

文章编号: 0253-2239(2010)02-0531-06

基于光栅光调制器的照明光源的显示特性研究

史玲娜^{1,2} 潘英俊² 张 洁² 韦 玮² 黄尚廉²

(¹ 重庆交通大学理学院, 重庆 400074; ² 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

摘要 研究了用 LED 作为光栅光调制器的照明光源时, 三基色光源数目之比和光源相干性对显示质量及颜色再现能力的影响。利用部分相干光和色度学的相关理论, 比较了不同光源带宽对显示对比度和色彩显示的影响。结果表明光源带宽越小, 显示对比度越高, 色品图中的色三角形的面积越大; 此外, 研究还发现三基色光源数目之比对色彩显示影响较大, 当红绿蓝三色光源数目之比为 2:1:1 时, 混色白场在色品图中的坐标与标准光源的白场坐标位置接近, 并进一步得到在该比例下光源带宽和一般显色指数的关系: 光源的一般显色指数随着光源带宽的减小而减小。从而为光学系统的设计提供了一个光源选择的优化方案。

关键词 发光学; 光栅光调制器; 色度学; 发光二极管; 带宽; 色温; 一般显色指数

中图分类号 TN942.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0531

Study of Display Properties of Lighting Source Based on Grating Light Modulator

Shi Lingna^{1,2} Pan Yingjun² Zhang Jie² Wei Wei² Huang Shanglian²

(¹ College of Science, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China
² College of Optoelectric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract The influence of display quality and ability of color discrimination on different ratio of RGB light source number and different coherence of light source is analyzed, when LED is used as the lighting source for grating light modulator. By using partially coherent light and colorimetry theory, the display contrast and color display on different bandwidth is compared. The result illuminates the contrast and the area of color triangle is increasing as the bandwidth is becoming narrower, and the ratio of RGB light source number affects the quality of color display largely. The coordinate of white field is highly closed to the position of standard white light source, when the ratio of RGB light source number is 2:1:1. Meanwhile the relation between general color rendering index and bandwidth is acquired in this situation. It shows that the general color rendering index becomes less as the bandwidth is narrower. Above all, an optimized project based on the choice of light source for the design of optical system is proposed.

Key words luminescence; grating light modulator; colorimetry; LED; bandwidth; color temperature; general color rendering index

1 引 言

近年来随着投影显示技术的发展, 一些新型的用于投影显示的器件不断被研制出来^[1~3], 如德州仪器公司的数字微镜 (DMD)^[4]、斯坦福大学的

Bloom 等^[5]提出的光栅光阀 (GLV), 重庆大学在结合 DMD 和 GLV 优点的基础上提出的一种基于衍射原理的面阵型光栅光调制器 (GLM)^[6~8] 不仅加工工艺简单, 还解决了 GLV 难于形成面阵的缺点,

收稿日期: 2009-02-10; **收到修改稿日期**: 2009-04-30

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

作者简介: 史玲娜 (1977—), 女, 博士研究生, 主要从事信息获取和处理技术等方面的研究。E-mail: sln1013@163.com

导师简介: 潘英俊 (1948—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电测控与传感技术、信息光学等方面的研究。

E-mail: pyj@cqu.edu.cn

具有良好的应用前景。在对光栅光调制器的光源选择上,由于器件是基于衍射原理设计,激光无疑是一种比较理想的光源,但是在涉及彩色显示时,由于蓝色激光相对较贵,成本较高,并且激光光源的体积较大,这不利于光栅光调制器光学系统的低成本化与小型化。相比较而言,LED作为一种新型的半导体光源,不仅成本低,体积小,并且具有较纯的红、绿、蓝三基色,其在投影显示方面的地位越来越得到人们的重视。本文就从部分相干光理论和色度学理论出发,讨论将LED用作光栅光调制器照明光源时,光源相干性对显示对比度和色彩显示的影响。并进一步讨论在三基色合成彩色显示时,该影响可否通过改变三基色光源数目之比进行协调。

介绍了光栅光调制器的光学调制原理,并分析光源相干性对衍射光强分布的影响,进而得出光源带宽对显示对比度的影响;接着介绍了色度学的基本理论,并以欧司朗公司的LE ATB A2A型RGB三基色LED光源为例分析该光源的色度学特性,计算不同三基色光源数目比例和不同光源带宽下的色度学特性,得到这两者对色彩显示的影响,并进一步通过一般显色指数分析带宽和光源显色性的关系;最后针对光栅光调制器这种特定的器件,在综合考虑光学系统的尺寸及最终显示效果时,确定合适的光源参数,并对光学投影系统的设计做出一定的理论与实验指导。

