

文章编号:1004-4213(2010)03-0513-5

参考光波面质量对全息存储质量影响的数值模拟研究*

宋伟,陶世荃,王焕勇

(北京工业大学 应用数理学院,北京 100124)

摘要:采用数值模拟方法研究了不同种类参考光波面质量对再现图像质量的影响.针对全息实验实际情况,对二值图像建立了傅里叶变换全息图记录和读出的物理模型,分别考察采用一般平面波参考光、高斯光束球面波参考光和散斑参考光时的读出图像质量,并以信噪比损失作为衡量图像质量的定量工具.模拟结果表明,在理想平面波参考光和球面波参考光的情形,全息读出图像质量非常好,与输入图像相比信噪比损失在 0.6 dB 以下.但是对于散斑参考光,尽管其极优的位移选择性提供了高密度存储的可能性,但再现图像质量明显变差,信噪比损失在 5 dB 以上,实现有效的数据存储位密度将是十分困难的.为了兼顾存储密度和再现质量,应该考虑优化参考光的途径.

关键词:全息存储;复用技术;散斑

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103903.0513

0 引言

由于全息存储在存储容量和存储密度方面的巨大潜力,全息信息技术一直得到广泛关注.光折变铌酸锂晶体是全息存储的主流材料之一.但是由于它的制备成本高、材料灵敏度低、数据擦除效应等问题,其应用受到制约.近年来,光致聚合物材料成为研究热点,它具有高灵敏度、高衍射效率、低成本、易于制作和不需要后期处理等优点^[1-3].尽管这种膜式记录材料具有一定角度选择特性,但是与其它更厚的全息存储材料相比(如铌酸锂晶体),其角度选择性是比较差的,必须通过提高其存储密度以达到较高的存储总容量^[4].散斑参考光由于可以在光致聚合物材料上进行高密度位移复用存储而受到注意.大量的理论和实验研究表明,散斑位移复用间隔可以到 10 μm ,具有高密度存储的巨大潜力^[5-9],但是这些研究大多聚焦于其位移选择性及由此而带来的高存储密度的潜力,很少涉及再现图像的质量.文献[10]虽然揭示了散斑参考光的高密度位移复用特性,但其显示出的再现图像有明显的噪音.文献[11]在用散斑参考光进行加密的全息存储实验中,发现再现图像质量较差且噪音明显,但是给出的解释是整个光学系统有限的带宽引起的,并未注意参考光质量的影响.

高质量的存储才能读出有效的数据信息,建立在有效信息基础上的高密度存储才能真正体现其存储潜力.参考光的波面质量对全息存储的质量也会

带来重要的影响,有必要进行各种类型参考光对全息记录再现图像质量影响的讨论.

本文建立了不同参考光傅里叶全息图记录和读出的物理模型,利用 MATLAB 软件,通过数值模拟的方法分析各种参考光下再现图像质量.再现图像质量用信噪比损失 Loss of Signal-to-Ratio(LSNR)作为衡量标准,以研究不同波面质量的参考光对全息存储质量的影响.

1 全息记录数值模拟的物理模型

建立全息记录的物理模型,模拟对一幅 128×128 二值图像的记录和读出,如图 1.一束波长为 λ 、单位复振幅的平面光波 S 透过 x_0-y_0 平面受到调制得到携带图像信息的光束 $f(x_0, y_0)$,经过透镜 Lens_1 在后焦面 x_H-y_H 面得到准确的傅里叶变换图样 $F(f_x, f_y)$;此时参考光 R 在此平面与物光束干涉,得到傅里叶变换全息图.再经过透镜 Lens_2 在 x_2-y_2 平面得到再现的物信息.

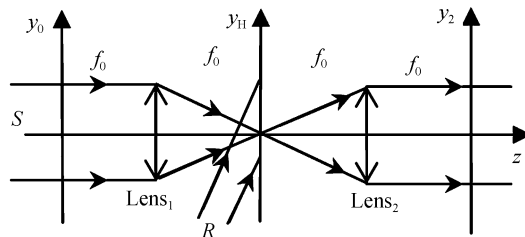


图 1 傅里叶变换全息光路图

Fig. 1 Scheme of recording Fourier transform hologram

1.1 物光信息

在 x_0-y_0 平面,经过 128×128 个像元的空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)加载的图像 $f(x_0, y_0)$ 如图 2.

