

引用格式: WANG Lin, FAN Hua, LI Zhenze, et al. Fabrication of Time Capsules by Femtosecond Laser-induced Birefringence (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0650105

王琳,樊华,李臻贇,等.基于飞秒激光诱导双折射效应的时胶囊的制备(特邀)[J].光子学报,2021,50(6):0650105

# 基于飞秒激光诱导双折射效应的时胶囊的制备(特邀)

王琳<sup>1</sup>,樊华<sup>2</sup>,李臻贇<sup>1</sup>,王熠<sup>2</sup>,胥亦实<sup>1</sup>,王磊<sup>1</sup>,陈岐岱<sup>1</sup>

(1 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130012)

(2 清华大学 精密仪器系, 北京 100000)

**摘要:**利用双折射显微镜和光学显微镜研究了飞秒激光石英材料内部诱导的双折射效应。结果表明,双折射的光学延迟量随脉冲数的增加而增加,并出现两种双折射结构。其中 Type X 结构需要至少 20 个脉冲,单脉冲能量不高于 854 nJ,脉冲宽度不低于 300 fs 且不高于 600 fs。此外,以“光子学报”等汉字为例,阐述了激光诱导双折射的数据存储过程,制备了包涵吉林省省史省情、吉林大学校史、清华大学校史的数据存储时胶囊样品。

**关键词:**超快激光;光存储;超快激光加工;双折射效应;数据存储

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215006.0650105

## Fabrication of Time Capsules by Femtosecond Laser-induced Birefringence(Invited)

WANG Lin<sup>1</sup>, FAN Hua<sup>2</sup>, LI Zhenze<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, XU Yishi<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, CHEN Qidai<sup>1</sup>

(1 College of Electronic Science&Engineering, Jilin University, Changchun, 130012, China)

(2 Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, 100000, China)

**Abstract:** Femtosecond laser-induced birefringent voxels were explored by using birefringent microscope and optical microscope. It shows that the retardance increases as the pulse number increases. Two types of structures are found. Type X structures require at least 20 pulses and single pulse energy no more than 854 nJ. More, the pulse duration must limited between 300 fs and 600 fs. Additionally, the data storage process is presented by taking Chinese characters of "Acta Photonica Sinica" as example. Time capsules containing the history of Jilin Province, the history of Jilin University, and the history of Tsinghua University are prepared.

**Key words:** Ultrafast lasers; Optical storage; Ultrafast lasers processing; Birefringence effects; Data storage

**OCIS Codes:** 140.3430; 210.4770; 140.3390

## 0 引言

纵观人类发展史,人类对信息的记录和存储经历了从绘画、雕刻、印刷等直接记录的存储方式到磁盘、

基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFB1104600)

第一作者:王琳(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为飞秒激光永久光存储。Email: wanglin\_jlu@163.com

导师:陈岐岱(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为飞秒激光加工的器件功能化、加工效率提升和走向实用化。Email: chenqd@jlu.edu.cn

通讯作者:王磊(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为飞秒激光永久光存储方面的研究。Email: leiwang1987@jlu.edu.cn

收稿日期:2021-04-15;录用日期:2021-06-02

<http://www.photon.ac.cn>

光盘、大数据中心等数字化存储方式的演变<sup>[1]</sup>。其中,采用二进制存储数据的光盘(optical Compact Discs, CDs)的发明是数字化信息存储领域的一个重大进步,它将数据存储容量提高到了650~700 MB,存储寿命延长至2~10年<sup>[2]</sup>。随后,DVD的发明进一步将存储容量提高至4.7 GB/层,存储寿命可达20年。近十年来,随着物联网、云计算、人工智能为代表的关键技术的发展,人们需要存储的数据正呈现爆炸式增长<sup>[3-4]</sup>。研究表明,到2025年全球数据量将会从2018年的33 ZB上升至175 ZB<sup>[5]</sup>。PB(Peta Byte,千万亿字节,拍字节)甚至EB(Exa Byte,百亿亿字节,艾字节)容量的大数据中心纷纷建立,耗电量达到了全球发电量的1%~1.5%,每5~10年的数据刷新也在呈指数级增长。由此可见,传统的数据存储方式已经难以满足人们存储大量数据的需求。发展新型的高存储容量、长寿命存储媒介已经成为大数据存储方式的迫切需求<sup>[6]</sup>。

