

文章编号: 0253-2239(2009)08-2282-05

基于光栅光调制器的投影显示光学系统设计与实验

张 洁 孙吉勇 秦 逸 张智海 朱 永

(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 基于微机电系统(MEMS)光栅光调制器在静电压驱动下可改变其衍射效果,并在光学 $4f$ 系统中实现光信息处理,从而应用于投影显示。在典型 $4f$ 光学系统基础上,优化设计了基于 MEMS 光栅光调制器的投影显示系统,根据菲涅耳衍射分析了该系统;分别利用两种光栅光调制器实验样品在设计的光学系统中进行了显示实验研究。结果表明,该系统可实现投影显示;配以驱动电路可实现动态显示,并可进行工作电压、吸合电压、响应频率等特性测试。

关键词 衍射; 显示; 光栅; 光调制器

中图分类号 TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2282

Design and Experiment of Projection Display Optical System Based on Grating Light Modulator

Zhang Jie Sun Jiyong Qing Yi Zhang Zhihai Zhu Yong

(Key Laboratory for Opto-Electronic Technology & System, Education Ministry of China,
College of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract A micromachined optical modulator called grating light modulator (GLM) with electrostatic actuation, fabricated by the conventional process, is described. GLM modulates the light energy by changing the distance of the movable grating and the underlying fixed reflector, which can be applied in projection display in four-focus optical system. With the typical four-focus optical system, the projection display optical system based on GLM is optimized and designed, which is analyzed by Fresnel diffraction. The static and dynamic display experimental systems are designed. The experimental results indicate that the GLM technique has characteristics that make it suitable for projection display applications and several characteristic measurement experiments can be carried on by using such system, such as the working voltage, the pull-in voltage, the response frequency and so on.

Key words diffraction; display; grating; light modulator

1 引 言

近年来,随着微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的成熟和投影显示技术的发展,面向显示基于 MEMS 的光调制器已成为当前研究的热点之一^[1~10]。重庆大学提出的基于 MEMS 的光栅光调制器(Grating light modulator, GLM)^[11~15],通过改变可动光栅和下反射镜(面)的距离来实现对光能量的调制。

投影显示光学系统设计是光栅光调制器应用于投影显示的关键部分,文献[13~15]利用傅里叶光学分析了在光学 $4f$ 系统中实现 GLM 光信息处理,本文在此基础上,进行系统优化,并根据菲涅耳衍射分析整个光学系统;搭建实验平台,进行验证实验。

2 光栅光调制器原理和工艺

GLM 器件单像素结构如图 1(a)所示,主要由 1

收稿日期: 2008-09-24; 收到修改稿日期: 2008-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(60708017)、中国博士后科学基金(20070410773)和重庆市院士基金(CSTC, 2008BC3002)资助课题。

作者简介: 张 洁(1980-),女,博士,副教授,主要从事基于 MEMS 的光学器件和系统等方面的研究。

E-mail: zhangjie@cqu.edu.cn

衬底、2 绝缘层、3 悬臂梁、4 下反射镜和 5 可动光栅组成。可动光栅由 4 个按顺时针排列的悬臂梁支撑，并与下反射镜一起构成相位可变的相位光栅。在 p 型硅片的<100>面上氧化形成氧化层；溅射、光刻硅铝，形成下反射镜；PECVD 一层二氧化硅，该层是起绝缘的作用，防止上层的可动光栅被下拉时与下反射镜接触而短路；旋涂聚酰亚胺(PI)作为形成空气层的牺牲层，其厚度为通过控制空气层的厚度来控制下反射镜和上层可动光栅的距离；溅射、光刻硅铝，形成上层光栅；释放牺牲层。器件加工后器件阵列扫描电镜图 1(b)所示。

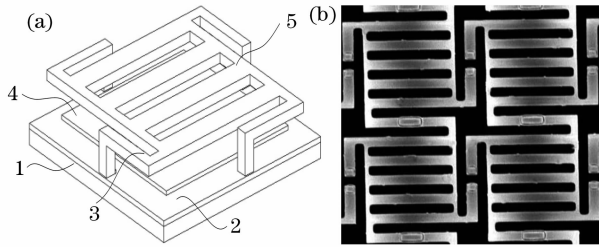


图 1 光栅光调制器。(a) 单像素 GLM 器件结构；
(b) GLM 阵列扫描电镜图

Fig. 1 Grating light modulator. (a) Single-pixel GLM structure; (b) SEM photo of GLM array