*国家自然科学基金(60477004)和北京市自然科学基金(4071001)资助

† Tel:13720087704 Email:123davidwsong@emails.bjut.edu.cn

收稿日期:2009-07-17

修回日期:2009-11-06

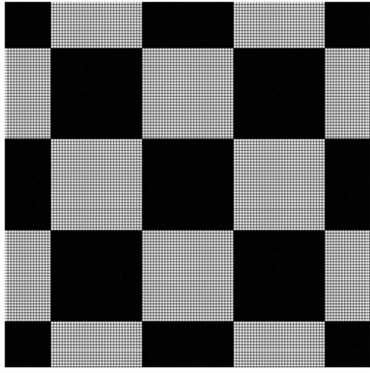


图2 输入图像 $f(x_0, y_0)$
Fig.2 The input image $f(x_0, y_0)$

在 x_H - y_H 平面上得到 $f(x_0, y_0)$ 的准确傅里叶变换, 由于 SLM 空间结构影响, 物光傅里叶频谱如图 3(a). 用相应于实际存储系统中记录光斑尺寸的低通滤波器 $h_{\text{filter}}(f_x, f_y)$ 对傅里叶频谱进行滤波, 如图 3(b). 滤波后傅里叶频谱如图 3(c). 最终在

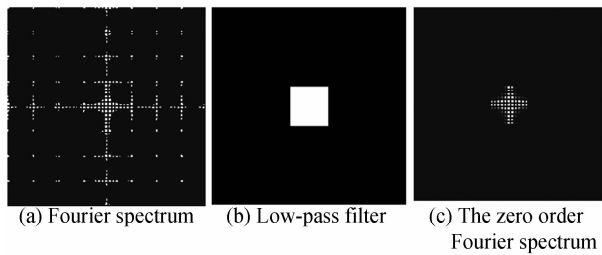


图3 输入图像的傅里叶频谱、低通滤波器和滤波后的零级频谱

Fig.3 The Fourier spectrum, low-pass filter, and the zero order Fourier spectrum of the input image

x_H - y_H 平面得到的物光为

$$F(f_x, f_y) = F[f(x_0, y_0)] \cdot h_{\text{filter}}(f_x, f_y) \quad (1)$$

1.2 参考光束的物理模型

参考光束 R 照射到频谱面上, 分别采用高斯光束、受到散斑调制的高斯光束以及受到散斑调制的平面波进行计算模拟.

1.2.1 高斯光束

高斯光束如式(2), 高斯光束的一般表达式为

$$E(x, y, z) = \frac{\omega_0}{w(z)} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} \right] \cdot \exp \left\{ -i \left[k \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} \right) - \arctan \frac{z}{f_{\text{gauss}}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, $w(z) = \omega_0 [1 + (z/f_{\text{gauss}})^2]^{1/2}$ 表示高斯光束传播到距离腰斑 z 时的光斑半径大小, 而 $f_{\text{gauss}} = \pi\omega_0^2/\lambda$ 和 $R(z) = z + f^2/z$ 代表与激光器谐振腔有关的量, ω_0 代表腰斑半径大小.

离轴高斯光束 R 以一定角度 θ 入射到图 1 中的 y_H - z_H 平面. 相应地, 式(2)先后经历了平移旋转的变换, 根据空间仿射坐标变换公式可得到在 x_H - y_H - z_H 坐标系中高斯参考光的表达式. 仿射坐标公式表达式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_H \\ y_H - y_R \\ z_H - z_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, 参量 θ 和 y_R, z_R 控制高斯光束入射到 y_H - x_H 平面的角度以及腰斑 ω_0 中心在坐标系 x_H - y_H - z_H 的空间位置.

1.2.2 平面光波

$$R_0(x_H, y_H) = A \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} y_H \sin(\theta) \right] \quad (4)$$

式中, 参量 A 表示光振幅大小, 参量 θ 控制平面波与 z 轴夹角.

