

用飞秒激光脉冲在 PMMA 内页面式写入 三维光存储的研究*

程光华[†] 王屹山 刘 青 赵 卫 陈国夫

(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)

(2003 年 2 月 10 日收到, 2003 年 5 月 21 日收到修改稿)

用微透镜阵列聚焦放大的钛宝石飞秒激光脉冲到 PMMA 内部, 在每个微透镜的焦点处造成光学损伤, 通过改变焦点的位置, 实现了三维数据的写入, 用 800 μJ 1 kHz 重复率的飞秒激光记录速度达到 20Mbit/s. 阐述了数据信息的调制、写入和读出, 分析了微透镜阵列参数对存储密度、数据记录速度和能量阈值的影响, 建议了提高存储密度的两种有效途径.

关键词: 三维光存储, 微透镜阵列, 飞秒激光, PMMA

PACC: 4230N, 4278C, 4262A, 4280W

1. 引 言

飞秒脉冲激光可以准确地将能量沉积在透明介质内部, 导致介质折射率的改变. 折射率改变面积可以远小于入射激光波长的衍射极限, 这使飞秒激光在超精细加工和材料处理等方面有广阔的应用前景^[1]. 相对于长脉冲和连续激光, 超短激光脉冲几乎不会在焦点区域以外的地方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化学结构. 利用这些特性, 在各种透明介质表面或内部制作纳米点^[2]、光波导器件, 衍射元件已有非常多的报道^[3]. 用飞秒激光在透明介质(如石英玻璃等)内可以实现高密度的三维光存储^[4], 但由于玻璃的损伤阈值比较高(200nJ, 用 0.65NA 的物镜聚焦), 只能用飞秒放大器来实现, 而飞秒放大器的重复率很低(最高 200kHz 左右), 因此, 存储速度非常慢. PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)的损伤阈值低, 能用飞秒振荡器来实现三维光存储, 但需要极高数值孔径的物镜(如 1.3NA).

我们首次报道了用微透镜阵列聚焦放大的钛宝石飞秒激光脉冲到 PMMA 内部, 实现了高存储速度的三维光存储. 用 800 μJ 1kHz 重复率的飞秒激光记录速度达到 20Mbit/s. 进一步的改进, 可以实现 Tbit/

cm^3 存储密度和更高记录速度(10^2 M bit/s). 信号的调制可以用空间光调制器, 数据的读出可以用价格低廉的 CCD 并行读出.

2. 实验方法

实验中采用的激光光源是钛宝石激光再生放大器(Spitfire-F, Spectra-Physics), 波长为 800nm, 脉冲宽度为 100fs, 重复频率 0—1000Hz 可调, 平均功率 800mW, 具有手动触发功能. 实验装置如图 1 所示, 由于从飞秒再生放大器输出的光脉冲是垂直偏振的, 因此可以用一个偏振片来调节入射到样品上的能量. 再加入两个共焦的微透镜阵列, 将高斯分布的光束变成光强均匀分布的“帽形”光束, 不用类空间光滤波器(加针孔)的方法是为了避免单透镜组合导致的空气电离, 再用一个微透镜阵列(单透镜大小为 $120\mu\text{m} \times 120\mu\text{m}$, 焦距为 $200\mu\text{m}$, 总面积为 $10 \times 10\text{mm}^2$)^[5]将光束聚焦到 PMMA 内部. PMMA 记录介质固定在一个高精度计算机控制三维移动平台(X 方向 100nm/步, Y 方向 125nm/步, Z 方向 7nm; PI Inc Germany). 普通光学显微镜连接高分辨率数码相机用来记录图像.

图 2 是页面式写入三维光存储的原理图, 高质量的微透镜每个小透镜有几乎相同的曲率半径, 焦

* 中国科学院知识创新工程方向性项目基金资助的课题.

