

文章编号: 0258-7025(2005)03-0361-04

高密度盘式全息存储及其热固定的实验研究

万玉红, 陶世荃, 袁 桦, 江竹青, 丁晓红, 刘国庆, 王大勇

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100022)

摘要 利用空间-角度复用方式与球面参考波相结合的全息复用存储技术, 在盘状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体单一扇形区域内成功存储 10000 幅高分辨率图像, 存储面密度达 $33.7 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 。在此基础上, 将分批热固定的方法应用于盘式体全息存储, 分 4 批次存储了 5000 幅高分辨率图像, 从而将存储面密度进一步提高到 $50 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 。会聚的球面参考波及优化的光路配置减小了参考光的反射光斑尺寸, 同时也减少了有害的杂散光从晶体表面反射进入成像光路, 保证存储图像能得到良好的再现。

关键词 全息; 盘式全息存储; 分批热固定; 光折变晶体

中图分类号 TB 877 **文献标识码** A

Experimental Study on High-Density Holographic Disk Storage with Batch Thermal Fixing

WAN Yu-hong, TAO Shi-quan, YUAN Wei, JIANG Zhu-qing,
DING Xiao-hong, LIU Guo-qing, WANG Da-yong

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Ten thousand images have been successfully stored in a single section of a disk-shaped, iron-doped LiNbO_3 crystal using spatio-angular multiplexing with a convergent spherical reference beam, resulting in an areal density of $33.7 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$. On this basis, the batch thermal fixing technique was applied to holographic disk storage. 5000 high-resolution images, divided in four batches, have been stored and fixed in the same crystal again but within a smaller area, resulting in a higher areal density of $50 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$. The application of convergent spherical reference beam and optimized optical set-up eliminated the detrimental scattering (from the crystal surface) and prevented it from entering the image detector. The images were reconstructed with good fidelity.

Key words holography; holo-disk storage; batch thermal fixing; photorefractive crystal

体全息存储技术以其存储容量大、存储密度和数据传输率高等优势成为人们寄予厚望的下一代信息存储技术。盘式全息存储方案简化了大面积介质中全息存储的寻址方式, 更适合大容量数据存储的应用^[1,2]。盘式体全息存储中广泛应用的存储介质主要是光折变晶体和光致聚合物^[3~5]。2002 年美国斯坦福大学研究小组报道的在光致聚合物盘中进行数字数据的全息存储, 数据传输速率达到 10 Gb/s ^[6]。但由于材料有限的厚度限制了存储的密度和

容量, 存储密度约为 $10 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 。

与光致聚合物相比, 光折变晶体具有可选择厚度范围大(通常为几个毫米), 介质无收缩, 存储信息保真度高、可擦除、可固定等优势。近几年所报道的大容量体全息存储均在光折变晶体中实现。2001 年, Burr 等利用角度复用技术和 90° 光路配置在块状晶体中存储了 1000 幅数据页, 每幅包含 100 万像素, 存储密度达到每平方微米 387.5 像素^[7]。在光折变晶体的盘式存储方面, 1996 年 Barbastathis 等

收稿日期: 2003-09-30; 收到修改稿日期: 2004-05-10

基金项目: 国家 973 计划(G19990330)和国家自然科学基金(69977005)资助项目。

作者简介: 万玉红(1976—), 河北安平人, 北京工业大学应用数理学院博士研究生, 主要从事光存储和光信息处理的研究。

E-mail: yhongw@emails.bjpu.edu.cn

采用位移复用的方式在铌酸锂晶体中存储了 600 幅全息图,但文中没有报道存储密度和图像质量等数据^[8]。1999 年,我们采用空间-角度复用方式,在铌酸锂晶体中存储了 10000 幅全息图,存储密度为 $5.35 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 。在那次实验中,虽然每幅全息图都可以成功读出,但再现图像的信噪比较低,图像质量不能令人满意^[9]。