1.2.3 散斑参考光

光束 R_0 入射到散射器上, 透射波受到散射器的随机位相调制, 传播过程中形成强度和位相呈随机分布的散斑参考光. 如果入射到散射器上的光束 R_0 是高斯光束, 散射光束 R 就是受到散斑调制的高斯光束; 如果 R_0 是式(4)代表的平面波, 散射光束 R 就是受到散斑调制的平面光波. 散射器的透过率函数是

$$h_0(x_H, y_H) = \exp [j\pi\gamma(x_H, y_H)] \quad (5)$$

式中, $\gamma(x_H, y_H)$ 是一幅 1024×1024 的 0、1 二值随机数据页.

如果散斑参考光经过焦距为 f_0 的透镜得到的傅里叶频谱在 x_H - y_H 平面与物光傅里叶谱(图 3(c))干涉记录傅里叶全息图, 散斑参考光束表达式为

$$R(f_x, f_y) = F[R_0(x_H, y_H) \cdot h_0(x_H, y_H)] \quad (6)$$

式中, $f_x = x_H/\lambda f_0$, $f_y = y_H/\lambda f_0$.

如果散斑参考光经过焦距为 f_0 的透镜, 1:1 成像到 x_H - y_H 平面, 考虑到衍射受限系统光瞳的影响, 若光瞳函数为 $h_c(f_x, f_y)$, 此时散斑参考光表达式为

$$R(f_x, f_y) = F^{-1} \{ F[R_0(x_H, y_H) h_0(x_H, y_H)] \cdot h_c(f_x, f_y) \} \quad (7)$$

1.3 全息图的记录和再现

如图 1, 当读出光束 $R(x_H/\lambda f_0, y_H/\lambda f_0)$ 入射到 x_H - y_H 平面上与物光傅里叶零级谱 $F(x_H/\lambda f_0, y_H/\lambda f_0)$ 干涉, 在 x_H - y_H 平面的记录介质上就会记录下傅里叶全息图. 如果记录介质的透过率函数与曝光光强成正比, 根据全息光学波前记录原理, 曝光过的记录介质透过率函数中包含原始物光信息的项为

$$t(x_H, y_H) = F(f_x, f_y) \cdot R^*(f_x, f_y) \quad (8)$$

式中, $f_x = x_H/\lambda f_0$, $f_y = y_H/\lambda f_0$.

如果再现光束 $R_c(f_x, f_y)$ 复振幅分布与记录光束 $R(f_x, f_y)$ 完全相同, 即 $R_c(f_x, f_y) = R(f_x, f_y)$, 根据全息光学波前再现理论, 通过式(8)的第三

项可以在 x_2-y_2 平面上得到的再现信息为

$$f'(x_2, y_2) = F\{|R(f_x, f_y)|^2 \times F(f_x, f_y)\} \quad (9)$$

2 计算方法及结果

采用 MATLAB 软件进行模拟计算, 图像的采样数为 1024×1024 , 计算中采用与实验光学系统相符合的参量. 图像质量用信噪比损失 LSNR 衡量

$$\text{LSNR} = 10 \times \log \frac{\text{SNR}_0}{\text{SNR}_n} \quad (10)$$

式中, SNR_0 表示只有原始图像(物光)通过系统时的直透图像信噪比, SNR_n 表示全息记录再现各个图像的信噪比.

2.1 高斯光束参考光

考虑到数值模拟时, 在高斯光束与 z_H 轴夹角 $\theta=0^\circ$ 入射时得到的图像作为直透图像, 图 4(a)、(b) 展示了此时的再现图像和高斯光束光斑图像, 计算出直透图像信噪比 $\text{SNR}_0 = 59.5$ dB. 此时, 高斯光束腰斑半径 $\omega_0 = 50 \times 10^{-3}$ mm, 腰斑中心距离入射平面 x_H-y_H 坐标中心 $r_{00} = 51.6$ mm. 用方孔进行低通滤波, 如图 4(c), 在边缘处光强下降约为中心光强的 50%. 可以认为在 x_H-y_H 平面, 高斯参考光斑恰好覆盖住如图 3(c) 的物光光谱.