[†]E-mail: Guanghuacheng@163.com

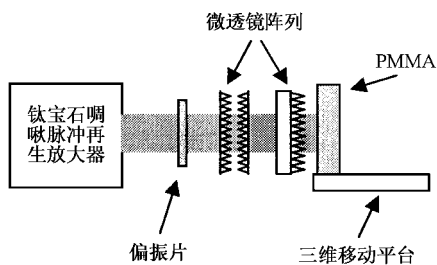


图 1 用微透镜阵列聚集飞秒激光脉冲在 PMMA 内部实现并行写入三维光存储的实验装置示意图

点在同一个平面内,形成焦平面.小透镜的直径和焦距决定其光学特性,对 F 值($F = f/D$, f 是小透镜焦距, D 是小透镜直径)相同的微透镜阵列,透镜的直径越小像差也越小,但尺寸太小对微透镜的组合、封装及光轴同轴度的校准要求较高,信息技术上常用的微透镜阵列单透镜的大小都在 $100\mu\text{m}$ 左右.我们特别制作了单透镜直径为 $60\mu\text{m}$ 焦距为 $100\mu\text{m}$ 的微透镜阵列,用来聚焦飞秒激光脉冲到存储介质内,而用于改善光束分布的是直径为 $120\mu\text{m}$,焦距为 $200\mu\text{m}$ 的微透镜阵列对.

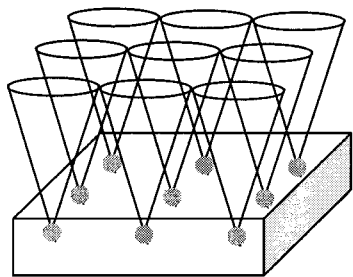


图 2 用微透镜阵列实现并行写入光数据存储示意图

图 3 是一个 $800\mu\text{J}$ 的激发脉冲形成的一个总直径约为 6mm 的一个点阵的一小片照片,用显微镜上的叉丝估测了点与点的间距,和微透镜阵列的间距一样,大约为 $60\mu\text{m}$,与微透镜阵列中单透镜的间距一致.点离表面大约 $30\mu\text{m}$,由于激发能量太大,形成了严重的损伤,甚至导致了爆裂(如图 3(a)所示),每个点的大小为 $20\mu\text{m}$.通过旋转偏振片,减小入射能量到 $600\mu\text{J}$,裂纹消失,但点的大小并没有减小(图 3(b)),甚至比 $800\mu\text{J}$ 入射时的点还要大,可能是由于入射能量太大,脉冲前沿就已经导致 PMMA 产生光学损伤,后续的脉冲被强烈的散射的缘故(实验表明光学损伤在 100fs 之内发生^[6]).继续减小能量到 $500\mu\text{J}$,点的直径减小到 $20\mu\text{m}$,如图 3(c)所示.当脉

冲能量减小到 $400\mu\text{J}$ 时,点的直径约 $8\mu\text{m}$;此时,误码也比较低.当入射能量小于 $400\mu\text{J}$ 时,折射率的对比度迅速减小,用光学显微镜难以分辨,衍射法也难以探测到衍射模式.我们以 $400\mu\text{J}$ 为入射阈值,每一个点的能量阈值为 40nJ .依次计算,一个单脉冲能量 $800\mu\text{J}$ 的飞秒激光脉冲,就能形成 2×10^4 个点;对 1kHz 飞秒激光系统来说,记录速度可以达到 20Mbit/s .如果采用像散更小的微透镜阵列,点的直径会更小,阈值会更低.

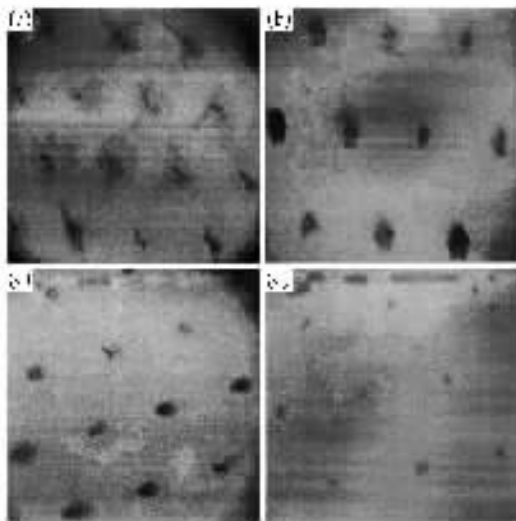


图 3 用微透镜阵列聚集飞秒激光脉冲在 PMMA 内部记录的点阵.入射脉冲能量分别为(a) $800\mu\text{J}$ (b) $600\mu\text{J}$ (c) $500\mu\text{J}$ (d) $400\mu\text{J}$

