

基于图像叠加的光学图像存储与恢复

尹 坤¹ 陶少华^{1,2}

¹ 中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083
² 中南大学物理与电子学院超微结构与超快过程研究所, 湖南 长沙 410083

摘要 介绍了一种基于光学原理存储和恢复多幅图像的方法。利用不同旋转角和槽型角的闪耀光栅分别对多幅灰度图像进行编码, 将所有被调制图像叠加并存储到一个纯位相光学元件中。将该位相元件的位相分布经计算机输入到空间光调制器(SLM)上, 用于调制入射激光光束。利用透镜对被调制光束进行傅里叶变换, 光阑在频域对衍射光斑进行筛选和过滤, 再通过透镜恢复图像, 由 CCD 记录恢复的图像。实验结果显示本方法可实现 22 幅图像信息的高质量存储和恢复, 且具有图像存储信息量大、操作简便、易于加密等优点。

关键词 图像处理; 图像存储; 空间光调制器; 位相元件; 闪耀光栅; 光学全息

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1205002

Technique Based on Image Superposition for Optical Image Storage and Reconstruction

Yin Shen¹ Tao Shaohua^{1,2}

¹ School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China
² Institute of Super Microstructure and Ultrafast Process, School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

Abstract A technique for image storage and reconstruction based on the superposition of multiple grating-modulated images is experimentally introduced. Blazed gratings with different groove orientations and groove angles are used to superpose many gray-scale images into a single phase element. In the experiment, the phase distribution of the superposed images is loaded onto a spatial light modulator (SLM) with a computer to modulate the incident beam. The laser beam is then Fourier transformed by a convex lens. A pinhole is used to filter the desired diffraction spot of an image in the frequency domain. Another convex lens is used for image reconstruction, and a CCD camera is used to record the reconstructed images. The experimental results demonstrate that 22 gray-scale images can be stored in a phase element and reconstructed with high fidelity. The method has advantages such as high-volume data storage, easy implementation, high security, and so on.

Key words image processing; image storage; spatial light modulator; phase element; blazed grating; optical holography

OCIS codes 050.1950; 070.2615; 090.1970; 090.1995; 090.4220

1 引 言

随着信息社会的飞速发展, 人们对快速、大容量信息存储的需要越来越迫切, 而图像作为最常见的信息存储方式, 对其进行存储和处理的要求也变得

更高。不同于传统的图像存储方式, 光学全息图可以对物体的复振幅进行存储, 然而常见的光学全息方法最多只能存储和重构几幅图像, 存储能力较为有限^[1-4]。Mosso 等^[5]在加密影片理论中提出利用

收稿日期: 2013-06-14; **收到修改稿日期:** 2013-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61178017)、湖南省自然科学基金重点项目(11JJ2039)

作者简介: 尹 坤(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学图像存储及恢复方面的研究。E-mail: yinshen19@163.com

导师简介: 陶少华(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: eshtao@csu.edu.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

正弦光栅调制的方式将 22 帧图像加密存储到单一全息图中的方法,但是该方法图像存储能力有限且没有得到实验验证。体全息技术以其能够存储近千幅图像的大存储量特点得到了较快的发展^[6-7],然而信息的存储和记录依赖特殊材料,且全息图的重构总伴随着其他级次衍射图样的串扰,降低了衍射效率,并且该类方法在实验上难以操作。基于此,本课题组曾提出一种利用闪耀光栅调制并叠加图像以实现多达数百幅图像的存储和恢复的方法^[8],该方法能够将多幅图像存储到一个衍射光学元件中,具有存储量大、衍射效率高、不受存储材料制约、操作简便且易于加密/解密等优点。

本文利用液晶空间光调制器(SLM)实验验证基于闪耀光栅调制的多幅图像存储、过滤及恢复的方法的可行性,并从理论和实验上证实了多幅叠加图像的信息可以仅用单个纯位相元件进行存储。虽然实验上闪耀光栅也曾被用于调制图像,但主要用

于图像位置的调制和提高单个衍射像的衍射效率^[9-10]。由于位相全息图只对光波的位相进行调制,因而具有较高的衍射效率^[11]。利用闪耀光栅的衍射特性对图像进行位相调制,在提高衍射效率的同时还避免了孪生衍射光斑的产生,使每一幅图像的频谱分量信息只包含在一个衍射光斑内^[12]。

