

相位对比读出三维光数据存储的实验研究*

马良财^{1,2} 程光华¹ 刘青¹ 王屹山¹ 于连君¹ 赵卫¹ 苗润才² 陈国夫¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

摘要 使用波长 800 nm、脉冲宽度 150 fs 的近红外激光脉冲紧聚焦到 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)和熔融石英中实现了三维逐位式光数据存储,分别记录下了 5、10、15 和 20 层数据位点. 利用相位对比光学显微原理对各层数据并行读出,实验分析了各层数据位点的读出对比度的变化. 结果表明:各层数据位点的折射率对比度由内至外依次增加,记录层数越多,其内部层的对比度下降越明显. 由于飞秒激光脉冲与透明介质相互作用中,熔融石英内部产生的残余应力比 PMMA 内大,因此数据位点参数相同的情况下,利用 PMMA 材料记录的层数更多.

关键词 三维光存储; 飞秒脉冲; PMMA; 熔融石英; 相位对比度

中图分类号 TQ59 **文献标识码** A

0 引言

近些年以来,信息科学发展迅猛,人们对数据存储器的存储密度和存储容量的要求在不断地提高,对超高密度数据存储的研究是当前信息科学重要的研究热点之一^[1-9]. 自从光存储走向实用化以来,由于激光束可以聚焦到 $\sim 1 \mu\text{m}$ 的程度,从而极大地提高了光数据存储的密度,但是在光数据存储中,每个数据位的尺度受所用光学系统的衍射极限的限制,从而限制了光存储面密度的进一步提高. 而现在使用的光存储技术一般还只是在单面或双面光盘上存储数据,新的DVD技术也仅只能存储几层数据. 为进一步提高数据的存储密度,充分利用存储介质的空间,三维体存储是首选的方法之一.

当高功率飞秒激光脉冲紧聚焦到物质体中时,通过多光子电离激励过程,能迅速在局部产生一个高温、高密度的等离子体结构,吸收大部分激光能量,在透明介质体内聚焦点附近将物质消融,产生一个微小的空腔. 在此过程中不会出现液态,直接通过蒸发改变物质的局部结构. 相对于长脉冲和连续波激光来说,超短激光脉冲几乎不会产生热作用区域和热损伤,能更精密地改变介质的局部物理结构,最终可实现亚微米级的微爆结构. 本文报道了利用飞秒脉冲在 PMMA 和熔融石英中实现多层逐位式光数据存储,通过相位对比光学显微镜对各层数据位进行读出,最后利用软件对数据位与背景的折射率对比度进行了分析. 实验结果表明:各层数据位点的折射率对比度由介质内部记录层至外部记录层依次增加,记录

层数越多,其内部层的对比度下降越明显. 由于飞秒激光脉冲与透明介质相互作用中,熔融石英内部产生的应力比 PMMA 大;因此数据位点参数相同的情况下,利用 PMMA 材料记录的层数更多.

1 实验

试验装置见图 1. 数据存储的写入光源^[10]为自制的钛宝石飞秒再生放大器,其输出脉冲波长为 800 nm,脉冲宽度为 150 fs,重复频率为 1 kHz,平均输出功率 100 mW. 用一个数值孔径为 0.55、放大倍数为 50、工作距离 13 mm 的长工作聚焦透镜将超短脉冲激光束紧聚焦到透明介质(PMMA 或熔融石英)内部指定位置,介质被置于由计算机控制的三维移动平台上,从而在透明介质样品中产生三维数据位点阵列(图 1). 在开始的写入试验中,我们沿着从记录介质的表面到内部的方向移动物镜,发现从表面到内部各层的点越来越小. 这是由于已经记录过的点会吸收和散射入射激光脉冲. 因此,在后面的实验中,我们都是先记录介质的内层,再记录外层. 这样,在入射的脉冲能量相同时,各层位点的大小几乎都相等. 最后通过连接有数码相机的相位对比光学显微镜对各层数据位进行了并行读出.