从二维到三维、从有机材料到无机材料,是实现上述目标的重要途径。1976年,人们利用染料激光器首次实现了飞秒激光脉冲输出<sup>[7]</sup>,飞秒激光由于其脉冲宽度极短,可以达到极高的峰值功率,因此在其与物质相互作用时,非热效应占据主导地位,可以实现真正的“冷加工”<sup>[8]</sup>。与传统的激光加工方式相比,飞秒激光加工具有精度高、热扩散范围小等优势,因此能够实现超高精度的微米级、纳米级三维加工<sup>[9-15]</sup>。

飞秒激光加工技术的发展使永久光存储技术成为可能。利用飞秒激光诱导透明介质内部产生纳米光栅<sup>[16-20]</sup>,通过调节不同的激光偏振方向、脉冲能量等参数可以实现多维的数据编码<sup>[21]</sup>,即多维永久光存储<sup>[22-24]</sup>。与传统的光存储技术相比,飞秒激光光存储具有存储密度高(理论上可以达到300 TB)、对环境承受能力高等优势。然而,飞秒激光诱导的纳米光栅由于其周期性的波动,所以具有透过率低的缺点<sup>[25-26]</sup>,这将导致它具有一定的散射损耗,这将对光存储中数据的写入和无损读出产生不利影响。

当飞秒激光聚焦到石英玻璃内部使其发生改性时,通过调控激光脉冲能量,可以获得三种不同类型的结构:1)当脉冲能量较低时,飞秒激光聚焦区域产生热作用,当热作用消失时材料会快速冷却,发生收缩,这会导致激光作用区域中心发生材料的致密化,会导致材料的折射率上升,进而产生一种各向同性改性(Type I 结构)。Type I 结构产生的同时伴随着折射率的改变,通常其该变量约为 $10^{-3}$ 量级,因此也经常应用于飞秒激光直写光波导,或是折射/衍射元件等领域。2)当脉冲能量较高时,可以产生一种高损耗的各向异性改性(Type II 结构),即纳米光栅;纳米光栅周期通常远小于入射激光波长且光栅取向垂直于偏振,根据等效介质理论,其具有一个形式双折射,因此可以视为一种飞秒激光在石英内部产生的各向异性改性,但是因为通常制备的Type II结构形貌质量都较差,其对光的散射也较强,因此不利于制备高效率的光学元件。3)当脉冲能量介于两者之间时,可以产生一种低损耗的各向异性改性(Type X结构)<sup>[27]</sup>;这种Type X结构,表现为在激光聚焦区域随机分布,但略微沿着垂直于偏振方向拉伸的纳米孔的集合。每个纳米孔的尺寸非常小,满足瑞利散射定律,因此具有非常小的损耗。将这种超低损耗的Type X结构代替纳米光栅应用到飞秒激光多维光存储技术中,可以显著改善上文提到的散射损耗的问题,有利于提高数据读取精度和存储密度。

本文系统地研究了Type X结构形成过程中的影响因素,探究了Type X结构和Type II结构各自的产生条件,并成功地将Type X结构应用于五维光存储,制作了一些基于飞秒激光诱导双折射效应的时间胶囊样品。

## 1 实验装置和方法

实验所用光源是飞秒激光器(Amplitude Systems 33600 Pessac France Satsuma HP<sup>2</sup>),它可以产生中心波长为1 030 nm、重复频率为500 kHz的高斯激光脉冲序列。图1为实验装置示意图,激光器输出的飞秒激光经扩束后,首先通过二分之一波片,变为偏振角度确定的偏振光,然后经格兰棱镜选偏得到线偏振光,再依次通过普克尔盒和四分之一波片,实现对激光偏振方向的实时调控,得到特定偏振方向的线偏振光,并由数值孔径NA=0.16的物镜聚焦到样品内部,实现对样品的改性。

实验中使用的样品为25.4 mm×25.4 mm×2 mm的石英玻璃片,样品固定在Aerotech三维电动位移平台上,通过计算机软件控制平台的移动,实验过程中,通过电荷耦合器件CCD实时观察加工情况。

