

# 光折变晶体中的盘式三维全息存储\*

袁 泉 陶世荃 宋雪华 刘国庆 王大勇 李宝胜 江竹青 徐 敏

(北京工业大学应用物理系 北京 100022)

**提要** 利用空间-角度复用和球面参考波技术在盘式光折变铌酸锂晶体中存储了 2000 幅高分辨率图像,并获得满意的再现。给出了选取盘面旋转角度等主要参数的基本依据和存储器达到的主要性能指标。研究表明,实验结果与理论分析符合得很好,证实了全息光盘在大容量信息存储方面的可行性。

**关键词** 体全息存储,三维全息光盘,角度-空间复用

## 1 引 言

体全息存储由于其三维存储的高容量和页面式并行存取的高数据传输速率,以及高冗余度和并行读出等独特优点,近年来的研究十分活跃,发展了各种存储介质和复用技术。在分块全息存储<sup>[1]</sup>的基础上提出的盘式存储方案<sup>[2]</sup>,是将二维空间复用直接向三维扩展,它可以克服光学系统提供的参考光角度数目有限以及记录材料动态范围有限,不能在同一体积中存储更多的全息图的局限;但它要求读写头相对记录介质不但有空间位置的改变,而且有角度的改变,因而光学系统较复杂。本文作者之一曾提出的空间-角度复用(简称 SAM)技术<sup>[3]</sup>,其核心是允许相邻全息图在空间部分重叠,而以不同的参考光角度加以区分。该方案结合角度复用体全息存储可能达到的高密度,空间复用可能达到的高衍射效率及低串扰噪音之优点,充分利用了材料的存储能力,提高了存储器的性能。将 SAM 方案与球面参考波结合而提出的空间-角度全息光盘方案即 SAMHD<sup>[4-6]</sup>,可以简化存储系统,使实用化程度大为提高。本文依据前述<sup>[4-6]</sup>的分析,进一步考虑 SAMHD 的旋转角度选择性,并通过原理性实验首次在盘状光折变铌酸锂晶体中实现了 2000 个高分辨率图像的全息存储,获得了满意的再现结果。

## 2 三维光盘全息图的旋转角度选择性

三维全息存储面向数据页面,并行写入和读出。它利用了体全息的角度(或波长)选择性,允许全息图重叠在共同体积中。对于角度复用而言,相邻全息图的参考光角度间隔的选取,将直接影响着全息图的存储容量、衍射效率和再现像的质量等特性。而 SAMHD 进一步使参考光角度的变化反映为盘面绕其中心轴旋转的角度。下面针对盘状记录介质对盘面旋转的选择角角度作一分析。

\* 国家自然科学基金和北京市自然科学基金资助项目。

采用 SAMHD 进行盘式存储时,是用球面波作参考光来记录信息页面的傅里叶变换全息图。每记录一个全息图后,光路不变,盘面绕中心轴旋转一微小角度,再记录下一个全息图,于是相邻全息图之间产生了  $\Delta x$  的空间间隔,一系列全息图沿紧密排列而互不重叠(或略为重叠)的环形轨道存储(见图 1)。由于空间位置和读出角度两者的改变同时完成,因而省去了为获得不同角度参考光所必须的角度导向机构,使存储光路变得简单。同时,若相邻轨道部分重叠的话,球面读出光波沿盘面径向的定位误差所引起的道间串扰将比平面读出光波的情形小得多。只要重叠因子  $\mu_x = d_H/\Delta x$  取值适当( $d_H$  是全息图的直径),相邻全息图间的串扰将受到抑制,同时存储容量和衍射效率也将提高。

