

文章编号: 0253-2239(2010)01-0186-06

# 光栅光调制器投影系统信息处理优化设计

韦 玮<sup>1,2</sup> 陈伟民<sup>1,2</sup> 黄尚廉<sup>1,2</sup> 王 宁<sup>1,2</sup> 金 珠<sup>2</sup> 朱 永<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; <sup>2</sup> 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 光学信息处理是投影系统设计的关键环节,利用部分相干光理论分析了具有一定光斑尺寸的激光照明下滤波面上的光学特性并进行了数值仿真。结果表明,滤波面上的衍射光强分布是调制器透过率函数傅里叶变换模的平方与激光光斑尺寸在滤波面上几何投影间的卷积;滤波面上各衍射级次出现了展宽,并产生了混叠;各级次混叠的程度随滤波面与调制器间距的增大而减弱。搭建了相关实验系统观察到了滤波面上的衍射图样,实验结果和理论分析一致。最后提出了在光栅光调制器与滤波面间设置一个会聚透镜来减小系统光学尺寸,提高系统信息处理效果的方法,并通过实验得到了最优方案,为研究光栅光调制器的微型化投影系统提供了理论基础与实验指导。

**关键词** 信号处理;光栅光调制器;光学信息处理;扩展光源

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0186

## Optimal Design for Optical Information Processing of Projection System Based on Grating Light Modulators

Wei Wei<sup>1,2</sup> Chen Weimin<sup>1,2</sup> Huang Shanglian<sup>1,2</sup> Wang Ning<sup>1,2</sup> Jin Zhu<sup>2</sup> Zhu Yong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Systems, Ministry of Education, University of Chongqing, Chongqing 400044, China

<sup>2</sup> Department of Optic-Electronic Engineering, University of Chongqing, Chongqing 400044, China

**Abstract** Analysis of the optical characteristic on the filtering plane of the projection system based on grating light modulators (GLM) illuminated by extended light source is the key section of the optical information processing. The optical characteristic on the filtering plane of the projection system illuminated by a laser facular of certain size is analyzed using the theory of partially coherent light and the numerical simulation. The result shows that the diffraction light intensity distribution on the filtering plane is the convolution of the squared Fourier transform of the modulator's transmittance function and the geometric projection of the laser facular size on the filtering plane. The diffraction order extends on the filtering plane, and the aliasing phenomenon appears that through the distance between the filtering plane and the modulator increasing while the degree of aliasing decreases. The relevant experimental system is constructed and the diffraction pattern on the filtering plane is obtained. The experimental results accord with the theoretical analysis. In the end, we propose that a converging lens set between the modulator and the filtering plane could reduce the optical dimension of the system, and a method for improving the effect of system information processing.

**Key words** signal processing; grating light modulator (GLM); optical information processing; extended light source

## 1 引 言

随着现代科技的不断发展,各种用于投影显示的新型器件应运而生<sup>[1~3]</sup>,其中最具代表的是基于微光机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的光调制器件,如德州仪器公司的数

字微镜(Digital micro-mirror devices, DMD)<sup>[4]</sup>和斯坦福大学的光栅光阀(Grating light valve, GLV)<sup>[5]</sup>等。但 DMD 多层结构工艺导致了制作过程十分复杂, GLV 由于器件本身是一个线阵结构,需要借助一个旋转扫描装置来产生二维图像,增加了系统

收稿日期: 2008-11-28; 收到修改稿日期: 2009-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(60708017)和重庆市院士基金(CSTC, 2008BC3002)资助课题。

作者简介: 韦 玮(1982—),男,博士研究生,主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: cqwei2000@hotmail.com

导师简介: 黄尚廉(1936—2008),男,中国工程院院士,教授,主要从事光电技术及系统、仪器科学与技术、微光机电系统等方面的研究。

的复杂性。重庆大学<sup>[6,7]</sup>提出了一种基于衍射原理的面阵型光栅光调制器(Grating light modulator, GLM)既克服了 DMD 的工艺复杂的问题,又解决了 GLV 难于形成面阵的缺点。

