

反射镜平动式光栅光调制器的光学特性分析

张洁 黄尚廉 闫许 伍艺 张智海

(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 提出了一种反射镜平动式光栅光调制器, 每个像素主要由一个可动反射镜和上面的固定光栅组成, 通过控制可动反射镜和固定光栅的距离达到对入射光的调制. 依据标量衍射理论对反射镜平动式光栅光调制器工作状态的光学特性进行了详细的理论分析; 并仿真了光调制器的结构参量对衍射效率和对比度的影响. 发现: 当可动平板和光栅的距离为 λ_0 和 $5\lambda_0/4$, 像素表现为暗态和亮态; 这种光调制器的工作原理决定了其有效面积大, 具有形成面阵的潜力; 固定光栅占空比为 $1/2$ 时, 对比度最优; 同时给出了对比度随入射光带宽的关系, 即带宽越大, 对比度急剧下降.

关键词 衍射与光栅; 光调制器; 对比度; 衍射效率

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

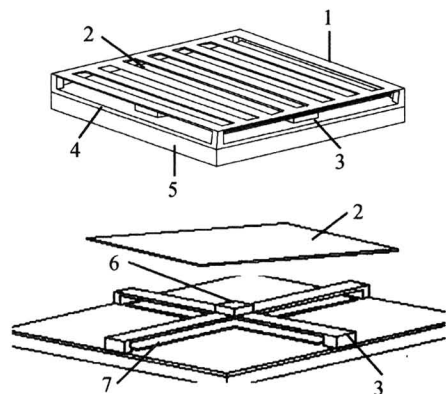
0 引言

近年来, 随着投影显示技术的发展, MOEMS (Micro-opto-electro-mechanical systems) 技术的成熟, 基于 MOMES 技术的核心显像器件的研究已成为当前研究的热点^[1,2]. 其主流技术有: DMD (Digital micro-mirror device)、GLV (Grating light valve) 等. DMD 是由 MEMS (Micro-electro-mechanical systems) 技术制造的上百万个可偏转的反射微镜构成的调制器, 通过微镜的偏转达到对光的调制, 但器件 DMD 工艺复杂, 导致成品率偏低, 价格昂贵^[1]. 光栅光阀的像素单元是光线反射元件, 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^[3]. GLV 具有工艺结构简单, 光学效率高等优点, 但由于其结构和工作原理决定了它有效衍射面积小, 无法实现器件的面阵结构, 在用于显示时, 需要借助机械扫描装置^[3,4]. 针对 DMD 器件工艺复杂、GLV 器件难以形成面阵等缺点, 本文提出了一种新型的光调制器, 即反射镜平动式光调制器, 仍然利用其结构中具有的可选的变形部分(可动反射镜), 构成衍射光栅. 同时, 因为衍射的作用使得该调制器在亮、暗态存在一定的光能量泄漏^[5,6], 降低了以光调制器为核心器件的投影机的投影性能, 所以有必要对反射镜平动式光调制器的光学特性进行分析.

1 反射镜平动式光栅光调制器

图 1 为单像素反射镜平动式光调制器^[7]. 其结构由基底、绝缘层、下电极、位于电极上方作为反射镜的可动平板、支持可动平板做垂直上下运动的支

撑梁、上面的固定光栅组成. 用于支撑可动平板的支撑梁, 下部支撑在基底上, 并镀有金属薄膜用作正电极, 使之同电极层之间形成可动的电容极板. 整个可动平板是由静电力的带动做整体垂直上下运动, 扩大了器件的有效衍射面积, 减小了像素之间的间隙, 可实现光调制器的面阵结构.