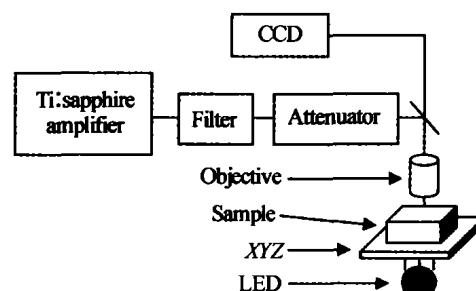


图 1 三维光存储写入系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 3-D optical storage

*中国科学院知识创新方向性项目(40001043)

Email: maliangcai@126.com

收稿日期:2004-05-12

为了得到更高的分辨率,我们在激光器和写入系统内做了两项改进. 第一项是将飞秒激光器输出的脉冲设置在负色散区域. 飞秒激光脉冲在压缩器前的脉冲宽度为 2.1 ps, 其色散在正色散区域. 用两个光栅对压缩, 在光栅间距 7.4 cm 时, 得到 150 fs 的激光脉冲; 此时色散量接近 0. 但衍射极限的飞秒激光脉冲通过能量调节系统、聚焦系统后又得到相当大的正色散, 脉冲再次展宽. 典型的脉冲宽度将从 150 fs 展宽到 400 fs 左右(取决于聚焦系统). 脉冲宽度增加, 飞秒激光作用在介质内部的热效应增强, 内部微应力增大, 这对光子器件的性能、光数据存储的读出都不利. 因此我们将光栅宽度设置在 8 cm, 使输出的脉冲在聚焦系统前在负色散区域; 聚焦到样品内部时, 在 0 色散区域, 脉冲宽度最短. 第二项改进是能量调节系统. 我们首先使飞秒激光脉冲通过一个 90% 的反射镜, 将激光能量衰减 90%. 再用一个偏振片做为检偏器, 旋转偏振片就可以调节写入的激光脉冲能量. 我们没有用能量可调的中性密度衰减器, 是因为圆形截面的高斯光斑通过中性密度衰减器后, 激光光斑将变成一个非圆形截面, 这对超高准确的飞秒激光脉冲加工极为不利.

2 实验结果

首先用不同单脉冲能量的激光束入射到 PMMA 和熔融石英中, 以检测出能产生可见的光损伤区域的阈值能量, 功率计是 coherence 公司的 Field 型, 功率测量范围在 1 nW ~ 1 mW. 相对于 800 nm, 150 fs 的超短脉冲激光来说, 我们得到 PMMA 和熔融石英的能量阈值分别接近于 30 nJ、120 nJ. 实验中我们用单脉冲能量分别为 32 nJ 和 140 nJ 的超短激光束在 PMMA 和熔融石英中产生多层记录位点阵列, 每个位点一个脉冲, 记录位点的点间距分别为 3 μm, 层间距为 10 μm. 为了对比研究折射率对比度的变化, 我们在 PMMA 和熔融石英中都分别记录了 5 层、10 层、15 层和 20 层的数据位点阵列. 图 2 是通过相位对比光学显微镜($NA=0.65, 40\times$)由数码相机沿平行于入射光束方向拍摄的超短脉冲在 PMMA 和熔融石英中产生的 5 层数据位的透射图像, 可以看出每个数据位点的大小 $<1\ \mu\text{m}$, 且其形状为圆形. 所有的图像都是在相同照明强度下拍摄的. 为了研究方便, 我们在每层的数据位点阵列的同一位置截取两列进行研究. 图 2 中从左至右依次为从记录介质内层到外层的各层数据位点阵列中的两列, 图 3 为各层对应的折射率对比度. 可以看出, 各层的数据位点均清晰可见, 外层的位点较之内层更清晰. 这一点在其对比度图(图 3、4、5、6)中也得到了证

实, 即 PMMA 和熔融石英中记录的各层数据位点阵列的对比度由内层至外层逐渐增加.

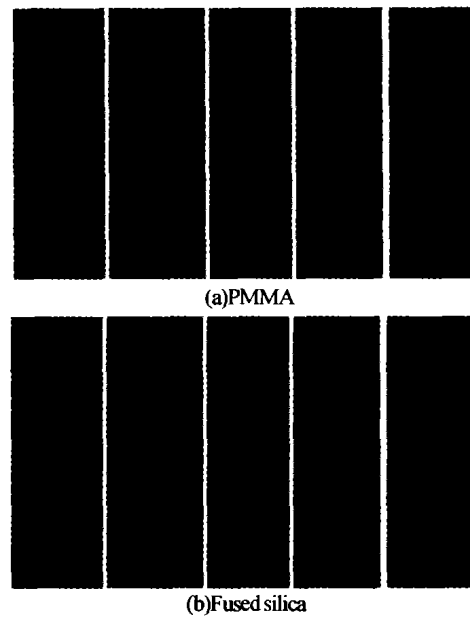


图 2 PMMA 和熔融石英中记录的 5 层数据位
Fig. 2 Optical image of the 5 bits planes written inside PMMA and fused silica