根据相位光栅的衍射原理^[13~15]，当可动光栅与下反射镜之间的光程差为 $(2k + 1)\lambda/4$ (k 取整数， λ 为入射光的波长)的时候，衍射光集中在正负一级；当可动光栅与下反射镜之间的光程差为 $k\lambda/2$ 的时候，衍射光集中在零级。从而入射光的相位通过可动光栅的上下活塞式运动得到调制，实现光的开关态。应用与投影显示时，假设调制器下反射镜和上层可动光栅之间的初始光程差为 $(2k + 1)\lambda/4$ ，衍射光强主要集中在正负一级，屏幕上得到的为亮点，对应于显示的亮态；通过外加激励电压，使得上层可动光栅在静电力的作用下向下移动，光程差变为 $k\lambda/2$ ，正负一级的衍射光强为零，屏幕上得到的为暗点，对应于显示的暗态。由多个 GLM 形成的二维面阵就

可以实现二维图像的显示效果。

3 投影显示光学系统

GLM 的光学信息处理主要是利用 $4f$ 系统在频谱面上得到光栅光调制器的频谱^[8]，在该面上利用空间滤波器对 GLM 的衍射谱进行滤波处理，然后利用反傅里叶变换透镜将信息从频域变换到空域，在成像面上得到 GLM 的像。如果是用零级衍射光投影成像，在频谱面上进行的光学处理只是滤除 ± 1 级衍射光，即滤波器的功能是通过零级衍射光，阻挡 ± 1 级衍射光。对衍射光的这种处理只要在零级和 ± 1 级衍射光能被分开的地方就可以进行，并不一定非要在频谱面上。因此，在 GLM 的后方有可能找到一个合适的距离 z 使得衍射光可以分开。将滤波器放置在大于 z 的位置就可以对衍射光实现滤波。优化后的投影显示光学系统各个组成部件的位置关系如图 2 所示。

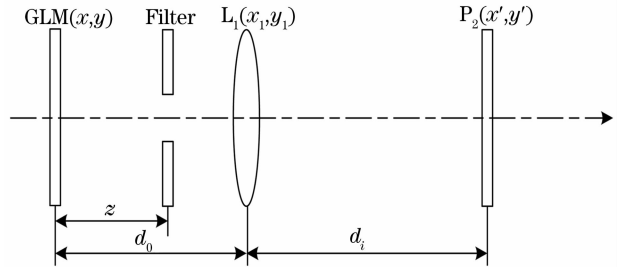


图 2 滤波器偏移后的光传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the light transmission when the filter is displaced

假设调整后的光栅光调制器与滤波器之间的距离为 z ；光栅与透镜 L_1 之间的距离为 d_0 ；透镜 L_1 和屏 P_2 之间的距离为 d_i ；透镜 L_1 的焦距为 f 。入射光通过光栅光调制器后的振幅分布为 $t(x, y)$ ，为了讨论的方便，考虑没有滤波器的情形，根据菲涅耳衍射传播公式，可以求得入射到透镜 L_1 前方位置上的光的振幅分布为

$$U_1(x_1, y_1) = \frac{\exp(jkd_0)}{j\lambda d_0} \exp\left[j \frac{k}{2d_0}(x_1^2 + y_1^2)\right] \iint t(x, y) \exp\left[j \frac{k}{2d_0}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-j \frac{k}{d_0}(xx_1 + yy_1)\right] dx dy, \tag{1}$$

光波通过透镜后产生的相位延迟为： $\exp(jkn\Delta_0) \exp\left[-j \frac{k}{2f}(x_1^2 + y_1^2)\right]$ ，式中 n 为透镜的折射率， Δ_0 为透镜中心厚度，考虑到 $\exp(jkn\Delta_0)$ 是一个常数相位因子，可以略去。因此，由菲涅耳衍射的性质和(1)式，可求得光通过透镜后，紧靠透镜平面上的光振幅分布：

$$U'_1(x_1, y_1) = U_1(x_1, y_1) \exp\left[-j \frac{k}{2f}(x_1^2 + y_1^2)\right] = \frac{\exp(jkd_0)}{j\lambda d_0} \exp\left[j \frac{k}{2d_0}(x_1^2 + y_1^2)\right] \iiint t(x, y) \exp\left[j \frac{k}{2d_0}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[-j \frac{k}{d_0}(xx_1 + yy_1)\right] \exp\left[-j \frac{k}{2f}(x_1^2 + y_1^2)\right] dx dy, \quad (2)$$