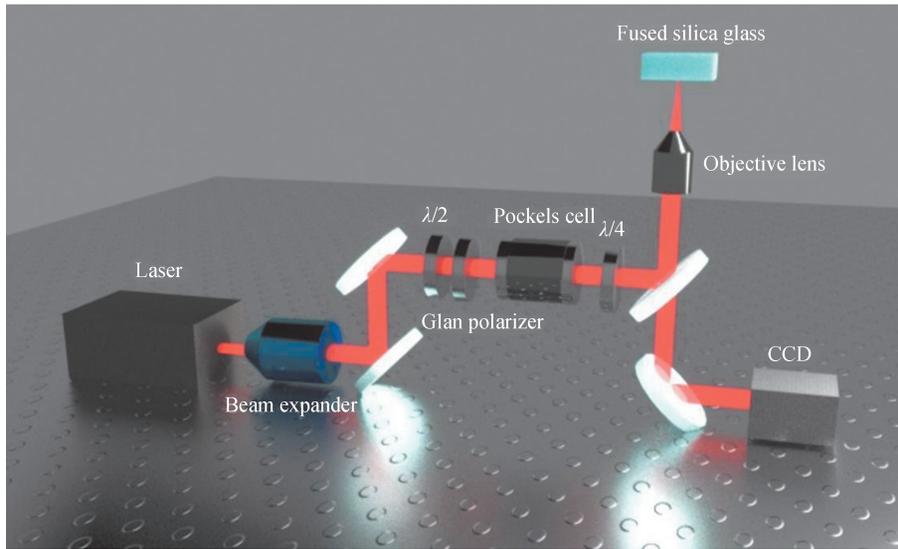


图1 实验装置示意图  
Fig.1 Schematic of the experiment setup

## 2 Type X结构的产生条件

激光的参数和所用物镜的参数会影响 Type X 结构的形成。为此,分别改变入射激光的单脉冲能量、脉冲数以及脉冲宽度,得到了不同类型的结构,利用光学显微镜及双折射显微镜表征了结构的双折射效应,探索了 Type X 结构的形成条件。

### 2.1 Type X 结构随单脉冲能量、脉冲数的演变情况

利用数值孔径  $NA=0.16$  的物镜,脉冲宽度为 500 fs 的激光,改变脉冲激光的单脉冲能量和脉冲数,在石英玻璃内部深度为  $200\ \mu\text{m}$  处制作了不同类型的纳米孔结构。得到的纳米孔结构在双折射显微镜下观察到的图像如图 2 所示,其中,每 16 个点为一组,沿着横向将单脉冲能量从 470 nJ 增加到 1 010 nJ,沿着纵向将激光脉冲数从 10 增加到 300,图中不同颜色对应不同的慢轴方向,即激光偏振方向,不同亮度对应不同的光学延迟量(retardance)。

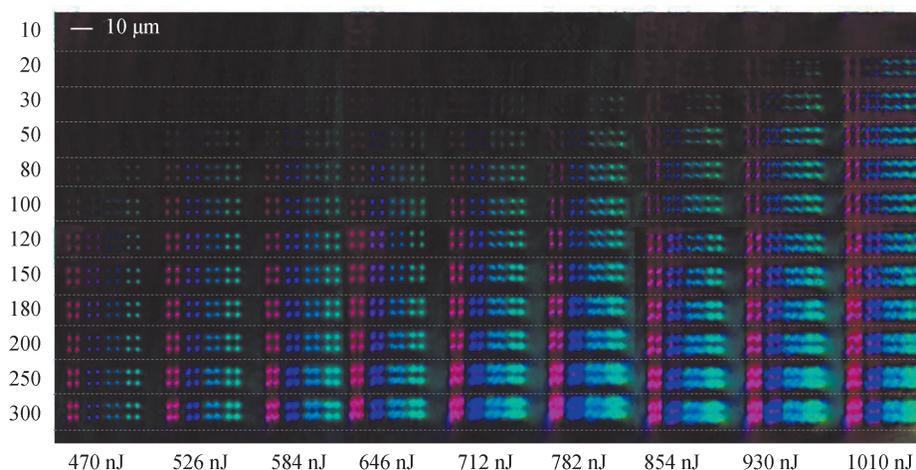


图2 Type X 结构随单脉冲能量、脉冲数的演变(双折射显微镜)  
Fig.2 Evolution of Type X structure with pulse energy and pulse number (birefringence microscope)

从图 2 可以看出,激光的脉冲数越多,结构的 retardance 越大,单脉冲能量越高,结构的 retardance 越大,且激光偏振方向不同,所产生纳米孔的 retardance 大小也不相同。当单脉冲能量为 470 nJ 时,产生 Type X 结构所需的最低脉冲数为 50,而当单脉冲能量达到 930 nJ 以上时,脉冲数为 20 以上就可以产生 Type X 结构。