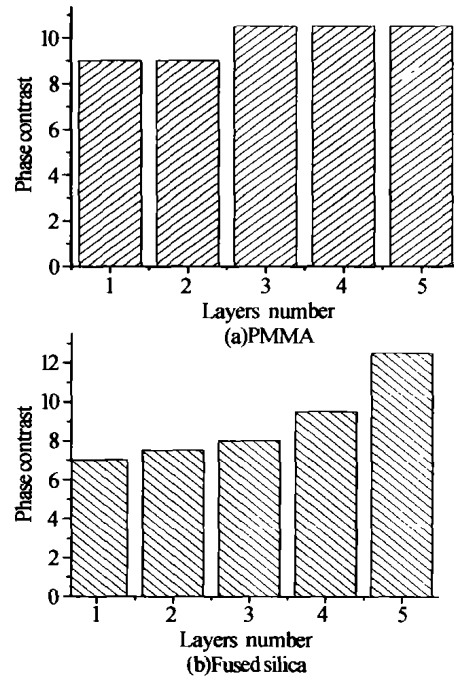


图 3 利用近红外飞秒激光脉冲在 PMMA 和熔融石英中记录的 5 层数据的各层的相位对比度
Fig. 3 Phase contrast of the 5 bits planes written inside PMMA and fused silica using near-infrared femtosecond laser pulse

从图 2 和图 3 可以看出, 在 PMMA 有机材料和熔融石英无机材料中进行的 5 层光存储及其层间对比度变化趋势相同, 在后面的实验发现, 在 10 层、15 层时两种不同材料中记录的数据点的对比度都非常相似, 只是在 20 层时和 20 层以上时, 在 PMMA 内点的相位对比度明显好于熔融石英内的点, 后面我们会较详细的讨论其机理. 图 4 为在 PMMA 中记录 10 层数据位时的各层透射图像和各层数据位折

射率对比度变化趋势. 此时, 相对于 5 层光存储, 位点的清晰度及其折射率对比度的增加趋势更明显. 其中出现的误差 (如第 2 层) 可能是由于激光器的不稳定性或照明采集时的误差引起的.

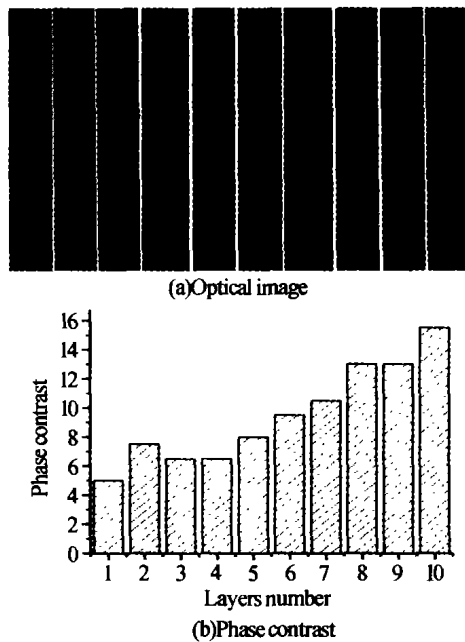


图 4 利用飞秒激光脉冲在 PMMA 中记录的 10 层数据位点和各层的对比度变化

Fig. 4 Optical image and phase contrast change of the 10 bits planes written inside PMMA

在我们的实验中, 写入 15 层数据位点阵列后得到的数据位的对比度变化规律与 10 层的相同, 但此时其内层数据位的清晰度及对比度较 10 层时略有下降, 但依然能够分辨. 为了提高三维透明介质的利用率, 更限度地在介质中存储信息, 写入更多的数据位层是首选方法之一. 但是, 在这种情况下, 对于内层数据位的读出可能会产生影响. 图 5 为在 PMMA 中写入 15 层数据位点阵列时的各层透射图像及各层相位对比读出的对比度, 图 6(a) 为其对应的数据位折射率对比度变化趋势, 此时可以看出, 介质