2 光栅光调制器的光学调制原理

2.1 调制原理

图1是加工得到的二维光栅光调制器阵列,其中单个器件主要包括一个上层的可动光栅面和下层的反射面。光射到调制器的上下表面被反射后,发生衍射。其中器件的上下反射面之间的光程差可以通过施加电压加以改变,在未加电压时,可动光栅

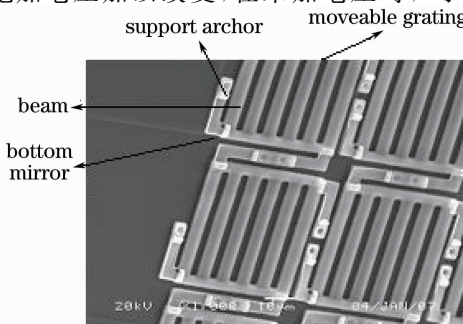


图1 二维光栅光调制器阵列

Fig.1 2D grating light modulator array

面与下反射面之间的光程差为 $h_1 = k\lambda/2$, 相位差 $\phi_1 = 2k\pi$, 频谱面上能量主要集中在0级,施加电压后,支撑梁在静电力作用下做垂直上下运动,带动光栅面作相同运动,从而使上下反射面之间的光程差变为 $h_2 = (2k+1)\lambda/4$, 相位差 $\phi_2 = (2k+1)\pi$, 频谱面上能量主要集中在 ± 1 级。如果在频谱面上放置一个空间滤波器,只让0级光通过,则当 $h = k\lambda/2$ 时,投影面上显示为亮点,当 $h = (2k+1)\lambda/4$ 时,投影面上显示为暗点,从而实现明暗调制的效果,达到显示的功效。

2.2 光源相干性对显示质量影响

由于器件是基于衍射原理设计,因此光源的相干性成为其能否实现显示的重要条件。根据部分相干光理论^[9,10],LED光源尺寸会对频谱面上的光强分布起到平滑展宽的作用,但只要频谱面上各级衍射光场分布在空间上不发生重叠交错,LED光源尺寸对像面上的显示质量不会有影响。但是从光谱分布来看,LED具有约30 nm的光谱带宽,当器件上下反射面之间的光程差为根据光源中心波长进行调制时,只要入射光波长偏离中心波长,就会由于器件在调制时不满足该光波下的明暗态条件,从而使光强在亮态时不再高度集中于0级,在暗态时不再高度集中于 ± 1 级,造成显示质量的下降,最直接的影响就是导致显示对比度的降低。根据显示对比度的定义^[11],分析光源带宽对显示对比度的影响,得到这两者的关系如图2所示。从图2可见,随着光源带宽的增加,对比度迅速降低,当光源带宽减小至光能的3 dB区间,即10 nm时,对比度大于225,可以满足一般显示的要求。

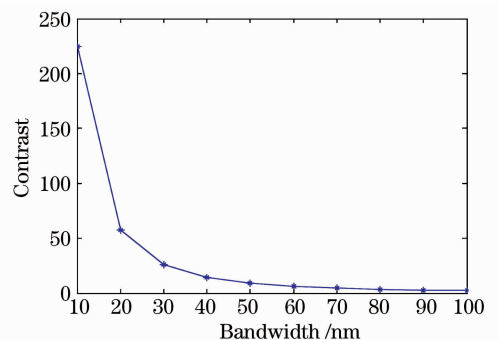


图2 光源带宽与对比度的关系

Fig.2 Relation between LED bandwidth and contrast

同时,光源的光谱分布变化又会影响到像面的色彩显示,接下来从色度学角度分析光源带宽和三基色光源数目之比对色彩还原能力和色彩显示效果

的影响。

3 色度分析

3.1 色度学原理

根据色度学的基本理论^[12,13],要分析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基色在色品图上的色品坐标。其中三刺激值可以利用

