doi: 10.3788/lop47.052301

基于光栅光调制器的彩色投影方案分析与实验

韦 玮[1] 陈伟民[1] 王 宁[1] 秦 逸[2] 史玲娜[2] 张 洁[1]

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

摘要 提出一种利用三色激光作为照明光源时，基于单片光栅光调制器(GLM)的彩色投影显示方案。阐述了该投影系统的彩色显示原理利用色度学相关理论；分析了红、绿、蓝三色激光合成标准 D65 白光源的原理；综合考虑显示色彩还原度、投影亮度和激光器输出功率 3 个重要指标，对激光光源进行了优化选择。分析结果表明，峰值波长分别为 635，532 及 457 nm 的三色激光器组合为光源的最优设计方案。搭建了相关实验系统，通过收集±1 级衍射光进行了静态光栅光调制器彩色投影实验。实验得到了红、绿、蓝及合成白色光源照明下的投影图案，初步证明了该彩色投影方案的正确性。

关键词 微机电系统；光栅光调制器；色度学；彩色；投影

中图分类号 TB133 **OCIS** 230.4685 330.1720 **文献标识码** A

Analysis and Experiments on Multi-Color Projection Scheme Based on Grating Light Modulator

Wei Wei[1] Chen Weimin[1] Wang Ning[1] Qin Yi[2] Shi Lingna[2] Zhang Jie[1]

([1]*Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*
[2]*Optoelectronic Engineering Department, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*)

Abstract A multi-color projection scheme based on single grating light modulator (GLM) using three-color lasers as light source is proposed. First, the principle of color display is explained. Second, red, green and blue laser composing standard D65 white light source is analyzed by colorimetry theory, considering three important indicators, displaying reduction degree of color, displaying brightness and output power of laser. The laser light source is analyzed and optimized. The result indicates that the combination of the lasers with wavelengths of 635, 532 and 457 nm is the best optimal project. The experiment system is set up, and the color projection experiment based on static grating light modulators is carried out by collecting the ±1st order diffraction light. Red, green, blue and white projection pattern is obtained through the experiment, which preliminarily proves the validity of this color projection scheme.

Key words micro-electro-mechanical systems; grating light modulator; colorimetry; multi-color; projection

1 引 言

近年来，投影显示器件正向多元化方向发展，基于微机电系统(MEMS)技术的投影显示器件[1]成为世界各国研究的热点，并以其优异的性能成为带动下一代显示产业发展的一个重要分支。在这类 MEMS 器件中，

收稿日期：2009-07-03; **收到修改稿日期**：2009-09-03

基金项目：国家自然科学基金(60976084)、重庆市科技攻关重大专项(2007AB4006)、重庆市院士基金(2008BC3002)和重庆市自然科学基金(2009BB3352)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：陈伟民(1955—)，男，教授，主要从事光电技术方面的研究。E-mail: wmchen@cqu.edu.cn

具有代表意义的有数字微镜器件(DMD)[2]和光栅光阀(GLV) [3]。DMD 是利用反射原理，其光利用率大，能够形成无缝面阵。但是 DMD 也存在加工难度大、成品率低等不足。GLV 是利用衍射原理，具有响应速度快、加工简单、对比度高等优点，但其线阵结构要求加入扫描器件来完成图像显示，增大器件成本。重庆大学提出一种双层结构的光栅光调制器(GLM)[4,5]，其加工较 DMD 简单，同时解决了 GLV 难于形成面阵的缺点，具有良好的应用前景。彩色投影方案设计是基于光栅光调制器投影仪走向实用化的一个关键环节，本文提出了一种基于单片光栅光调制器的彩色投影方案，分析了其投影显示的原理，对照明光源进行了分析及优化选择，并搭建了相关实验系统进行验证。

2 基于光栅光调制器的彩色投影显示方案原理

与 DMD 反射型光学器件不同的是光栅光调制器属于衍射型光学器件，入射光波长的带宽对其调制对比度影响很大。为了保证大屏幕投影图像有很高的对比度和亮度，采用窄带宽、高光通量的红(R)绿(G)蓝(B)三色激光照明单片光栅光调制器来实现图像的彩色投影显示[6]。其彩色投影显示系统的结构如图 1 所示。整个系统主要包括红、绿、蓝三种颜色的激光光源，X-cube 合成棱镜[7]，单片光栅光调制器，空间光学滤波器和投影物镜等。其中 X-cube 合成棱镜的主要作用是将 3 种不同颜色的激光合成一束复色光。

