

# 基于 LED 光源的数字微镜器件全息显示系统

马建设<sup>1</sup> 程炳超<sup>2</sup> 曹文波<sup>3</sup> 苏 萍<sup>1\*</sup> 曹良才<sup>2</sup>

<sup>1</sup>清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055

<sup>2</sup>清华大学精密仪器系, 北京 100084

<sup>3</sup>宁波大学物理系光学研究所, 浙江 宁波 315211

**摘要** 数字微镜器件(DMD)具有较高的刷新速率和衍射效率,是理想的动态计算全息图加载器件。采用发光二极管(LED)作为光源来代替激光可以有效减少由激光的时间和空间相干性带来的散斑噪声。提出了一种以 LED 为光源、以 DMD 为计算全息图承载器的全息显示系统。研究了 DMD 进行全息显示的调制特性,分析了 LED 作为再现光源导致像质变差的原因,并用数值仿真的方法验证了 LED 的相干性和准直度对 DMD 全息显示系统再现像质的影响。根据仿真分析结果,采用滤色片和空间滤波器来提高 LED 的相干性,同时采用非球面准直透镜来改善光的利用效率,最终得到了较好的显示效果。

**关键词** 全息; 全息显示; 部分相干光; 数字微镜器件; 发光二极管; 计算全息图

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0709001

## Holographic Display System of Digital Micro-Mirror Devices Based on LED Light Source

Ma Jianshe<sup>1</sup> Cheng Bingchao<sup>2</sup> Cao Wenbo<sup>3</sup> Su Ping<sup>1</sup> Cao Liangcai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China

<sup>2</sup>Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>3</sup>Institute of Optics, Department of Physics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** Digital micro-mirror device (DMD) has the advantages of high refresh rate and high diffraction efficiency, and it is an ideal dynamic computer-generated hologram loader. Light-emitting diode (LED) is chosen as light source to replace the laser, since it can effectively reduce the speckle noise caused by both temporal and spatial coherence of laser. A holographic display system using LED as light source and DMD as computer-generated hologram loader is proposed in this paper. The modulation characteristics of DMD as a hologram display device are studied and the reason why worse image quality caused by LED chosen as representation light source is analyzed. The impact of coherence and collimation of LED on reconstruction image quality is analyzed. Numerical simulation results verify the above analysis. According to the results, a color filter and a spatial filter are used to improve the coherence of LED and an aspheric collimation lens is used to improve the optical efficiency. The experimental results show that the system has good display quality.

**Key words** holography; holographic display; partial coherent light; digital micro-mirror device; light-emitting diode; computer generated hologram

**OCIS codes** 090.2870; 110.4980; 220.4830; 090.1760

## 1 引 言

全息显示技术被视为未来的 3D 显示技术,可以提供物理和心理上的双重景深,最真实自然地还原 3D 物体的发光状态<sup>[1]</sup>。目前,产生全息图主要有两种方式,一种是采用光学记录材料全息图<sup>[2-3]</sup>,另一种是计算

收稿日期: 2016-02-19; 收到修改稿日期: 2016-03-16

基金项目: 国家 973 计划(2013CB328801)、青年科学基金(61405103)、深圳市基础研究(JCYJ20150529164918737)

作者简介: 马建设(1969—),男,博士,副教授,主要从事全息显示和 LED 照明方面的研究。E-mail: mjs888@126.com

\* 通信联系人。E-mail: su.ping@mail.sz.tsinghua.edu.cn

机制全息图(CGH)<sup>[4]</sup>。计算全息可以记录和再现现实中并不存在的物体,尤其是可以记录动态物体,是目前主流的动态全息显示技术<sup>[5-8]</sup>。空间光调制器(SLM)是动态全息显示系统中承载 CGH 的关键器件。常见的电寻址 SLM 主要包括数字微镜器件(DMD)、硅基液晶(LCoS)、液晶板、磁光 SLM 等。相对于透射型的 SLM,DMD 具有光转换效率较高的优势;与同为反射型 SLM 的 LCoS 相比,DMD 具有较高的刷新频率(高于 20000 frame/s)<sup>[9-12]</sup>。Kreis T 等<sup>[13]</sup>研究了 DMD 作为 CGH 承载器件进行全息再现的原理,Huebschman M L 等<sup>[14]</sup>报道了一种基于 DMD 的激光全息系统,韩超等<sup>[15]</sup>从 DMD 的微观结构入手阐述了 DMD 全息显示过程。然而,关于 DMD 的衍射特性对再现像像质影响的研究比较少见。