研究投影系统滤波面上的光强分布是进行信息处理的前提条件。之前对 GLM 投影系统滤波面上衍射光强分布的分析都是基于相干光理论,忽略了照明光源空间尺寸的影响。然而,实际照明的激光光斑具有一定的尺寸,不能再利用相干光照明进行理论分析。利用部分相干光理论详细分析了扩展光源照明下投影系统滤波面的衍射光强分布特性,通过实验提出了一种信息处理优化设计方案。

## 2 光栅光调制器投影系统

在 p 型硅片的<100>面上氧化形成 500~600 nm 的氧化层;溅射,光刻硅铝,形成下反射镜;化学气相沉积法(PECVD)制备二氧化硅;旋涂聚酰亚胺(PI)作为形成空气层的牺牲层,空气层的厚度为 500 nm;溅射,光刻硅铝形成上层光栅,释放牺牲层。最终加工得到二维光栅光调制器阵列,如图 1 所示。

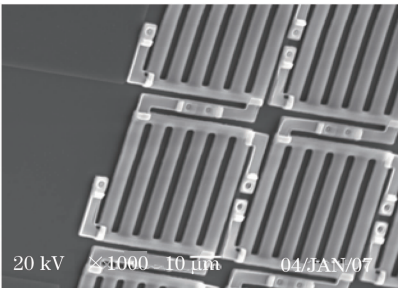


图 1 光栅光调制器结构

Fig. 1 Structure of grating light modulator

光栅光调制器投影系统<sup>[7]</sup>如图 2 所示,在滤波面上设置一空间滤波器,阻挡零级和其他高阶衍射级次,仅让正负一级衍射光通过,再经过成像物镜就可以在屏幕上得到二维显示图像。当单像素下反射镜和上层可动光栅之间的初始光程差为  $(2K+1)\lambda/4$  时

( $K$  为正整数),屏幕上得到亮点,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作用下向下移动,光程差变为  $K\lambda/2$ ,屏幕上得到暗点,对应于显示的暗态。

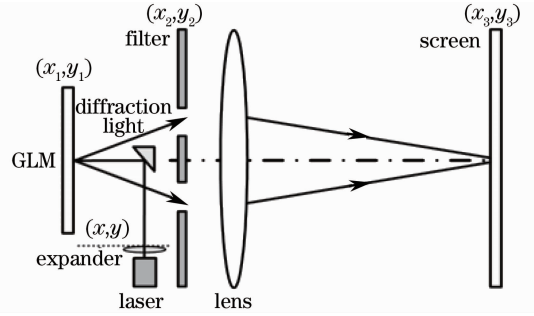


图 2 光栅光调制器投影系统

Fig. 2 Structure of projection display with GLM

## 3 投影系统滤波面衍射光强分布理论分析

在实际投影系统中,所采用的固体泵浦激光器并非理想单色点光源其光谱带宽通常约为 1 nm,而且光斑具有一定的尺寸,该尺寸由光栅光调制器阵列大小来决定。对于  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$  的光栅光调制器小面阵,经扩束后的光斑尺寸约为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。因此激光在光栅光调制器投影系统中的传播可以看成扩展光源的准单色光传播。其传播特性可用互强度<sup>[8]</sup>的传播来描述,空间传播示意图如图 3 所示。激光经扩束后的光斑位于  $xy$  平面, GLM 位于  $x_1y_1$  平面,也即  $z = 0$  平面,滤波面为  $x_2y_2$  平面, GLM 到滤波面的距离为  $d$ ,光源到 GLM 的距离为  $d'$ 。设扩束后激光光斑的强度分布为  $I(x, y)$ ,该平面上两点  $P(x, y)$  和  $P'(x, y)$  的光强分别为  $I(p)$  和  $I(p')$ ,对于非相干光源,两个不同点的发光相互独立,其光振动统计无关,故互强度可表示为

$$J(x, y; x', y') = \langle u(P, t)u^*(P', t) \rangle = I(x, y)\delta(x - x', y - y'). \quad (1)$$