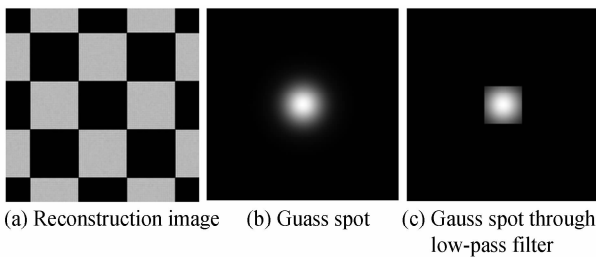


图 4 $\theta=0^\circ$ 直透图像、高斯光束光斑和经过低通滤波高斯光斑

Fig. 4 $\theta=0^\circ$ reconstruction image Guass spot and Guass spot through Low-pass filter

保持腰斑中心与 x_H-y_H 平面坐标中心距离不变, 腰斑半径不变, 改变离轴角 θ , 得到信噪比损失随高斯光束离轴角变化的曲线如图 5.

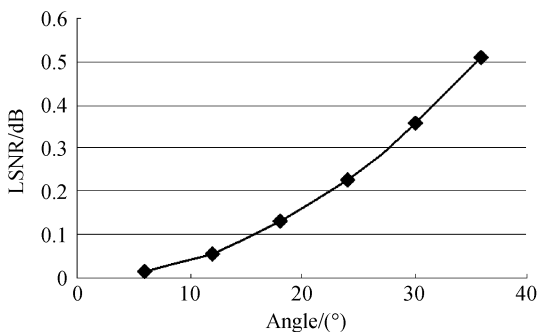


图 5 再现图像信噪比损失 LSNR 随高斯光束轴角变化曲线

Fig. 5 LSNR of reconstructed image versus off-axis angle of Guass reference beam

从图 5 可以看出信噪比损失随参考光离轴角的增大而增大, 但一直在 0.6 dB 以下, 高斯光束作为参考光, 可以得到较为理想的再现图像.

2.2 平面波参考光

平面波作为参考光在数值模拟过程中再现图像质量非常好, 平面光参考光 R 与 z 轴夹角在 $0 \sim 40^\circ$ 范围内变化, 得到的再现图像信噪比损失一直在 0.4 dB 以下.

2.3 平面波受到散斑调制

受到散斑调制的平面光波, 其傅里叶频谱在 x_H-y_H 平面记录全息图的再现图像质量很差. 不加散斑平面波直透图像信噪比 $\text{SNR}_0 = 32.8$ dB, 而经散斑参考光纪录后再再现图像信噪比 $\text{SNR} = 3.3$ dB, 信噪比损失 LSNR 高达 9.9 dB.

当将散射器成像到 x_H-y_H 平面上作为参考光束时, 在透镜光瞳直径为 2.07 cm 条件下, 参考光束(经过滤波刚好覆盖住图 3(c) 的物光傅里叶频谱)和最后的再现图像如图 6(a)、(b), 再现图像信噪比损失 $\text{LSNR} = 5.4$ dB; 在透镜光瞳直径为 1.45 cm 条件下, 参考光束和再现图像如图 6(c)、(d), 再现图像信噪比损失 $\text{LSNR} = 11.9$ dB.

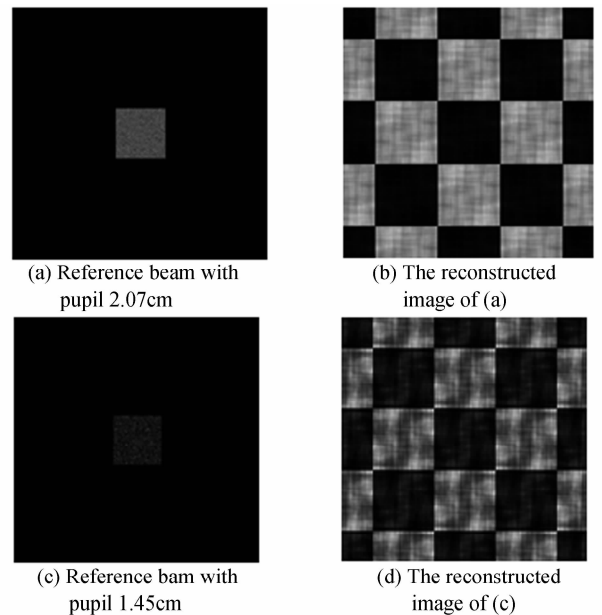


图 6 透镜光瞳直径分别为 2.07 cm 和 1.45 cm 条件下参考光以及对应的再现图像

Fig. 6 Reference beam formed by imaging a scatter with pupil size 2.07 cm, 1.45 cm and plane wave illumination, and the corresponding reconstructed images

2.4 高斯光束受到散斑调制

受到散斑调制的高斯光波, 其傅里叶频谱在 x_H-y_H 平面记录全息图的再现图像质量也很差. 再现图像信噪比 $\text{SNR} = 3.2$ dB, 不加散斑高斯光束直透图像信噪比 $\text{SNR}_0 = 59.5$ dB, 那么信噪比损失达到 $\text{LSNR} = 12.8$ dB.

