越宽衬比度越高。衬比度随每像素的光栅周期 m 的变化如图 10 所示, 当 m 为 $1/2$ 的奇数倍时, 根据式 $L_1 = md + d/2$, 此时 L_1 为光栅周期 d 的整数倍时, 衬比度是最优的, 如图 10(a) 所示, 与分析 Δy 的结论吻合; 当 m 为整数时, 即 L_1 为光栅周期 d 的整数倍还要加上半个周期, 此时 m 越多, 衬比度越大, 如图 10(b) 所示。

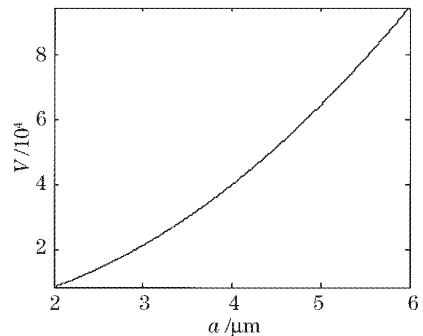


图 9 衬比度随参数 a 的变化

Fig. 9 Relation of contrast and parameter a

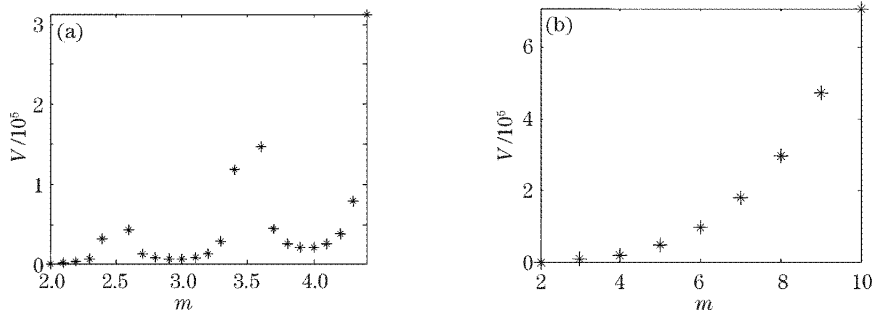


图 10 衬比度随参数 m 的变化曲线。(a) m 为 $1/2$ 的奇数倍,(b) m 为整数

Fig. 10 Relation of contrast and parameter m . (a) m is odd multiple of $1/2$, (b) parameter m is integer

5 结 论

从光栅平动式光调制器在投影显示系统中的应用背景出发,通过对其光学理论分析、结构参量影响分析和仿真得知,当关态时 $h = \lambda_0$, 开态时 $h = 0.75\lambda_0$, 光调制器的衬比度达到理想值,即无穷大。光栅平动式光调制器中的可动光栅对开关系数影响很大,为了达到最优的衍射效果,可动光栅的占空比应为 0.5。当可动光栅结构参量满足 $L_1 = md$, Δy 的存在就不会降低光调制器的衬比度,而当 $L_1 \neq md$, 衬比度会随着 Δy 的增加而急剧恶化,我们可以通过工艺,即只是对可动光栅的栅条处进行镀反射膜处理,实现 $\Delta y = 0$ 的要求。同时可动光栅栅条的宽度 a 和每像素的光栅周期数越多,衬比度越大。

致谢 感谢重庆大学光电学院潘英俊教授在文章理论分析部分的指导;感谢光栅光调制器课题组成员的讨论和合作;感谢唐德东博士在文章结构方面提出的有益意见。

参 考 文 献

- 1 Stephen D. Senturia. *Microsystems Design* [M]. Liu Zewen, Wang Xiaohong, Huang Qing'an transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 252~255 (in Chinese)
Stephen D. Senturia. 微系统设计[M]. 刘泽文, 王晓红, 黄庆安译. 北京: 电子工业出版社, 2004. 252~255
- 2 W. Men, J. Mohr, O. Paul. *Micro Systems Technology* [M]. Wang Chunmei, Yu Jie transl., Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 263~265 (in Chinese)
W. Men, J. Mohr, O. Paul. 微系统技术[M]. 王春海, 于杰译. 北京: 化学工业出版社, 2003. 263~265
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 Wu Yi, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Electromechanical characteristics analysis for the reflector-movable grating light modulator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(14): 1251~1253 (in Chinese)
伍艺, 黄尚廉, 张洁等. 反射面平动式光栅光调制器的实现及机电特性分析[J]. 中国机械工程, 2005, **16**(4): 1251~1253
- 7 Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu *et al.*. Optical characteristics analysis and simulation of grating moving light modulator [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(Suppl.): 218~220 (in Chinese)
张洁, 黄尚廉, 闫许等. 光栅平动式光调制器的光学特性分析和仿真[J]. 中国机械工程, 2005, **16**(增刊): 218~220
- 8 Timothy P K, Jose A M, Steven P *et al.*. System simulation of a GLV projection system[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4985**: 160~170
- 9 Chen Dewei, Li Yongping. Limitation of scalar method to the analysis and design of diffractive optics elements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 9~13 (in Chinese)
陈德伟, 李永平. 衍射光学元件分析和设计中标量理论的局限性[J]. 光电工程, 2004, **31**(6): 9~13
- 10 Zhong Xihua. *Light Wave Diffraction and Transform Optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 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
- 11 J. Zhang, H. Q. Fu, S. L. Huang. A method of gaining higher diffractive efficiency of diffractive spatial light modulator. *4th International Workshop on Microfactories*. Shanghai, China, 2004, **1**: 244~249