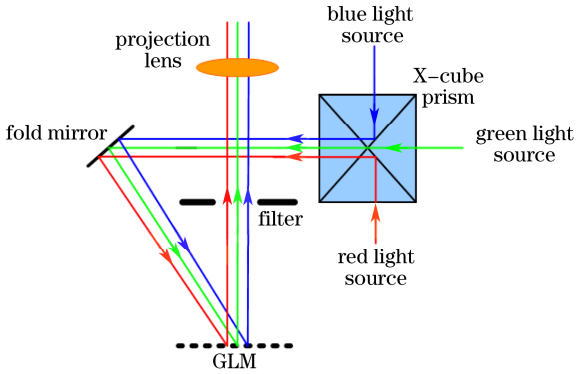

图 1 基于光栅光调制器的彩色投影显示系统结构图
Fig.1 Structure of color projection display based on GLM

在该投影显示系统中，调制器的亮暗态是针对特定入射波长的，它对波长有选择性。选用±1 级光作为投影光，若入射光的波长为 λ_1，当 h 和波长 λ_1 满足关系 $h=k\lambda_1/2$ 时，调制器对应的像素表现为暗态。当入射波长变为 $\lambda_2(\lambda_1\neq\lambda_2)$时， $h=k\lambda_2/2$ 不成立，调制器对应的像素不再为暗态，而是为处于亮态与暗态间的中间态。因此，使用的单片光栅光调制器不能同时对 3 种颜色的光进行开或关的控制。一个有效的解决办法是在不同的时间内分别对 3 种颜色的光进行明暗调制，根据视觉滞留效应[8]得到图像的彩色显示。图 2 给出单片光栅光调制器的彩色调制原理。首先，将图像的显示周期 T 细分为 3 个子周期 T_r，T_g 和 T_b，在 3 个子周期内分别显示红、绿、蓝 3 种颜色的图像。通过外围控制电路对激光开关状态和光栅光调制器的开关状态进行同步控制，在时间 T_r 内，打开红色激光，关闭绿色和蓝色激光，同时将调制器的光栅与反射镜之间的光程差 h_{on} 调整到$(2k\text{-}1)\lambda_r/4$，即调制器对红色光呈开态；然后，在时间 T_g 内，打开绿色激光，关闭红色和蓝色激光，同时将调制器的光栅与反射镜之间的光程差 h_{on} 调整到$(2k\text{-}1)\lambda_g/4$，即调制器对绿色光呈开态；最后，在时间 T_b 内，打开蓝色激光，关闭红色和绿色激光，同时将调制器的光栅与反射镜之间的光程差 h_{on} 调整到$(2k\text{-}1)\lambda_b/4$，即调制器对蓝色光呈开态。控制一个显示周期里面各色光照明的时间 T_r，T_g 和 T_b 的分布，即控制每个周期占整个显示周期的百分比就可以得到各种合成色彩的照明光。由于在 T_r，T_g 和 T_b 各自的时间周期内，分别仅有红、绿、蓝颜色的光照明调制器，彻底避免其他颜色的光对调制器产生的干扰，因此该彩色投影显示方案具有对比度高、串扰极小、结构简单、紧凑等优点。

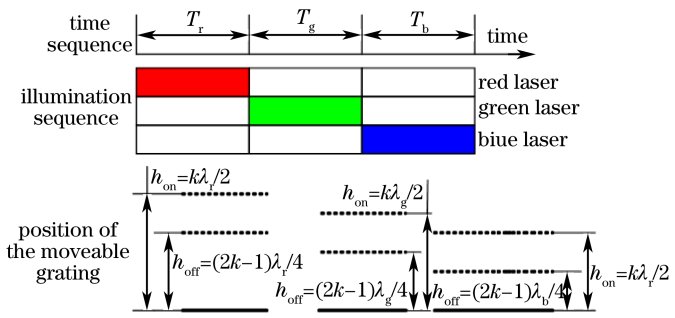

图 2 单片光栅光调制器的彩色显示原理示意图

Fig 2 Principle of color projection display based on single GLM chip

3 激光光源分析及优化选择

由于光栅光调制器是基于衍射原理，对光源单色性要求非常高。因此，价格低廉、带宽约为 1 nm 的半导体激光器是一种比较理想的光源。激光光源的选择，主要从能使投影图像尽量得到自然逼真的丰富颜色和所需激光器具有较低价格(即到达相同彩色显示效果，激光器输出功率最小)这两个角度去考虑。

