

# 基于单片数字微镜器件的三维彩色全息投影技术

季冬 宋佳文 周皓 顾济华

苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215000

**摘要** 研究分析了不同波长照明条件下的数字微镜器件(DMD)衍射特性,并以此为依据设计了一套基于单片DMD的无透镜式三维彩色全息投影系统。为了得到真彩色三维物体再现效果,以一单色分量为基准消除原始图中的倍率色差;通过调节三色激光器入射角度来消除横向位置色差;将三色分量光电再现图像进行合成,得到了具有三维深度信息的彩色全息再现图像。结果表明,所提方法不仅降低了彩色计算全息生成程序的复杂性,而且再现光路简洁。

**关键词** 全息;彩色全息投影;色差调整;数字微镜器件;光电再现

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080901

## Three-Dimensional Color Holographic Projection System Using Single Digital Micromirror Device

Ji Dong Song Jiawen Zhou Hao Gu Jihua

College of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000, China

**Abstract** By analyzing the diffraction under different wavelengths of digital micromirror device (DMD), a lensless color holographic projection system using single DMD is designed. With the reference of a single color component, the magnification chromatic aberration of the original image is eliminated. By adjusting the incident angle of these three-color lasers, the transverse chromatic aberration is eliminated. Color holographic reconstruction images with three-dimensional depth information is obtained by synthesizing the optoelectronic reconstruction image of the three color components. With this method, not only the program of color computer generated holography is simplified, but also the optical path of reconstruction is more intuitive.

**Key words** holography; color holographic projection; adjustment of chromatic aberration; digital micromirror device; optoelectronic reconstruction

**OCIS codes** 090.1705; 090.1760; 090.2870; 100.3010

### 1 引言

随着信息技术的发展,更好地获取与显示三维信息成了研究的热点。三维计算全息无需现实世界的物体,理论上只需三维物体的空间分布函数即可得到三维物体的计算全息图,再利用光电方法便可对物体进行重构,因而被认为是未来实现三维图像显示的一种非常有效的手段<sup>[1-4]</sup>。相比于光学全息,计算全息更为灵活、方便,而且实验光路相对更为简单<sup>[5-6]</sup>。

Huebschman等<sup>[7]</sup>提出利用单色激光照射数字微镜器件(DMD)面板来实现数字全息图的光电再现。虽然得到了较好的再现结果,但缺乏彩色效果。Yaras等<sup>[8]</sup>提出了使用图形处理器(GPU)加载数字全息图。该系统使用三片纯相位型空间光调制器(SLM)分别用来加载对应颜色分量的全息图,利用红、绿、蓝(R、G、B)三色LED光源分别照射对应的SLM面板来进行光电再现实验,最终得到了较好的再现结果,但由于使用了三片SLM面板,结构相对复杂,成本也比较高。

为了克服上述缺点,本文以单片DMD作为反射成像装置来实现彩色计算全息图像的重建。分析了DMD的结构特性,以此推导演射光场函数,绘制衍射光场分布图;针对DMD对于彩色图像中R、G、B三色分

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-03-30; 网络出版日期: 2015-07-11

作者简介: 季冬(1990—),男,硕士研究生,主要从事三维彩色全息投影方面的研究。E-mail: 937043304@qq.com

导师简介: 顾济华(1957—),男,博士,教授,主要从事光学测量与光信息处理方面的研究。

E-mail: jhgu@suda.edu.cn(通信联系人)

量的不同衍射特性,通过调整三色激光器入射角度来消除横向位置色差;搭建基于单片 DMD 的 R(632.8 nm)、G(532 nm)、B(473 nm)三色激光无透镜式的时分复用<sup>[9]</sup>彩色全息投影系统,对两张不同记录距离的彩色图像进行光电再现。