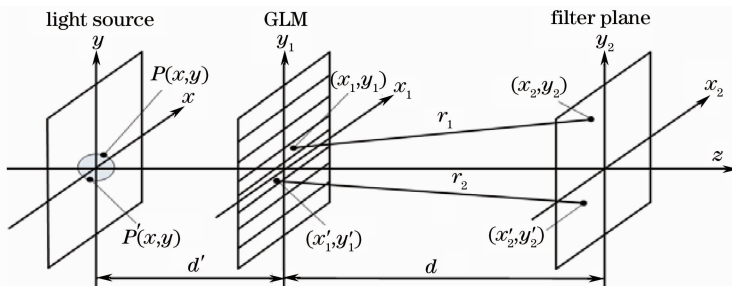


图 3 激光照明条件下衍射光空间传播示意图

Fig. 3 Schematic of diffraction light spread illuminated by laser

根据范西特-泽尼克定理<sup>[8]</sup>,对于一定尺寸的准单色平面光源,在傍轴近似情况下,观察区域上的复

空间相干度正比于光源强度分布的归一化傅里叶变换。若入射光能量为单位能量。复空间相干度为

$$\mu_1(\Delta x_1, \Delta y_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) \exp[-j(2\pi/\lambda z')(\Delta x_1 x + \Delta y_1 y)] dx dy. \quad (2)$$

若照明光在 GLM 前的互强度为  $J_1$ , GLM 的复振幅透射率函数为  $t(x_1, y_1)$ , 根据惠更斯-菲涅耳原理<sup>[11]</sup>, 小角度入射, 传播距离  $z$  远大于光栅常数  $d$  时, 滤波面上的互强度  $J_2$  为

$$J_2(x_2, y_2; x'_2, y'_2) = \frac{1}{\lambda^2 z^2} \exp\left[j \frac{k}{2z}(x_2^2 + y_2^2 - x'^2_2 - y'^2_2)\right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t(x_1, y_1) t^*(x'_1, y'_1) J_1(x_1, y_1; x'_1, y'_1) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z}(x_2 x_1 + y_2 y_1 - x'_2 x'_1 - y'_2 y'_1)\right] dx_1 dy_1 dx'_1 dy'_1, \quad (3)$$

式中 GLM 二维阵列的透射率函数为

$$t(x_1, y_1) = \left\{ \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x_1 + md}{a}\right) + \exp\left(\frac{j4\pi h}{\lambda}\right) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x_1 + md + d/2}{a}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x_1}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{W}\right) \right\} * \left[ \frac{1}{D_{x1}} \text{comb}\left(\frac{x_1}{D_{x1}}\right) \cdot \frac{1}{D_{y1}} \text{comb}\left(\frac{y_1}{D_{y1}}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x_1}{N_{x1} D_{x1}}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{N_{y1} D_{y1}}\right), \quad (4)$$

式中  $a$  为光栅条的宽度,  $d$  为光栅常数,  $h$  为下反射镜和可动光栅上表面之间的光程差,  $L$  为调制器沿光栅周期方向的宽度,  $W$  为光栅条的长度,  $D_x$  和  $D_y$  分别为单个光栅在  $x$  和  $y$  方向的尺寸,  $N_x$  和  $N_y$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向的调制器的个数。rect 是矩形函数, comb 是梳状函数, \* 表示卷积。

非相干光照明时, 互强度  $J_1(x_1, y_1; x'_1, y'_1)$  可以用入射光波复空间相干度  $\mu_1$  来表示:

$$J_1(x_1, y_1; x'_1, y'_1) = I_0 \mu_1(\Delta x_1, \Delta y_1), \quad (5)$$

式中  $\Delta x_1 = x_1 - x'_1, \Delta y_1 = y_1 - y'_1$ , 当滤波面上两个观察点重合时, 即  $x_2 = x'_2; y_2 = y'_2; J_2(x_2, y_2; x'_2, y'_2)$  等价于  $I(x_2, y_2)$ , 则滤波面上的光强分布为

$$I(x_2, y_2) = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t(x_1, y_1) t^*(x_1 - \Delta x_1, y_1 - \Delta y_1) \mu_1(\Delta x_1, \Delta y_1) \times \exp[-j(2\pi/\lambda z)(x_2 \Delta x_1 + y_2 \Delta y_1)] dx_1 dy_1 d\Delta x_1 d\Delta y_1. \quad (6)$$