根据色度学的理论[9]，要得到三基色的色彩还原能力，首先要根据颜色的三刺激值计算三色激光在色品图上的色品坐标。其中三刺激值

$$X=k\sum_{\lambda}\tau(\lambda)S(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda\,,\quad Y=k\sum_{\lambda}\tau(\lambda)S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda\,,\quad Z=k\sum_{\lambda}\tau(\lambda)S(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda\,,\tag{1}$$

式中 $k=\dfrac{100}{\sum_{\lambda}S(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda}$ 为归化系数，是将光源的 Y 值调整到 100 时求得的，$S(\lambda)$ 为激光光源的相对光谱功率分布，$\tau(\lambda)$ 为物体的光谱透过率，这两个参数可以通过实际测量得到；$\bar{x}(\lambda)$，$\bar{y}(\lambda)$，$\bar{z}(\lambda)$ 为 CIE1931 标准观察者光谱三刺激值，可以通过查表得到，$\Delta\lambda$ 为波长间隔。

在求得光源颜色的三刺激值后可以计算出颜色在 CIE1931 色品图中的色坐标

$$x=\frac{X}{X+Y+Z}\,,\quad y=\frac{Y}{X+Y+Z}\,,\quad z=\frac{Z}{X+Y+Z}\,.\tag{2}$$

针对目前市场上可选择的典型红绿蓝激光器，根据产品相对光谱功率分布数据代入(1)式，再根据(2)式可以求得各种激光器的色坐标如表 1 所示。

表 1 典型激光器的色坐标

Table 1 Color coordinate of typical lasers

Peak wavelength /nm	Cordinate		
	x	y	z
635	0.714	0.258	0.028
673	0.732	0.267	0.001
532	0.170	0.796	0.034
457	0.148	0.025	0.827
473	0.116	0.074	0.810

根据表 1 计算的结果及标准白光数据可以得到红、绿、蓝 3 种激光器的峰值波长分别为方案 1(635，532 和 473 nm)、方案 2(671，532 和 473 nm)、方案 3(635，532 和 457 nm)3 种组合时的色度数据及标准白色光源的色度数据，如图 3 所示。由图可见 3 种激光光源组合方案的色三角面积均大于标准白光光源面积，而且 3 种方案的色三角面积相差不大。因此，3 种方案都具有较强的色彩还原能力，都可以用于基于光栅光调制器投影系统的彩色显示。

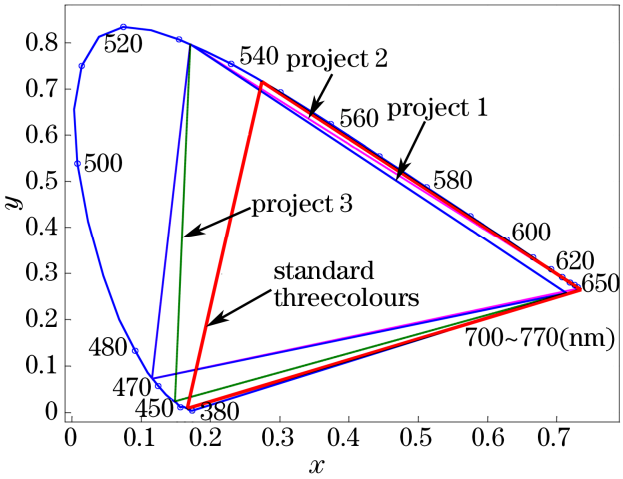

图 3　3 种方案的色度图

Fig.3 Chromaticity diagram of three projects

在这种条件下就需要根据各种方案的激光输出功率进行优化选择。目前投影仪的标准亮度通常为 1500~3500 lm(投影仪中通常使用亮度来表示光通量，单位为 lm)，故取其中间值 2000 lm 作为基于光栅光调制器的投影系统光源设计的参考标准。目前 DLP 投影仪中用的是 0.55 英寸的数字微镜，其芯片尺寸为 8.2 mm×10.9 mm，故每平方毫米面积上亮度为 21.26 lm。目前在光栅光调制器研究的初期阶段，我们所设计的光栅光调制器为 16 pixel×16 pixel 的像素阵列，单个器件的尺寸是 52 μm×52 μm，像素阵列的尺寸为 0.84 mm×0.84 mm。激光器输出光的总亮度应为 15 lm，15 lm 是红、绿、蓝 3 个激光器总的输出亮度，各个激光的亮度需要按比例进行分配。