影响图像质量的主要因素是光学系统引入的各种噪声,特别是晶体的散射噪声^[10]。为提高存储密度和存储数据保真度,我们深入研究了存储系统的噪声问题。采用空间-角度复用与会聚的球面参考波结合,设计并实现了在盘状 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体内存储 10000 幅高分辨率图像的实验,存储图像得到高保真度再现,存储面密度达 $33.7 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 。为了充分利用晶体的动态范围,进一步提高存储密度和容量,需要采用分批存储的热固定技术^[11~13]。因此,本文将盘式存储与分批热固定技术结合起来,完成了 5000 幅高分辨率图像的分批存储和离线热固定及显影再现,使存储的面密度进一步提高到了 $50 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 。

1 实验设计

1.1 常规存储 10000 幅全息图

为得到高保真度的再现图像,在实验设计中,要尽可能地抑制噪声对读出图像的影响。光生伏打效应引起的光折变晶体的散射噪声,是影响全息存储图像质量一个主要因素^[14]。通常用信噪比表示二值图像的质量,而用信噪比损失系数(LSNR)来定量研究散射噪声对晶体中存储图像质量的影响^[15]。通过评价晶体的性能参数和噪声特点,实验中选用了 z 向切割,厚度 $d = 5 \text{ mm}$,单掺铁质量分数为 0.03% 的生长态的铌酸锂晶体。该晶体具有灵敏度高、动态范围适中和强相干光照射下信噪比损失较小等优点。

在空间-角度复用的盘式存储中,应当选择合适的相邻全息图间距,以便有效地抑制串扰噪声。理论上,同一轨道内相邻全息图的最小中心间距(即切向选择性)可以表示为^[9]

$$\Delta X \approx \frac{2\lambda}{d(\sin\theta_R + \sin\theta_S)} \times \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta_R}}{\cos^2\theta_R} r_R, \quad (1)$$

相邻轨道最小间距(即径向选择性)可近似表示为

$$\Delta Y \approx \frac{2\sqrt{r_R \Delta X \sin\theta_R}}{\cos\theta_R}, \quad (2)$$

其中 n 和 d 分别为存储介质的折射率和厚度, r_R 为球面波中心到全息图中心的距离。理论计算的 $\Delta X \approx 3.7 \mu\text{m}$, $\Delta Y \approx 0.3 \text{ mm}$ 。以全息图直径 $d_H = 3 \text{ mm}$ 计算,最大的切向重叠因子 $\mu_x = 810$,最大径向重叠因子 $\mu_y = 10$,等效单点复用度可达 8100^[1]。但由于晶体的动态范围有限,在此复用度下,无法获得可以接受的图像保真度。实验中选用了大于理论值的 $\Delta X = 15 \mu\text{m}$ 和 $\Delta Y = 0.8 \text{ mm}$,等效单点复用度为 750,以保证较低的串扰噪声,并与晶体的动态范围相匹配。表 1 给出了存储时各轨道的记录参数。

表 1 常规存储 10000 幅全息图各轨道记录参数

Table 1 Recording parameters in all tracks for conventional storage of 10000 holograms

Track serial number	Track radius /mm	Disk rotation angle /($^\circ$)	Number of holograms
1	19.6	0.044	1856
2	18.8	0.046	1780
3	18.0	0.048	1704
4	17.2	0.050	1629
5	16.4	0.052	1553
6	15.6	0.055	1478

合适的曝光时序是实验成功与否的另一关键因素。由于后续记录对前面已记录的全息图有擦除效应,为获得相同衍射效率的全息图,根据实验测定的晶体时间常数(写入时间 90 s,擦除时间 1100 s)和选定的目标衍射效率,全息图间距等参数,利用文献^[9]中的方法计算出 10000 幅全息图专用曝光时序。