1. Fixed grating; 2. Movable reflector; 3. Support beam; 4. Dielectric; 5. Substrate; 6. Support; 7. Electrode

图 1 反射镜平动式光调制器的结构简图(仅显示了一个像素)

Fig. 1 The structure of reflector moving grating light modulator

器件的工作原理如图 2, 在未加电压的情况下, 可动反射镜和固定光栅的距离为 h_1 ; 施加电压以后, 支撑梁在静电力作用下做垂直上下运动, 带动可动反射镜垂直上下运动. 可动反射镜和固定光栅的

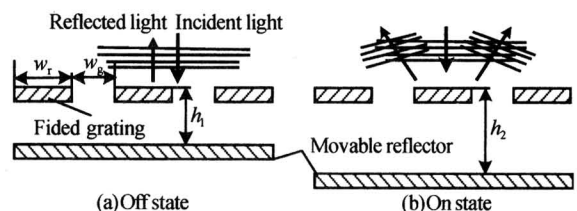


图 2 反射镜平动式光栅光调制器的两种工作状态
Fig. 2 Two states of reflector moving grating light modulator

*国家自然科学基金(No. 60578023)和重庆市院士基金(No. 8272, 8883)资助项目

Tel: 023-65112467 Email: jiezhang1980@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-00-04

距离变化到 h_2 , 经由固定光栅和可动反射镜的光束相位差随之改变, 从而达到调制光束的目的. 当该调制器用于显示领域时, 在某一个合适的位置收集光能量, 使之呈现显示中的暗、亮态.

2 理论分析

2.1 衍射分析

因为反射镜平动光调制器的固定光栅和可动反射镜都是反射层, 可以看作是由黑白光栅和可动反射镜一起构成的复合光栅结构, 如图3, 由光栅 G_1

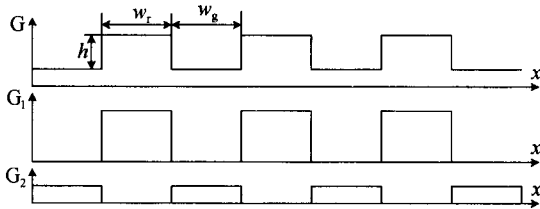


图3 反射镜平动式光调制器的光学模型

Fig. 3 Optical model of reflector moving grating light modulator

和 G_2 组成. 设复合光栅栅条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 $R_r, R_g, R_r = r_r^2, R_g = r_g^2$. 根据标量衍射理论^[8], 可得

$$E_{G_1} = r_r E_0 \frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} e^{j(N-1)\beta_1} \quad (1)$$

$$E_{G_2} = r_g E_0 \frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} e^{j(N-1)\beta_2} e^{j\phi} \quad (2)$$

式中 $\alpha_1 = \frac{\pi}{\lambda} w_r \sin \theta_1, \alpha_2 = \frac{\pi}{\lambda} w_g \sin \theta_1, \beta_1 = \beta_2 = \frac{\pi}{\lambda} (w_r + w_g) \sin \theta_1, \phi$ 是光束在光栅 G_1 和 G_2 产生的光程差. 光程差的计算如图4, 其中 t, l 分别为两光束在 x, y

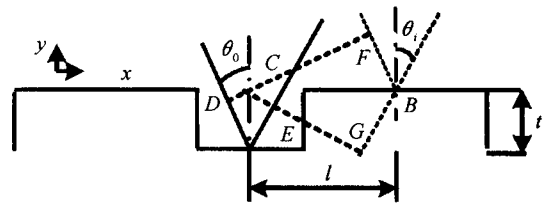


图4 光程差示意图

Fig. 4 Geometry of optical distance

轴的距离, 光程差计算可由式表示

$$\Delta = AD - BF + AE + BG = t(\cos \theta_0 + \cos \theta_1) + l(\sin \theta_1 - \sin \theta_0) \quad (3)$$

所以可得

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(h(\cos \theta_0 + \cos \theta_1) + \frac{w_g + w_r}{2} (\sin \theta_1 - \sin \theta_0) \right) \quad (4)$$

推导可得衍射效率为

$$\eta = R_r \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right]^2 + R_g \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right]^2 + 2 \sqrt{R_r R_g} \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right] \cdot \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right] \cdot \cos \phi \quad (5)$$

