

# 基于超快液晶薄膜的实时动态全息三维视频显示

高洪跃 于瀛洁 郑华东

(上海大学机电工程与自动化学院精密机械工程系应用光学与检测实验室, 上海 200072)

**摘要** 介绍了在超快液晶薄膜中的实时动态全息视频显示成果, 此薄膜不需任何外加电场, 而且全息响应在毫秒量级, 全息图建立和自擦除时间最快都可达到 1 ms。利用红绿蓝(RGB)三色激光作为读出光获得了无串扰噪声红绿蓝三色实时动态全息显示视频。基于全息复用技术, 在此材料中实现 RGB 模式彩色全息视频显示。由于此材料易于制成大尺寸显示屏, 而且无需任何外加电场, 所以由其制成的空间光调制器或其他全息显示器件无需进行像素化, 这样就能有效地克服现有空间光调制器的缺陷, 其有望在未来被开发成高分辨率、大尺寸、彩色实时动态全息三维视频显示器。

**关键词** 全息; 实时动态全息视频显示; 彩色全息三维显示; 真三维显示; 液晶薄膜

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209013

## Real-Time Dynamic Holographic Three-Dimensional Video Display Based on a Super Fast Response Liquid Crystal Thin Film

Gao Hongyue Yu Yingjie Zheng Huadong

(Laboratory of Applied Optics and Metrology, Department of Precision Mechanical Engineering, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** Real-time dynamic holographic video display is presented in a super fast liquid crystal thin film with holographic response in the order of a millisecond and without any applied electric field. Both the formation time and self-erasure time of holographic images are 1 ms. Real-time dynamic holographic videos are achieved at red, green and blue laser without cross talk between the holograms. Furthermore, color holographic display in RGB model is realized by holographic multiplexing. Because the sample is easy to be made into a large size screen and needs no external electric field, any spatial light modulators or other holographic display devices resulting from this material will not be pixilated, and it can conquer the defect of existing spatial light modulator. It is believed that the film can be developed into a high resolution, large-size, real-time dynamic, and color holographic three-dimensional display in the future.

**Key words** holography; real-time dynamic holographic display; color holographic three-dimensional display; true three-dimensional display; liquid crystal thin film

**OCIS codes** 090.5694; 090.2870; 090.1705; 090.4220; 160.3710

## 1 引言

视觉是人类认识世界的主要途径, 人类获得的信息约 80% 来自视觉, 长期以来, 表达可视信息的主要手段仍然是二维的。近年来, 信息科学的不断发展使三维(3D)立体显示成为可能。三维显示技术(包括分光三维显示、集成成像三维显示、体三维显示和全息三维显示等)具有巨大的经济价值和战

略意义<sup>[1-16]</sup>, 因此受到世界各国的重视, 正处于蓬勃发展阶段。但当前的三维显示技术都存在着诸多缺陷, 例如: 观看视角和距离受限, 令人产生不适、立体效果不佳等, 所以未能实现广泛的应用。相较于其他三维显示技术, 全息三维显示技术可以实现真实物体全部信息(包括强度信息和相位信息)的再现, 是一种真正的三维显示技术<sup>[13-16]</sup>, 因此成为世

**收稿日期**: 2013-10-21; **收到修改稿日期**: 2013-12-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(11004037, 61101176, 61235002)、中国科学院开发基金(SKLST201104)、中国博士后基金(20110490732)、上海市高等院校青年教师培养资助计划(ZZSD12014)、上海市教委创新团队项目、上海大学创新基金