脉冲数较低时,每个纳米孔的尺寸较小,随着脉冲数的增加,纳米孔尺寸变大,各纳米孔之间会发生串扰,此外,随着单脉冲能量增加,也会出现这种串扰情况,当单脉冲能量增加到 930 nJ 时,纳米孔之间会发生严重串扰,此时几乎没有 Type X 结构出现。

Type X 结构和 Type II 结构都具有双折射效应,所以在双折射显微镜下二者都能观察到,而 Type X 结构的透过率远高于 Type II 结构,故在光学显微镜下能够观察到 Type II 结构,但观察不到 Type X 结构。我们可以利用这种特性来区分 Type X 结构和 Type II 结构。将同一结构的双折射显微镜图像(图 2)与其光学显微镜图像(图 3)作对比,划分出 Type X 结构和 Type II 结构的范围,图 3 中白色虚线右侧为 Type II 结构,而虚线左侧的结构在双折射显微镜下能看到,在光学显微镜下看不到,为 Type X 结构。

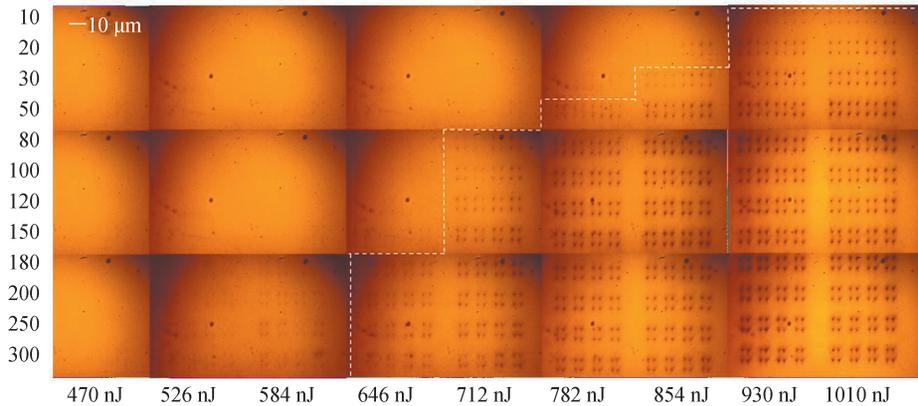


图 3 Type X 结构随单脉冲能量、脉冲数的演变(光学显微镜)

Fig.3 Evolution of Type X structure with pulse energy and pulse number (optical microscope)

测得了纳米孔结构的 retardance 随激光单脉冲能量及脉冲数的定量变化关系如图 4 所示,单脉冲能量越大,结构的 retardance 越大;脉冲数越多,结构的 retardance 也越大。图 4 中绿色阴影区域为 Type II 结构。单脉冲能量 470 nJ 时,retardance 随脉冲数的增加呈缓慢增长,变化较为平缓,此时脉冲数为 50 到 300 对应的都是 Type X 结构。当单脉冲能量增加到 526 nJ 以上,随着脉冲数的增加,结构的 retardance 显著增大,双折射效应显著增强,将有 Type II 结构产生。其中,单脉冲能量为 526 nJ,脉冲数为 210 时的测量结果与整体趋势相差较大,推测是由于样品表面有污垢、双折射显微镜的背景噪声去除不彻底等因素导致了测量误差。

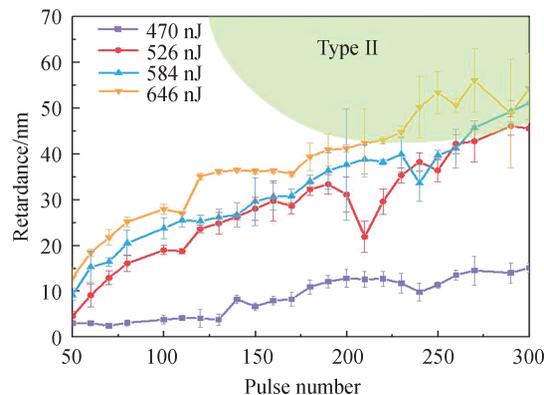


图 4 Retardance 随单脉冲能量及脉冲数的演变

Fig.4 Evolution of retardance with pulse energy and pulse number

从图中可以看出 Type X 结构最高的 retardance 约为 40 nm,由物镜的参数可以估算出焦点的长度  $L$  约为 50  $\mu\text{m}$ , 根据  $\text{retardance} = \Delta n \times L$ , 可估算出 Type X 的最大的双折射约为  $8 \times 10^{-4}$ 。一旦双折射大于这一数值,材料本身的属性即会改变为 Type II 的纳米光栅结构,这将大大加深对飞秒激光诱导的双折射现象的认识。