2.2 对比度的分析

显示领域中, 对比度是一个关键的参量, 通常对比度为亮、暗态光能量之比, 即

$$V = I_{ON} / I_{OFF} \quad (6)$$

当入射到反射镜平动式光调制器的光为单色光时, 对比度为亮、暗态衍射效率之比, 即

$$V = \eta_{ON} / \eta_{OFF} \quad (7)$$

当入射光具有一定的带宽, 即 $\lambda_0 - \Delta\lambda/2 \sim \lambda_0 + \Delta\lambda/2$, 则 $d\lambda$ 的入射光产生的衍射光强为

$$R_r \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right]^2 + R_g \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right]^2 + 2 \sqrt{R_r R_g} \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right] \cdot \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right] \cdot \cos \phi \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

那么整个衍射光强就是各个波长衍射光强的叠加, 对比度为

$$V = \left[\int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} R_r \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right]^2 + R_g \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right]^2 + 2 \sqrt{R_r R_g} \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right] \cdot \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right] \cos \phi_1 I(\lambda) d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} R_r \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right]^2 + R_g \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right]^2 + 2 \sqrt{R_r R_g} \left[\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\sin (N\beta_1)}{\sin \beta_1} \right] \cdot \left[\frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\sin (N\beta_2)}{\sin \beta_2} \right] \cos \phi_2 I(\lambda) d\lambda \right] \quad (9)$$

式中 ϕ_1 和 ϕ_2 是可动反射镜和固定光栅之间的距离 h_1 和 h_2 引起的.

3 仿真

仿真时器件结构参量值如表1.

表1 仿真时各个参量取值

参量	$w_r/\mu\text{m}$	$w_g/\mu\text{m}$	R_r, R_g	$\lambda_0/\mu\text{m}$	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$
值	3	6	1	0.5145	λ_0	$5\lambda_0/4$

根据式(5), 衍射效率的情况如图5, 其中 k 为衍射级次, 当 $h_1 = \lambda_0$ 时, 能量全部集中在0级, ± 1

级衍射光能量为 0; 当 $h_2 = 5\lambda_0/4$ 时, 81% 的能量集中在 ± 1 级. 器件应用于显示领域时, 收集 ± 1 级光能量, 这样就实现了显示时的亮、暗态. 在理想情况下, 即单一波长入射反射镜平动式光调制器, 且高度精确控制时, 可以实现对比度为最优.

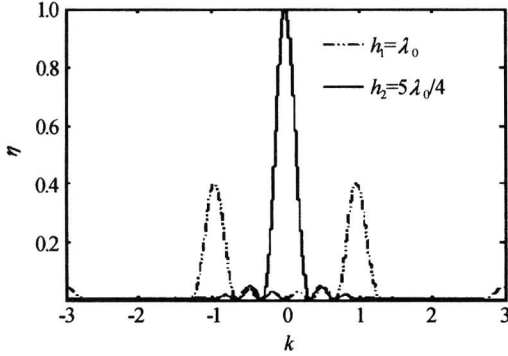


图 5 衍射效率在亮暗态时的不同分布
Fig. 5 Diffraction efficiency of reflector moving grating light modulator in on state and off state

该光调制器中上面的固定光栅是一个关键器件, 根据式(5), 其结构参量对衍射效率影响很大, 定义固定光栅的占空比为 $u = \omega_r / (\omega_r + \omega_g)$, 器件衍射效率与占空比的关系如图 6、7. 可见, 为使得对比

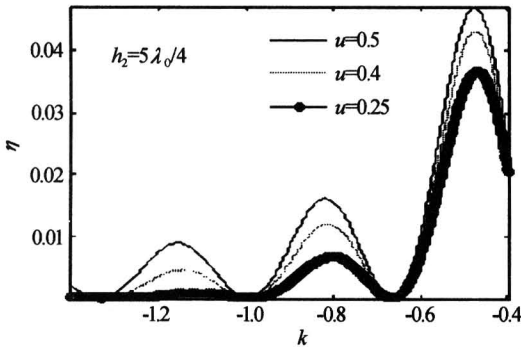


图 6 衍射效率随占空比的变化(暗态)
Fig. 6 Diffraction efficiency with occupation ratio in off state

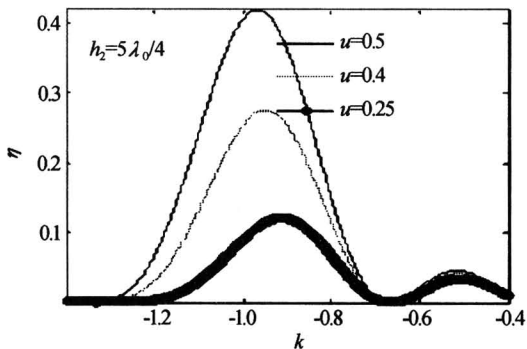


图 7 衍射效率随占空比的变化(亮态)
Fig. 7 Diffraction efficiency with occupation ratio in on state
度最好, 最优的占空比为 1/2.