## 2 DMD 特性分析

德州仪器公司于 1987 年在微机电系统的基础上,开发了二维可控微反射镜阵列器件,即 DMD。DMD 是一种反射式的空间光调制器,具有极高的光能利用率,相比硅基液晶具有更高的衍射效率和刷新率<sup>[10]</sup>,而且 DMD 作为半导体器件,具有较好的耐高温性能以及较长的使用时间<sup>[11]</sup>。其理论模型如图 1 所示。

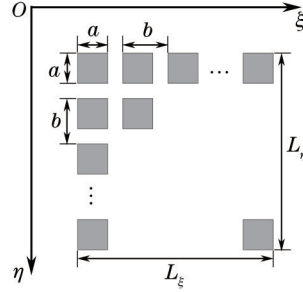


图 1 DMD 理论模型

Fig.1 Theoretical model of DMD

如图 1 所示, DMD 所在平面为  $\xi-O-\eta$ , DMD 的横向、纵向长度分别为  $L_\xi$ 、 $L_\eta$ , 单个微镜的长度和宽度都为  $a$ , 微镜间距均为  $b$ 。当平行光波垂直入射 DMD 时, 出射光的衍射光场  $U(\xi, \eta)$  满足:

$$U(\xi, \eta) = \left[ \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}, \frac{\eta}{a}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{\xi}{b}, \frac{\eta}{b}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{\xi}{L_\xi}, \frac{\eta}{L_\eta}\right), \quad (1)$$

式中  $\otimes$  表示卷积,  $\text{rect}\left(\frac{\xi}{a}, \frac{\eta}{a}\right)$  表示单个微镜的孔径函数,  $\text{comb}\left(\frac{\xi}{b}, \frac{\eta}{b}\right)$  表示对微镜的周期性复制。与 DMD 相距  $d$  时的衍射光场  $K(x, y)$  满足:

$$\begin{aligned} K(x, y) &= \frac{\exp(ikd)}{ikd} \iint U(\xi, \eta) \exp\left\{\frac{i\pi}{d\lambda}[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]\right\} d\xi d\eta = \frac{\exp(ikd)}{ikd} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]x^2\} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]y^2\} \times \\ &\iint \left[ \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}, \frac{\eta}{a}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{\xi}{b}, \frac{\eta}{b}\right) \right] \times \text{rect}\left(\frac{\xi}{L_\xi}, \frac{\eta}{L_\eta}\right) \times \exp\{[i\pi/(d\lambda)]\xi^2\} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]\eta^2\} \times \\ &\exp\{[-2i\pi/(d\lambda)]\xi x\} \exp\{[-2i\pi/(d\lambda)]\eta y\} d\xi d\eta = \frac{\exp(ikd)}{ikd} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]x^2\} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]y^2\} \times \\ &F\left\{ \text{rect}\left(\frac{\xi}{a}, \frac{\eta}{a}\right) \otimes \text{comb}\left(\frac{\xi}{b}, \frac{\eta}{b}\right) \exp\{[i\pi/(d\lambda)]\xi^2\} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]\eta^2\} \right\} = \\ &a^2 b^2 \frac{\exp(ikd)}{ikd} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]x^2\} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]y^2\} \times \\ &P(x, y) \otimes F\left\{ \text{rect}\left(\frac{\xi}{L_\xi}, \frac{\eta}{L_\eta}\right) \exp\{[i\pi/(d\lambda)]\xi^2\} \exp\{[i\pi/(d\lambda)]\eta^2\} \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $F$  表示傅里叶变换,  $P(x, y)$  是一个二维周期函数, 作为零级衍射光斑的周期性复制, 满足:

$$P(x, y) = \text{sinc}\left(\frac{ax}{d\lambda}, \frac{ay}{d\lambda}\right) \text{comb}\left(\frac{bx}{d\lambda}, \frac{by}{d\lambda}\right), \quad (3)$$

式中  $\text{sinc}\left(\frac{ax}{d\lambda}, \frac{ay}{d\lambda}\right)$  决定了光斑的复制强度, 而  $\text{comb}\left(\frac{bx}{d\lambda}, \frac{by}{d\lambda}\right)$  决定了光斑的复制周期。