在实验中,以 $4f$ 光学图像处理体系为基础,利用闪耀光栅对多幅图像进行调制并存储至单一的位相元件,同时应用激光器、SLM、透镜及其他光学元件搭建光路以实现图像的过滤和恢复,最后应用 CCD 对恢复的图像进行记录,以验证该方法的可行性与实际应用效果。

2 实验原理及方法

实验体系基于一个 $4f$ 光学图像处理系统,如图 1 所示。

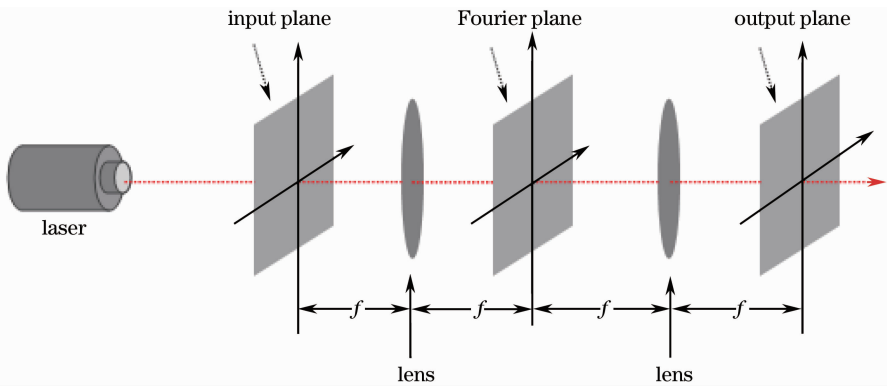


图 1 光学图像 $4f$ 处理系统结构图

Fig. 1 Configuration of the $4f$ optical image processing system

由计算机直接读取图像或从视频中提取图像帧并将其转换成灰度图,然后将灰度图的灰度值与相应的闪耀光栅的位相相乘,之后将所有经光栅位相调制的图像进行叠加,叠加的结果存储于一个同尺寸大小的衍射光学元件。将衍射光学元件置于 $4f$ 系统的输入平面,当其被一束准直平面激光光束照射时,将在第一个透镜的焦平面聚焦。特殊设计的空间滤波器被放置在频谱面用来选择性地过滤相应图像的频谱分量。当每幅图像的频谱分量分别通过各自的空间滤波器被滤出后,接着经第二个透镜作傅里叶变换,在第二个透镜的焦平面将会获得再现的图像信息。闪耀光栅的传输函数可以表示为^[8]

$$g_v(x, y) = \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \tan \theta \cdot x\right), \quad (1)$$

式中 λ 表示照射光的波长, θ 表示光栅的槽型角, x 表示入射光在光栅上的水平变量。用于调制一幅输

入图像的第 i 个光栅表达式为

$$g_i(x, y) = F_{\text{imr}}[g_v(x, y)]_\gamma, \quad (2)$$

式中 $F_{\text{imr}}(\cdot)_\gamma$ 表示整个光栅逆时针旋转角度 γ 的函数。由于光栅和图像具有相同的像素尺寸,可以将所有的调制图像叠加到一个衍射光学元件中。设第 i 个输入图像 $f_i(x, y)$ 由第 i 个衍射光栅 g_i 进行调制,则输入图像的调制和叠加表达为

$$m(x, y) = \sum_{i=1}^N f_i(x, y) \cdot g_i(x, y) = A(x, y) \exp[j\phi(x, y)], \quad (3)$$

式中 $A(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$ 分别表示叠加后图像的振幅信息和位相信息。变换(3)式可得

$$\exp[j\phi(x, y)] = \frac{\sum_{i=1}^N f_i(x, y) \cdot g_i(x, y)}{A(x, y)}. \quad (4)$$

由(4)式可知,如果叠加图像的振幅信息是近似均匀

分布的,将其赋值为 1,这样,位相信息 $\exp[j\phi(x, y)]$ 就能表示整个叠加图像 $m(x, y)$ 的信息。对于叠加图像的位相信息 $\exp[j\phi(x, y)]$,可以实现光学加密和解密^[13-14],无需对所有的单个输入图像进行逐一加密和解密,在简化操作的同时保障了其安全性。将叠加图像的位相信息 $\exp[j\phi(x, y)]$ 置于透镜的焦平面,则叠加图像的频谱为

$$M(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{\exp[j\phi(x, y)]\}, \quad (5)$$