**作者简介**: 高洪跃(1977—), 女, 博士, 讲师, 主要从事实时动态全息三维视频显示、全息数据光盘、三维全息图打印、上转换材料体三维显示和全息图全光传输等方面的研究。E-mail: gaohylet@shu.edu.cn

界各国的研究热点之一。

近年来,静态全息三维显示技术相对比较成熟,已经被应用在军事、商业等领域。但动态全息三维显示在刷新频率、尺寸、色彩等方面还无法达到视频显示的应用要求。当前的商业空间光调制器无法实现大尺寸全息显示,而且其像素尺寸也接近材料和工艺极限,很难再减小像素尺寸以获得高分辨率和高清晰的全息图像。2010年,美国的Blanche等<sup>[17]</sup>报道了他们在聚合物材料中获得的每幅全息图更新时间为2s的全息动态显示成果,该成果应用的是全息视技术实现了水平视差和全视差立体显示。2012年,日本的Kinashi等<sup>[18]</sup>同样在聚合物中获得了全息图刷新频率为每秒5幅的动态全息显示结果,该报道旨在证明其全息介质的响应优势,所以只是利用全息技术实现二维图像再现和刷新。但这两项成果依然没能实现实时视频全息显示而且需要在全息介质上加每微米几十伏的高电压。2013年,美国的Smalley等<sup>[19]</sup>报道了一种刷新频率为30Hz的全息视频显示装置—各项异性泄漏模式调制器,虽然较当前的空间光调制器性能有很大提升,而且成本相对低廉,但其基于各项异性模式耦合阵列实现,无法完全克服传统空间光调制器的缺陷。

本文将报道超快响应液晶薄膜中实时动态全息视频显示成果。该全息液晶显示薄膜的全息响应时间在毫秒量级,其全息图建立和自擦除时间最快都可达到1ms。在全息显示过程中,此薄膜无需任何外加电场,全息图刷新完全是光控实现,而且该介质中的全息图可快速、完全擦除,实现无串扰全息视频显示。获得了红绿蓝(RGB)三色实时动态全息图像显示视频,证实了此材料中多色全息显示的可行性。最终,利用全息复用技术和RGB模式获得了彩色全息视频显示结果。研究结果证明此液晶薄膜可实现大尺寸、全色彩、实时动态视频全息三维显示,其在未来真三维显示领域具有广阔的应用前景。

## 2 实时动态彩色全息三维视频显示系统构建

这里所用材料为掺偶氮染料液晶混合物,利用其形成超薄的液晶薄膜<sup>[20-23]</sup>。实时动态全息显示实验光路如图1所示,其是典型的全息实验系统,波长为532nm的Nd:YAG激光作为记录光,被分为两束:一束作为参考光;另一束经空间光滤波器扩束滤波,再经过计算机驱动的空间光调制器,就可将计

算机上呈现的视频加载到该光束上,最后用透镜将其聚焦到液晶薄膜处作为信号光。参考光和信号光在液晶薄膜处相交干涉,在液晶薄膜中记录全息图。波长为491、532、633nm的二极管抽运固态(DPSS)激光(蓝色)、Nd:YAG激光(绿色)和氦氖(He-Ne)激光(红色)分别作为读出光实时再现液晶薄膜中记录的全息图,从而可以获得实时动态全息视频。

