

文章编号: 0258-7025(2007)12-1665-05

一种基于散斑结构的全息显示屏

周 雷, 吴智华, 浦东林, 申 溯, 周小红, 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 提出一种全息平面显示屏的设计和制作方法。显示屏由全息像素单元组成, 每一个像素单元都基于散斑的像面全息结构, 其中基元光栅起到调制入射光并定向衍射成像的作用。分析了显示屏的视场特性, 数值模拟了记录参考光不同入射角度和起限制垂直方向视场作用的狭缝的宽度对再现散斑像的影响。制作出幅面大小为 $600\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ (约 $40''$), 厚度为 1.5 mm 的普通投影全息显示屏, 给出相应的制作流程和制作参数。结果表明, 全息显示屏具有高亮度和消色散的优点, 浮雕型结构便于进行大幅面的快速微纳米压印复制, 使得所提出的显示屏具有低成本的工艺优势。

关键词 全息; 全息显示屏; 散斑场; 像面全息; 数字再现

中图分类号 O 438.1 **文献标识码** A

A Holographic Display Screen Based on Laser Speckle Structure

ZHOU Lei, WU Zhi-hua, PU Dong-lin, SHEN Su, ZHOU Xiao-hong, CHEN Lin-sen

(Institute of Information Optical Engineering, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract A method of designing and fabricating display screen based on the planar holography is proposed. The holographic screen is composed of many pixels, and every pixel is produced by the speckle image holography. The input illumination is diffracted by the gratings in each pixel and directionally diffracted to reconstruct image observed on the holographic plane. The reconstructed speckle image, which is influenced by both incident angle of reference beam and the width of slot, is demonstrated by numerical simulation. A holographic projection screen sample with a size of $600\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ (about 40 inch diagonal) and thickness of 1.5 mm is fabricated. The corresponding fabrication details are given. The proposed holographic screen has the advantages of high brightness and achromatism. Furthermore, the surface-relief micro-structure can be manufactured by the nano-imprint technology efficiently and cost-effectively.

Key words holography; holographic display screen; speckle field; image plane hologram; numerical reconstruction

1 引 言

全息术自提出后, 在显示、干涉计量、光存储、光学防伪等领域得到了广泛的应用^[1~5]。在全息显示领域中, 全息显示屏是一个重要的应用方向。最近几年国际上有关全息二维(2D)、三维(3D)显示系统的研究引起人们普遍关注^[6~8]。相对于其他类型的显示屏, 全息显示屏的突出优点是可在空间某个特定区域内成像, 有效提高投影系统的能量利用率, 因此被认为是最有可能实现立体投影显示的技术之一。

本文提出了一种基于散斑像面全息技术的二维全息显示屏的制作方法。首先介绍了该全息显示屏的制作光路, 分析了其再现时的色散及视场特性, 数值模拟了记录参考光不同入射角度和狭缝不同宽度时对再现散斑像的影响。最后设计制作了用于普通投影显示的全息显示屏。

2 制作光路及色散与视场特性

显示屏的制作系统如图 1 所示。激光束从激光

收稿日期: 2007-04-10; 收到修改稿日期: 2007-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(10474070)资助项目。

作者简介: 周 雷(1980—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事光信息处理及器件方面的研究。E-mail: zhzhlei@gmail.com

导师简介: 陈林森(1961—), 男, 江苏人, 博士生导师, 主要从事光信息器件与微纳米结构制造方面的研究。

E-mail: lschen@e172.com; lschen@suda.edu.cn

器出射后,经过分束器(BS)分为两路,一路通过准直透镜 $L1$,毛玻璃 GG 后形成散斑物光,再经过透镜组 $L3$ 后将散斑成像于记录光刻胶板 H 上;另一路经滤波器 3 和准直透镜 $L2$ 后变为平行光,再经过光阑 $D1$ 后作为参考光。物光和参考光汇聚于记录光刻胶版 H 上曝光。光刻胶版装载在二维平台上,由计算机(PC)控制二维平台和光电快门,使光电快门的关闭和二维平台的微位移相匹配,从而在光刻胶版 H 上均匀记录散斑的像面全息点阵,如图 1 插图所示,点阵微结构单元为正方形。由全息原理可知,一幅全息图可以看成是很多基元全息图的叠加,具有复杂的光栅结构,再现时用与记录参考光相同方向的光波照明全息图时,色模糊量^[9]

$$|\Delta I_\lambda| = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} z_i \sin\theta_R, \quad (1)$$