式中 f_x 和 f_y 表示频域坐标, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。叠加图像的频谱 $M(f_x, f_y)$ 包含有许多衍射光斑,这些衍射光斑对应着被调制的图像。通过调制光栅槽型角和闪耀角的角度,可以在傅里叶平面不同半径

圆的不同位置对衍射光斑进行排布,在空间上分开排布的衍射光斑就可以通过光阑逐一滤出。将过滤的衍射光斑经透镜进行逆傅里叶变换得到恢复的图像为

$$m'_i(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[M(f_x, f_y) \cdot S_i(f_x, f_y)], \quad (6)$$

式中 \mathcal{F}^{-1} 表示逆傅里叶变换, $S_i(f_x, f_y)$ 表示第 i 个空间滤波器, $m'_i(x, y)$ 表示第 i 幅恢复图像。

3 实验及结果

为了验证上述理论分析的正确性和可行性,搭建了如图 2 所示的光学图像存储及恢复的实验系统。

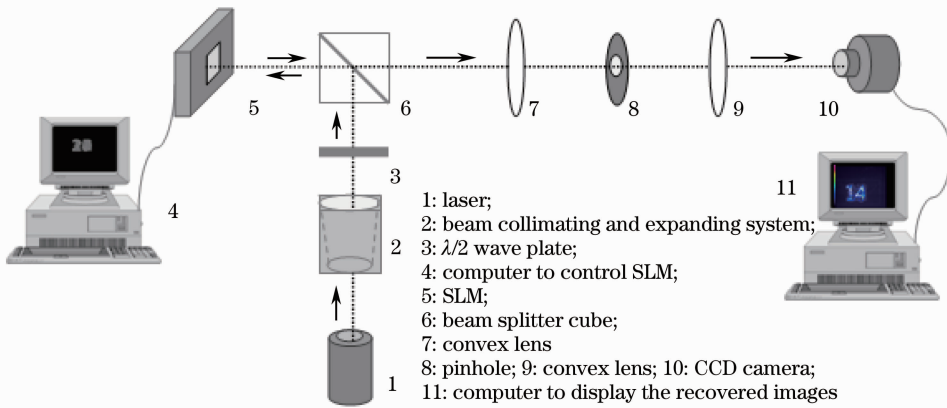


图 2 光学系统示意图

Fig. 2 Schematic of the optical setup for the proposed method

实验中使用的 SLM 为 BNS 公司生产的型号为 XY phase series SLM 的纯位相空间光调制器。激光器发射激光波长为 532 nm,由激光器发出的激光,经扩束准直系统扩束后再经 $\lambda/2$ 波片和分光镜,使偏振光按指定的偏振方向入射到 SLM。将用于存储图像叠加信息的位相分布经计算机输入到 SLM 上,经激光照射后,SLM 上的位相信息加载到激光束上。调制后的激光光束经分光镜后,由透镜进行傅里叶变换,光阑在频域对衍射光斑进行筛选和过滤。最后通过透镜进行逆傅里叶变换以恢复图像,CCD 进行图像采集,并由计算机显示。实验装置图如图 3 所示,其中箭头表示激光传播的方向。

首先进行多幅图像的存储。原始图像如图 4 所示,使用 Matlab 程序将内容为数字 10~31 的 22 幅图像设置为 256 灰阶,且图像像素大小为 512 pixel \times 512 pixel。同样,将闪耀光栅的像素大小也设为 512 pixel \times 512 pixel,使用槽角为 14.57°且初始槽线方向垂直的闪耀光栅对第一幅输入图像进行调制。保持槽角不变的同时对闪耀光栅每 36°进行一次整