## 2.2 Type X 结构随脉冲宽度的演变情况

除了单脉冲能量、脉冲数以外,激光的脉冲宽度也会影响 Type X 结构的形成。分别在激光脉冲宽度为 400 fs、450 fs、500 fs 的条件下重复 2.1 节中的实验,得出不同脉冲宽度下 Type X 和 Type II 结构的分布情况,如图 5 所示。脉冲宽度为 400 fs 时,单脉冲能量为 712 nJ 以上才会出现 Type II 结构,而 450 fs 和 500 fs 时,单脉冲能量为 646 nJ 就会有 Type II 结构产生。400 fs 下,脉冲数为 50 以上才会产生 Type X 结构,而 450 fs 和 500 fs 下,脉冲数为 20 即可产生 Type X 结构。从实验结果可以得出,450 fs 和 500 fs 时能够产生 Type X 结构的脉冲数和单脉冲能量范围明显大于 400 fs,但产生 Type X 结构的范围大小与脉冲宽度之间并非简单的单调函数关系,在某一特定的脉冲宽度下,能够产生 Type X 结构的脉冲数和单脉冲能量范围达到最大。

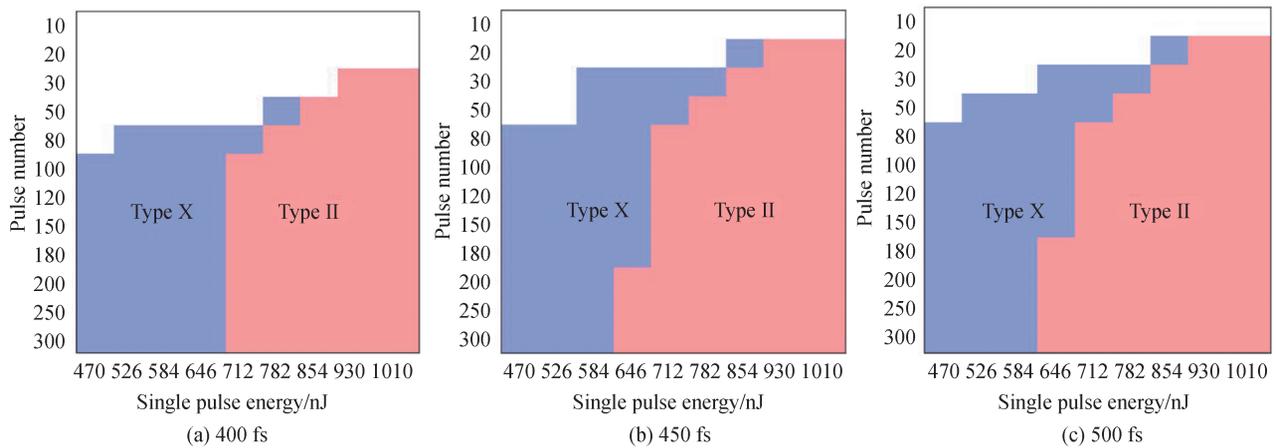


图 5 不同脉冲宽度下 Type X 和 Type II 结构的分布  
Fig.5 Distribution of Type X and Type II structure under different pulse duration

在前期的研究中认为,Type X 结构是由随机分布的拉伸的纳米孔组成的<sup>[27]</sup>,我们目前认为这些纳米孔本质为石英玻璃在经过激光加热后局部随机产生的“气泡”。我们在实验中发现的 Type X 结构对脉冲宽度的依赖效应是因为飞秒激光对材料的热效应本身就对脉宽有明显的依赖。一般来说,Type I 型结构是由于飞秒激光的热作用和超快速冷却共同作用形成的。当飞秒激光聚焦到石英玻璃内部时产生热作用,热作用结束时,材料会快速冷却,发生收缩,这会导致激光作用区域中心发生材料的致密化,因此会导致材料的折射率上升,进而产生 Type I 型结构。而 Type II 型结构的形成涉及更多的非线性过程,根据以往文献报道,在此能量区间内,材料的电子会通过非线性光电离而被大量地激发到导带,其浓度可达到价电子浓度的 0.87% 以上,可以产生温等离子体<sup>[28]</sup>,并支持某些特殊的电子振荡模式。目前认为其结构的产生是由于,激光和等离子(Surface Plasmon Polaritons, SPP)波干涉<sup>[29]</sup>,或者是 SPP 波之间发生干涉<sup>[30]</sup>导致的。在我们的实验中,Type X 结构的参数介于 Type I 和 Type II 之间,因此我们猜测,Type X 结构本质上是 Type I 结构到 Type II 结构的过渡。初始的随机分布纳米孔的形成是与飞秒激光对材料的热作用紧密相关的,但是,一旦纳米孔产生完毕,其定向的拉伸效应(严格垂直于偏振)则是局域电场增强作用的结果<sup>[9]</sup>。