当将散射器成像到 x_H-y_H 平面上作为参考光束时,在透镜光瞳直径为 2.07 cm 条件下,参考光束和最后的再现图像如图 7(a)和图 7(b).再现图像信噪比损失 $LSNR=7.2$ dB.

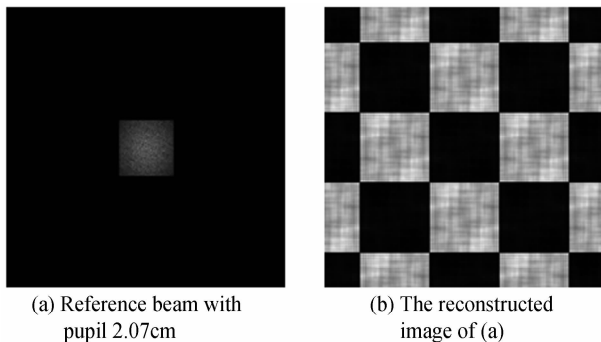


图 7 透镜光瞳直径 2.07 cm 条件下参考光以及对应的再现图像

Fig.7 Reference beam formed by imaging a scatter with pupil size 2.07 cm and Gauss wave illumination and correspond reconstructed image

我们在一种光致聚合物材料上,用 532 nm 绿光,以高斯光束和受到散斑调制的高斯光束作为参考光,分别记录一幅全息图,读出图像如图 8(a)和图 8(b).

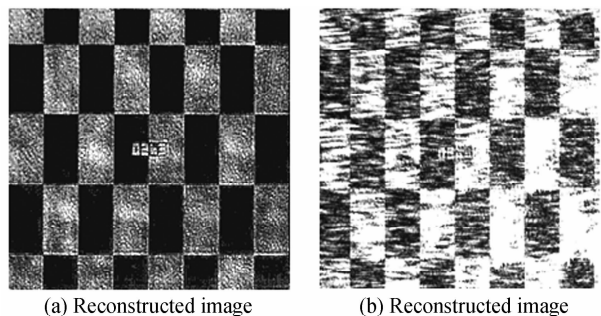


图 8 高斯光束参考光记录读出图像和散斑调制高斯光束记录读出图像

Fig.8 Reconstructed image by Gaussian Reference beam and reconstructed image by reference beam formed by imaging a scatter

可以明显看出,散斑调制高斯光束参考光读出图像质量比高斯光束作为参考光读出图像质量要差得多.

3 结论

模拟结果表明在理想平面波参考光和高斯球面波参考光的情形,全息读出图像质量非常好.高斯光束作为参考光时,参考光束角度大范围变化从 0° 变化到 40° ,信噪比损失在 0.6 dB 以内,仍能得到质量较高的再现图像.理想平面波参考光作为参考光束,参考光束角度从 0° 变化到 40° 变化,得到的图像信噪比损失一直在 0.4 dB 以下,质量很好.

但是对于散斑参考光,其再现图像质量明显很

差.散斑傅里叶频谱作为记录光束,平面波散斑傅里叶谱下,信噪比损失 $LSNR=9.9$ dB;高斯光束散斑傅里叶谱下,信噪比损失达到 $LSNR=12.8$ dB.而散斑参考光成像作为记录光束时,平面光波散斑调制下,光瞳直径 2.07 cm,再现图像信噪比损失 $LSNR=5.4$ dB,光瞳直径 1.45 cm,再现图像信噪比损失 $LSNR=11.9$ dB;高斯光波散斑调制下,光瞳直径 2.07 cm,再现图像信噪比损失 $LSNR=7.2$ dB.从中我们可以看出,散斑成像参考光读出图像质量受到成像透镜光瞳影响,随着光瞳直径的减小而下降.