定义调制器透射率函数的自相关函数为

$$\tau(\Delta x_1, \Delta y_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} t(x_1, y_1) t^*(x_1 - \Delta x_1, y_1 - \Delta y_1) dx_1 dy_1, \quad (7)$$

再根据傅里叶变换的自相关定理

$$\mathcal{F}[\tau(\Delta x_1, \Delta y_1)] = |T(f_x, f_y)|^2, \quad (8)$$

式中  $f_x = x_2/\lambda z, f_y = y_2/\lambda z$ , 将(7), (8)式代入(6)式, 滤波面上衍射光强分布为

$$I(x_2, y_2) = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(\Delta x_1, \Delta y_1) \mu_1(\Delta x_1, \Delta y_1) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z}(x_2 \Delta x_1 + y_2 \Delta y_1)\right] d\Delta x_1 d\Delta y_1 = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \mathcal{F}^{-1}[\tau(\Delta x_1, \Delta y_1)] * \mathcal{F}^{-1}[\mu_1(\Delta x_1, \Delta y_1)] = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \left| T\left(\frac{x_2}{\lambda z}, \frac{y_2}{\lambda z}\right) \right|^2 * I\left(-\frac{z'}{z}x_2, -\frac{z'}{z}y_2\right). \quad (9)$$

由(9)式可见, 投影系统滤波面上的衍射光强分布是调制器透射率函数傅里叶变换模的平方与光源光强分布在滤波面上几何投影间的卷积。对于二维光栅光调制器阵列, 欲使每个调制器单元能被入射光照明, 则入射到调制器上的光源的形状是一个近似矩形分布的均匀光斑, 因此需要在扩束后的出光口处加

一个尺寸为  $U \times V$  的矩形光阑, (9)式可以写作

$$I(x_2, y_2) = \frac{I_0}{\lambda^2 z^2} \left| T\left(\frac{x_2}{\lambda z}, \frac{y_2}{\lambda z}\right) \right|^2 * \text{rect}\left(-\frac{z'}{zU}x_2, -\frac{z'}{zV}y_2\right), \quad (10)$$

式中  $U, V$  为  $xy$  平面上光斑在  $x$  和  $y$  方向的尺寸。

## 4 数值计算

由(10)式,借助 Matlab 软件对滤波面上的衍射光强分布进行数值计算。GLM 各参数设计为: $a = 4 \mu\text{m}$ ,  $d = 8 \mu\text{m}$ ,  $h = 3\lambda/8$ ,  $N_x = 32$ ,  $N_y = 32$ 。若光源为理想点光源,则其强度分布为  $I(x, y) = \delta(x, y)$ 。而对于  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$  的小面阵光栅光调制器阵列,  $xy$  面上的激光光斑大小应为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 即  $U = 2 \text{ mm}$ ,  $V = 2 \text{ mm}$ 。结合(4)式, (10)式, 图 4 给出了不同光源照明条件下, 光源面到滤波面的距离  $z'$  为  $100 \text{ mm}$ , 滤波面到 GLM 的距离  $z$  为  $100 \text{ mm}$  时, 滤波面上的光强分布。

由图 4 可知, 在投影系统光学尺寸  $z$  和  $z'$  一定

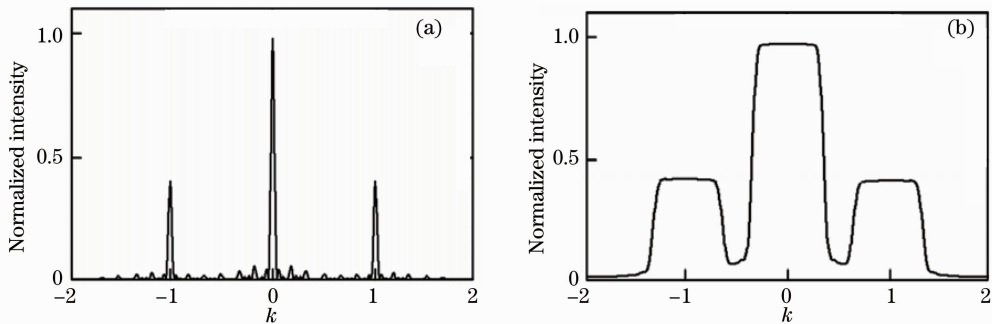


图 4 不同光源照明滤波面上的光强分布。(a)光源为理想点光源照明;(b) $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  矩形光斑照明