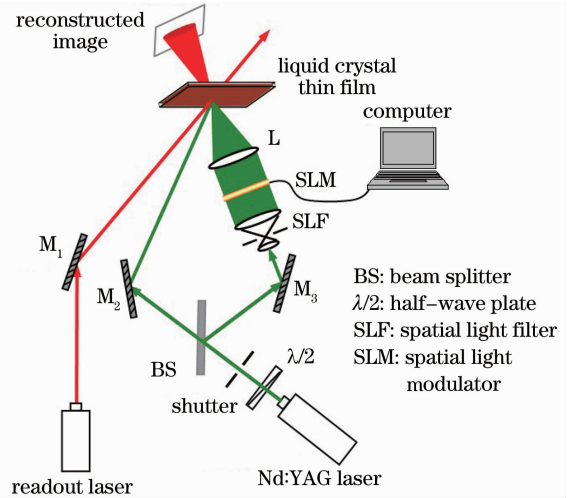


图1 实时动态全息显示实验系统

Fig. 1 Experimental setup for real-time dynamic holographic display

## 3 超快全息液晶薄膜动态特性分析

在此液晶薄膜中形成的全息图是瞬态全息图,全息图建立和擦除时间都在毫秒量级,测量了全息图建立和自擦除的过程,如图2所示,图中“on”和“off”分别表示记录光开启和关闭。图2(a)中上升曲线部分所示为全息图建立过程,由图可以看出当记录光开启,液晶薄膜中的全息图在1ms左右就可以形成,而且衍射效率达到最高值。此过程无需任何外加电场,在绿色激光记录的同时,读出激光可以实时的读出。图2(b)下降曲线部分所示为全息图自擦除过程,之所以叫自擦除是因为这种液晶薄膜中全息图的擦除既不需要任何光场也不需要任何电场,只要记录光关闭一束或两束同时关闭,所记录的全息图就会自动被擦除。图2(b)可以看到全息图自擦除时间最快也可达到1ms,由于此液晶材料对全息图没有存储效应,所以全息图是完全被擦除,不会对后续的全息图产生任何影响,即全息图间不会有串扰噪声产生。

研究中采用刷新频率为75Hz的空间光调制器,而此薄膜的刷新频率远高于它,所以利用图1的

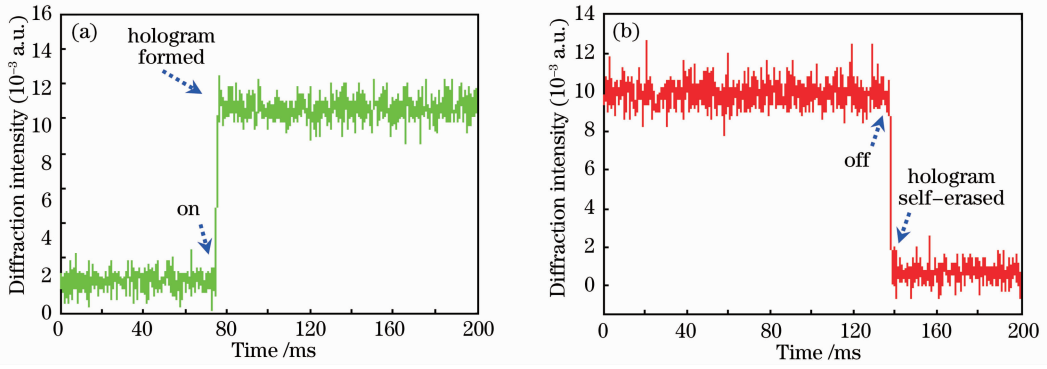


图 2 (a)全息图建立过程；(b)自擦除过程

Fig. 2 (a) Hologram formation; (b) self-erasure process

实验系统实现了真正的实时动态全息显示,获得了 RGB 三色全息视频。图 3 所示为实时动态全息视频的截图。由空间光调制器加载的是旋转的字母“A”,记录光都是 532 nm 的绿色激光,读出光分别为 633 nm 的红色激光、532 nm 的绿色激光和 491 nm 的蓝色激光。红色激光对全息图记录几乎没有影响,但是此液晶薄膜对绿色激光和蓝色激光比较敏感,为避免这两种激光对全息图记录的影响,实验中使读出角足够大,这样绿色激光和蓝色激光对全息图记录的影响可以忽略不计。所以获得了衍射效果较好的红绿蓝三色全息视频。由于此液晶薄膜具有超快的全息响应速度,而且完全没有全息存储效应,所以这些全息视频显示中再现图像间没有任何的串扰噪声,在室温下播放任意长时间,图像质

量都不会下降。

#### 4 彩色全息视频显示

为实现高清晰、大尺度、彩色全息显示,全息复用技术应该应用到全息动态显示中。利用全息角度复用技术、全息旋转复用技术和全息波长复用技术已经在此液晶薄膜中实现了多重复用全息显示<sup>[21-23]</sup>。为了实现彩色全息视频显示,采用了 RGB 彩色模式。这里是利用三幅全息图复用来实现 RGB 图像分量的再现,RGB 图像分量最终合成彩色全息图像。图 4 所示是基于 RGB 模式实现彩色全息三维显示的原理图。RGB 图像分量被记录在三个不同的全息图中,这三个全息图是利用角度复用被记录在液晶薄膜的同一记录点,RGB 三色读出光可分别将它们读出,保证这三幅再现图像位置和尺寸完全一致的情况下,就可得到彩色的图像。图 5 为彩色全息显示光路图,绿色激光作为记录光同时记录三幅