现有计算全息图的再现方法中采用的光源类型主要是激光,激光光源会使再现像产生严重的散斑噪声现象。发光二极管(LED)因其高发光效率和高可靠性被广泛应用。LED 发出的光具有一定的时间和空间相干性,因此可以用作 CGH 再现的光源。LED 不是完全相干光,因而重建的图像几乎没有散斑噪声,信噪比得到增强。使用 LED 作为全息显示系统的照明光源已成为一个发展趋势,在 LCoS 上采用 LED 作为重建光源的研究已被广泛报道<sup>[16-18]</sup>。由于 DMD 的调制原理与 LCoS 有本质区别,因此亟需研究以 LED 作为 DMD 全息显示系统的照明光源时,LED、DMD 的特性对再现像像质的影响。

本文将分析在以 LED 为光源,以 DMD 为 CGH 承载器的全息显示系统中,影响像质的主要因素,并用数值模拟的方法再现了这些因素导致的像质下降问题。根据研究结果,提出了针对这些问题的解决方案。实验结果证明了理论分析的有效性。

## 2 理论分析

### 2.1 DMD 的衍射特性

DMD 是一种微机电系统(MEMS),如图 1 所示,DMD 芯片的表面呈矩阵顺序排列着几十万甚至上百万个尺寸为  $10\ \mu\text{m}$  级的微镜,当 DMD 上电后,每个微镜可以独立地高速(低于毫秒级)旋转  $\pm 10^\circ$  或  $\pm 12^\circ$ ,因此每个微镜都具有开、关、静止三个状态,从而实现对入射光的振幅型调制。基于以上结构,可将通电后的 DMD 视为二维闪耀光栅,其闪耀角由微镜阵列的旋转角度决定。闪耀光栅将会给入射光束引入额外的相位差,如图 2 所示,以 DMD 的相邻两片微镜的侧视图为例,来说明 DMD 的相位调制原理。

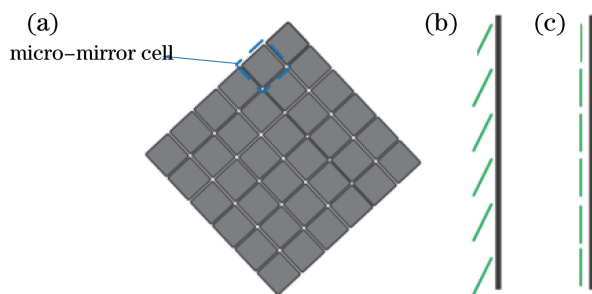


图 1 数字微镜的像素和状态示意图。(a) 像素;(b) 开态或关态;(c) 静止态

Fig. 1 Schematic of the pixels and states of digital micro-mirror. (a) Pixels; (b) on (off) state; (c) static state

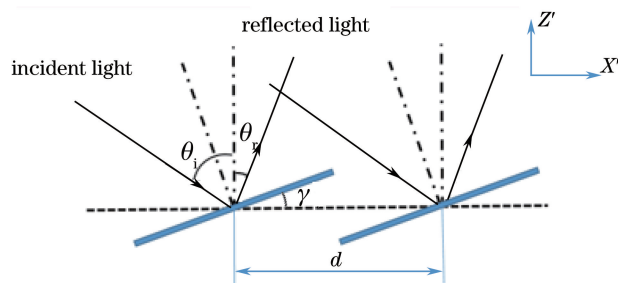


图 2 闪耀光栅

Fig. 2 Blazing grating

图 2 中  $X$  轴方向与 DMD 显微镜的零位平行,  $Z$  轴垂直于 DMD 显微镜的零位表面。设光束的入射角为  $\theta_i$ , 光束的出射角为  $\theta_r$ , 显微镜阵列的闪耀角为  $\gamma$ , 相邻显微镜中心间距为  $d$ 。在相邻两片显微镜上所反射的细光束的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d (\sin \theta_i - \sin \theta_r)}{\lambda} = \frac{2\pi d [\sin \theta_i - \sin (\theta_i - 2\gamma)]}{\lambda}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为入射光的波长。由 (1) 式可知, DMD 在对入射光束产生振幅调制的同时, 也会引入相位调制, 且相位调制量与波长  $\lambda$  有关。设全息图的光场分布为  $U(m, n)$ , 那么全息图经 DMD 调制后的光场分布为