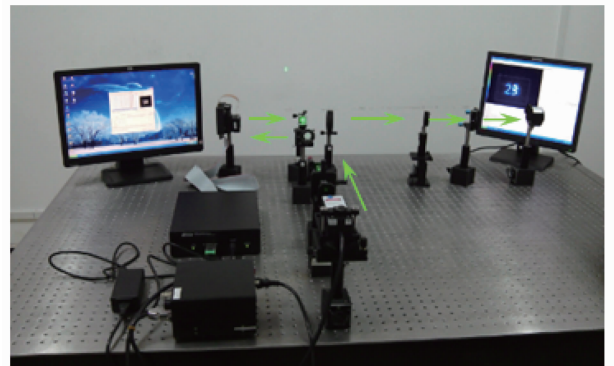


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

体逆时针旋转,每旋转一次便对一幅新的输入图像进行调制,这样经过 360°的旋转,10 幅图像便完成调制,同时在频域上会得到分布在半径为 130 pixel 圆周上的一圈衍射光斑。然后,将光栅的槽角增加到 20.81°,槽向仍为垂直,按照之前的方式每 30°进行一次逆时针旋转,这样经过 360°的旋转,12 幅图像便完成调制,在频域上,衍射光斑会分布在半径为 190 pixel 的圆周上。在完成了对全部 22 幅图像的

调制后,将全部被调制图像叠加,叠加图像的像素大小仍为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。图 5(a)、(b)所示分别为叠加图像的振幅和位相信息,其中图 5(a)的灰度值范围为 $0 \sim 255$,对应振幅值的范围为 $0 \sim 1$;图 5(b)的灰度值范围为 $0 \sim 255$,对应位相大小的范围为 $0 \sim 2\pi$ 。经计算机仿真得到的频域衍射光斑分布如图 6 所示。

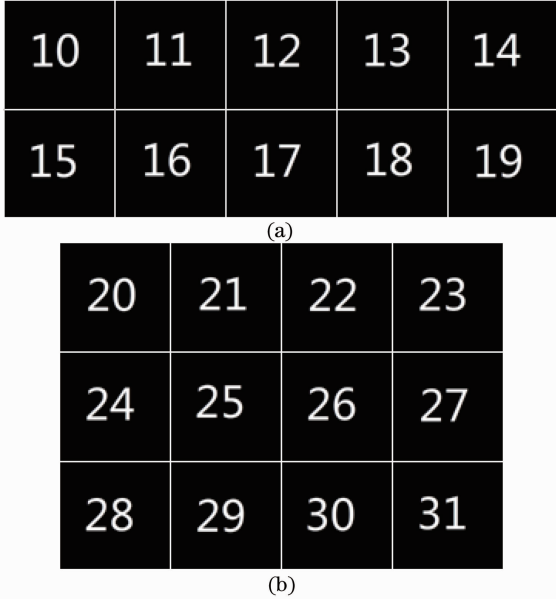


图 4 用于被槽角为(a) 14.57° 和(b) 20.81° 的闪耀光栅调制的原始图像
Fig. 4 Input images to be modulated by the blazed gratings with groove angles of (a) 14.57° and (b) 20.81° , respectively

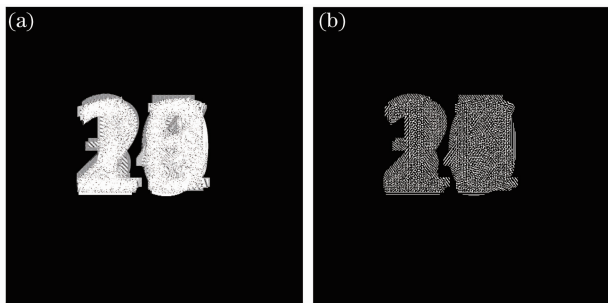


图 5 叠加图像的(a)振幅和(b)位相信息
Fig. 5 Informations of (a) amplitude and (b) phase of the superposed images

将叠加图像的位相信息经计算机输入至 SLM,激光器发出的激光经扩束准直系统和 $\lambda/2$ 波片照射到分光镜后反射至 SLM 上。其中,扩束准直系统由 25 倍显微物镜、直径为 $100 \mu\text{m}$ 的针孔和焦距为 15 cm 的准直透镜等组成。SLM 上的位相信息加载在激光上后,经分光镜,由焦距为 25 cm 的透镜对其进行傅里叶变换,叠加图像的衍射光斑被 CCD 采