在色度学中，常用合成白色作为一种评价标准。常用的标准白光有 5 种，它们分别是 A，B，C，D65 和 E 光源。其中相关色温为 6500 K 的 D65 光源常被用作彩色显示的标准光源。假设红，绿，蓝 三基色的色坐标为(x_R,y_R)，(x_G, y_G)和(x_B, y_B)；各种颜色的三刺激值分别为：(X_R, Y_R, Z_R)，(X_G, Y_G, Z_G)，(X_B, Y_B, Z_B)；三刺激值的相对亮度单位：L_R:L_G:L_B。根据色度学原理，要使红、绿、蓝 3 个单色光源形成一个标准的 D65 白光源(0.313，0.329)。它们之间存在关系[10]

$$\begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_R}{y_R} & \frac{x_G}{y_G} & \frac{x_B}{y_B} \\ 1 & 1 & 1 \\ \frac{1-x_R-y_R}{y_R} & \frac{1-x_G-y_G}{y_G} & \frac{1-x_B-y_B}{y_B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_R \\ L_G \\ L_B \end{pmatrix} . \tag{3}$$

利用(3)式可以得到利用上述各种激光器发出的光合成 D65 白光源(0.313, 0.329)时，红、绿、蓝三基色所占的比例。结合总的亮度要求，就得到 3 种颜色各自的亮度值。根据视函数[10]，可以利用计算得到的亮度值求出所要求的红、绿、蓝 3 色激光器的功率。表 2~4 分别给出了红、绿、蓝 3 种激光器的峰值波长分别为(635，532 和 473 nm)，(671，532 和 473 nm)和(635，532 和 457 nm)3 种组合时，三基色的亮度比、亮度以及激光器的功率要求。

表 2 三色激光照明方案 1

Table 2 Project 1 based on red green and blue lasers

Wavelength /nm	Brightness ratio	Brightness /lm	Visibility function	Power /mW
635	0.266	3.99	0.22	26.6
532	0.638	9.57	0.8804	15.9
473	0.096	1.44	0.0958	22.0

表 3 三色激光照明方案 2
Table 3 Project 2 based on red green and blue lasers

Wavelength /nm	Brightness ratio	Brightness /lm	Visibility function	Power /mW
671	0.241	3.62	0.0335	158
532	0.663	9.95	0.8804	16.6
473	0.096	2.88	0.0958	22.0

表 4 三色激光照明方案 3
Table 4 Project 3 based on red green and blue lasers

Wavelength /nm	Brightness ratio	Brightness /lm	Visibility function	Power /mW
635	0.2203	6.61	0.22	22.0
532	0.7471	22.4	0.8804	18.6
457	0.0326	0.99	0.0534	13.6

由分析可知，对于 16 pixel×16 pixel 光栅光调制器投影系统，当三色激光器的组合为(635，532 和 457 nm)时，对各个激光器的功率要求最低，分别只有 22，18.6 和 13.6 mW。因此可以选取 30 mW 的 635 nm 红光激光器，20 mW 的 532 nm 绿光激光器和 20 mW 的 457 nm 蓝光激光器作为 16 pixel×16 pixel 的像素阵列光栅光调制器投影系统的三基色光源。

4 实验

利用静态光栅光调制器搭建了如图 4 所示的实验装置。红、绿、蓝三色激光器通过 X 棱镜合成后入射到光栅光调制器上，实验中用±1 级衍射光投影成像。图 5 为衍射谱面上得到的三色激光器照明静态 GLM 情况下的衍射图样，三色的 0 级重合，±1 级在频谱面上有分开。由 0 级可知，基于方案 3 的红绿蓝三色激光照明可以实现合成白光照明。

图 6(a)～(c)分别为红色激光、绿色激光和蓝色激光单独投影成像的结果，(d)为三色光合成后投影成像的结果。从实验结果可以看出，在投影屏幕上得到一幅准白色的图像，图像的颜色与标准白色有一定的偏移，这是由于三色激光的亮度与设计值有一定偏差引起的。实验结果从原理上证明了利用三色激光器实现 GLM 彩色图像显示的可行性。