Fig. 4 Distribution of light intensity on filter plane illuminated by different light source. (a) point light source illumination; (b)  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  rectangle light source illumination

在 GLM 投影系统设计时,通常 GLM 的大小和光源到 GLM 的距离确定,仅有 GLM 到滤波面的距离这参数可以变化,即滤波面的位置可以选择。根据(10)式计算得到了不同  $z$  下,滤波面上的衍射光强分布。由图 5(a)可知,当  $z = 60 \text{ mm}$  时,滤波面上各级衍射级次完全混叠在一起了,在滤波面上无法

进行信息处理。图 5(b)所示,当  $z = 400 \text{ mm}$  时,滤波面上各级衍射级次可以完全分开,此时计算得到显示的衬比度约为 4000。因此,可以通过增大光栅光调制器到滤波面的距离  $z$  来减小光源的空间扩展性对光栅光调制器衍射特性的影响,从而提高光学信息处理质量和投影显示效果。

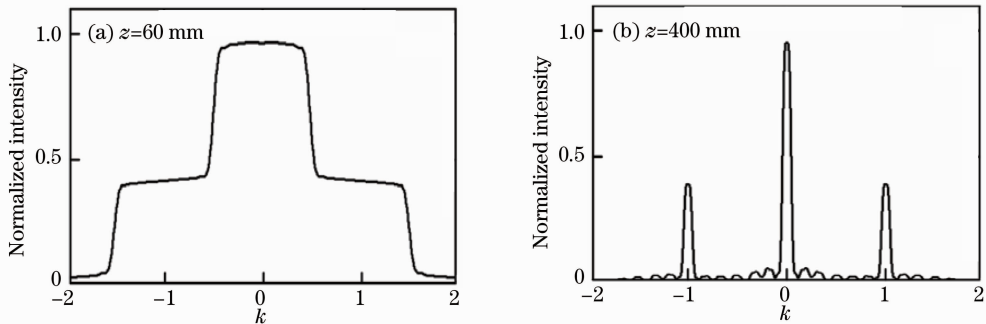


图 5 光斑尺寸为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  时滤波面光强分布与  $z$  的关系

Fig. 5 Relation between the light intensity distribution on filter plane and the distance  $z$  when the spot size is  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$

## 5 实 验

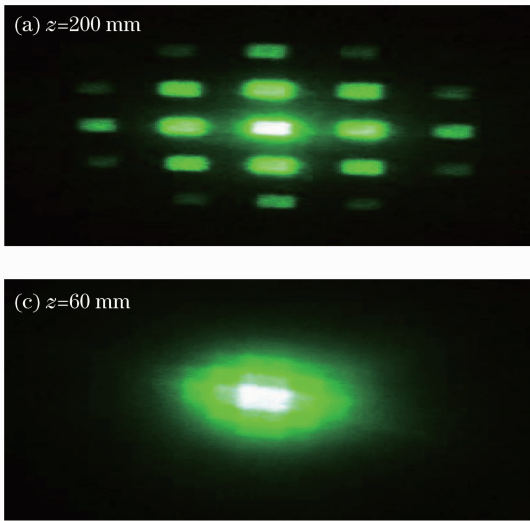
### 5.1 滤波面衍射光强分布

为了验证激光光斑尺寸对 GLM 衍射特性的影

响,按照图 2 所示的系统原理图搭建了相关实验装置,它主要由绿光激光器、扩束器、 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的矩形光阑(紧贴于扩束器的出光口)、滤波面等组成。

缓慢移动滤波面,使其到 GLM 的距离由大到小变化,记录下滤波面上的衍射光强分布和滤波面到 GLM 的距离  $z$ 。

图 6(a)~(c)为 GLM 到滤波面不同距离时,滤波面上的衍射光强分布。可见  $z$  越大,各衍射级次分得越开,对 0 级和  $\pm 1$  级的滤波处理越容易进行;当  $z$  足够小时,各衍射级次完全混叠在一起,滤波处理无法进行。因此,在实际投影系统设计时可以通