通过移动存储介质和透镜之间的间距,就可以改变记录点的位置,沿着激光入射的方向,记录介质到微透镜阵列的距离每次移动 $10\mu\text{m}$,在 PMMA 内部记录了 3 层点阵,由于自聚焦和光学器件的原因(我们在微透镜基片的周围和 PMMA 之间加入一些纸片,以避免将微透镜表面损伤),点阵距离表面只有 $40\mu\text{m}$ 左右.采用焦距长一些的微透镜阵列,或减小微透镜阵列与记录介质间的距离,都可以得到更多的记录层数.

这种三维光存储的数据信号调制可以通过尺寸与微透镜阵列单透镜大小相同的空间光调制器来实现数据信息的写入,采用与目前光盘编码相同的相位编码方式.如图 4 所示,准直的写入光束通过矩形孔(RH),光束截面变为矩形;光束通过加载数据信息的空间光调制器(SLM)后,经过微透镜阵列(MLA)聚焦到记录介质内部.利用光化学 BR 膜数据记录系统^[7]附加微透镜阵列就可以实现二进制数

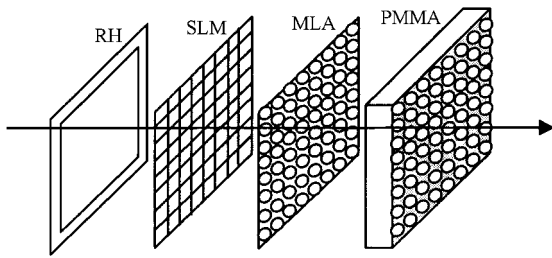


图4 用空间光调制器(SLM)实现二进制数据并行写入示意图
MLA为微透镜阵列,RH为矩形孔

据的写入;用准直的白光照明,用数字CCD可以方便地实现信息的高速读出;而且,整个系统容易实现集成化。

3. 讨 论

图5是用数值孔径为1.2NA的物镜聚焦70fs 8nJ激光脉冲在PMMA表面,导致的热熔(图5(a)和(b))和气化(c)。图5(a)是以 $500\mu\text{m/s}$ 的速度在PMMA表面扫描形成的热熔层,被放大200倍的像,图5(b)是图5(a)放大400倍的像。图5和图3在对比上有明显的差别:图3中点呈黑色,而图5中的热融化区域并不是黑色,只有在较长时间曝光下,在融化区域的边沿有黑色的痕迹(图5(c))。导致有机物,如树脂、PMMA等的光学损伤主要是热效应,温度超过 250°C 时,PMMA就会发生化学解离^[8],而对一般透明材料,在紧聚焦下,双光子吸收一个2nJ的飞秒脉冲会导致 100°C 的升温^[19],40nJ的飞秒激光脉冲在PMMA内部引起的热效应完全可以解离PMMA分子。这种光化学解离导致了材料结构的变化,不可恢复的光学损伤;而且与融化不同,它具有很高的相位对比度。

根据上面的分析可知,在材料的软化温度以下,飞秒激光在透明介质如玻璃、树脂、PMMA内诱导微爆导致材料结构变化是相当稳定的,因此它可以实现长寿命的数据存储,这是信息记录最为关键的因素之一。作为只读光盘,与全息光盘相比,数据传输速度、存储密度相当;但由于全息存储介质存在光伏效应等原因^[10],稳定性较差,基于微爆机理的三维数据存储在使用寿命方面具有明显的优势,而且有机光致变色数据存储,由于记录速度太慢,离实用化还有相当的距离^[11]。由于纳米管的生产、操作、定位等问题,基于纳米技术的数据存储还面临着很大的