$$U'(m, n) = U(m, n) \exp [j(m\Delta\varphi + n\Delta\varphi)], \quad (2)$$

根据 DMD 的结构和参数可知, 经 DMD 反射后在 DMD 平面附近的光场为

$$U(x, y) = \sum_m \sum_n U'(m, n) \operatorname{rect}\left(\frac{x-m}{t}, \frac{y-n}{t}\right) \operatorname{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) = \operatorname{rect}\left(\frac{x}{t}, \frac{y}{t}\right) \sum_m \sum_n U'(m, n) \delta(x-m, y-n) \operatorname{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right), \quad (3)$$

式中  $t$  为 DMD 在  $x, y$  方向的占空比,  $L_x, L_y$  分别为 DMD 在  $x, y$  方向的长度。

设 CGH 的再现距离为  $z$ , 像平面上的光场分布是对  $U(x, y)$  做菲涅耳衍射变换:

$$F\left(\frac{2\pi x}{\lambda z}, \frac{2\pi y}{\lambda z}\right) = \mathcal{F}[U(x, y)] = t^2 L_x L_y \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi x}{\lambda z} t, \frac{2\pi y}{\lambda z} t\right) \times \sum_m \sum_n U'(m, n) \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{2\pi x}{\lambda z} m + \frac{2\pi y}{\lambda z} n\right)\right] \operatorname{sinc}(xL_x, yL_y). \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 当入射光束的波长范围很窄并且入射角相同时, 相位差  $\Delta\varphi$  近似为一个常数, 那么反射光束经过一段距离的传播后, 经 DMD 反射引入的相位差将不会影响到再现光场的复振幅分布。对于激光来说, 相位差  $\Delta\varphi$  几乎是恒定的, 因此激光进行再现时会有较好的效果。若入射光束的波长范围较宽或者入射角在一定范围内变动, 则  $\Delta\varphi$  对再现光场的复振幅影响不可忽略。  $\Delta\varphi$  的改变会使再现像的位置发生偏移, 经过积分后会使图像变得模糊并产生一定的形变。

## 2.2 LED 的发光特性

LED 发出的光具有较宽的光谱范围。使用光谱仪测试得到实验用红光 LED 的光谱特性, 其中心波长为 635 nm, 半波宽约为 30 nm, 相干长度为 13.44  $\mu\text{m}$ , 如图 3 所示。

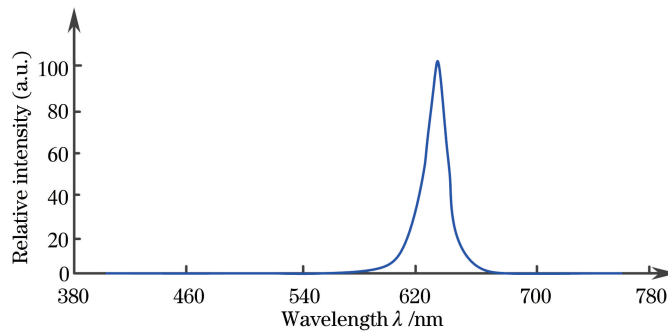


图 3 某红光 LED 光谱归一化图

Fig. 3 Normalized spectrum of a red LED

LED 的发光面具有一定的尺寸。实验中所用的大功率红光 LED 的发光面尺寸为 80 mil  $\times$  80 mil (1 mil = 0.0254 mm)。LED 的发光角度特性可近似为一个朗伯发光体, 经二次聚光后, 其方向角通常仍大于  $45^\circ$ 。采用常见的准直光路的方法, 将会损失大部分光能量, 导致再现像的能量降低。

## 2.3 数值模拟与讨论

根据 (1) 式, 入射光束在经 DMD 反射后, 将引入非线性的相移  $\Delta\varphi$ , 从而使再现像发生模糊。LED 是一

种面光源,其发光面可以看作由多个矩形排布的非相干点光源组成,各个点光源所发出的光束经准直后从不同方向入射在 DMD 上,即入射角  $\theta_i$  会有不同,由(1)式可知,  $\Delta\varphi$  也会产生非线性变化,从而影响再现像的质量。