同理,根据菲涅耳衍射传播公式,并略去常数相位因子,整理得光传播到 P_2 面上的光振幅分布为

$$U(x', y') = \frac{1}{\lambda^2 d_0 d_i} \exp\left[j \frac{k}{2d_1}(x'^2 + y'^2)\right] \iiint t(x, y) \exp\left[-j \frac{k}{2} \left(\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} - \frac{1}{f}\right)(x^2 + y^2)\right] \times \exp\left[j \frac{k}{2d_0}(x^2 + y^2)\right] \exp\left[-j \frac{k}{d_0}(xx_1 + yy_1)\right] \exp\left[-j \frac{k}{d_1}(x_1 x' + y_1 y')\right] dx dy dx_1 dy_1, \quad (3)$$

令 $\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_i} - \frac{1}{f} = 0$, 定义: $\tilde{x}_1 = \frac{x_1}{\lambda d_i}$, $\tilde{y}_1 = \frac{y_1}{\lambda d_i}$, $M = \frac{d_i}{d_0}$; $\tilde{x}_1 = \frac{x_1}{\lambda d_i}$, $\tilde{y}_1 = \frac{y_1}{\lambda d_i}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $M = \frac{d_i}{d_0}$ 为放大倍数,

(3) 式变为

$$U(x', y') = M \exp\left[j \frac{k}{2d_i}(x'^2 + y'^2)\right] \iiint t(x, y) \exp\left[j \frac{k}{2d_0}(x^2 + y^2)\right] \times \exp\{-j2\pi[(Mx + x')\tilde{x}_1 + (My + y')\tilde{y}_1]\} dx dy d\tilde{x}_1 d\tilde{y}_1, \quad (4)$$

根据傅里叶变换性质

$$\iint \exp\{-j2\pi[(Mx + x')\tilde{x}_1 + (My + y')\tilde{y}_1]\} d\tilde{x}_1 d\tilde{y}_1 = \delta(Mx + x', My + y'), \quad (5)$$

利用(5)式,(4)式可以简化为

$$U(x', y') = \frac{1}{M} \exp\left[j \frac{k}{2d_1}(x'^2 + y'^2)\right] \exp\left[j \frac{k}{2d_0} \left(\frac{x'^2 + y'^2}{M^2}\right)\right] t\left(-\frac{x'}{M}, -\frac{y'}{M}\right), \quad (6)$$

由(6)式可得到 P_2 面上光强分布

$$I(x', y') = |U(x', y')|^2 = \frac{1}{M^2} \left| t\left(-\frac{x'}{M}, -\frac{y'}{M}\right) \right|^2. \quad (7)$$

由(7)式的推导过程可以看到,当光栅光调制器、透镜 L_1 和屏 P_2 之间的位置关系满足: $1/d_0 + 1/d_i - 1/f = 0$ 时。在 P_2 上位置上将得到一个光栅光调制器的像。如果考虑到滤波器的影响,当零级衍射光通过滤波器的时候,在 P_2 位置得到的是光栅光调制器的零级衍射光所成的像。当 GLM 的相位差为 $(2k-1)\pi$ 的时候,由于衍射光主要集中在 ± 1 级,零级衍射位置处没有光能量,所以对应的像为暗态。当调制器的相位差为 $2k\pi$ 时,衍射光集中在零级,因此,在 P_2 位置所对应的像为亮态。此时通

过一个透镜和滤波器就可以实现对调制器的光学信息处理,避免了 $4f$ 系统中使用两组透镜的情况。

对于透镜 L_1 ,如果选择合适的焦距 f 和它到调制器的距离 d_0 ,可以使得透镜 L_1 直接将衍射光放大成像到投影屏上。此时透镜 L_1 同时起着光学信号处理和投影成像的功能。简化后的光路如图 3 所示。

对于光栅光调制器,其光学信息处理只是对衍射的零级或 ± 1 级进行滤波,因此滤波器的位置不一定必须放置在频谱面的位置,从而为整个光学系统进行优化提供了可能。通过上面分析可见,直接