1.2 分批存储热固定 5000 幅全息图

分批热固定全息存储是指将要存储的全息图分成若干批,依次对每一批全息图进行室温记录和高温定影,直至完成所有批次全息图的热定影,然后待晶体冷却到室温后再一次性显影出所有的全息图离子光栅^[12]。由于热固定后的全息图抗光擦除的能力增强,批间光擦除时间(即后续批次记录的全息图对已固定全息图的擦除时间)变长,提高了光折变晶体的有效动态范围。这便允许单点复用度增大,相邻全息图间距可进一步压缩,从而提高存储的密度。在分批存储热固定的实验中,选择 $\Delta X \approx 8.68 \mu\text{m}$, $\Delta Y \approx 0.8 \text{ mm}$ 的相邻全息图间距,等效于单点复用度为 1296。表 2 为各批次的记录参数。

为实现一定的存储密度和数据保真度,两次实验对复用技术和噪声问题的考虑是相同的。对于分批存储热固定,通过测量批间擦除时间常数^[13],结

表 2 分批存储热固定 5000 幅全息图各批次的记录参数
Table 2 Recording parameters in all tracks for batch-fixed storage of 5000 holograms

Batch serial number	Track radius /mm	Disk rotation angle /($^{\circ}$)	Number of holograms
1	15.4	0.032	1357
2	14.6	0.034	1284
3	13.8	0.036	1213
4	13.0	0.038	1146

合空间-角度复用的曝光补偿算法,给出了每一批次全息图记录的曝光时序。

2 实验

图 1 所示光路即为两次存储实验的光路,波长为 532 nm 的激光束经偏振分束棱镜(PBS)后分为物光和参考光。物光经扩束准直后照射到分辨率为 1024×768 像素的空间光调制器上。存储介质位于傅里叶频谱面附近。在保证较低的页内串扰的前提下,晶体前放置一适当尺寸的滤波孔径以减小所记录全息图的尺寸。读出的全息图用高灵敏度的 CCD 来采集。非对称入射的反射式记录光路和会聚的球面参考波,既减小参考光的反射光斑的尺寸,又保证其不能进入成像光路。

实验中总的写入光强为 246 mW/cm²,物光和参考光的光强比为 1:5。10000 幅全息图总曝光时间为 25467.8 s,其中最长的曝光时间为 3.28 s,最

短为 1.46 s。

分批热固定存储 5000 幅全息图(晶体已预先进行热擦除)总曝光时间为 10700.4 s。其中全息图最长曝光时间为 2.50 s,最短为 1.46 s。单批次全息图均在室温下记录,140℃ 的温度下热定影 20 min。所有全息图冷却到室温后用光强为 400 mW/cm² 的非相干光照射进行显影,显影时间 5 min。

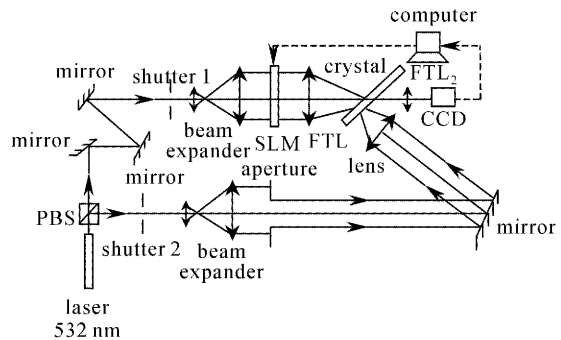


图 1 实验记录光路简图

SLM:空间光调制器;FTL:傅里叶变换镜

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up
SLM: space light modulator; FTL: Fourier transform lens

3 结果和讨论

两次实验中采集到的部分再现图像示于图 2。常规存储的 10000 幅图像,采样的全息图均得到高保真度再现。从图 2 可以看出,再现图像的衍射效率基本均匀,细节清晰,平均信噪比(SNR)为 3.6。