图 2 为对应不同微镜孔径参数时, (3)式函数的分布图形。图中的红色“·”表示在  $x, y$  方向获得的强度分布, 为了便于观察分析, 仅标定了主要级次。

从图 2 中可以看出, 光斑的复制周期由  $\text{comb}$  函数决定, 并且在  $x, y$  轴上以项  $\left(\frac{d\lambda}{b}, \frac{d\lambda}{b}\right)$  表示出来。光斑

的强度由 sinc 函数的峰值和 comb 函数共同决定,最大光强的斑点是在  $(x,y)=(0,0)$  处。随着 DMD 的单片微镜孔径以及孔径间隙的改变,其衍射光场的分布也会随着改变。为了便于观察分析,对  $P(x,y)$  做了归一化处理。首先设定  $\frac{d\lambda}{b}=1$ ,在图 2(a)中,单片微镜孔径  $a$  为  $10.8 \mu\text{m}$ ,微镜间距  $b$  为  $11.8 \mu\text{m}$  的 DMD,由此可得  $\frac{b}{a}=1.093$ 。在此情况下的次级衍射光斑的强度变化比较平坦,随着级次的增大,衍射光斑强度逐渐变弱。在图 2(b)中,保持  $b$  的值不变( $11.8 \mu\text{m}$ ),改变微镜孔径  $a$  的值使得  $\frac{b}{a}=2$ 。在此情况下次级衍射光斑发生了比较大的变化, $2n$  级衍射光斑强度都为零,这符合衍射光栅中的缺级现象。

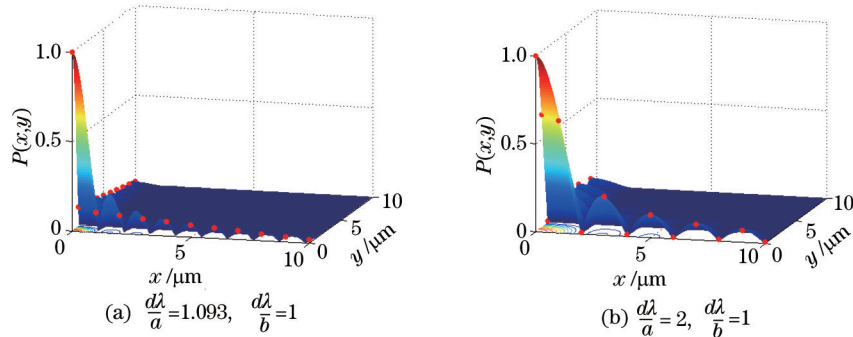


图 2 不同微镜孔径对应的  $P(x,y)$  分布图

Fig.2 Distribution diagrams of  $P(x,y)$  under different micromirror apertures

### 3 彩色全息显示的色差消除

针对一幅彩色图像,首先提取其 R、G、B 分量信息,然后分别进行图像缩放以及制作计算全息生成 (CGH) 图,得到消除倍率色差<sup>[12]</sup>后的各颜色分量 CGH 图。接下来,通过调整 R、G、B 三色激光入射角,相应的横向位置色差得以消除。最后,在 DMD 上按照时序加载分量图像,通过光电再现就可得到具有三维深度信息的彩色全息再现图像。其流程图如图 3 所示。