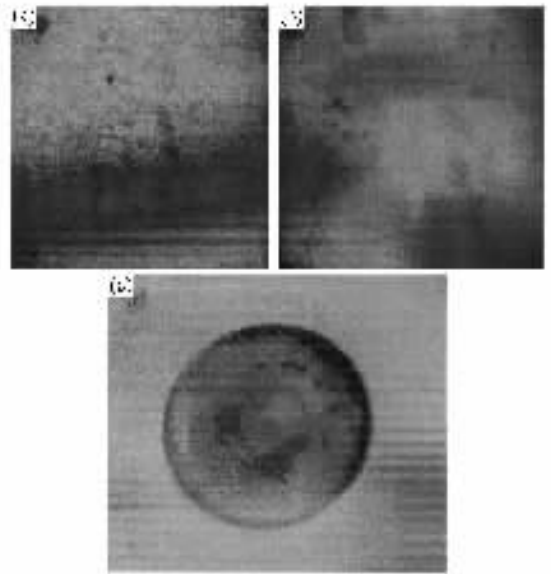


图5 纳焦飞秒激光脉冲在PMMA表面的损伤形态(a)和(b)是放大倍数为200倍和400倍的融化带(c)为多个飞秒激光脉冲产生的融化坑

技术障碍^[12]。随着飞秒激光技术的迅速发展,锁模半导体激光器和飞秒光纤激光器、放大器的出现将提供价格较低廉的光源,以及飞秒光存储具有超高存储密度,并行写入、读出的优点,作为只读光盘,最有可能在不久的将来实现实用化。

进一步提高存储密度的方法有两种,第一种是用单透镜更小的微透镜阵列聚焦飞秒脉冲,比如,单透镜为 $10\mu\text{m}$ 的微透镜阵列可以使存储密度提高到 $1\text{G}/\text{cm}^3$ 。实际上,目前微透镜阵列中单透镜的大小可以做到 $2\mu\text{m}$ ^[13,14],而且具有好的光学表面和小的像差。最近,Denk等人^[15]报道了用单透镜直径为 $6\mu\text{m}$ 的微透镜阵列聚焦514nm的连续激光实现金属薄膜表面刻蚀。第二种方法就是采用交叉多次曝光的方法,以单透镜间距 $20\mu\text{m}$ 为例,第一次曝光后,垂直于光束移动(X方向)记录介质 $10\mu\text{m}$,再曝光一次,存储密度增加一倍。再沿Y方向移动 $10\mu\text{m}$ 曝光一次,存储密度就可以增加2倍。虽然沿x和y方向扫描会导致图像彼此交叠,但可以通过写入时的数据编码预处理将每个页面的内容和实际内容一致,以实现读出的分离,更好地控制激光束和选用质量更好的微透镜阵列(如离子交换法制作的微透镜阵列)也可以减小PMMA的损伤阈值,联合这两种方法,存储速度和密度都可以得到大幅度的增加。

用微透镜聚焦进行三维点阵的记录,点间距由微透镜的特征(小透镜间距)决定,本实验中所用的

透镜直径比较大,因此存储密度只有 $0.27\text{Gbit}/\text{cm}^3$ ($60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$)。最近 Straub 等^[8]用高数值孔径的物镜聚焦飞秒激光脉冲在树脂上用扫描的方法记录约 40 层点阵,点间距 $2.25\mu\text{m} \times 2.25\mu\text{m} \times 0.5\mu\text{m}$,依此计算,存储密度达到 $1.28\text{Tbit}/\text{cm}^3$ 。由此看来,无论是从存储机理还是从存储材料来讲,这种三维光数据存储方式都可以实现高传输速率、高存储密度和高稳定性的信息记录方式。