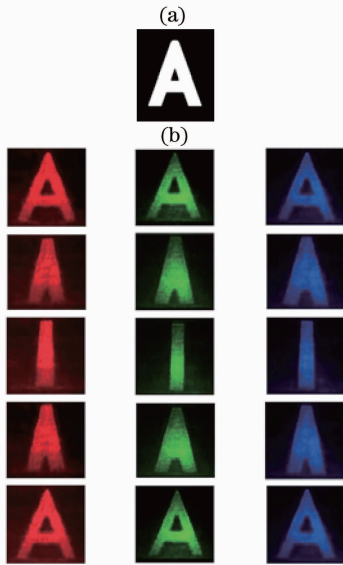


图 3 实时动态全息视频显示。(a)入射图像；(b)全息再现图像(全息显示视频的截图)

Fig. 3 Real-time dynamic holographic display. (a) Incident image; (b) holographic reconstruction images (snap shots from holographic display videos)

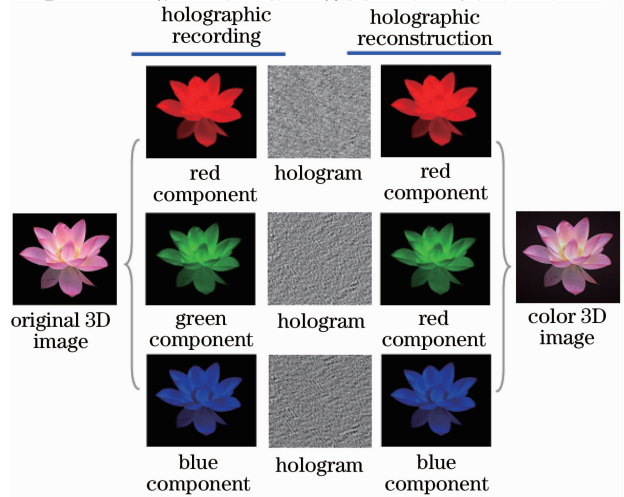


图 4 RGB 模式彩色全息三维显示示意图

Fig. 4 Sketch of color holographic 3D display using RGB model

全息图,然后红绿蓝三色激光分别读出相应的全息图,这三幅红绿蓝图像合成为彩色全息图像。图 6 为彩色全息显示的结果。图 6(a)所示为空间光调制器

加载的入射图像,图 6 (b)为从三幅角度复用全息图再现出来的 RGB 再现图像,作为 RGB 图像分量合成为图 6(c)的彩色图像。

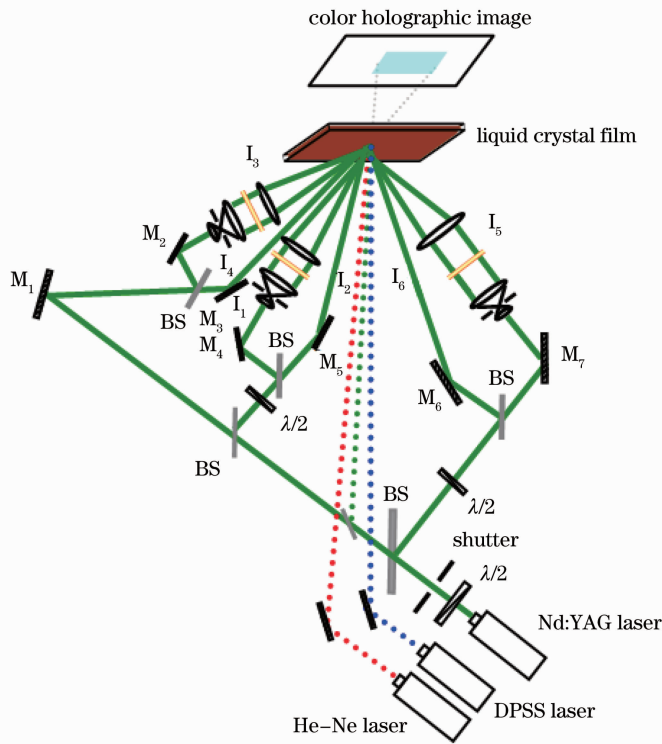


图 5 彩色全息显示光路图

Fig. 5 Experimental setup for color holographic display

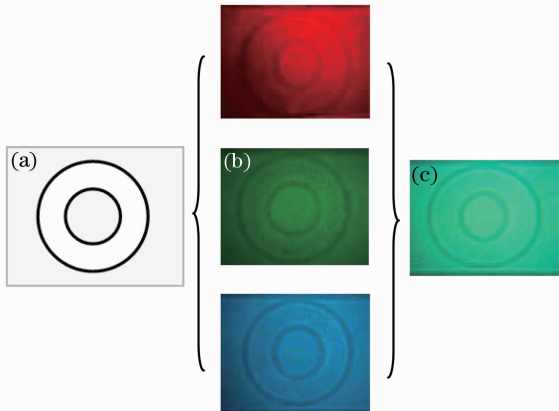


图 6 彩色全息显示。(a) 入射图像;(b) RGB 图像分量;  
(c) 合成的彩色图像

Fig. 6 Color holographic display. (a) Incident image;  
(b) RGB components; (c) combined color image