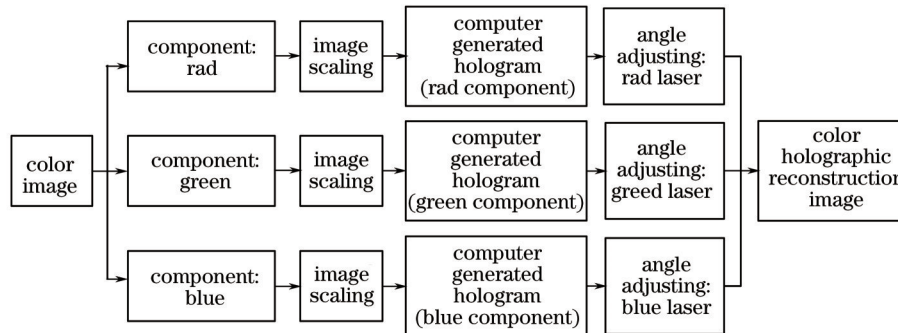


图 3 单片 DMD 彩色全息显示流程图

Fig.3 Flow chart of color holographic display based on single DMD

#### 3.1 横向位置色差的产生

依据第 2 节讨论,由于 DMD 结构特性限制,衍射光斑的复制周期由  $\frac{\lambda d}{b}$  决定。图 4 为模拟 R、G、B 三色光源衍射级次位置关系图,为了便于观察分析,设定  $\frac{\lambda_r d}{b}=6.328$ ,  $\frac{\lambda_g d}{b}=5.32$ ,  $\frac{\lambda_b d}{b}=4.73$ 。

当 DMD 上加载电寻址信号后,微反射镜发生  $\pm 12^\circ$  的偏转角度<sup>[13-14]</sup>,得到

$$k = \frac{b \sin 2\theta}{\sqrt{2} \lambda}, \quad (4)$$

式中  $k$  代表微镜发生偏转后最强衍射光斑的级次,  $\lambda$  代表光波波长,  $b$  代表微镜间距。通过计算得到 R、G、B 最强衍射光斑的级次分别为 5、6、7 级。在图 4 中分别标注零级衍射光斑为  $(r_0, r_0)$ 、 $(g_0, g_0)$ 、 $(b_0, b_0)$ , 加载电寻址信号后的最强衍射光斑为  $(r_5, r_5)$ 、 $(g_6, g_6)$ 、 $(b_7, b_7)$ 。

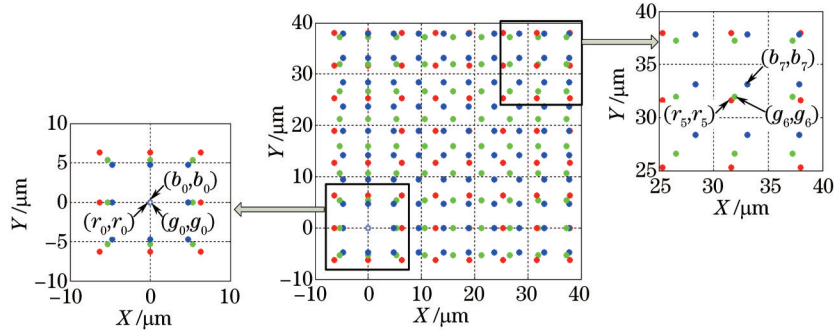


图4 红、绿、蓝三色光源衍射级次位置关系图

Fig.4 Relationship diagrams of R, G, B light sources diffraction

将R、G、B三色激光器合成一束白光后,经过扩束准直后入射未加载电寻址信号的DMD,得到如图5(a)所示的未加载电寻址信号时的衍射图像。分别标定出R、G、B三色最强衍射光斑中心为 $O_r(x_r, y_r)=(0,0)$ 、 $O_g(x_g, y_g)=(0,0)$ 、 $O_b(x_b, y_b)=(0,0)$ 。当复合激光入射加载电寻址信号的DMD后得到如图5(b)所示的图像,三色分量的再现像中心位置将不再重合,分别标定为 $O_r(x_r, y_r)$ 、 $O_g(x_g, y_g)$ 、 $O_b(x_b, y_b)$ 。对比图4和图5可见,无论是未加载电寻址信号还是加载电寻址信号后得到的模拟衍射图像和实际衍射图像均吻合。