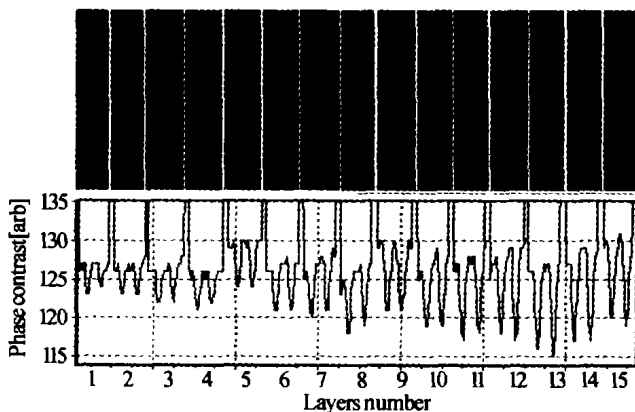


图 5 利用 32nJ150fs 的近红外激光脉冲在 PMMA 内部记录的 15 层数据位及其相位对比读出的对比度

Fig. 5 [Top] optical image and [bottom] phase contrast of phase contrast read-out of the 15 bits planes written inside PMMA using 32nJ, 150fs near-infrared femtosecond laser pulse

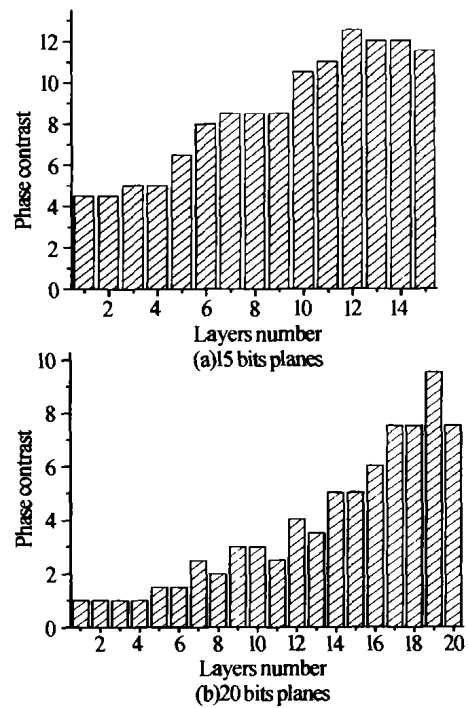


图 6 飞秒激光在 PMMA 中记录的 15 层和 20 层数据位时的各层对比度

Fig. 6 The phase contrast of 15 bits planes and 20 bits planes written inside PMMA using femtosecond laser

中最内部几层的位点已难以分辨, 各层的对比度相对于 5 层或 10 层的对比度已有明显下降. 但在整体上, PMMA 的各层对比度由内层至外层逐渐增加.

我们每次写入的面积是 $2 \times 1 \text{ mm}^2$ 大小, 第一层距离表面的深度都是 $245 \mu\text{m}$, 最后一层距离表面 $45 \mu\text{m}$. 每次记录 5 层以后我们用连接在 CCD 上的数据采集卡按从内到外的顺序采集一组数据, 分别记录下来. 图 6(b) 就是在 PMMA 中记录 20 层后各层的对比度, 与图 3 和图 4 相比, 前 4 层的对比度变得很差; 相反最后 5 层非常清楚, 和图 3 的对比度差别不大 (图 3(a) 中平均对比度为 9.6; 图 6(b) 最后 5 层的对比度大约为 8). 这是由相位对比成像原理决定的. 最底层的相位对比信号经过一系列折射率变化区域后, 相位对比下降, 读出图像模糊; 最上层的相位对比图像不会遭遇到相位对比畸变, 因此图像清晰.

与 15 层以下的情况不同, 利用飞秒激光脉冲在 PMMA 内部和熔融石英内部读出的 20 层的对比度有明显的差异. 通过 X 射线衍射技术发现, 飞秒激光照射过的石英玻璃的 X 射线衍射峰没有变化, 但衍射峰的宽度明显增加; 进一步用双折射显微测量发现, 在飞秒激光记录的数据点周围存在明显的双折射现象. 这主要是熔融石英微爆时产生的应力造成的. Streltsov 等^[4] 测量了飞秒激光作用在透明介质内部的温度, 结果表明, 焦点处温度的增加与入射激光脉冲能量基本呈线性关系. 由于 PMMA 的阈值只有熔融石英的 25%, 熔融石英内部的残余应

力要比 PMMA 内严重,双折射的存在降低了相位对比度读出的对比度.