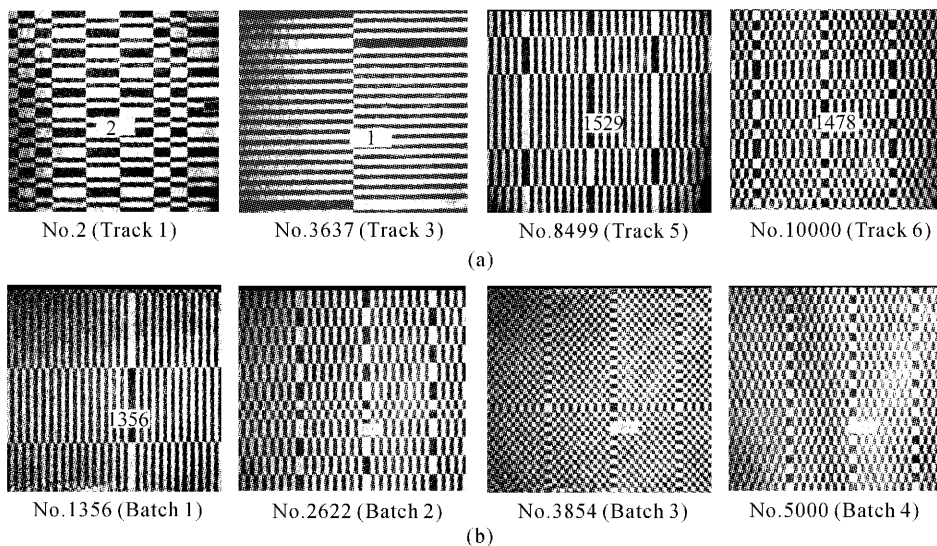


图 2 部分再现图像

(a) 非固定存储 10000 幅全息图的再现图像;(b) 分批存储热固定 5000 幅全息图的再现图像

Fig. 2 Sampled reconstructed images

(a) read out after 10000 data pages stored; (b) read out after 5000 data pages stored and batch-thermally fixed

而分批存储热固定 5000 幅图像的再现质量略差于未固定的全息图。这主要是由于热固定降低了总的衍射效率,因而信噪比略低。同时由于盘式存储对离线热固定的复位精度要求极高,读出时微小的定位偏差也会对读出图像的信噪比产生较大影响。

本实验利用分批热固定和盘式多轨道存储相结合的方案,将系统的面存储密度和体存储密度分别提高到了 $50 \text{ bits}/\mu\text{m}^2$ 和 $10 \text{ Gb}/\text{cm}^3$ 。详细实验结果参见表 3。

实验表明,光折变晶体中的盘式全息存储是实

表 3 两次大容量盘式存储的实验结果

Table 3 Results of large-capacity disk storage experiments

	Multi-track storage of 10000 holograms	Batch-thermal fixing storage of 5000 holograms
Size of data page /pixels	768×768	768×768
Number of tracks	6	4
Section angle /($^{\circ}$)	81.5	43.8
Storage area / cm^2	1.75	0.586
Storage volume / cm^3	0.875	0.293
Storage capacity /Gbits	5.898	2.949
Areal density /($\text{bits}/\mu\text{m}^2$)	33.7	50
Volume density /(Gbits/cm^3)	6.7	10

现超大容量数据存储的有效方法。分批存储热固定技术能够充分利用存储介质的动态范围,有效提高存储密度。进一步细化盘式分批存储热固定的曝光时序及优化离线热固定中夹持晶体的复位装置,将得到更为理想的实验结果。大容量体全息存储的关键是使系统实现高存储密度,对于盘式存储而言,在获得高存储密度的前提下,存储容量的增大可由介质面积的增加直接获得。