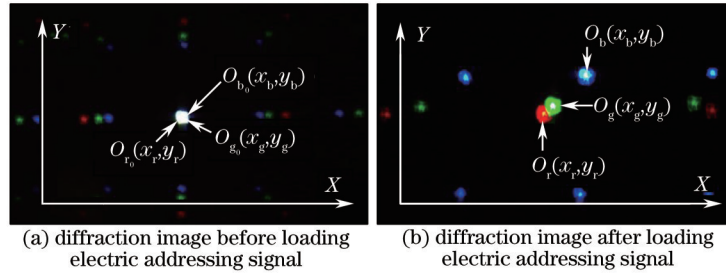


图5 红、绿、蓝三色光源照明DMD衍射实验图

Fig.5 Diffraction experimental diagram of R, G, B light illuminate DMD

### 3.2 横向位置色差的消除

如图6所示即为调整前、后的R、G、B最强衍射光斑的分布模拟图,其中图6(a)为调整前的分布模拟图,图6(b)为调整后的分布模拟图,中心即为合成后的衍射光斑,灰色部分表示最终彩色图像的合成再现区域。分别标定出在DMD加载电寻址信号后的衍射图像中R、G、B最强衍射光斑的中心 $O_r(x_r, y_r)$ 、 $O_g(x_g, y_g)$ 、 $O_b(x_b, y_b)$ 。其分别满足:

$$\begin{cases} O_r = \left( \frac{5\lambda_r d}{b}, \frac{5\lambda_r d}{b} \right) \\ O_g = \left( \frac{6\lambda_g d}{b}, \frac{6\lambda_g d}{b} \right) \\ O_b = \left( \frac{7\lambda_b d}{b}, \frac{7\lambda_b d}{b} \right) \end{cases} \quad (5)$$

考虑其二维对称特性,以一维 $x$ 轴方向为例进行讨论:

$$\begin{cases} \theta_{rg(x)} = \frac{6\lambda_g - 5\lambda_r}{4\pi b} \times 360^\circ \\ \theta_{rb(x)} = \frac{7\lambda_b - 5\lambda_r}{4\pi b} \times 360^\circ \\ \theta_{gb(x)} = \frac{7\lambda_b - 6\lambda_g}{4\pi b} \times 360^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\theta_{rg(x)}$ 、 $\theta_{rb(x)}$ 、 $\theta_{gb(x)}$ 分别代表红、绿、红、蓝,绿、蓝激光入射DMD的角度在 $x$ 轴上的角度差。要使得三个斑点重合,须以其中某一颜色光斑为基准,分别调整其余两色激光的入射角度<sup>[15]</sup>,即可消除横向位置色差。

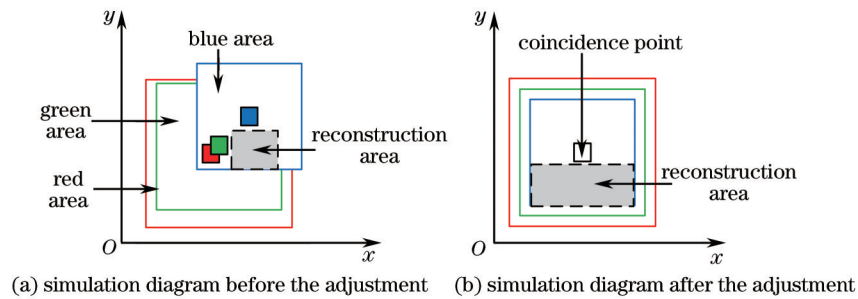


图6 R、G、B最强衍射光斑分布模拟图

Fig.6 Simulation diagram of the R, G, B strongest diffraction distribution

#### 4 三维彩色物体光电再现

在三维彩色物体光电再现实验中,采用如图7所示的彩色图像作为原始物体,对不同记录距离<sup>[16-17]</sup>的彩色图像进行光电再现。其中,图7(a)的记录距离为0.25 m,图7(b)的记录距离为0.45 m。