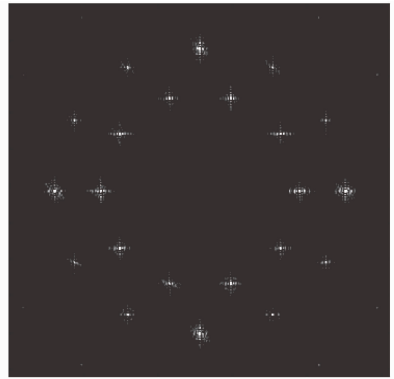


图 6 频域衍射光斑分布
Fig. 6 Distribution of diffraction spots in the frequency domain

集,如图 7 所示。图像左侧颜色条中不同的颜色对应着不同的光强度值。从图 7 中可以看到两圈共 22 个衍射光斑,每个衍射光斑均包含有不同图像的频谱信息。实验中用不透光的盖玻片对中心亮斑进行遮挡处理,避免影响对周围亮斑的观察。

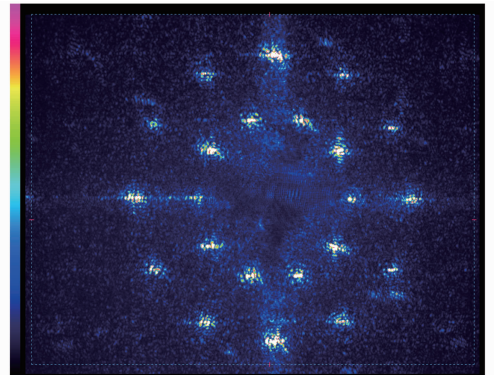


图 7 叠加图像的衍射光斑
Fig. 7 Diffraction spots of the superposed images

在第一个透镜(焦距为 25 cm)的焦平面上使用光阑对频谱域上的衍射光斑进行逐一过滤,以滤出相应图像的频谱分量。调整光阑半径至 0.3 mm 以使单个光斑被滤过。CCD 采集到的滤过的光斑如图 8 所示,可以看到包含有其他图像频谱分量的光斑均被滤除,从而避免了串扰。

将过滤出的图像频谱分量经第二个透镜(焦距为 15 cm)进行逆傅里叶变换,在透镜的焦平面由 CCD 采集恢复图像。图 9 为过滤恢复出的全部图像,蓝色代表了其某一强度,CCD 具有自带软件,其图像显示根据光强度来标度图像的颜色。

从图 9 中可以清楚地看到 22 幅图像均得到了恢复。恢复的图像虽然有部分失真,但图像内容可以识别,实验达到了图像恢复与识别的目的。图像的失真主要来源于:实验中图像在衍射光学元件中

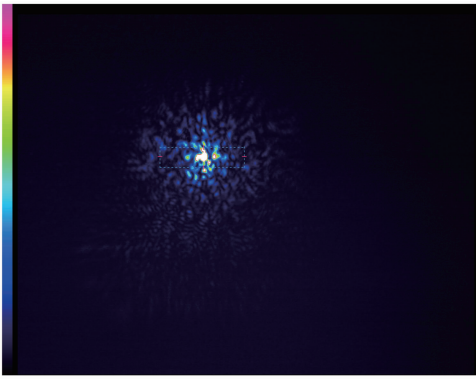
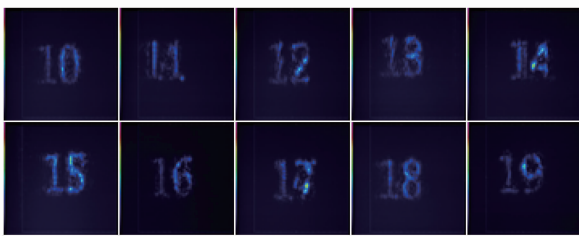


图 8 由光阑过滤的单一衍射光斑

Fig. 8 Single diffraction spot filtered by the pinhole



(a)



(b)

图 9 (a)内圈和(b)外圈所恢复的图像

Fig. 9 (a) Inner and (b) outer circles of the recovered images

的叠加是近似均匀的,且叠加图像越多光强分布越均匀,而在实验过程中只采用了 22 幅图像作为示例来验证所提出方法的可行性,这样在实验时采用纯位相元件会造成部分失真,随着叠加图像数量的增加,其振幅信息会更加均匀,从而减小失真度;在对频域衍射光斑进行过滤时需要用到光阑,由于光阑孔径的限制会导致部分信息的缺失而造成图像恢复的失真;“17”和“28”中数字“7”和“2”在恢复时部分失真,这是由于在实验操作中光阑位置的偏差会导致在过滤单一衍射光斑时遗失部分信息,同时引入其他光斑的谐波分量,从而对图像恢复质量产生影响。