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

进行计算。式中 $k = 100 / \sum_{\lambda} \tau(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda$ 为归一化系数,是将光源的 Y 值调整到 100 时求得的, $S(\lambda)$ 为光源的相对光谱功率分布, $\tau(\lambda)$ 为物体的光谱透射率,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, $\Delta\lambda$ 为波长间隔。

在求得光源颜色的三刺激值后,可以用下式计算出颜色在 CIE1931 色品图中的色品坐标:

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z}. \end{cases} \quad (2)$$

根据三基色的三刺激值可以计算混合白场的色度坐标,从而可以进一步得到相应的白场相关色温。根据白场的相关色温确定标准照明体的光谱分布,并通过计算在 LED 光源和标准照明体照明下的八种样品色显现的色差得到光源的一般显色指数,并对光源的显色性作出评价。

3.2 计算与分析

在采用 LED 作为投影光源时,不同型号的 LED 对光栅光调制器照明系统的设计要求不同,这里采用的是欧司朗公司生产的 LE ATB A2A 型大功率 LED。该型号的 LED 将红绿蓝三色芯片集成在一起,每种颜色的芯片可以单独驱动,因此在照明系统设计上无须采用额外的分光合色系统,只需要对三基色的芯片分别进行时序控制,即可实现彩色显示。其照明系统如图 3 所示,系统中 TIR(全内反射)透镜起到会聚光束并缩小聚光系统的作用,光棒起到光束整形并达到光能均匀化的目的,该棒设计中空结构,内表面所镀反射膜能够反射三基色光,在匀光棒的出射端设置一滤波片,以减小出射光的

光谱宽度,以此达到提高对比度的要求。

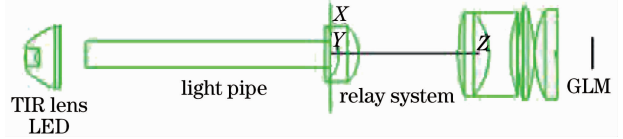


图 3 GLM 的照明系统

Fig. 3 Illumination system of GLM

LED 的相对光谱功率分布 $S(\lambda)$ 如图 4 实线所示,为了分析不同带宽对色彩显示的影响,通过滤色片的滤波范围来设定光谱透射率函数 $\tau(\lambda)$,利用现有镀膜工艺,该滤色片表面镀膜的加工难度应该不大,图 4 虚线为将三基色光源光谱带宽都减小至 10 nm 时的滤色片的透射率函数曲线,其他带宽下滤色片的透射率函数曲线与之类似,都是以中心波长为中心根据滤波范围进行扩展。计算中按额定功率点亮红绿蓝 LED 光源各一个,将三基色 $S(\lambda)$ 和不同滤波要求下的 $\tau(\lambda)$ 代入(1)式,根据(1)式和(2)式可得到相应滤波范围下的三基色色品坐标,在色品图中得到相应的色三角如图 5 所示,图中 sRGB 色三角是目前数字投影机使用的彩色显示规范,其中星号位置是标准光源在色品图中的白场坐

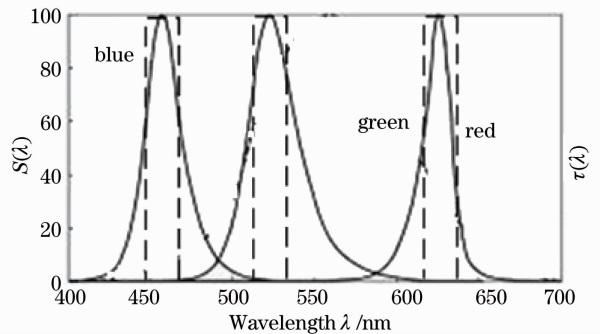


图 4 欧司朗 LE ATB A2A 型 LED 的光谱特性

Fig. 4 Spectrum of LED(LE ATB A2A type) provided by OSRAM

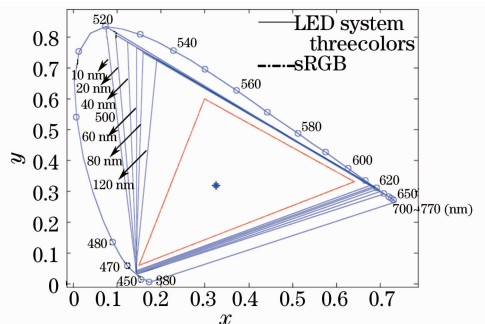


图 5 光源带宽对显示三基色的影响

Fig. 5 Influence of the bandwidth of light source on the display's three primary colors