3 结论

本文利用超短脉冲激光在 PMMA 和熔融石英中进行了多层三维光数据存储的实验研究,在每个数据位上经过微爆,在局部产生了一个亚微米尺度的具有高折射率的微结构.分析了各层数据位的折射率对比度变化趋势.结果表明:各层数据位的折射率对比度由内层到外层依次增加,记录层数越多,其内部层的对比度下降越明显.这为飞秒激光三维光数据存储提供了一种并行读出方式.

参考文献

- 1 Cheng Guanghua, Whiter J D, Liu Qing, *et al.* Microstructure on surface of $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ induced by a single ultra-short laser pulse. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**(8):1283 ~ 1285
- 2 Jiang Zhongwei, Zhou Yongjun, Yuan Dajun, *et al.* A two-photon femtosecond laser system for three-dimensional microfabrication and data storage. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**(12):2126 ~ 2129
- 3 Cheng Guanghua, Liu Qing, Wang Yishan, *et al.* Writing of internal gratings in optical glass with a femtosecond laser. *Sb Chin Opt Lett*, 2004, **2**(2):119 ~ 121
- 4 Surtsov A M, Borrelli N F. Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses. *JOSA (B)*, 2002, **19**(20):2496 ~ 2504
- 5 Gemert M J C, Welch A J. Clinical use of laser-tissue interactions. *IEEE Eng Medicine and Biol*, 1989, **8**(4):10 ~ 13
- 6 Cheng Guanghua, Wang Yishan, Whiter J D, *et al.* Demonstration of high-density three-dimensional storage in fused silica by femtosecond laser pulses. *J of Appl Phys*, 2003, **94**(3):1304 ~ 1307
- 7 刘青,程光华,王屹山,等.非秒脉冲在透明材料中的三维光存储及其机理.光子学报,2003,**32**(3):276 ~ 279
Liu Q, Cheng G H, Wang Y S, *et al.* *Acta Photonic Sinica*, 2003, **32**(3):276 ~ 279
- 8 程光华,刘青,王屹山,等.非秒激光脉冲诱导介质的非线性吸收和折射率改变轮廓研究.光子学报,2003,**32**(11):1281 ~ 1284
Cheng G H, Liu Q, Wang Y S, *et al.* *Acta Photonic Sinica*, 2003, **32**(11):1281 ~ 1284
- 9 程光华,王屹山,刘青,等.用非秒激光脉冲在 PMMA 内页面式写入三维光存储的研究.物理学报,2004,**53**(2):283 ~ 287
Cheng G H, Wang Y S, Liu Q, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2):283 ~ 287
- 10 Cheng Guanghua, Yu Lianjun, Wang Yishan, *et al.* Without stretcher and compact Ti:sapphire femtosecond pulse amplifier at high repetition rate. *Chin Opt Lett*, 2003, **1**(4):256 ~ 258

Experimental Study of Phase Contrast Reading out of Three-dimensional Optical Data Storage

Ma Liangcai^{1,2}, Cheng Guanghua¹, Liu Qing¹, Wang Yishan¹, Yu Lianjun¹,
Zhao Wei¹, Miao Runcai², Chen Guofu¹

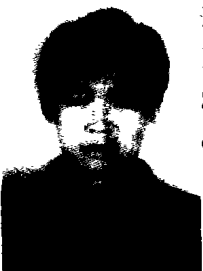
1 State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Collage of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062

Received date:2004-05-12

Abstract Three-dimensional optical data storage in PMMA (poly methyl metacrylate) and fused silica is demonstrated by a chirped amplified femtosecond laser pulses at 800 nm, 150 fs, 1 kHz repetition rate. The writing and reading of the bits in 5, 10, 15 and 20 layers are presented. The signal/noise ratio (S/N) of multi-layers bits reading by a phase contrast optical microscope is analyzed experimentally and the phase contrast change of each bits plane is given. The results show that the phase contrast of each layer increases monotonously from interior to surface of the sample, and the contrast of the interior bits planes will be decreased as the number of written layers increased. Due to residual stress in the interaction between femtosecond laser pulse and fused silica, PMMA is more suitable for 3-D optical storage with femtosecond laser pulse.

Keywords Three-dimensional optical storage; Femtosecond pulse; PMMA; Fused silica; Contrast



Ma Liangcai was born in 1979, and received his B. S. degree from Collage of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University in 2002. Now he is currently working as a M. S. candidate at the same university. His research interests are laser material processing and three dimension optical data storage.