4 结 论

理论分析及实验验证的结果表明,基于闪耀光栅调制图像进行图像存储和恢复的方法具有较高的图像存储率和恢复率。实验中,22 幅图像均得到恢复且能够被识别。在 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的衍射光学元件中,通过计算机数字仿真可以叠加存储约 200 幅图像,而在实验中,限于实验设备和操作水平,只采用了 22 幅图像作为示例来验证所提出方法的可行性。实验虽然只验证了二值图像的存储和恢复,但其对于 256 色灰度图像仍然适用。对于比较复杂的灰度图像,可以通过提升系统分辨率等方法来提高恢复效果,而对于彩色图像和更为复杂的图像,其存储和恢复有待进一步研究。随着图像数量的增加,衍射光斑分布会更为密集,需要用更小孔径的光阑对衍射光斑进行过滤,必要的时候需要搭建望远系统来扩大频域衍射光斑的间距以利于光斑的过滤,因而在实验操作上会对实验结果造成一定的影响。闪耀光栅的应用有效地避免了孪生衍射光斑的产生,并且提高了衍射效率。衍射光学元件中频域空间的合理布局及在光学实验中光路的合理搭建提高了图像的过滤和恢复质量。利用 SLM 的位相调制性及 CCD 等器件进行图像信息的输入和采集,提高了图像存储及恢复效率,使实验操作简便而快速。

参 考 文 献

- 1 Chung-Sheng Chiang, Min-Tzung Shiu, Wen-Ho Wu. Multiple-hologram recording with one-beam encoding [J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 6897–6904.
 - 2 D Psaltis, M Levene, A Pu. Holographic storage using shift multiplexing [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 782–784.
 - 3 J Ashley, M P Bernal, G W Burr. Holographic data storage technology [J]. *IBM J Res Develop*, 2000, 44(3): 341–368.
 - 4 Jung-Ping Liu. Angle-multiplexed holographic data storage with minimum cross talk noise [J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(2): 229–237.
 - 5 Fabian Mosso, John Fredy Barrera, Myrian Tebaldi. All-optical encrypted movie [J]. *Opt Express*, 2011, 19(6): 5706–5712.
 - 6 Allen Pu, Demetri Psaltis. High-density recording in photopolymer-based holographic three-dimensional disks [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(14): 2389–2398.
 - 7 Hsin-Yu, Sidney Li, Demetri Psaltis. Three-dimensional holographic disks [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(17): 3764–3774.
 - 8 S Yin, S H Tao. Compression and storage of multiple images with modulating blazed gratings [J]. *J Opt*, 2013, 15(7): 075406.
 - 9 Yu Yingjie, Wang Tao, Zheng Huadong. Optimization of optoelectronic reconstruction of phase hologram by use of digital blazed grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3154–3160.
- 于瀛洁,王 涛,郑华东. 基于数字闪耀光栅的位相全息图光电再现优化[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3154–3160.

- 10 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
沈 川, 张 成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
- 11 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 144.
苏显渝, 李继陶. *信息光学*[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 144.
- 12 Cao Dongmei, Xue Linna, Zhu Xiaomin. Diffracted patterns analysis of blazed grating with mathematical software [J]. *J Yanan University (Natural Science Edition)*, 2010, 29(2): 47-49.
曹冬梅, 薛琳娜, 朱晓敏. 闪耀光栅衍射图样分析[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(2): 47-49.
- 13 Xi Sixing, Sun Xin, Liu Bing, *et al.*. New image encryption technology of image based on computer generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040902.
席思星, 孙 欣, 刘 兵, 等. 基于计算全息的双随机相位图像加密技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 040902.
- 14 Qin Yi, Zhang Shuai, Gong Qiong, *et al.*. Virtual optical image encryption based on interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1007001.
秦 怡, 张 帅, 巩 琼, 等. 基于干涉原理的虚拟光学加密系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1007001.

栏目编辑: 史 敏