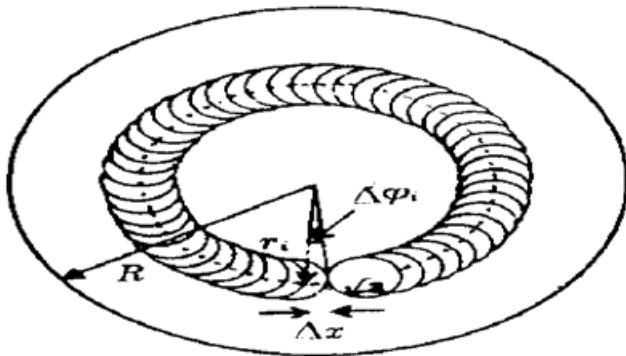


图 1 全息图部分重叠示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing partial overlapping of holograms

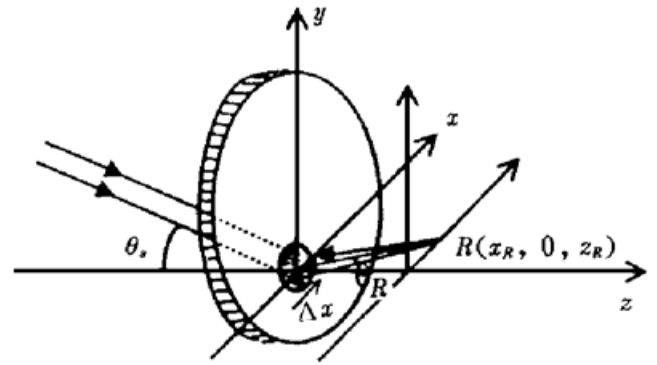


图 2 SAMHD 反射型记录几何示意图

Fig. 2 Recording geometry of SAMHD using reflection configuration

设盘面在  $x-y$  平面内,全息图的中心为坐标原点,见图 2。球面参考点源坐标为  $(x_R, 0, z_R)$ ,它使全息图上不同位置的参考光入射角均不相同,是位置的函数。为简单起见,这里设主光线的入射角为  $\theta_R$ ,物光波(也在  $x-z$  平面内)的入射角为  $\theta_s$ 。为使相邻全息图的再现像不发生串扰,在盘式晶体的同一环形轨道中,每记录一个全息图后,要让晶体在  $x-z$  平面中(即沿切线方向)移动一个微小距离  $\Delta x$ 。那么根据体光栅的角度选择性,并通过几何分析,可由下式给出 SAMHD 沿切向的选择性<sup>[5]</sup>

$$\Delta x = \frac{2\lambda z_R \cos \theta_s}{n d \cos^2 \theta_R \sin(\theta_R + \theta_s)} \tag{1}$$

式中  $\lambda$  为记录光波长,  $d$  为介质的厚度,  $n$  为介质的折射率,右边各量均为介质内观察到的值。经过一些近似步骤,将其换算到空气中的值,成为<sup>[6]</sup>

$$\Delta x \approx \frac{2\lambda z_{R0} \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{R0}}}{d \cos^3 \theta_{R0} (\sin \theta_{R0} + \sin \theta_{s0})} \tag{2}$$

附加的下标 0 表示空气中观测的值。在全息图半径很小(即  $a \ll z_{R0}$ ) 的情况下,还应考虑形成球面参考波的透镜的相对孔径所引起的角度展宽,这一展宽所对应的空间位移  $\Delta x_a = \lambda z_R / a \cos^2 \theta_{R0}$ 。通常在球面波相对孔径不太小的情况下,可以忽略这一影响。

同样,根据体光栅的垂直角度选择性<sup>[7]</sup>,可得到三维全息光盘沿径向的选择性,即相邻轨道的间距为( $\theta_{R0} \approx \theta_{s0}$  时)<sup>[5]</sup>

$$\Delta y \approx 2 \sqrt{\frac{z_{R0} \sin \theta_{R0}}{\cos^3 \theta_{R0}}} \cdot \sqrt{\Delta x} \tag{3}$$

其中  $\Delta x$  由(2)式表示,由于  $\Delta x \ll \Delta y$ ,因此比值  $\Delta y / \Delta x$  很大,在实际存储时,取该比值为 100 已