为了验证上述分析,使用 Matlab 软件进行了数值模拟。以图 4(a)所示的“圆环”为物体 3D 模型,利用 3D Max进行采样,使用查找表法计算得到 CGH<sup>[19-20]</sup>,称之为“圆环 CGH”。

首先模拟 LED 的宽光谱特性对以 DMD 为 CGH 承载器件的全息显示系统的像质的影响。以 635 nm 为中心波长,基于(4)式,分别数值再现了光源为单波长、半波宽为 15 nm 和 30 nm 时,加载了“圆环 CGH”的 DMD 的像。其中,当光源具有一定半波宽时,对波长进行间隔为 1 nm 的采样,利用(4)式分别计算得到数值再现像,最后进行叠加,结果如图 4 所示。比较图 4(b)~(d)可知,对于单波长光源,再现像较为清晰,而随着波长宽度的增加,再现图像会变得越来越模糊。

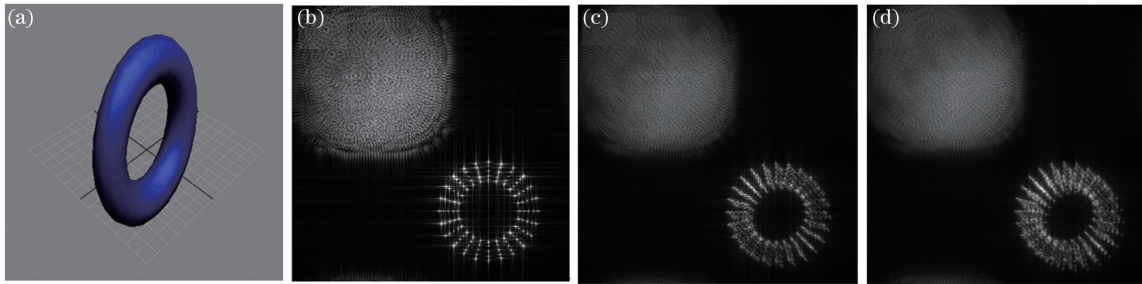


图 4 (a)“圆环”和再现光波长为不同范围时“圆环 CGH”的数值模拟再现图; (b) 635 nm; (c) 627~642 nm; (d) 620~650 nm  
Fig. 4 (a) “Ring” model and the numerical reconstructed images of the “ring CGH” with different reconstruction light wavelengths; (b) 635 nm; (c) 627~642 nm; (d) 620~650 nm

然后模拟 LED 的面光源特性对以 DMD 为 CGH 承载器件的全息显示系统的像质的影响。面光源可以认为是由很多个点光源呈矩形阵列排列构成,位置不同的点光源经准直后,以不同的入射角  $\theta_i$  照射在 DMD 平面。同样,LED 准直度较差也会使入射光角度在一定范围内变化。以光轴方向为  $z$  轴正方向,分别再现了再现光为沿  $z$  轴、入射角度范围为  $-\pi/30 \sim \pi/30$ 、 $-\pi/10 \sim \pi/10$  之间的平面波时,加载了“圆环 CGH”的 DMD 的像。其中,按照  $\pi/180$  的间隔对再现光的入射角度进行采样,根据(4)式分别计算得到再现结果,对所有结果进行叠加,得到最终的再现结果,如图 5 所示,其中图 5(a)中入射光线与全息面垂直,图 5(b)中入射角范围在  $-\pi/30 \sim \pi/30$  之间,图 5(c)中入射角范围在  $-\pi/10 \sim \pi/10$  之间。由图 5 可以看出,再现像随着入射角范围的增大,质量变差。

数值再现的结果与理论分析结果相符合。LED 的相干性和准直度会对再现像质产生影响,其宽光谱特性、面光源特性、准直度较差的特性都会导致再现像质量下降。

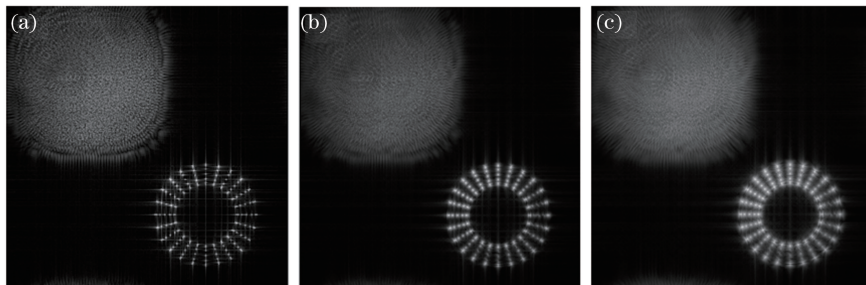


图 5 再现光空间频率为不同值时“圆环 CGH”的数值模拟再现图。

$$(a) 0; (b) -\frac{\pi}{30} \sim \frac{\pi}{30}; (c) -\frac{\pi}{10} \sim \frac{\pi}{10}$$