## 5 结 论

针对三维立体显示发展需要,研究了全息动态显示,介绍了获得的实时动态全息视频显示结果。证实了研究所采用的超快液晶薄膜全息响应在毫秒量级,并在此液晶薄膜中获得了全息图建立和擦除

时间最快达到 1 ms 的实验结果;获得了红绿蓝三色实时动态全息显示视频,这一结果证实此液晶薄膜中可实现多色全息再现,为 RGB 模式彩色全息显示奠定了基础;给出了彩色全息显示实验结果,彩色全息显示是基于全息复用技术并利用 RGB 模式实现的。全息复用技术在此薄膜中的成功运用证明其实现高清晰和大尺度全息三维视频显示的可行性。研究所用的全息显示液晶薄膜成本低廉、制作工艺相对简单,而且易于制成大尺寸全息显示屏,所以此材料有望应用于高清晰、大尺寸、彩色、实时动态全息视频显示领域。

## 参 考 文 献

- 1 Tao Shiquan, Jiang Zhuqing, Wan Yuhong, *et al.*. Optical Volume Holographic Technology and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- 2 陶世荃,江竹青,万玉红,等. 光学体全息技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- 3 Benton S A, Bove V M. Holographic Imaging[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2008.
- 4 Zheng Huadong, Dai Linmao, Yu Yingjie. Three-dimensional imaging based on orthogonal-stacked lenticular screens and computer holography [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37 (s1): 213-218.