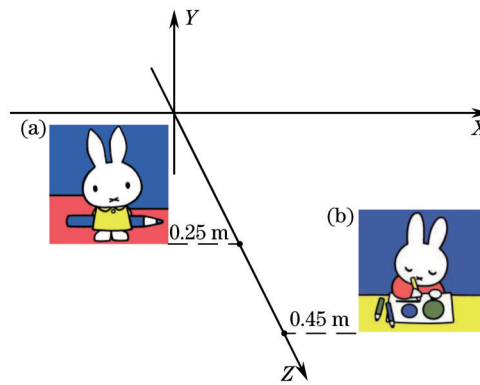


图7 原始物体图像

Fig.7 Original object image

如图8所示的彩色全息再现光路示意图,其中laser1、laser2、laser3分别代表R、G、B三色激光器,S1、S2、S3分别代表可控光路通断开关,C1、C2、C3分别代表R、G、B三色激光的扩束准直装置。

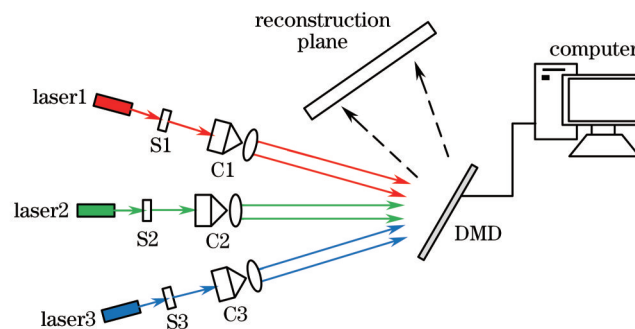


图8 无透镜式彩色全息再现系统光路示意图

Fig.8 Optical path schematic drawing of lensless color holographic reconstruction system

实验所采用的R、G、B三色激光器分别为:632.8 nm He-Ne激光器、532 nm 半导体激光器、473 nm 半导体激光器。以一定的先后时序分别加载R、G、B三色激光器和对应的全息图<sup>[18]</sup>。即在 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 时刻,分别开启S1、S2、S3并加载对应分量的全息图至DMD上。根据设定的采样参数及再现距离<sup>[19]</sup>,在成像空间中得到如图9(a)、(b)所示距离DMD分别为2.45 m和4.41 m处的彩色光电再现图。

由图9(a)、(b)可见,当接收屏与DMD距离为2.45 m时,左边图像处于聚焦状态,右边图像离焦;而当接收屏与DMD距离为4.41 m时,左边图像处于离焦状态,右边图像聚焦。这表明在不同的深度时,再现图像处于不同的聚焦状态,清晰度不同,再现的彩色图像具有真实的空间效果。