Fig. 5 Numerical reconstructed images of the “ring CGH” with different spatial frequencies of the reconstruction light.

$$(a) 0; (b) -\frac{\pi}{30} \sim \frac{\pi}{30}; (c) -\frac{\pi}{10} \sim \frac{\pi}{10}$$

### 3 实验与讨论

实验系统如图 6 所示,实验器材参数如表 1 所示,实验采用的全息图再现距离为 150 mm。LED 发出的光首先由一个非球面的准直透镜来收集,针孔被放置于透镜的焦平面上以改善光的空间相干性。穿过针孔的光被扩束准直,使光束的直径与 DMD 的尺寸相适合。该光束通过滤色片,带宽由 30 nm 变为 15 nm,最后以一定角度入射到 DMD 平面上。调节 CCD 平面与 DMD 平面之间的角度,找到并记录 +1 级再现像。实验结果如图 7 所示。

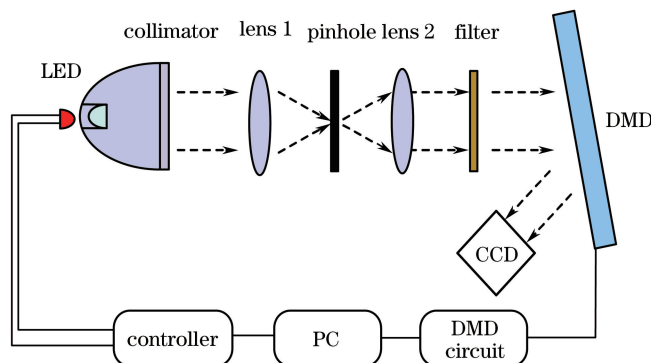


图 6 实验系统光路示意图

Fig. 6 Optical path diagram of the experiment system

表 1 实验器材及型号参数

Table 1 Experimental equipment and parameters

Equipment	Parameter
DMD	TI DLP 4100
LED	600~660 nm
Laser	635 nm
Pinhole	100 $\mu\text{m}$
Filter	635 nm (627~642 nm)
CCD	Cannon camera

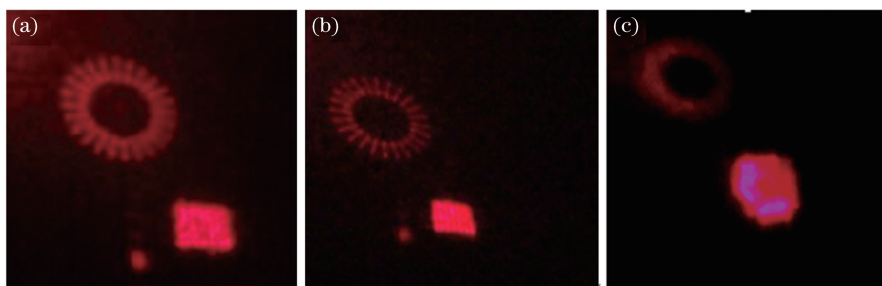


图 7 再现距离为 150 mm 时不同光源下的光学再现图。

(a) 635 nm 激光; (b) 使用了滤色片的 LED; (c) 未使用滤色片的 LED

Fig. 7 Optical reconstructed images at the reconstruction distance of 150 mm using different light sources.