## 3 基于 Type X 结构的时间胶囊制备

Type X 结构高透过率的特性有利于提高数据的存储密度和读取精度,可以为多层数据光存储技术带来显著进步。图 6 为制作的基于 Type X 结构的时间胶囊(time capsule)样品。该时间胶囊可以实现数据的多维永久存储,且可以无损读出。

本文制备的时间胶囊的数据编码规则如表 1 所示,利用两种脉冲数、8 种偏振角度对数据进行编码,得到 16 进制的编码,故数据存储容量为 4 bits/点。将想要存储的文本转换成对应的 ASCII 码,再将十进制的 ASCII 码转为十六进制数字,最后按照表 1 的编码规则将表示数据的点打在石英玻璃内部。图 6 为本文制备的时间胶囊的数据读取示例,图 6(a)中的 16 种点对应 0 到 15 的编码,写入的数据点如图 6(b)所示,写入的

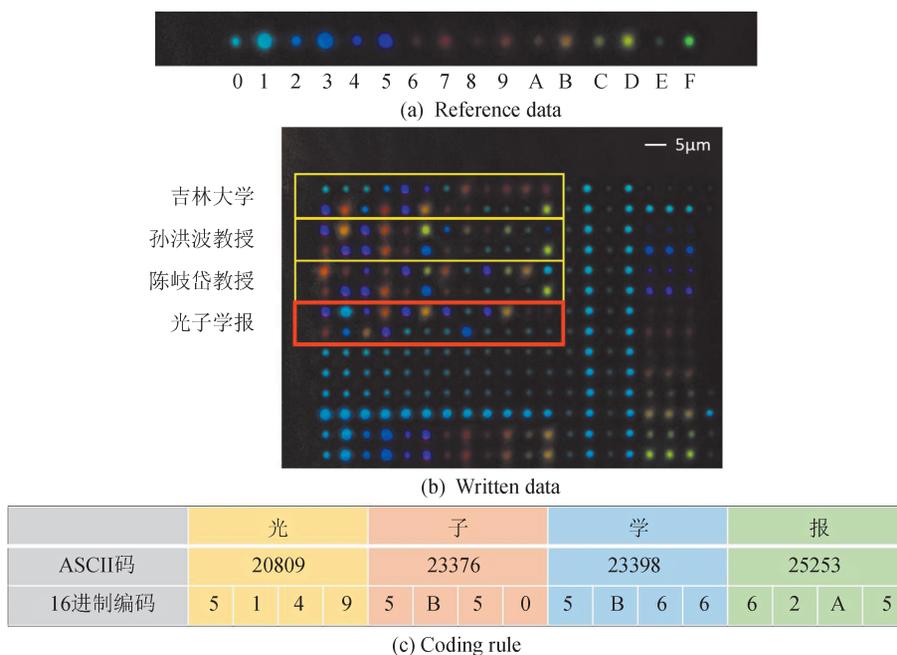


图 6 时间胶囊示例

Fig.6 Example of time capsule

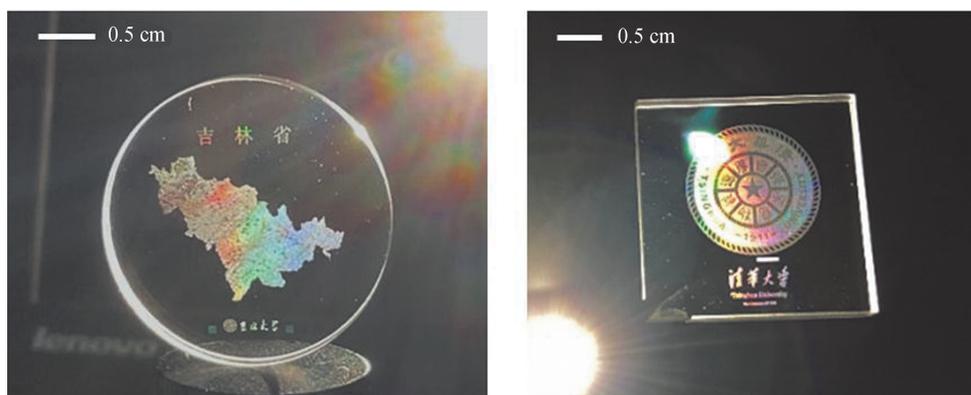
表 1 数据编码规则

Table 1 Data coding rules

Coding	0	1	2	3	4	5	6	7
Pulse number	80	180	80	180	80	180	80	180
Polarization angle	0°	0°	22.5°	22.5°	45°	45°	67.5°	67.5°
Coding	8	9	10	11	12	13	14	15