标位置。从图中可见,即使滤波范围为 120 nm,几乎为没滤波的情况,该三基色所包围的色三角的面积还是大于传统光源的色三角,说明 LED 光源在色彩表现上比传统光源具有更高的色彩饱和度。并且随着滤波范围的减小,由该三基色所包围的色三角的面积逐渐增大,相应地颜色还原能力也逐步增强,从而可以混合出更多的颜色,色彩表现将更加丰富,当滤波范围选择使带宽减小至 10 nm 时,此时,在颜色显示上,三基色所包围的色三角面积几乎是传统投影光源的色三角的两倍,在彩色合成后将混合

表 1 红绿蓝三基色光源数目比为 1:1:1 时不同光源带宽下的色度学特性

Table 1 Colorimetric properties with different bandwidth when the ratio of RGB light source number is 1:1:1

White field	$\Delta\lambda=10$ nm	$\Delta\lambda=20$ nm	$\Delta\lambda=40$ nm	$\Delta\lambda=60$ nm	$\Delta\lambda=80$ nm	$\Delta\lambda=120$ nm
$R:G:B=1:1:1$ x	0.2498	0.253	0.258	0.2615	0.267	0.271
y	0.2364	0.2546	0.2598	0.2645	0.2705	0.2754
Color temperature /K	24865	22035	18745	15306	12890	10564

由于光源带宽的减小在保证高对比度和宽色彩还原范围的同时,不可避免地造成色彩的失真,考虑到当红绿蓝三基色光源数目比不同时,在彩色显示时体现出来的混色效果也可能不同,通过改变红绿蓝光源比例发现,当该型号的红绿蓝三色光源的数目之比为 1:2:1 或 1:1:2 时,混色后的色品坐标更偏离标准光源白场区域,只有当该比例为 2:1:1 时,合成的白场在色品图中的位置最接近标准光源的白场坐标,从表

表 2 红绿蓝三基色光源数目比为 2:1:1 时不同光源带宽下的色度学特性

Table 2 Colorimetric properties with different bandwidth when the ratio of RGB light source number is 2:1:1

White field	$\Delta\lambda=10$ nm	$\Delta\lambda=20$ nm	$\Delta\lambda=40$ nm	$\Delta\lambda=60$ nm	$\Delta\lambda=80$ nm	$\Delta\lambda=120$ nm
$R:G:B=2:1:1$ x	0.331	0.332	0.334	0.338	0.343	0.348992
y	0.3408	0.3425	0.3487	0.3501	0.3524	0.3541
Color temperature /K	5560	5396	5302	5260	5162	4876

在选择红绿蓝三色光源数目之比为 2:1:1 的情况下,根据表 2 得到的不同滤波范围下光源的相关色温结合标准照明体的光谱分布,分别对 CIE 用于显示指数计算的 8 种色试样计算显色指数,最终得到的光源的一般显色指数与滤波范围的关系如图 6 所示,从图中可见,随着滤波范围的增加,光源的一般显色指数增大,显色指数越大,说明光源的显色性质量越好。对于投影显示的光源由于辨色要求较高,一般都要求其光源的显色指数在 80 以上。随着投影技术的发展,人们对色彩的要求进一步提高,尽管光栅光调制器的干涉原理要求光源需要有较窄的带宽,但是光源的显色性要求又限制了光源带宽的进一步减小,因此,在采用 LED 作为光栅光调制器

出更为丰富的色彩,能够大大提升显示的质量。

当红绿蓝三基色光源数目之比为 1:1:1 时,计算不同滤波范围下混色白场坐标及相关色温如表 1 所示,从表 1 可见,白场坐标在色品图中的位置比标准光源偏向短波部分,并且滤波范围越小,偏移越大。在该比例下合成的白光在颜色显示上有点偏蓝。当滤波范围为 10 nm 时,在色品图中的白场坐标为 (0.2498,0.2364),相关色温为 24865 K,混色白光与用作彩色电视标准光源的 D65 白光源 [(0.313, 0.329),相关色温 6500 K] 的白光相差较大。