过增大滤波面到 GLM 的距离  $z$ ,来使得各级衍射级次不发生混叠。

图 6(d)为在 GLM 与滤波面间增加一个焦距  $f=30\text{ mm}$  透镜时在  $z=60\text{ mm}$  滤波面上的衍射图像。由图 6(c)、(d)可知,在相同光学系统尺寸下,透镜的会聚作用使得原本混叠在一起的各衍射级次重新被分开,消除了由光源扩展而带来的各衍射级次的混叠。

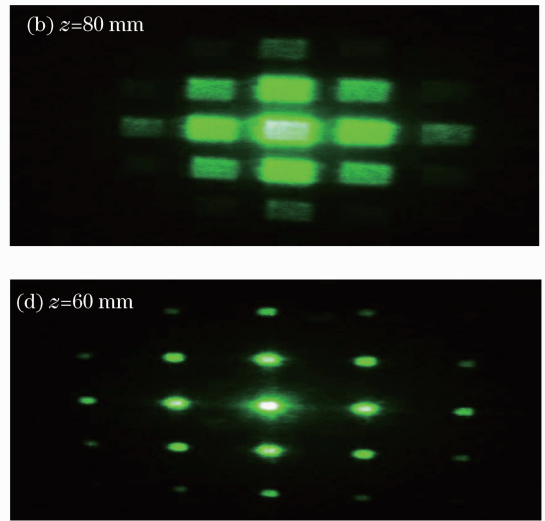


图 6 扩展光源照明下滤波面上衍射图样的实验结果

Fig. 6 Experimental results of the grating's diffraction pattern when it was illuminated by the extended light source

### 5.2 投影系统信息处理优化设计

由上述实验结果可知,增加  $z$  和在 GLM 与滤波面间增加一个会聚透镜均有利于信息处理,提高显示质量。基于此结论,按图 7 搭建相关实验装置,对几种信息处理方案进行了比较。整个装置主要由激光器、扩束器、光阑、GLM 面阵、空间光学滤波器、信号发生器、放大器、汇聚透镜、投影物镜、光电探测器、电流放大器和示波器等部分组成。激光器发出的光入射到光栅光调制器上,衍射光先后经会聚透镜和空间滤波器后,被投影物镜成像到光电探

测器的表面。实验所用的光栅光调制器件是一个光栅光调制器二维阵列,因此在探测器所在的成像面上,得到是一个二维平面光栅光调制器像。选择合适的光电探测器,并调整投影成像的空间位置,使得单个光栅光调制器的像面大小与光电探测器的光敏面相等,此时单个像素所包含的光强都被探测器接收,产生的微小光电流被电流放大器放大,并转换为电压信号后输出到示波器上,在示波器上得到了同步的电压信号。表 1 中方案 6 对应调制器的动态响应特性如图 8 所示。

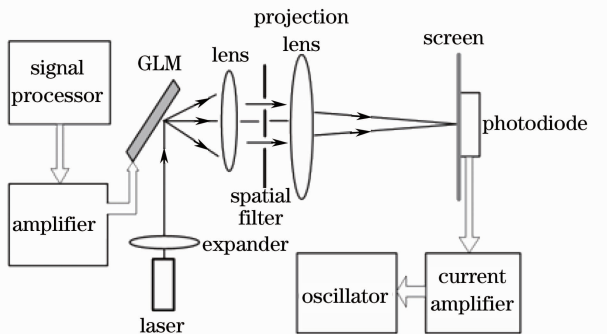


图 7 投影系统微型化实验装置图  
Fig. 7 Miniature projection system

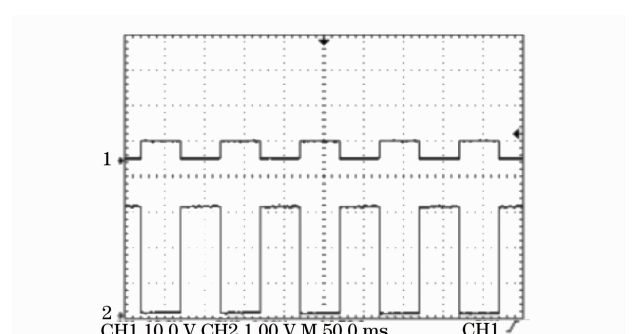


图 8 调制器的动态响应特性  
Fig. 8 Dynamic response characteristic of the GLM

各种信息处理方案实验结果如表 1 所示, 方案 1~3 为不增加会聚透镜, 仅改变  $z$  时, 示波器得到的最大响应电压和最小响应电压。方案 4~7 为增加会聚透镜后, 示波器得到的最大响应电压和最小响应电压。其中在增加会聚透镜时, 考虑到器件装配难度, 在 GLM 与滤波面间留 20 mm 的空间间隙, 同时滤波面设置在会聚透镜的焦平面上。