式中 θ_R 为参考光与 x 轴的夹角, λ_0 为再现时的波长, z_i 为再现像至全息图的距离。当 $z_i \rightarrow 0$ 时,色模糊量也趋近于零, $z_i \rightarrow 0$ 意味着 $z_0 \rightarrow 0$, 即记录全息图时物体的实像位于记录介质上,对再现物光波长的线宽在理论上就可以不加限制。

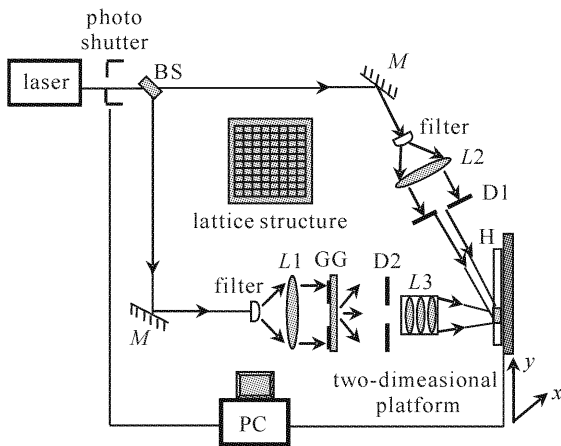


图 1 散斑像面全息点阵系统光路

Fig. 1 Experimental setup for the recording speckle image plane holography

图 1 中平行激光束照射毛玻璃 GG , 产生激光散斑,散斑经透镜组成像后,在像面(光刻胶版 H) 上形成随机的亮暗散斑分布(主观散斑)。散斑光场与参考光光场干涉后在光刻胶版 H 上记录下散斑的像面全息图。点阵单元内的基元光栅起到调制入射光衍射方向的作用,使衍射光线集中在有效视场内。图 1 中的 x 和 y 方向视场由记录条件决定, x 方向视场角示意图如图 2 所示, L 为系统光路中成像透镜组 $L3$ 的理想情况,有效通光口径为 D ,光刻胶版 H 距透镜组的距离为 z_i ,光刻胶版的高度为 d ,参

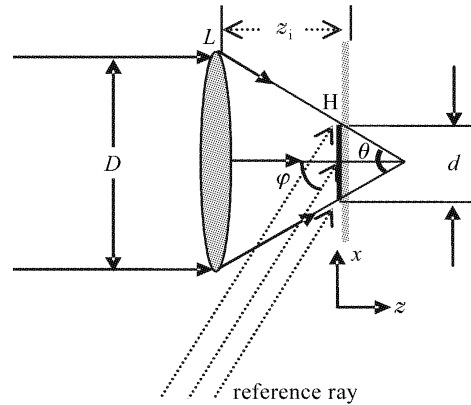


图 2 x 方向视场角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of x -axis direction view angle

考光以入射角 φ 记录。若用原平行光照明再现,则 x 方向视场角 θ 为

$$\tan(\theta/2) = (D - d)/2z_i. \quad (2)$$

y 方向视场也由记录条件决定,坐标平面为 yz 平面,光阑 $D2$ 为视场光阑,它的线宽限制了观察散斑像面全息图的 y 方向视场角 θ_1

$$\tan(\theta_1/2) = (D_2 - d)/2z_i, \quad (3)$$

式中 D_2 为光栅 $D2$ 的通光口径。在实际观察中,有效的 y 方向视场是一定的。线宽太大,使全息图再现不能有效限制 y 方向视场;线宽过小,一方面可能造成散斑物光光强较弱,另一方面由于狭缝的低通特性,会造成物面 y 方向高频分量的丢失,导致散斑再现像失真。同时 $D2$ 的线宽影响了主观散斑的颗粒尺寸,散斑的大小是两个相邻亮斑间距离的统计平均值。对于主观散斑,当表面颗粒无规律分布,且颗粒高度比光的波长大,散射波彼此间振幅和相位是统计无关时,散斑场的平均光强起伏为^[10]

$$\Delta E^2 = \sqrt{E^2 - \bar{E}^2} = N, \quad (4)$$

式中 N 为毛玻璃被照射成像在记录光刻胶版上的有效散射颗粒数。这表明参加散射的有效颗粒越多,则散斑越明显,可以在 y 方向视场不变的情况下,通过调整毛玻璃的粗糙度来增加成像有效颗粒数。