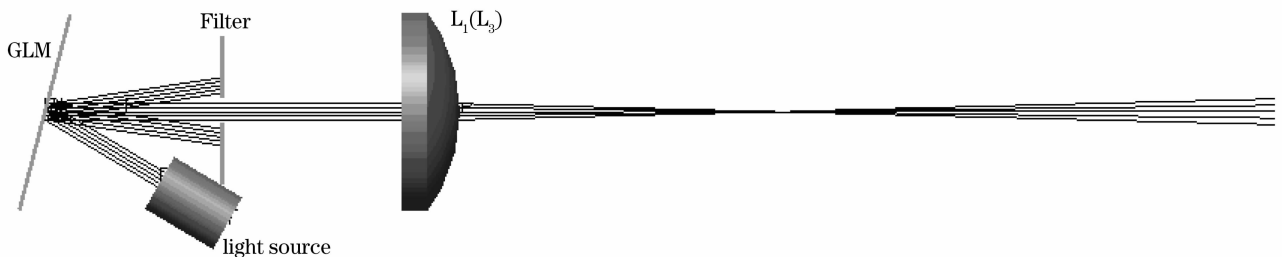


图 3 改进的光栅光调制器投影光学系统示意图

Fig. 3 Improved optical projection system with grating light modulator

利用一个透镜和狭缝滤波器,就可以实现对调制器的信息处理和投影成像。

4 投影显示实验

根据图 3 投影光学系统示意图,搭建的实验系统如图 4 所示(用 ± 1 级衍射光投影成像)。入射光被调制器衍射后,经过滤波器滤波,被投影透镜变换、投影成像到投影屏上。光栅光调制器样品一由 A 和 B 两个部分组成,A 部分是铝反射镜,等效于

光栅光调制器中光程差为 $2k\pi$ 的相位光栅;B 部分是光程差为 $(2k-1)\pi$ 的二维矩形槽相位光栅。如果系统用 ± 1 级衍射光投影成像,则在投影像面上,A 对应于光栅光调制器中那些状态为暗态的像素;B 对应于光栅光调制器中那些状态为亮态的像素。图 5 分别为 ± 1 和 0 级衍射光投影成像得到的实验结果。图 6 分别为光栅光调制器实验样品二, 0 和 ± 1 级衍射光投影成像结果。

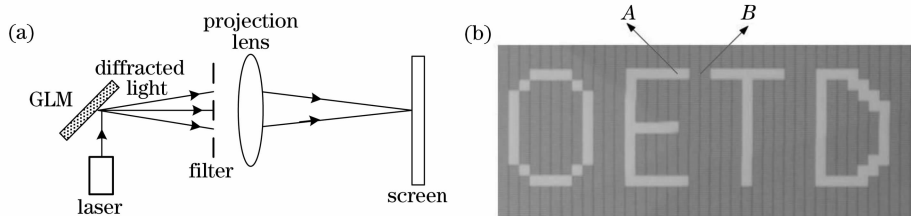


图 4 实验(a)光栅光调制器投影成像实验装置示意图(b)光栅光调制器样品一

Fig. 4 Experiments (a) schematic structure of the experimental setup for static GLM based projection system (b) No. 1 grating light modulator

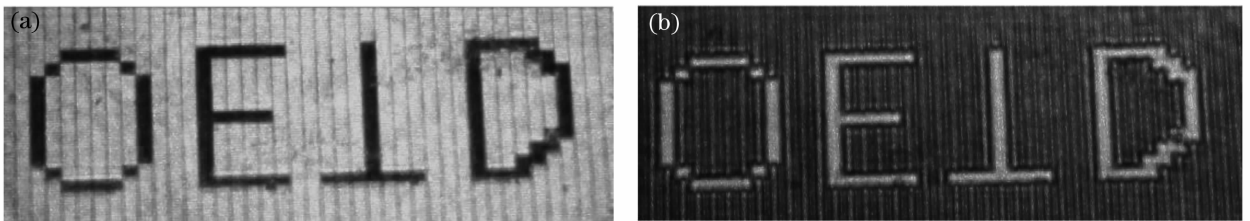


图 5 静态光栅光调制器投影成像实验结果。(a) ± 1 级衍射光;(b)0级衍射光

Fig. 5 Projection image of the static GLM (a) collecting the first order diffracted light; (b) collecting the zero order diffracted light