有足够的余地。

设  $r_i$  为第  $i$  个记录轨道的旋转半径, 将(2) 式计算的结果转换成图 1 中的转角  $\Delta\phi$ , 则可得到同一轨道内相邻全息图间对应的旋转选择角  $\Delta\phi = \frac{\Delta x}{r_i}$ , 结合式(2),  $\Delta\phi$  表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\lambda z_{R0} \sqrt{n^2 - \sin^2\theta_{R0}}}{dr_i \cos^3\theta_{R0} (\sin\theta_{R0} + \sin\theta_{S0})} \quad (4)$$

可见, 在记录介质和光路已确定的情况下, 每记录一个全息图后, 盘面旋转的角度与记录光路参数密切相关, 也与盘的旋转半径有关, 越靠近盘面中心的轨道, 相邻全息图之间需旋转的角度就越大。

### 3 SAMHD 的原理性实验

实验装置如图 3 所示, 采用的盘式记录介质为盘片状铌酸锂 ( $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$ ) 晶体 (掺铁量 0.06 wt-%), 晶体半径  $R = 15 \text{ mm}$ , 厚度  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $z$ -切割 (光轴沿厚度方向), 折射率  $n_0 = 2.28$ 。将晶体安放在精密微动转台上, 转台的分辨率及重复性均为  $0.001^\circ$ , 可旋转角度范围为  $355^\circ$ 。理论计算最佳的物光和参考光的角度分别约为  $55^\circ$  和  $35^\circ$ <sup>[8]</sup>, 但由于转台厚度的限制, 实验中取全息图所处轨道半径  $r_i = 10 \text{ mm}$ ,  $\theta_{R0} = 30^\circ$  和  $\theta_{S0} = 11^\circ$ 。球面参考波中心与全息图中心的距离为  $z_R = 7.5 \text{ mm}$ , 每个全息图的直径为  $2a = 3 \text{ mm}$ 。采用寻常偏振 ( $s$  偏振) 的记录光, 参考光和物光均来自同一  $\text{Ar}^+$  激光器的  $514.5 \text{ nm}$  谱线, 曝光强度为  $34 \text{ mW/cm}^2$ 。组页器为  $640 \times 480$  像素的空间光调制器 (SLM), 每个像元尺寸为  $42 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ , 实验中使用的页面区域约包含  $5 \times 10^4$  个像元。

由于后续记录对前面已记录的全息图有擦除效应, 为使每个全息图获得相同的衍射效率, 根据实验测定的晶体时间常数 (写入时间常数为  $300 \text{ s}$ , 擦除时间常数为  $1400 \text{ s}$ ) 和目标衍射效率 ( $\eta_0 = 10^{-5}$ ), 并按照类似文献[3]的基本方法, 计算了 2000 个全息图的专用曝光程序, 示于图 4, 单个全息图的平均曝光时间为  $3.6 \text{ s}$ 。实验中, 每个全息图的曝光时间由计算机通过电子快门控制。

在进行大规模存储之前, 先对单个全息图的转角选择性进行了测量, 见图 5。实测选择角宽为  $0.04^\circ$ , 与按(4) 式计算的理论值  $0.038^\circ$  基本符合。实验中采用的转角间隔为  $\Delta\phi = 0.15^\circ$ 。每存储一个页面后计算机控制转台转动一微小角度  $\Delta\phi$ , 同时 SLM 加载另一个页面。存储结束后关闭物光, 计算机控制转台使晶体在自身平面 (即图 2 的  $x-y$  平面) 内转动, 每转动到全息图的原记录位置时, 快门 2 自动打开, 衍射光经 F. T. L<sub>2</sub> 变换为图像, 通过 CCD 采集并存储, 依次循环, 依次读出所有 2000 个再现图像。