表 1 几种信息处理方案实验结果比较

Table 1 Comparison among experimental results through different information processing methods

Projects	Additional lens /mm	$z$ /mm	$V_{\max}$ /V	$V_{\min}$ /mV	$V_{\max}/V_{\min}$
1	non	200	3.20	23	139
2	non	80	4.50	200	27.5
3	non	60	7.00	2600	2.7
4	$f=25$	45	3.20	40	80
5	$f=30$	50	3.00	21	143
6	$f=40$	60	3.12	21	148
7	$f=50$	70	2.90	20	145

影响调制器开关性能的主要参数是当调制器分别处于开与关态时, 光电探测器所探测到的光能量转化成的电压  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值, 这一数值直接关系到投影显示的衬比度, 决定着信息处理的好坏。根据表 1 中方案 1~3 可知, GLM 到滤波面的距离越小, 调制器暗态时, 探测器获得的  $V_{\min}$  越大,  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值越小, 当  $z=60$  mm 时, 实验测得  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值仅为 2.7, 此时调制器几乎没有光学调制器效果; 根据方案 4~7 可知, 当在 GLM 与滤波面间增加一个会聚透镜后,  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值显著增加。而且会聚透镜的焦距  $f$  越大, 调制器暗态时, 探测器对应的  $V_{\min}$  越小,  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值均超过了相同尺寸下, 不增加会聚情况下的数值。汇聚透镜的焦距  $f$  分别在 30, 40, 50 mm 时,  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值基本一致。此时, 0 级衍射光与  $\pm 1$  级衍射光可以完全分开, 光源的扩展性对显示的对比度几乎没有影响。考虑到光学系统的微型化, 在保证 0 级与  $\pm 1$  级衍射光互不干扰的情况下, 尽可能缩小系统的光学尺寸(主要由  $z$  来决定), 因此方案 5 中  $V_{\max}$  与  $V_{\min}$  的比值高达 143, 而光调制器到滤波面的尺寸仅为 50 mm, 为当前 GLM 投影系统信息处理设计的最优方案。

## 6 结 论

利用部分相干光理论分析了激光光斑尺寸对基于光栅光调制器投影系统滤波面衍射光强的影响, 并进行了数值仿真。结果表明: 各衍射级次混叠程度随观察屏与调制器的距离增大而减弱, 可以通过该方法来提高信息处理的质量, 但在增大  $z$  的同时会增加投影系统尺寸, 不利于投影系统的微型化。最后, 通过实验比较了各种信息处理方案, 提出了在调制器与滤波面之间增加焦距为 30 mm 会聚透镜来消除光源的空间扩展性带来的衍射级次混叠的最佳方案。该方法为设计微型化投影系统提供了一种有效的解决方案。

## 参 考 文 献

- 1 Kerwin Wang. Micro-optical components for a MEMS integrated display [D]. Doctoral Dissertation of University of Washington, 2004. 4~8
- 2 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, 吴霓虹, 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
- 3 Li Wei, Liu Deming, Yang Chunyong *et al.*. Design and implementation of a novel low cost intelligent optical wavelength cross converter connect [J]. *Chinese 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
- 4 J. B. Sampsell. An overview of the digital micromirror device (DMD) and its application to projection displays [J]. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 1993, **24**: 1012~1015
- 5 D. M. Bloom. The grating light valve: revolutionizing display technology[C]. *SPIE*, 1997, **3013**: 165~171
- 6 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
- 7 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): 1136~1140  
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): 1136~1140
- 8 Lü nanguang. Fourier Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 182~220  
吕乃光. 傅立叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 182~220