3 计算分析

在制作光路中,如果狭缝 $D2$ 宽度远大于散斑颗粒直径时,狭缝将主要起到限制 y 方向视场的作用,视场角由式(3)确定。在某些特殊的应用场合,可能需将再现像限制于较小的视场中,过窄的狭缝 $D2$ 宽度将会影响散斑再现像质,导致投影再现像的像质下降乃至失真。

在如图 1 所示的实验光路中,狭缝 D2 紧靠成像透镜组 L3,因此可将成像透镜组 L3 视作被狭缝

在 y 方向限制的衍射受限成像系统。对衍射受限成像系统,点物的响应函数为

$$h(x_2, y_2; x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda^2 d_1 d_2} \exp\left[i \frac{k}{2} \left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{d_1} + \frac{x_2^2 + y_2^2}{d_2} \right)\right] \times \iint_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \exp\left[-i2\pi \left(\frac{x_2 - Mx_1}{M} x + \frac{y_2 - My_1}{M} y \right)\right] dx dy, \quad (5)$$

式中 $M = -d_2/d_1$, d_1, d_2 分别指出瞳到像面和物面到入瞳的距离, $k = 2\pi/\lambda$, $P(x, y)$ 为光阑函数, (x_1, y_1) 为物平面坐标, (x_2, y_2) 为像平面坐标。像平面上光场的复振幅分布可以用叠加积分表示为

$$O(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x_1, y_1) h(x_2, y_2; x_1, y_1) dx_1 dy_1. \quad (6)$$

记录全息图时,设参考光为 $R(x_2, y_2) = R_0 \exp(i2\pi x_2 \frac{\sin\theta_H}{\lambda})$, θ_H 为参考光与记录全息面法向之间的夹角。再现全息图时,用描述照明光的数学表达式和全息图相乘,获得再现像的光场强度分布。由分析可得,理论上像面全息中再现像应与全息图重合。若用记录参考光对全息图进行照明再现,再现光波的基本表达式为^[11]

$$U(x_2, y_2) = R(x_2, y_2) |O(x_2, y_2)|^2 + R(x_2, y_2) |R(x_2, y_2)|^2 + |R(x_2, y_2)|^2 O(x_2, y_2) + R(x_2, y_2) R(x_2, y_2) O^*(x_2, y_2), \quad (7)$$

式中 $*$ 为复共轭符号,第 1 项和第 2 项为直透像项,第 3 项为 $O(x_2)$ 的实像项,第 4 项为虚像项。如果对(7)式进行傅里叶变换,经过合适的滤波函数,可留下再现实像频谱,再做逆傅里叶变换,可得到再现实像,即(7)式中的第三项。

为了研究固定狭缝宽度和不同参考入射角时物面(毛玻璃)的再现情况,以黑屏上的透明方孔替代毛玻璃作为物面进行分析。图 3 是参考光不同入射角时记录面上的归一化透射系数频谱(绝对值),其中方孔边长 2 mm,狭缝 D2 宽度取为 176.4 μm ,0 级为直接透射空间频谱,+1 级为共轭虚像空间频谱,-1 级为再现实像透射空间频谱。图中左侧虚框为物体(方孔),右侧虚框内为 -1 级再现实像强度。当参考光以 10° 入射时,0 级与 +1 级,-1 级空间频谱产生干扰,-1 级再现实像中有记录面的自相关像的杂光。而当参考光以 30° 入射时,0 级与 -1 级空间频谱相距较远,能够得到较好的物面再现像。