(a) 635 nm laser; (b) LED with filter; (c) LED without filter

如图 7 所示,(a)、(b)两幅图的对比体现了使用低相干光源的优势。虽然图 7(a)具有更高的清晰度,但从图中可以看到较为明显的散斑噪声;与此相反,在图 7(b)中,散斑噪声几乎是不存在的,再现像的像质较高。图 7(b)、(c)两幅图的对比也验证了上文中的分析。图 7(c)由于未加滤色片,LED 的光谱较宽,导致再现像像质极差。图 7(b)使用了带宽为 15 nm 的滤色片,得到的再现像像质较好。

## 4 结 论

报道了一种基于 LED 照明的 DMD 全息显示系统。为了解决 LED 作为 DMD 照明光源的问题,研究了 DMD 作为 CGH 承载器件时的调制特性,并且根据 LED 的发光特性分析了像质变差的原因。然后用数值仿真的方法验证了上述分析。根据分析结果,提出了相应的解决方案。使用滤色片和空间滤波器来改善相干性,同时采用了一种非球面准直透镜来提高 LED 的光学利用效率。实验验证了这个系统的有效性,实验所用的全息显示系统表现出良好的显示效果,有效地避免了激光作为光源引入的散斑噪声问题。

## 参 考 文 献

- 1 Ma Jianshe, Xia Feipeng, Su Ping, *et al.*. Survey on key techniques and systems of digital holographic 3D display[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1141-1152.  
马建设, 夏飞鹏, 苏 萍, 等. 数字全息三维显示关键技术与系统综述[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1141-1152.
- 2 Wang Ding, Li Jinsong. 2-D real hologram making with white light recording method [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2003, 26(11): 101-104.  
王 丁, 李劲松. 白光编码法制作真彩色全息图[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(11): 101-104.
- 3 Li Junchang, Song Qinghe, Picart P, *et al.*. Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209008.  
李俊昌, 宋庆和, Picart P, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209008.
- 4 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer-generated hologram[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 5.  
虞祖良, 金国藩. 计算机制全息图[M]. 北京:清华大学出版社, 1984: 5.
- 5 Yoshikawa H, Yamaguchi T. Computer-generated holograms for 3D display[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(12): 1079-1082.
- 6 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.
- 7 Slinger C, Cameron C, Stanley M. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. Computer, 2005, 38(8): 46-53.
- 8 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.
- 9 Nesbitt R S, Smith S L, Molnar R A, *et al.*. Holographic recording using a digital micromirror device[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optics and Photonics, 1999, 3637: 12-20.
- 10 Xu Fuyang, Li Yong, Gao Zhiqiang. Blazing characteristics of DMD and its application in holographic display[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(3): 332-335.  
许富洋, 李 勇, 高志强. 数字微镜器件闪耀特性及其在全息显示中的应用[J]. 光子学报, 2011, 40(3): 332-335.
- 11 Wang Dapeng, Wei Sui. Characterization of a digital micromirror device for computer generated holographic video[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 50-55.  
王大鹏, 韦 穗. 数字微镜器件在视频全息中的应用[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 50-55.
- 12 Ji Dong, Song Jiawen, Zhou Hao, *et al.*. Three-dimensional color holographic projection system using single digital micromirror device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080901.  
季 东, 宋佳文, 周 皓, 等. 基于单片数字微镜器件的三维彩色全息投影技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080901.
- 13 Kreis T, Aswendnt P, Hoeffling R. Hologram reconstruction using a digital micromirror device[J]. Optical Engineering, 2001, 40(6): 926-933.
- 14 Huebschman M L, Munjuluri B, Garner H R. Dynamic holographic 3-D image projection[ J]. Optics Express, 2003, 11(5), 437-445.
- 15 Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong, *et al.*. Holographic display of digital micromirror device[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 190-194.  
韩 超, 韦 穗, 权希龙, 等. 数字微镜器件的全息显示[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 190-194.
- 16 Yaraş F, Kang H, Onural L. Real-time phase-only color holographic video display system using LED illumination[J].

- Applied Optics, 2009, 48(34): 48-53.
- 17 Zhao Y, Cao L C, Zhang H, *et al.*. Holographic display with LED illumination based on phase-only spatial light modulator[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optics and Photonics, 2012, 8559: 34-36.
  - 18 Moon E, Kim M, Roh J, *et al.*. Holographic head-mounted display with RGB light emitting diode light source[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6526-6534.
  - 19 Lucente M. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. Journal of Electronic Imaging, 1993, 2(1): 28-34.
  - 20 Jiang Xiaoyu, Cong Bin, Pei Chuang, *et al.*. A new look-up table method of holographic algorithms based on compute unified device architecture parallel computing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0209001.  
蒋晓瑜, 丛 斌, 裴 闯, 等. 一种基于新型查表方法的统一计算设备架构并行计算全息算法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0209001.