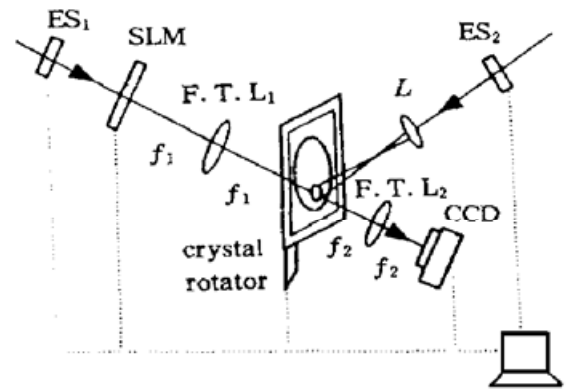


图 3 SAMHD 存储光路示意图

ES: 电子快门; SLM: 空间光调制器;

F. T. L: 傅里叶变换透镜

Fig. 3 Experimental setup of SAMHD storage

ES: electronic shutter; SLM: spatial light modulator;

F. T. L: Fourier transform lens

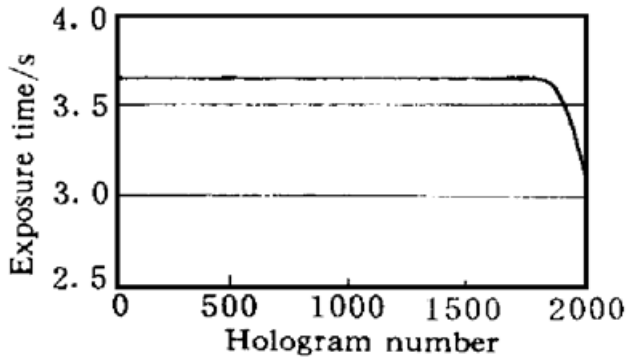


图 4 2000 个全息图的曝光序列

Fig. 4 Calculated exposure time schedule of 2000 holograms

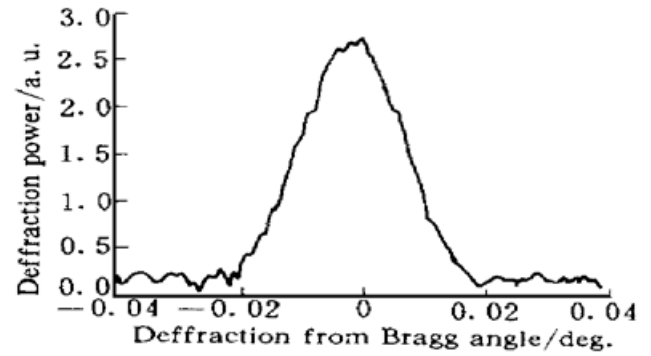


图 5 单个全息图的衍射效率与旋转角度之间的关系

Fig. 5 Measured curve of diffraction efficiency versus the disk rotation angle

## 4 实验结果与讨论

存储结束后,立即进行了全部 2000 个全息图读出的再现图像采集,没有发现缺页或页面中丢失部分信息的现象,也没有观察到任何再现图像间的串扰。图 6 给出了其中两幅全息图的再现像,由图看出再现效果满意,最小可分辨的像元为 SLM 的像元尺寸( $42 \mu\text{m}$ )。