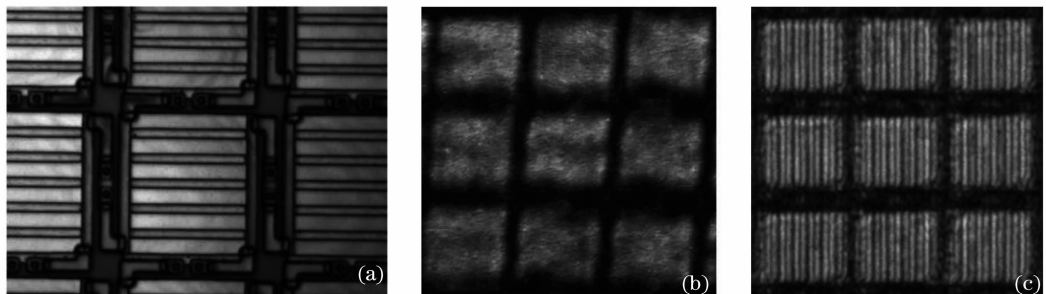


图 6 光栅光调制器光投影成像实验结果。(a) GLM 样品 2; (b) 0 级衍射光所成的像; (c) ± 1 级衍射光所成的像

Fig. 6 Experimental result of the projection display system based on GLM. (a) No. 2 Experimental GLM; (b) image by collecting the zero-order diffracted light; (c) image by collecting the first-order diffracted light

依据本实验系统,在象面上放置光电二极管,可以获得光信号;对 GLM 施加电压,光电二极管测得的信号会发生改变,通过观察该信号,可获得 GLM 的工作电压。当施加的电压达到一定时,该信号会保持不变,此时施加的电压就是 GLM 的吸合电压。当改变施加电压的频率时,同样可以观察到该信号

的变化,从而可以得到 GLM 的响应频率。

5 结 论

利用菲涅耳衍射分析了整个光学系统,搭建了投影显示实验系统,进行了实验研究。研究表明:该系统可实现投影显示,配以驱动电路可实现动态显

示;在该系统的像面上放置光电二极管,可进行工作电压、吸合电压、响应频率等特性测试。下一步将进行三色合成投影显示系统分析。

致谢 感谢中国电子集团第二十四研究所在器件加工中给予的帮助,重庆大学微系统中心提供的仿真和实验平台。

参 考 文 献

- Mao Huibing, Xing Peisheng, Lai Zhongsheng. Theoretical and experimental study on driving mechanism for micromechanical modulator[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(3): 160~164
茅惠兵,忻佩胜,赖宗声. 微机械光调制器激励机制的理论和实验研究[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(3): 160~164
- 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谐特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1125~1129
- S. Sakarya, G. Vdovin, P. M. Sarro. Spatial light modulators based on micromachined reflective membranes on viscoelastic layers[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, **108**(1~3): 271~275
- J. Li, A. Q. Liu, W. D. Zhong *et al.*. MEMS switch based serial reconfigurable OADM[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(1~3): 81~89
- A. Q. Liu, X. M. Zhang, J. Li *et al.*. Single-/multi-mode tunable lasers using MEMS mirror and grating[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, **108**(1~3): 49~54
- Boliang Luo, Chengcheng Wang, Jinglei Du *et al.*. Design and analysis of phase gratings for laser beams coherent combination [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83**(4~9): 1368~1371
- Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi *et al.*. Characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 374~379
叶必卿,陈 军,福智焯史等. 液晶空间光调制器的斜入射特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 374~379
- Li Baohua, Yang Kuntao, Zeng Youyi. COlor-combination prism in liquid-crystal display[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 107~109
李宝华,杨坤涛,曾有义等. 液晶显示中的合色棱镜[J]. *光学技术*, 2004, **30**(1): 107~109
- 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
- Wang Wei, Zhou Changhe. High-fidelity replication technology of polymer micro-structure diffraction gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1363~1366
王 伟,周常河. 高精度微结构聚合物光栅的复制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1363~1366
- Sun Jiyong, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Two-dimensional grating light modulator for projection display[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **47**(15): 2813~2820
- Huang Shanglian, Yan Xu, Zhang Jie *et al.*. Optical characteristic analysis of grating moving light modulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 749~753
- Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao *et al.*. Structural analysis and optimization 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
- Sun Jiyong, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Optical analysis and experiments of two-dimensional grating light modulator array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1130~1140
孙吉勇,黄尚廉,张 洁等. 二维光栅光调制器阵列的光学分析与实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1130~1140
- Zhang Jie, Huang Shanglian, Zhang ZHihai *et al.*. Experiments and structural optimization of micro-electro-mechanical system based grating moving light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1565~1569
孙吉勇,黄尚廉,张智海等. 基于微机电系统光栅平动式光调制器实验和优化设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1565~1569