器件衍射效率随波长的变化如图 8、9. 当 $h_1 = \lambda_0$ 时, 器件在 1 级的衍射效率只对设计波长 λ_0 达到最优, 零; 当 $h_2 = 5\lambda_0/4$ 时, 器件在 1 级的衍射效率只对设计波长 λ_0 达到最优, 40.4%. 可见, 在 h 为

定值的情况下, 衍射效率只对单一波长最优, 即 λ_0 .

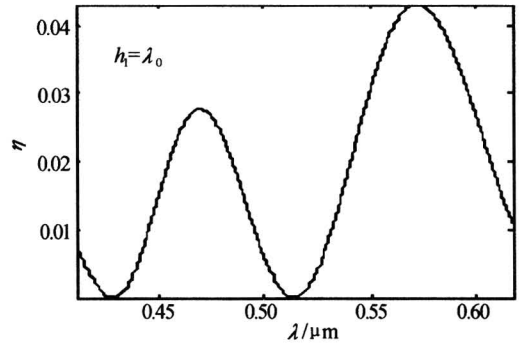


图 8 衍射效率随波长的变化(暗态)
Fig. 8 1st order diffraction efficiency with wavelength in off state

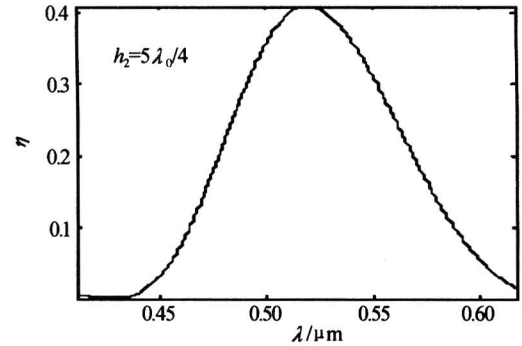


图 9 衍射效率随波长的变化(亮态)
Fig. 9 1st order diffraction efficiency with wavelength in on state

当入射光为宽带光源时, 根据式(9), 可以得到对比度受光源带宽的影响, 如图 10. 随入射光带宽的增加, 对比度急剧下降.

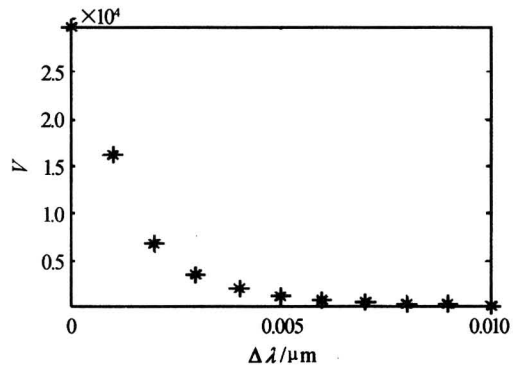


图 10 入射光带宽对对比度的影响
Fig. 10 Contrast ratio with wavelength width of incident light

从图 5 和图 10 可见, 精确控制高度 h_1 和 h_2 , 采用窄带光源, 反射镜平动式光栅光调制器的衍射效率、对比度都将达到比较理想的值. 同时固定光栅不需要参与机械运动, 有效解决了 GLV 的结构必须存在的间隙(两条细长梁之间的间隙), 提高了器件的光学性能.