2 可以看出该比例下不同滤波范围下的白场坐标和相关色温,尽管随着滤波范围的减小,白场坐标也向短波部分偏移,但总体看来,此时,该比例下三色混和后能显示出中性白光,其显示效果应优于其他比例下的显示效果。并且当滤波范围为 10 nm 时,白场坐标为 (0.331,0.3408),相关色温为 5560 K,与标准 D65 光源接近。

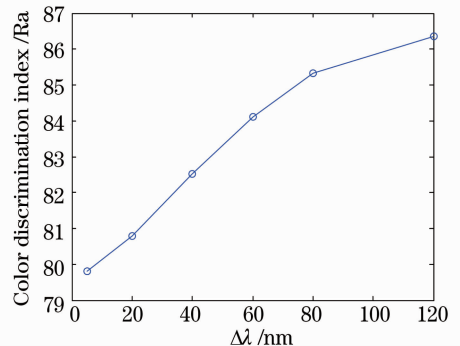


图 6 光源带宽对一般显色指数的影响

Fig. 6 Influence of the bandwidth of light source on general color rendering index

的投影光源时,从图像显示的对比度及色彩的饱和度和显色性角度必须对滤波范围有个折衷。

4 实 验

为了验证不同红绿蓝三基色光源数目比例对混色效果的影响,在采用 LE ATB A2A 型大功率 LED 作为投影光源时,用微型光谱仪采集了在额定功率下

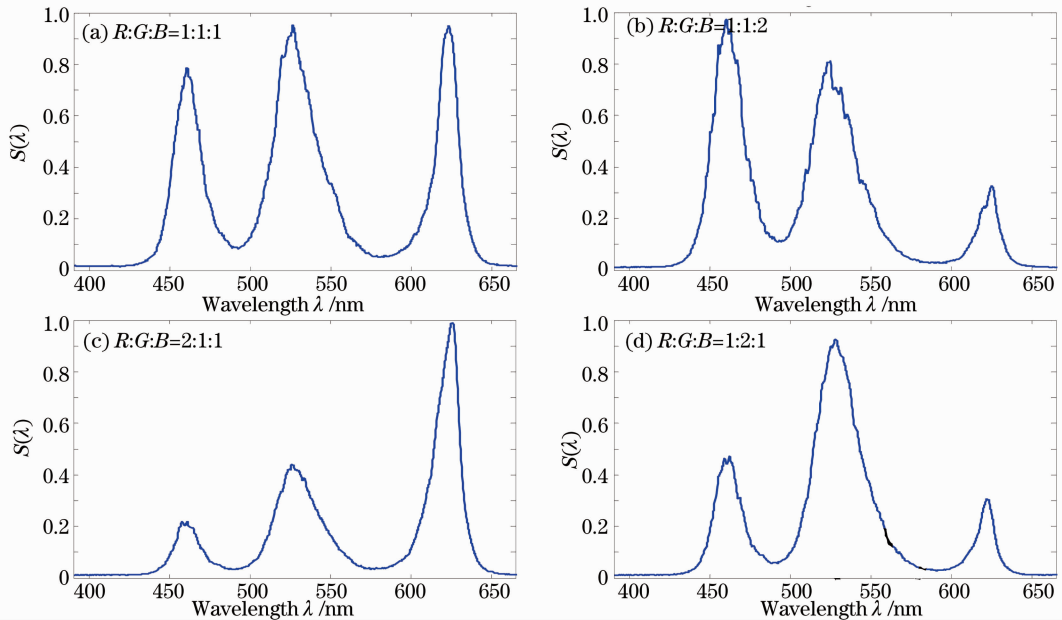


图 7 不同 RGB 光源数目比例下混色后 LED 的相对光谱分布

Fig. 7 Relative spectral distribution $S(\lambda)$ of LED in different ratio of RGB light source number

表 3 不同红绿蓝三基色光源数目比下的色度学特性

Table 3 Colorimetric properties with different ratio of RGB light source

R:G:B	1:1:1	1:1:2	2:1:1	1:2:1
x	0.2745	0.2047	0.3395	0.26166
y	0.2786	0.1864	0.3499	0.40957
Color temperature /K	10423	22544	4806	15000