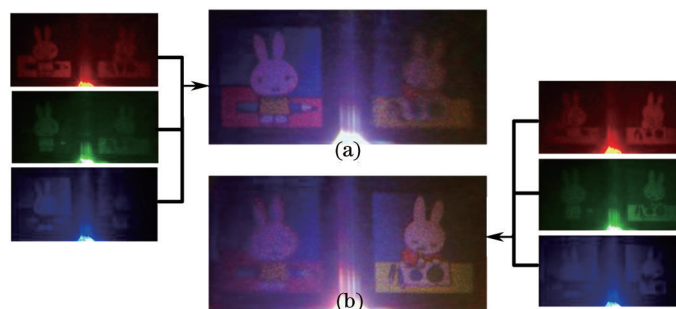


图9 光电再现图

Fig.9 Optoelectronic reconstruction images

## 5 结 论

基于单片 DMD 构建了一套三维彩色全息再现系统。分析了 DMD 对于多波长衍射的特性,依据此特性提出了彩色全息图色差消除的方法:通过调整三色激光器入射 DMD 的角度来消除横向位置色差,既避免了对图像进行复杂调整,又使得彩色全息再现区域得到了最大限度的扩展。结果表明,采用本文方法无需复杂运算即可获得较高质量的三维物体真彩色全息再现图像,实验光路简洁,具有很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Yaras F, Kang H, Onural L. State of the art in holographic displays: a survey[J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(10): 443-454.
- 2 Slinger C, Cameron C, Stanley M. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 46-53.
- 3 Wang Hui, Jin Hongzhen, Wu Dongyuan, *et al.*. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209012.  
王 辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209012.
- 4 Dong Jianwen, Chen Dingchen, Pang Xiaoning, *et al.*. Spatial-domain computer generated holographic three-dimensional display[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0701001.  
董建文, 陈定尘, 庞晓宁, 等. 空域计算全息三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0701001.
- 5 Wang Hao, Bi Yong, Li Fang, *et al.*. Enlargement technology of reconstructed image of computer generated hologram based on spatial light modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0309001.  
王 皓, 毕 勇, 李 芳, 等. 基于空间光调制器的计算全息再现像放大技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0309001.
- 6 Shen Chuan, Wei Sui, Liu Kaifeng, *et al.*. Survey on methods and systems of color holographic display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030005.  
沈 川, 韦 穗, 刘凯峰, 等. 彩色全息显示方法与系统概述[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030005.
- 7 M L Huebschman, B Munjuluri, H R Garner. Dynamic holographic 3-D image projection[J]. *Opt Express*, 2003, 11(5): 437-445.
- 8 Yaras F, Kang H, Onural L. Real-time phase-only color holographic video display system using LED illumination[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H48-H53.
- 9 Zhao J, Jiang H, Di J. Recording and reconstruction of a color holographic image by using digital lensless Fourier transform holography[J]. *Opt Express*, 2008, 16(4): 2514-2519.
- 10 Ma J, Su P, Xia F, *et al.*. Magnification of optical image in holography projection using lensless Fresnel holography[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(8): 1-7.
- 11 Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]. *Micromachining and Microfabrication, International Society for Optics and Photonics*, 2003: 14-25.
- 12 Wang Tao, Yu Yingjie, Zheng Huadong. Removal of magnification chromatism in optoelectronic full color holography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1414-1420.  
王 涛, 于瀛洁, 郑华东. 彩色全息光电再现倍率色差的消除[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1414-1420.
- 13 Son J Y, Lee B R, Chernyshov O O, *et al.*. Holographic display based on a spatial DMD array[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(16): 3173-3176.

- 14 Ai Qi, Chen Xiao, Tian Miao, *et al.*. Multi-channel C-band-tunable fiber lasers based on digital-micromirror-device processor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0414001.  
艾 琪, 陈 笑, 田 森, 等. 基于数字微镜器件的多通道C波段可调谐光纤激光器[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0414001.
- 15 Xue G, Liu J, Li X, *et al.*. Multiplexing encoding method for full-color dynamic 3D holographic display[J]. *Opt Express*, 2014, 22(15): 18473-18482.
- 16 Yang Lei, Xia Jun, Zhang Xiaobing, *et al.*. Three-dimensional display by holographic imaging on multiple focal planes[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209017.  
杨 磊, 夏 军, 张晓兵, 等. 基于多平面全息成像的三维显示[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209017.
- 17 Cao Xuemei, Sang Xinzhu, Chen Zhidong, *et al.*. Computer generated hologram of complex three-dimensional object based on a two-dimensional color image and the depth map[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0609002.  
曹雪梅, 桑新柱, 陈志东, 等. 基于二维彩色图像和深度图的复杂三维场景的计算全息图[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0609002.
- 18 Oikawa M, Shimobaba T, Yoda T, *et al.*. Time-division color electroholography using one-chip RGB LED and synchronizing controller[J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12008-12013.
- 19 Kreis T, Aswendt P, Ho R. Hologram reconstruction using a digital micromirror device[J]. *Opt Eng*, 2001, 40(6): 926-933.

栏目编辑: 何卓铭