4 结论

本文从 MOEMS 光调制器在投影显示系统中

的应用背景出发,通过反射镜平动光调制器的光学特性分析和仿真,得到以下结论:1) 当 $h_1 = \lambda_0$ 时,反射镜平动式光调制器在暗态时的衍射效率只对单一波长 λ_0 最优;2) 当 $h_2 = 5\lambda_0/4$ 时,反射镜平动光调制器在亮态时的衍射效率只对单一波长 λ_0 最优;3) 为了得到高的衍射效率,设计时需要使固定光栅占空比为 $1/2$;4) 反射镜平动式光调制器应用于显示时,其对比度随入射光带宽的增加而明显下降,这对光源提出了要求,为今后光学系统的设计提供了理论依据;5) 从结构中分离的固定光栅来看,反射镜平动式光栅光调制器的加工工艺较 DMD 的三层结构简单;同时,光学分析结果显示,采用窄带光源、精确控制高度 h_1 和 h_2 ,此光调制器的衍射效率、对比度明显优于 GLV.

关于反射镜平动式光栅光调制器的电力学、结构仿真将另文分析.

致谢:感谢重庆大学光电工程学院陈伟民教授为本人的理论分析部分提出的宝贵意见;感谢付红桥老师在结构方面的讨论;感谢光栅光调制器项目组成员的合作和讨论.

参考文献

- 1 邱亮台,杨界雄. 投影显示. 现代显示,1998,(4):15~28
Qiu L T, Yang J X. *Modern Display*, 1998, (4):15~28
- 2 杨立功,顾培夫. 液晶投影显示中分色合色膜系空间角

度特性的研究. 光子学报,2003,32(1):117~120

Yang L G, Gu P F. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1):117~120

- 3 Shigeo R K. The grating light valve projector. *Optics & Photonics News*, 2002, 13(9):50~53
- 4 Timothy, Jose A M, Steven P L, et al. System simulation of a GLV projection system. *Proc of SPIE2003*, 4985:160~170
- 5 王淮生,张志刚,柴路,等. 一般多值相位光栅菲涅耳衍射光场的分析. 光子学报,2003,32(11):1402~1404
Wang H S, Zhang Z G, Cai L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(11):1402~1404
- 6 吕银环,王汝笠,柴震海,等. 基于衍射光学元件色散特征的三维建模系统. 光子学报,2004,33(9):1144~1147
Lü Y H, Wang R Q, Cai Z X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(9):1144~1147
- 7 伍艺,黄尚廉,张洁,等. 反射面平动式光栅光调制器的实现及其机电特性分析. 中国机械工程,2005,16(14):1251~1253
Wu Y, Huang S L, Zhang J, et al. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(14):1251~1253
- 8 钟锡华. 光波衍射与变换光学. 北京:高等教育出版社,1984. 82~85
Zhong X H. *Light Wave Diffraction and Transform Optics*, Beijing: Higher Education Publishing Company, 1984. 80~85

Optical Performance Analysis and Simulation of Reflector Moving Grating Light Modulator

Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu, Wu Yi, Zhang Zhihai

The Key Laboratory for Opto-electronic Technology & System, Education Ministry of China,
Opto-electronic Engineering Department, Chongqing University, Chongqing 400030

Received date:2005-05-17

Abstract A novel spatial light modulator called reflector moving grating light modulator is proposed. Each pixel mostly consists of a fixed grating and a movable reflector. The optical performance of this modulator is a key parameter, so it is necessary to analyze the optical performance. With scalar diffraction theory, its optical performance is analyzed in details. Meanwhile, computer simulation is carried on, and the influence of several key parameters on the diffraction efficiency and contrast ratio is presented. All these results indicate that the height between the fixed grating and movable reflector must be controlled at λ_0 in off state, $5\lambda_0/4$ in on state respectively, and the occupation ratio of the fixed grating has an important influence on the optical performance whose optimized value is 0.5. The contrast ratio at different wavelength width is given out, wider wavelength, worse contrast ratio.

Keywords Diffraction and Grating; Light modulator; Contrast ratio; Diffraction efficiency

Zhang Jie was born in 1980. She received her B. E. degree in mechanism electron engineering at Opto-electronic Engineering Department of CQU (Chongqing University), China, in 2002. She is now studying as a Ph. D in Chongqing University. She is engaged in the area of microsystem.