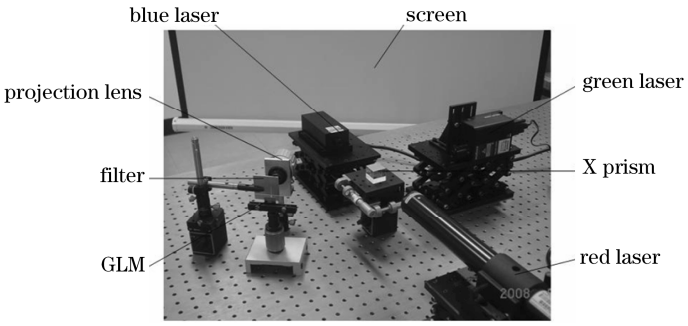

图 4 光栅光调制器彩色投影显示实验装置
Fig.4 Experimental device of colorized projection display

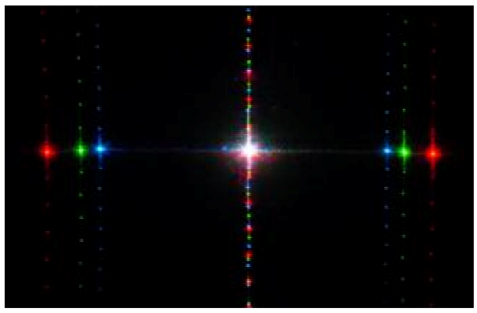

图 5 GLM 在红绿蓝三色激光照明情况下的衍射图样
Fig.5 Diffraction image illuminated by R，G，B lasers

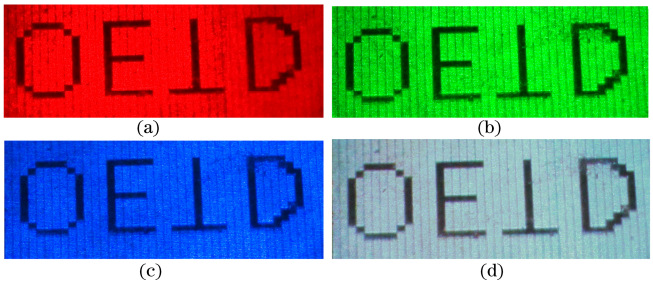

图 6 静态 GLM 彩色投影显示图像。(a) 红色激光；(b)绿色激光；(c)蓝色激光；(d)三色合成
Fig.6 Static colorized projection image of GLM. (a) red laser; (b) green laser; (c) blue laser; (d) RGB lasers

5 结　　论

提出了基于单片光栅光调制器的彩色投影显示方案，分析了利用该方案进行彩色投影显示的基本原理。按三色合成标准白光光源对红、绿、蓝三色激光器进行了分析及优化选择。分析表明，当红绿蓝三色激光器的 635，532 和 457 nm 的投影方案为最优方案。实验结果表明，利用方案 3 可以在价格最低的条件下实现 GLM 彩色图像显示具有切实可行性，为研制基于光栅光调制器的彩色投影显示仪提供了指导。

参 考 文 献

1 Kerwin Wang. Micro-Optical Components for a MEMS Integrated Display[D]. Seattle: University of Washington, 2004. 4~8

2 L. J. Hornbeck. Digital light processing TM for high brightness, high-resolution applications[C]. *SPIE,* 1997, **3013**: 27~40

3 D. M. Bloom The grating light valve: revolutionizing display technology[C]. *SPIE,* 1997, **3013**: 165~171

4 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

5 Shi Lingna, Huang Shanglian, Sun Jiyong *et al.*. Optical performance analysis and experiment of grating light modulator with LED light source[J]. *Acta Optica Sinica,* 2008, **28**(1): 1~7
史玲娜, 黄尚廉, 孙吉勇 等. LED照明的光栅光调制器光学特性分析与实验[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 1~7

6 Zhang Yue, Hao Li, Liu Hua *et al.*. Principle and realization of laser display technique[J]. *Optics and Precision Engineering* 2006, **14**(3): 402~405
张　岳, 郝　丽, 柳　华 等. 激光显示的原理及实现[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(3): 402~405

7 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of mini-projector[J]. *Acta Optica Sinica,* 2007, **27**(5): 913~918
赵　星, 方志良, 崔继承 等. 微型投影光学引擎的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 913~918

8 Xu Yong, Liu Xiangdong, Liu Xu *et al.*. The research for rotatable display apparatus based on the persistence of vosion[J]. *Laser and Infreared,* 2002, **32**(5): 353~355
徐　咏, 刘向东, 刘　旭 等. 基于视觉滞留的环场显示系统研究[J]. 激光与红外, 2002, **32**(5): 353~355

9 Tang Shunqing. Colorimetry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology press, 1990. 80~120
汤顺青. 色度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 80~120

10 Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 153~180
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 153~180