尽管散斑成像作为参考光的读出图像质量比散斑参考光傅里叶频谱下稍好一些,但是依然造成图像质量严重下降,此外,经过实验考察,可以看出散斑调制光束作为参考光读出图像质量显然低于高斯光束作为参考光读出图像质量.在散斑调制光束作为参考光束的情况下,为了实现有效的数据存储位密度,就要兼顾存储密度和再现质量,应该考虑优化参考光的途径.

参考文献

- [1] COLBURN M, SUEZ I, CHOI B J, *et al.* Characterization and modeling of volumetric and mechanical properties for step and flash imprint lithography photopolymers [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2001, **19**(6): 2685-2689.
- [2] ZHAI Feng-xiao, LI Ruo-ping, YIN Qiong, *et al.* Analysis of dynamic behavior of bragg mismatch in photopolymer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 1842-1845.
翟凤潇, 李若平, 殷琼, 等. 光聚物材料中布喇格偏移的动态分析[J]. *光子学报*, 2006, **36**(12): 1842-1845.
- [3] SUN Cai-xia, LI Ruo-ping, HAI Lu, ZHAI Feng-xiao, *et al.* Study of holographic characteristics of photopolymer with two photo-initiator systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(11): 1998-2002.
孙彩霞, 李若平, 路海, 等. 含双引发剂的光致聚合物全息特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 1998-1002.
- [4] BOYD J E, TRENTLER T J, WAHI R K, *et al.* Effect of film thickness on the performance of photopolymers as holographic recording materials[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(14): 2353-2358.
- [5] SHIN S, JAVIDI B. Speckle-reduced 3D image visualization using integral imaging based photorefractive storage[C]//P. Delaye, C. Denz, L. Mager. *Photorefractive Effects, Materials, and Devices*. La Colle sur Loup, 2003: 729-729.
- [6] HE Qing-sheng, WANG Jin-nan, WANG Jian-gang, *et al.* Dynamic speckle multiplexing scheme in volume holographic data storage and its realization[J]. *Opt Lett*, 2003, **11**(4): 366-370.
- [7] GOLAN L, SHOHAM S. Speckle elimination using shift-averaging in high-rate holographic projection[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(3): 1330-1339.
- [8] YAMATSU H, EZURA M, KIHARA N. Study on multiplexing methods for volume holographic memory[DB]. International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage. (2005-06-10) [2009-07-17]. <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ISOM/ODS-2005-ThE1>.

- [9] HE Qing-sheng, WANG Jin-nan, WANG Jian-gang, *et al.* Dynamic speckle multiplexing scheme in volume holographic data storage and its realization[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(4): 366-370.
- [10] BUNSEN M, OKAMOTO A. Experiment on hologram multiplexing with photorefractive beam-fanning speckle[J]. *Transparent Optical Networks*, 2003, **1**(29): 287-290.
- [11] ZHU Yi-zhao. Research on the technology of encrypted optical holographic storage[D]. Beijing: Peiking University, 2008.
朱一超. 全息存储光学加密方法研究[D]. 北京: 北京大学, 2008.

Influence of Wavefront Quality of Reference Beam on Hologram Storage by Numerical Simulation

SONG Wei, TAO Shi-Quan, WANG Huan-yong

College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: The influence of wavefront quality of reference beams on the reconstruction quality of holographic recordings is investigated by numerical simulation. A physical model of recording and readout of Fourier transform holograms is built up to study reconstruction quality with various reference waves such as general plane wave, Gaussian wave and speckle wave. The quality is quantitatively evaluated using the loss of signal to noise ratio(LSNR) of the readout images. The simulation results show that plane and Gaussian reference waves could successfully record and readout high-quality holographic images with LSNR lower than 0.6 dB, but the speckle reference led to quality deterioration of reconstructed images with LSNR as high as 5 dB. It will be difficult to realize effective high-density data storage by speckle reference beam. In order to implement high-quality and high-density holographic storage, the reference beam must be optimized.

Key words: Holographic storage; Multiplexing technology; Speckle



SONG Wei was born in 1985. He is a graduate student at Beijing University of Technology, and his research interests focus on technology of holographic storage.



TAO Shi-quan graduated from Peking University in 1969, and obtained her Ph. D. degree from University of London in 1993. She is currently a professor, and her research interests focus on optical information processing and holography.