图 4 为狭缝 D2 不同宽度时频谱透射系数的绝

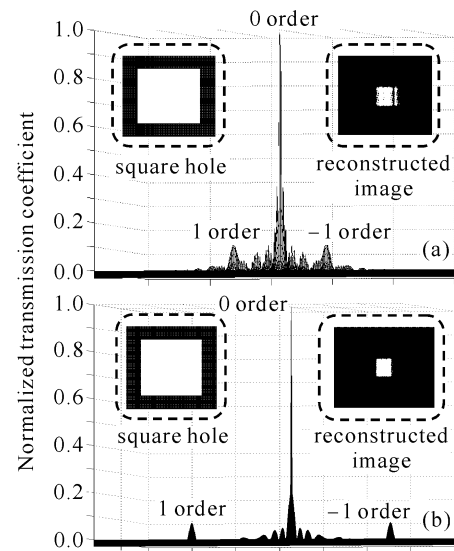


图 3 参考光 10° (a)和 30° (b)入射角时记录面上的归一化透射系数频谱(绝对值)

Fig. 3 Normalized transmission coefficient at 10° (a) and 30° (b) incident angle of reference light

对值和物面再现实像(虚框中)强度。当狭缝宽度分别为 88.2 μm , 136.2 μm 时,物体发出的部分空间频谱分量被狭缝滤波,导致物面再现像的失真,但 0 级与 -1 级衍射级次有较大的分隔。当狭缝宽度增大到 220.5 μm 时,物面再现像质量较好,但由于 0 级与 -1 级出现重合,再现物面衬比度下降。

以上的讨论对于物面是毛玻璃的情况可做类似推理。散斑的再现像质影响最终投影显示时衍射观察光场的均匀性。实际制作时可以使物光和参考光的夹角在 30° 左右并根据视场需要来确定狭缝 D2 的宽度。

4 设计实例和结果验证

本文制作了基于激光散斑的全息投影显示屏。采取如图 1 所示的记录光路,调整毛玻璃的通光方孔的大小和光阑 D1 的大小使散斑点阵单元大小为 $1.1 \mu\text{m} \times 1.1 \mu\text{m}$;记录波长为 $\lambda = 0.441 \mu\text{m}$ (He-

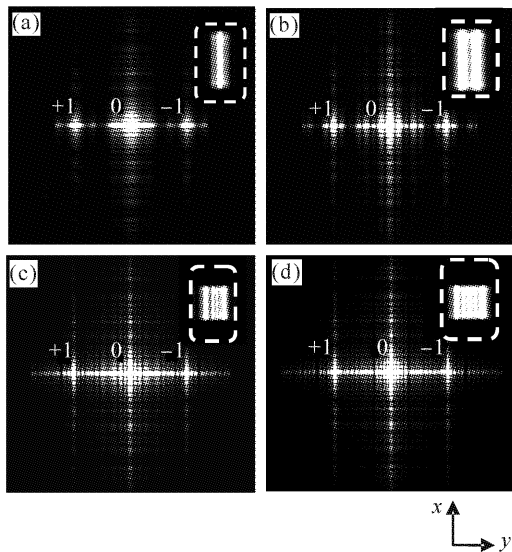


图4 狭缝 D2 不同宽度时像面上透射系数的空间频谱及再现像强度

狭缝宽度分别为(a) 88.2 μm ; (b) 132.6 μm ;
(c) 176.8 μm ; (d) 220.5 μm

Fig.4 Spatial frequency spectra of transmission coefficients and reconstructed images intensity on the image surface when width of slit D2 is different
(a) 88.2 μm ; (b) 132.6 μm ; (c) 176.8 μm ; (d) 220.5 μm