Pulse number	80	180	80	180	80	180	80	180
Polarization angle	90°	90°	112.5°	112.5°	135°	135°	167.5°	167.5°

文本已在图 6(b)左侧标出。其中,整篇文本开头的编码为 0002,每段末尾为 00013,整篇末尾为 0003,每四个点对应一个汉字,可以根据数据点的双折射显微镜图像准确无误地读出所存文本。例如,将图 6(a)中红色框内的前四个点与参比数据比较,可以读出其对应的十六进制编码为 5149,将其转为十进制编码为 20809,该 ASCII 码对应的汉字为“光”。

图 7 为制备的不同图案的时间胶囊小样实物图,其中正方形样品边长为 25.4 mm,圆形样品直径为 25.4 mm。分别将吉林省省史省情、吉林大学校史、清华大学校史等文件按上述编码方式写入各图上的小方块中。其存储容量能够达到 100 TB。



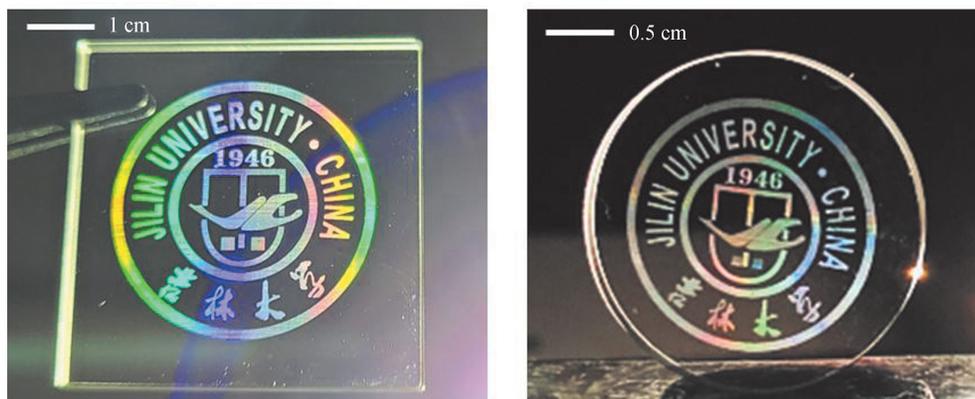


图7 时胶囊小样实物图

Fig. 7 Physical picture of time capsule sample

## 4 结论

本文确定了飞秒激光在石英玻璃内部诱导的一种低损耗各向异性改性(Type X结构)产生时对应的激光单脉冲能量、脉冲数、脉冲宽度范围,并制备了基于Type X结构的五维永久光存储时胶囊小样,数据存储容量为4 bits/点,能够实现数据的无损读出。与飞秒激光诱导纳米光栅的多维光存储相比,本文制备的时胶囊具有高透过率、低散射损耗的优势,有望增大数据写入深度、增加数据层数、提高数据读取精确度。