另外,这里讨论的用微透镜阵列聚焦光束来刻写光盘的原理还可以用于其他的三维光存储系统之中,如 Daniel Day 等^[16]用数值孔径 $\text{NA} = 0.8$ 的物镜聚焦 34mW 的光束在 PMMA 中逐点式记录数据,存储速度不到 $1000\text{bit}/\text{s}$,而激光器可以输出 2W (Tsunami, Spectra Physics)飞秒脉冲,如果用微透镜阵列聚焦,其速度可以提高约 60 倍。

4. 结 论

用微透镜阵列聚焦高功率飞秒激光脉冲在树脂

或 PMMA 上,可以实现高速写入,高密度光学数据存储。数据的调制可以通过选用与微透镜阵列相匹配的空间光调制器,每个小透镜和空间光调制器的像素精密对齐,同样,存储的数据用 CCD 并行读出,其速度可以达到 Gbit/s 。通过光刻胶制作的微透镜阵列像散比较大,透光性能不好,激光损伤阈值也比较低。如果选用离子交换或离子刻蚀制作的微透镜,由于其像散小,能把光束聚焦的更小,存储密度可以提高几个数量级,这种工艺制作的微透镜阵列一般在石英玻璃内部或表面,损伤阈值高,透过性能好,直径可以小到几个微米,因此选用质量更好的微透镜,不仅可以降低诱导存储介质改变的阈值,还可以提高数据存储密度,这些工作目前还在进行中。其次,用该技术还可以在透明介质内制作各种点阵式的光学元件。

[1] Strltsov A M and Borrelli N F 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2496
 [2] Kawamura K *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 1228
 [3] Glezer E N and Mazur E 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 882
 [4] Glezer E N *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 2023
 [5] Cui S 2002 *Acta. Photonic Sin.* **31** 769(in Chinese) [崔 崧 2002 光子学报 **31** 769]
 [6] Jeschke H O 2002 *Appl. Surf. Sci.* **8120** 1
 [7] Yao B *et al* 2002 *SPIE* **4930** 64
 [8] Straub M and Gu M 2002 *Opt. Lett.* **27** 1824
 [9] Yamasaki K *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1000

[10] Liu Y W and Liu L R 2000 *Acta. Phys. Sin.* **49** 880(in Chinese) [刘友文、刘立人 2000 物理学报 **49** 880]
 [11] Yao H W 2001 *Progress in Physics* **21** 459 (in Chinese) [姚华文 2001 物理学进展 **21** 459]
 [12] Sun J P and Wang T H 2002 *Acta. Phys. Sin.* **51** 2096(in Chinese) [孙劲鹏、王太宏 2002 物理学报 **51** 2096]
 [13] Moon S and Bu J 2002 *Opt. Eng.* **41** 2269
 [14] Hartmann D M *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 975
 [15] Denk R *et al* 2003 *Appl. Phys. A* **76** 549
 [16] Daniel Day and Min Gu 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2404

Study of three-dimensional storage by parallel writing in PMMA with femtosecond laser pulses^{*}

Cheng Guang-Hua[†] Wang Yi-Shan Liu Qin Zhao Wei Chen Guo-Fu

(*State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068 China*)

(Received 10 February 2003; revised manuscript received 21 May 2003)

Abstract

Using a microlens array to focus an amplified femtosecond laser pulse inside a bulk PMMA (polymethyl methacrylate), optical breakdown occurs at each focus of the microlenses. By changing the positions of the foci, we realize the three-dimensional optical recording of high contrast bits at a speed of 20Mbit/s (with a 1kHz fs pulse laser) in PMMA. Accordingly, modulation and readout of binary data have been presented. The diameter, focus length, and lens aberration in the microlenses are key factors which affect the recording speed and optical capacity based on this mechanism. Two kinds of effective ways to increase the capacity are discussed in this paper.

Keywords : three-dimensional optical data storage, microlens arrays, femtosecond laser pulse, PMMA

PACC : 4230N, 4278C, 4262A, 4280W

^{*} Project supported by the Knowledge innovation Foundation of Chinese Academy of Sciences.

[†]E-mail :Guanghuacheng@163.com