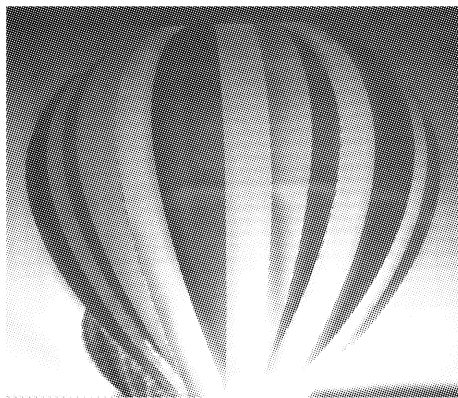


图5 投影衍射效果图

Fig.5 Diffraction image of projection

Cd),物光和参考光间夹角为 30° ; 实验中镜头焦距为 $f=50\text{ mm}$, 像距 $z_i=58.98\text{ mm}$, 通光口径 $D=40\text{ mm}$, 水平方向视场角由式(2)得 36.5° ; 光阑 D2 的线宽为 $D_2=30\text{ mm}$, 垂直方向视场角由式(3)得 27.5° ; 光刻胶板 H 的胶层厚 $0.953\ \mu\text{m}$; 点阵每个单元曝光 $t_1=2.5\text{ s}$; 考虑到静台, 点阵单元间曝光停顿 $t_2=2\text{ s}$; 显影液 (NaOH) 体积分数为 1.3% ; 显影时间为 9 s ; 经电铸、拼版、模压后做成幅面大小为 $600\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ (约 $40''$) 的全息显示屏, 该器件的材料为聚碳酸酯 (PC: Polycarbonate), 厚度为 1.5 mm , 物理拼缝小于 0.1 mm 。用该显示屏作投

影衍射试验, 当投影光线与屏幕法线夹角为 30° , 满足再现条件时, 投影衍射效果如图 5 所示, 其色彩还原逼真, 定向衍射成像效果明显, 且屏幕呈半透明状。

5 结 论

提出了一种全息平面显示屏的设计和制作方法, 并且制作出了具有浮雕型结构的全息显示屏。显示屏的全息像素单元基于散斑的像面全息结构, 其中基元光栅起到调制投影入射光并定向衍射的作用。数值模拟表明当狭缝宽度接近散斑尺寸时, 虽能有效压缩视场, 但会导致再现散斑像质下降乃至失真。设计的浮雕型结构便于进行大幅面的快速微纳米压印复制, 在制作上具有低成本的工艺优势。当显示屏用作投影显示时, 由于环境光不满足全息再现条件, 只有满足条件的投影光可以成像, 因而在明亮环境中也可以获得较好的投影定向显示效果。

参 考 文 献

- Zhang Xiaojie, Liu Xu, Li Sha. Reconstruction of no-slit computer-generated hologram with white-light illumination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1393~1396
张晓洁, 刘旭, 李莎. 无狭缝计算全息图的白光再现[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1393~1396
- Liang Zhongcheng, Chen Jiasheng, Yang Tao *et al.*. Principles and experiments of the waveguide multilayer optical memory [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(3):315~317
梁忠诚, 陈家胜, 杨涛等. 新型波导多层光存储原理和实验[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(3):315~317
- Chen Linsen, Xie Jianfeng, Lu Zhiwei *et al.*. Fabrication of a diffractive image lithographic system for optical storage [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3):392~395
陈林森, 解剑峰, 陆志伟等. 具有存储功能的衍射图像光刻系统的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3):392~395
- Wang Yang, Yu Jia, Liu Huiping *et al.*. Application and foreground of the digital technology on holography [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(4):13~15
王杨, 于佳, 刘惠萍等. 数字技术在光学全息领域的应用与前景展望[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(4):13~15
- Cao Hanqiang, Zhu Guangxi, Zhu Yaoting *et al.*. Study on protection methods in laser holography anti-counterfeiting techniques [J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(5):289~292
曹汉强, 朱光喜, 朱耀庭等. 激光全息防伪技术中的安全保护方法研究[J]. *激光技术*, 2000, **24**(5):289~292
- H. H. Song, T. Shibuya, T. Honda. Development of hybrid hologram screen for large auto-stereoscopic display [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2002, **30**(12):737~741 (in Japanese)
- H. John Caulfield. Designing the "perfect" projection screen [J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, **37**(5):345~347
- N. M. Ganzherli, Y. N. Denisyuk, I. A. Maure *et al.*. Holographic and speckle screens for image projection [J]. *Journal of Optical Technology*, 2005, **72**(5):406~409
- Yu Meiwen. *Optical Holography and Its Applications* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 12~18, 134~138

- 于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 12~18, 134~138
- 10 Zhang Wenbi, Yang Qimin, Zhong Liyun *et al.*. The application of the narrow laser beam in making hologram [J]. *Laser Journal*, 1999, **20**(4):29
张文碧,杨齐民,钟丽云等. 细激光束在全息照像中的应用[J]. 激光杂志, 1999, **20**(4):29
- 11 Lü Qieni, Ge Baozhen, Zhang Yimo. Digital microscopic image plane holography [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(4): 475~478
吕且妮,葛宝臻,张以谟. 数字显微像面全息技术研究[J]. 光子·激光, 2006, **17**(4):475~478