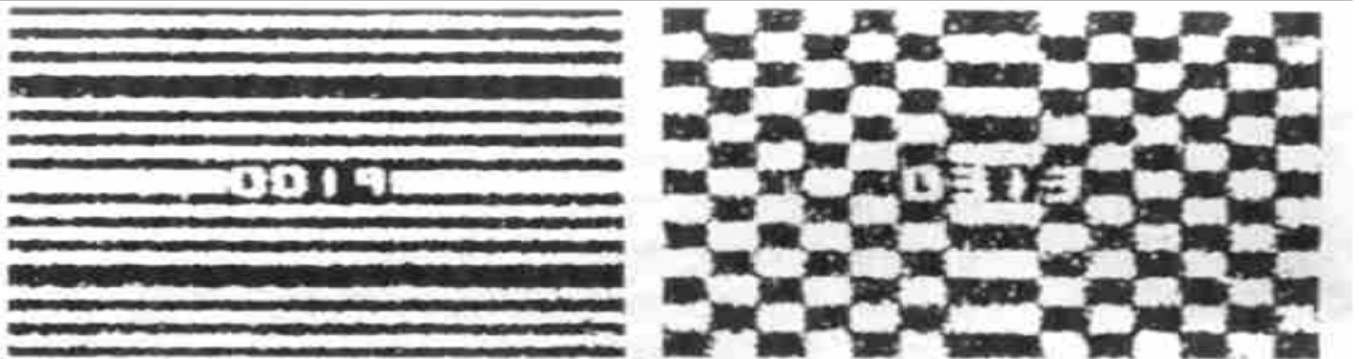


图 6 两个全息图的再现像

Fig. 6 Reconstructed of two holograms

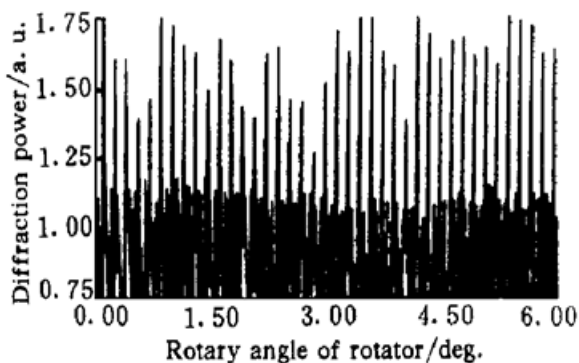


图 7 40 个全息图的衍射效率

Fig. 7 Diffraction efficiency of 40 holograms

在光折变晶体中进行全息存储,读出时通常存在布喇格偏移,即获得衍射峰值时的读出光角度,通常不同于记录时使用的参考光角度<sup>[9]</sup>。但在单个全息图和极小曝光量的情况下,布喇格偏移通常观察不到<sup>[10]</sup>。为了研究盘式大规模全息存储中布喇格偏移的特点,我们在完成 2000 个全息图的存储和读出后,又在同一晶体中用相同的条件和程序记录了 40 幅全息图,并在记录后逐一扫描读出了衍射效率随盘面转动的变化,示于图 7。从图 7 的数据中统计出以下结果:(1) 峰值衍射效率为  $(3.9 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ ,略大于设计采用的  $n = 10^{-5}$  这一参数,但衍射效率

的均匀度尚能满足;(2) 峰值衍射功率的位置通常不同于记录位置,即布喇格偏移存在。实验得出的布喇格偏移为 $(-2 \pm 3) \times 10^{-3}^\circ$ ,即大多数全息图的布喇格偏移范围在 $-0.005^\circ \sim 0.001^\circ$ 的范围之间,与旋转选择角 $(0.04^\circ)$ 相比很小。若在原位读出,测得的平均衍射效率为 $(3.1 \pm 0.7) \times 10^{-5}$ ,约为峰值的 80%。根据我们对再现像质规律的研究,这一衍射效率的下降对再现像质量的影响可以忽略<sup>[11]</sup>。因此,以小曝光时间记录的全息图阵列,可以不考虑布喇格偏移的影响。

由本实验给定的参数,可计算出实际达到的存储面密度约为 $6 \times 10^5 \text{ bit/mm}^2$ 。由于实验中仅在一个轨道上进行了存储,且采用了较大的存储角度间隔 $0.15^\circ$ (约为选择角的 4 倍),SLM 的页面也未充分利用,因此,存储密度低于理论估计。若将角间隔缩小 4 倍(已做过小规模存储实验,证明是可行的,无明显串扰),进行多轨道部分重叠的存储(理论计算<sup>[5]</sup>表明这是可行的),并扩大存储页面的信息量,即充分利用 SLM 所能提供的像素,让 $\theta_{R0}$ , $\theta_{S0}$ 及 $z_{R0}$ 取得最佳值,那么存储面密度还可提高约 20 倍。