- 郑华东, 代林茂, 于瀛洁. 基于正交柱透镜光栅的计算全息三维成像[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 213-218.
- 4 Sang Xinzhu, Yu Chongxiu, Wang Xu, *et al.*. Novel applications of holography in optical communication devices [J]. Applied Laser, 2004, 24(1): 37-40.
- 桑新柱, 余重秀, 王旭, 等. 全息技术在光通信器件中的新应用[J]. 应用激光, 2004, 24(1): 37-40.
- 5 Poon T-C. Digital Holography and Three-Dimensional Display [M]. Berlin: Springer, 2006.
- 6 Zhao Xing, Wang Fang, Yang Yong, *et al.*. Research progress of display performance of integral imaging three-dimensional display system[J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2012, 5(3): 209-221.
- 赵星, 王芳, 杨勇, 等. 集成成像三维显示系统显示性能的研究进展[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 209-221.
- 7 Li Jianhua, Cao Liangcai, Tan Xiaodi, *et al.*. Transmission type of collinear volume holographic storage technology based on LiNbO<sub>3</sub> crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0409001.
- 李建华, 曹良才, 谭小地, 等. 基于 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的透射式共光轴体全息存储技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0409001.
- 8 Xu Zhennan, Zhong Jingang. Self-calibration phase-shifting digital holographic microscopy based on carrier frequency analysis [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1209001.
- 徐振南, 钟金钢. 基于载频条纹分析的自定标相移数字全息显微术[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1209001.
- 9 Li Mengyang, Li Dahai, Wang Qionghua, *et al.*. Wavefront reconstruction with orthonormal polynomials in a square area[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1108011.
- 李萌阳, 李大海, 王琼华, 等. 用方形区域内的标准正交多项式重构波前[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108011.
- 10 Jia Jia, Wang Yongtian, Liu Juan, *et al.*. Progress of dynamic 3D display of the computer-generated hologram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050002.
- 贾甲, 王涌天, 刘娟, 等. 计算全息三维实时显示的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050002.
- 11 Sun Guodong, Zheng Huadong, Yu Yingjie. Full-parallax stereogram generation and display using orthogonal-stacked lenticular screens [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s111010.
- 孙国栋, 郑华东, 于瀛洁. 全视差立体图合成与正交柱透镜光栅成像[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s111010.
- 12 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu, *et al.*. Analysis of some fundamental issue about digital hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 465-471.
- 钟丽云, 张以谟, 吕晓旭, 等. 数字全息中的一些基本问题分析[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 465-471.
- 13 Gao Hongyue, Gu Kaiyu, Zhou Zhongxiang, *et al.*. Diffraction behavior of an azo-dye-doped nematic liquid crystal without applied electric field[J]. Current Applied Physics, 2008, 8(1): 31-35.
- 14 Gao Hongyue, Jiang Yongyuan, Zhou Zhongxiang, *et al.*. The dependence of orientational optical nonlinearity in dye-doped liquid-crystal films on the polarization direction of the recording beams[J]. IEEE J Quantum Electron, 2006, 42(7): 651-656.
- 15 Gao Hongyue, Zhou Zhongxiang. Study on holographic image storage and reconstruction in azo-dye-doped liquid-crystal films [C]. SPIE, 2007, 6595: 65950W.
- 16 Gao Hongyue, Liu Jianhua, Gan Fuxi, *et al.*. Investigation of multiple holographic recording in azo-dye-doped nematic liquid-crystal film[J]. Appl Opt, 2009, 48(16): 3014-3018.
- 17 P-A Blanche, A Bablumian, R Voorakaranam, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468(7320): 80-83.
- 18 K Kinashi, Yu Wang, Sho Tsujimura, *et al.*. Dynamic holographic images using photorefractive composites[C]. Miami: Topical Meeting on Biomedical Optics and 3D Imaging, 2012. JM3A. 58.
- 19 D E Smalley, Q Y J Smithwick, V M Bove, *et al.*. Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays[J]. Nature, 2013, 498(7454): 313-317.
- 20 H Gao, X Li, Z He, *et al.*. Real-time dynamic holographic display based on a liquid crystal thin film [J]. Society for information Display Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 4: 804-807.
- 21 H Gao, X Li, Z He, *et al.*. Multiplexed holographic display based on a fast response liquid crystal film[C]. Miami: Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, 2012. DM2C. 44.
- 22 H Gao, X Li, Z He, *et al.*. Real-time holographic display based on a super fast response thin film[J]. J Physics: Conf Ser, 2013, 415(1): 012052.
- 23 Gao Hongyue, Liu Jicheng, Poon Ting-Chung. True color holographic display based on a super fast response liquid crystal film[C]. Kohala Coast: Int Conf Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, 2013. DTh2A. 1.