### 参考文献

- [1] MA Q, CUI T J. Information metamaterials: bridging the physical world and digital world[J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 1.
- [2] GU Min, LI Xiangping, CAO Yaoyu. Optical storage arrays: a perspective for future big data storage[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e177.
- [3] SCHADT E E, LINDERMAN M, SORENSON J, et al. Computational solutions to large-scale data management and analysis[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2010, 11(9): 647-657.
- [4] TRELLES O, PRINS P, SNIR M, et al. Big data, but are we ready?[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2011, 12(3): 224.
- [5] SUN Huifeng. 2019 China's big data industry development white paper[J]. *Internet Economy*, 2019, (Z2):10-21.  
孙会峰, 2019中国大数据产业发展白皮书[J]. *互联网经济*, 2019, (Z2):10-21.
- [6] LI Xianbin, CHEN Nianke, WANG Xuepeng, et al. Phase-change superlattice materials toward low power consumption and high density data storage: microscopic picture, working principles, and optimization [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(44):1803380.
- [7] RONG H, JONES R, LIU A, et al. A continuous-wave Raman silicon laser[J]. *Nature*, 2005, 433: 725-728.
- [8] LI Xianbin, LIU X Q, LIU Xin, et al. Role of electronic excitation in the amorphization of Ge-Sb-Te alloys[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(1): 015501.
- [9] LI Zhenze, WANG Lei, FAN Hua, et al. O-FIB: far-field-induced near-field breakdown for direct nanowriting in an atmospheric environment[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 41.
- [10] LIU Xueqing, CHEN Qidai. Dry-etching-assisted femtosecond laser machining [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(3):1600115.
- [11] YIN Da, JIANG Nairong, LIU Yuefeng, et al. Mechanically robust stretchable organic optoelectronic devices built using a simple and universal stencil-pattern transferring technology[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 35.
- [12] HAN Dongdong, ZHANG Yonglai, MA Jianan, et al. Light-mediated manufacture and manipulation of actuators[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(38): 8328-8343.
- [13] HAN Ddongdong, ZHANG Yonglai, LIU Yuqing, et al. Bioinspired graphene actuators prepared by unilateral UV irradiation of graphene oxide papers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(28): 4548-4557.
- [14] WU Zhipeng, YIN Kai, WU Junrui, et al. Recent advances in femtosecond laser-structured Janus membranes with asymmetric surface wettability[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(4): 2209-2226.
- [15] GAO Xiaohui, FENG Wenshuai, ZHU Zhuo, et al. Rapid fabrication of superhydrophilic micro/nanostructured nickel foam toward high-performance glucose sensor[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2021, 8(7):2002133.
- [16] VALLE G D, OSELLAME R, LAPORTA P. Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2009, 11(1): 013001.
- [17] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2

- (4): 219-225.
- [18] BERESNA M, GECEVISIUS M, KAZANSKY P G, et al. Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(20): 233901.
- [19] BRICCHI E, KLAPPAUF B G, KAZANSKY P G. Form birefringence and negative index change created by femtosecond direct writing in transparent materials[J]. Optics Letters, 2004, 29(1): 119-21.
- [20] WANG Lei, CHEN Qidai, CAO Xiaowen, et al. Plasmonic nano-printing: large-area nanoscale energy deposition for efficient surface texturing[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(12): e17112.
- [21] ZHAO Ruizhe, HUANG Lingling, WANG Yongtian. Recent advances in multi-dimensional metasurfaces holographic technologies[J]. PhotonIX, 2020, 1(1):20.
- [22] ZHANG Jingyu, GECEVICIUS M, BERESNA M, et al. Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(3): 033901.
- [23] ZIJLSTRA P, CHON J W, GU M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods [J]. Nature, 2009, 459(7245): 410-413.
- [24] GLEZER E N, MILOSAVLJEVIC M, HUANG L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials [J]. Optics Letters, 1996, 21(24):2023-2025.
- [25] DREVINSKAS R, KAZANSKY P. Dataset for high-performance geometric phase elements in silica glass [J]. APL Photonics, 2017, 2(6):066014.
- [26] SÖREN RICHTER A M H, DÖRINGSVEN, TÜNNERMANNANDREAS, B, et al. Nanogratings in fused silica: Formation, control, and applications[J]. Journal of Laser Applications, 2012, 24(4):131904.
- [27] SAKAKURA M, LEI Yuhao, WANG Lei, et al. Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 9: 15.
- [28] RUDENKO A, COLOMBIER J P, HOHM S, et al. Spontaneous periodic ordering on the surface and in the bulk of dielectrics irradiated by ultrafast laser: a shared electromagnetic origin[J]. Science Report, 2017, 7(1): 12306.
- [29] SHIMOTSUMA Y, KAZANSKY P G, QIU J, et al. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(24): 247405.
- [30] LIAO Yang, NI Jielei, QIAO Lingling, et al. High-fidelity visualization of formation of volume nanogratings in porous glass by femtosecond laser irradiation[J]. Optica, 2015, 2(4): 329-334.