## 5 结 论

采用 SAMHD 技术在光折变晶体中进行了大容量体全息存储,理论和实验均表明,盘式三维全息存储技术是一种有开发潜力和应用前景的海量存储技术。我们的原理性实验证实了大容量的盘式三维全息存储的现实可行性。

若选取响应时间更短的晶体材料,并适当提高曝光强度,将有助于提高写入速度。采用更厚的晶体(使 $\Delta x$ 变小),进一步优化记录光路和尽量利用 SLM 面积,可使存储密度大幅度提高。为了使这一技术得到实用,还需要在抑制光学噪音和全息图固定技术等方面深入进行研究。

## 参 考 文 献

- 1 R. G. Zech. Volume hologram optical memories, mass storage future perfect? *Opt. & Photonics News*, 1992, **8**: 16~ 25
- 2 Hsin-Yu Sidney Li, Demetri Psaltis. Three-dimensional holographic disks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17): 3764~ 3774
- 3 S. Tao, Z. H. Song, D. R. Selviah *et al.*. Spatioangular multiplexing scheme for dense holographic storage. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(29): 6729~ 6737
- 4 Tao Shiquan, Xu Min. Spatioangularly-multiplexed three-dimensional holographic disks. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(8): 1015~ 1020 (in Chinese)
- 5 Shiquan Tao, Baosheng Li, Zhuqing Jiang *et al.*. Spatioangularly multiplexed 3-D holographic disks using photorefractive crystals, 1997 Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects, and Devices. Chiba, Japan, 1997. paper WD4, 242~ 245
- 6 Tao Shiquan, Wang Dayong, Jiang Zhuqing *et al.*. Optical Holographic Storage. Beijing: Beijing Polytechnic University Press, 1998 (in Chinese)
- 7 Yuan Quan, Tao Shiquan, Jiang Zhuqing *et al.*. The vertical angular selectivity and grating degeneracy of volume holographic gratings. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(4): 337~ 341 (in Chinese)
- 8 Zhuqing Jiang, Shiya He, Shiquan Tao. Diffraction properties reflection-type holographic grating in photorefractive  $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$ . 1997 Topical Meeting on Photorefractive Materials, Effects, and Devices. Chiba, Japan, June 1997. paper WD4, 580~ 583
- 9 S. Tao, Z. H. Song, D. R. Selviah. Bragg-shift of holographic gratings in photorefractive  $\text{Fe} \cdot \text{LiNbO}_3$  crystals. *Opt. Commun.*, 1994, **108**: 144~ 152

storage, Msc. thesis. Beijing: Beijing Polytechnic University, 1998. 24~ 25 (in Chinese)

- 11 Tao Bin. Study on quality of images retrieved from volume holographic memories, Ph. D. Thesis. Hefei: University of Science and Technology of China, 1998. 55 (in Chinese)

## Disk-type 3-D Holographic Storage in a Photorefractive Crystal

Yuan Quan Tao Shiquan Song Xuehua Liu Guoqin

Wang Dayong Li Baoshen Jiang Zhuqing Xu Min

(*Applied Physics Department, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*)

**Abstract** 2000 high resolution images have been stored in a disk-type photorefractive  $\text{LiNbO}_3 \cdot \text{Fe}$  crystal using spatioangular multiplexing with a spherical reference wave. All images stored are successfully reconstructed without visuable cross talk or information loss. In this paper the angular separation between adjacent holograms in a track, as well as the radial separation between adjacent tracks are given, and the achieved performance from this memory is reported. The experimental results agree well with theory. This research demonstrated that 3-D holographic disks are feasible for mass information storage.

**Key words** volume holographic storage, 3-D holographic disks, spatioangular multiplexing