从实验所得结果可见,当红绿蓝三基色光源数目比为 1:1:2 和 1:2:1 时,所得混色坐标严重偏移白场区域,且色温较高。当该比例为 1:1:1 时,此状态下的白场在 CIE1931 色度图中的色度坐标为 (0.2645, 0.2786), 相关色温值为 10423。从混色后 LED 的相对光谱分布及计算结果看,当蓝绿光谱能量较强时,混色后光源的整体色温就偏高,要想获得较低色温的白场平衡,必须减小蓝绿光的相对强度,因此当把红绿蓝三基色光源数目比改为 2:1:1 时,获得的白场坐标为 (0.3395, 0.3499), 该比例下的相关色温则为 4806, 此结果也与理论分析相吻合,从而也得到了一种保证 LED 光源在额定功率的情况下,通过改变光

不同三基色光源数目比例下的混色光谱,图 7 显示了当红绿蓝三色光源数目比例分别为 1:1:1, 1:1:2, 2:1:1 及 1:2:1 时的光谱分布图。通过对采集到的光谱数据进行计算分析,并取波长间隔 $\Delta\lambda$ 为 5 nm, 从而得到在不同混色比例下用于显示的色品坐标及相应色温如表 3 所示。

源数目之比获得理想白场平衡的一种办法。

5 结 论

通过分析光栅光调制器的光学调制原理,选择具有一定相干性的 LED 光源,通过计算不同红绿蓝三基色光源数目之比和不同光源带宽下 LED 光源的色度学特性,得出如下结论:

1) 用 LED 光源作为投影显示的光源,光源带宽对显示质量影响较大,从对比度角度看,当光源带宽小于 10 nm 时,对比度大于 225,可以满足一般显示要求。

2) 由三基色 LED 光源在色品图上的色三角面积明显大于传统光源的色三角面积,具有更丰富的色彩显示能力。

3) LED 的光源带宽对颜色复现能力影响较大,光源带宽越小,三基色在色品图中包围的色三角面积越大,能够还原的颜色越丰富,此外,混色后的白场坐标随着带宽的减小偏向短波部分,会造成混色白光在显示上失真。

4) 不同三基色光源数目之比对色彩再现影响较大,当红绿蓝三基色光源数目之比为 2:1:1 时,混合后的色彩跟标准光源的色彩比较失真较小,主要体现在混色白场坐标与标准光源的白场坐标在色品图中位置接近,并通过实验加以验证,获得了一种由于带宽的减小而造成色彩失真的补偿办法。

5) 在红绿蓝三基色光源数目之比为 2:1:1 时,从光源带宽与光源的一般显色指数的关系得出,随着光源带宽的减小,光源的一般显色指数随之下降,说明光源带宽的减小不利于颜色呈现效果的提高,因此,在对 LED 光源进行滤波以提高对比度的同时必须考虑光源的颜色复现效果。

由此可见,在采用 LED 作为光栅光调制器的照明光源时,必须综合考虑光源带宽对显示对比度和色彩复现能力的影响。在取红绿蓝三色光源数目之比为 2:1:1 时,且光源的带宽为 10 nm 的情况下,对比度可以达到 225,同时也可以保障光源的复现指数大于 80,具有较优的颜色复现能力,并且该三色光源比例又能保证复色白光与标准光源的白光接近,不至于造成较大的色彩失真。因此在光学系统设计上,所采用红绿蓝三基色光源的比例须满足 2:1:1 这个条件,并且所采用的滤色片应为一带通滤色片,具有约 10 nm 的滤波范围,从而可以保证较好的投影显示效果。

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 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

- 3 Sun Jiyong, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Transmitting Fabry-Pérot light modulator for display application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2240~2244
孙吉勇, 黄尚廉, 张 洁等. 用于显示的透射型法布里珀罗光调制器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2240~2244
- 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, 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
- 7 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
- 8 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
- 9 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**(11): 2225~2231
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**(11): 2225~2231
- 10 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics[M]. Beijing: Science Press, 1981
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理[下][M]. 北京: 科学出版社, 1981
- 11 J. Tumblin, J. K. Hodgins, B. K. Guenter. Two methods for display of high contrast images[J]. *Transactions on Graphics*, 1999, **18**(1): 56~94
- 12 Tang Shunqing. Colorimetry [M]. Beijing: Publishing House of Beijing Institute, 1990
汤顺青. 色度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
- 13 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Mu Guoguang. Study on the colorimetric properties of the LED projection sources[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2537~2540
赵 星, 方志良, 母国光. LED 投影光源的色度学特性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2537~2540