参 考 文 献

- 1 Tao Shiquan, Xu Min. Spatioangularly-multiplexed three-dimensional holographic disks [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8):1015~1020
陶世荃,徐敏. 采用空间-角度复用的盘式三维全息存储[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8):1015~1020
- 2 D. Psaltis, Michael Levene, Allen Pu *et al.*. Holographic storage using shift multiplexing [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7):782~784
- 3 Yuan Quan, Tao Shiquan, Song Xuehua *et al.*. Disk-type 3-D holographic storage in a photorefractive crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(12):1097~1101
袁泉,陶世荃,宋雪华等. 光折变晶体中的盘式三维全息存储[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(12):1097~1101
- 4 Liu Guodong, He Qingsheng, Huang Xiongbin *et al.*. 5 Gbits/ cm^3 hologram storage system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(Suppl.):77~78
刘国栋,何庆声,黄雄斌等. 5 Gbits/ cm^3 体全息存储系统[J]. *中国激光*, 2003, **30**(增刊):77~78
- 5 Huang Mingju, Yao Huawen, Chen Zhongyu *et al.*. Optimization of recording method and optical setup of photopolymer disk-type holographic memory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):402~406
黄明举,姚华文,陈仲裕等. 光聚合物全息光盘记录方法和光路的优化[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):402~406
- 6 Sergei S. Orlov, William Phillips, Eric Bjornson *et al.*. High data rate (10 Gbits/sec) demonstration in holographic disk digital data storage system [C]. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO - Technical Digest May 19~24 2002, p70~71, Sponsored by: IEEE-Lasers and Electro-Optics Society; Optical Society of America Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. New York, 2002
- 7 Geoffrey W. Burr, C. Michael Jefferson, Hans Coufal *et al.*. Volume holographic data storage at an areal density of 250 gigapixels/ in^2 [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(7):444~446
- 8 G. Barbastathis, M. Levene, D. Psaltis. Shift multiplexing with spherical reference waves [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(14):2403~2417
- 9 Tao Shiquan, Yuan Quan, Jiang Zhuqing *et al.*. Multi-track storage of 10,000 holograms in a disk-type photorefractive crystal [C]. *SPIE*, 1999, **3864**:270~272
- 10 Wan Yuhong, Yuan Wei, Liu Guoqing *et al.*. Study on the characteristics of scattering noise in photorefractive holographic storage [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):529~532
万玉红,袁 骅,刘国庆等. 光折变晶体全息存储中散射噪声特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):529~532
- 11 Jiang Zhuqing, Song Xuehua, Tao Shiquan. Study on characteristics of thermal fixing of holograms in photorefractive crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):160~164
江竹青,宋雪华,陶世荃. 光折变晶体全息图的热固定特性优化的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(2):160~164
- 12 Jiang Zhuqing, Meng Gang, Tao Shiquan. A study on the batch method of thermal fixing for multiplexed photorefractive holograms [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(4):25~26
江竹青,孟 纲,陶世荃. 光折变晶体中多重全息图分批定影热固定的研究[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(4):25~26
- 13 Jiang Zhuqing. Study on thermal fixing for high-density holographic storage [D]. Thesis of Doctor's Degree in Beijing University of Technology, 2003. 100~105
江竹青. 光折变晶体中高密度全息存储热固定技术的研究[D]. 北京工业大学博士论文, 2003. 100~105
- 14 Liu Guodong, He Qingsheng, Li Xiaochun *et al.*. Suppression and influence of photovoltaic DC field on volume hologram [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):713~716
刘国栋,何庆声,李晓春等. 光伏电场对大容量体全息存储的影响与抑制[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):713~716
- 15 Mingyan Qin, Shiquan Tao, Guoqing Liu *et al.*. Effect of scattering noise on the data fidelity of holograms recorded in photorefractive crystals [C]. Borg, Bussmann, Egelhoff, Jr, Hesselink, Majettich, Murdoch, ed(s), MRS Symp. Proc. Vol. 674, Application of ferromagnetic and optical materials, storage and magnetoelctronics, M. R. S. USA. 2001, paper V2. 6. 1~2. 6. 6