

微爆材料的飞秒激光三维光存储

蔡建文¹, 胡衍雷², 黄文浩²

- (1. 常州工学院 电气与光电工程学院, 江苏 常州 213002;
2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 飞秒激光三维光存储是实现高密度和超高密度光存储的重要方法之一。对一种新的微爆材料(以 PMMA 为基质掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3$ Phen 染料)的吸收光谱进行了测量和分析,以波长为 514.5 nm 的激光作为激光光源获得了激发前后的荧光光谱,以 800 nm 飞秒激光作为激发光源得到激发前后的电子旋转共振光谱特性,并分析了不同激光脉冲能量下存储数据点尺寸和存储点读出灰度值的变化情况,并实现了该材料的飞秒激光四层光信息存储,点间距为 4 μm ,层间距为 16 μm ,实验结果表明:这种材料可以很好地应用于三维光信息存储。

关键词: 三维光存储; 微爆; 飞秒激光

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1106010

Three dimensional optical storage of femtosecond laser based on micro explosion material

Cai Jianwen¹, Hu Yanlei², Huang Wenhao²

- (1. School of Electrical and Photoelectric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
2. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Three dimensional optical storage based on femtosecond laser is one of the most important methods to realize high density and super-high density optical storage. The absorption spectrum of a new micro explosion material($\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3$ Phen dye doped with PMMA as substrate) was measured and analyzed, the fluorescence spectra before and after excitation were obtained by using 514.5 nm laser as laser source, the characteristics of electron rotation resonance spectra before and after excitation were obtained by using 800 nm femtosecond laser as excitation source, the change of storage point size and storage point readout gray value under different femtosecond laser pulse energy was analyzed, the four layer optical information storage of femtosecond laser was realized, the distance between the points is 4 μm and the distance between layers is 16 μm . The experimental results show that this material can be well applied to 3D optical information storage.

Key words: three dimensional optical storage; micro explosion; femtosecond laser

收稿日期: 2018-06-07; 修订日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51405464); 江苏省自然科学基金(BK20171197); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(GDZB-084); 江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB416001)

作者简介: 蔡建文(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事双光子三维光信息存储、激光微加工、光电检测等方面的研究。

Email: caijw@ustc.edu.cn

0 引言

目前市场上传统的二维光盘由于受到光学衍射的限制,其信息点的大小已经达到极限,因而其存储密度也就达到了极限。为突破这一极限,人们正在努力发展短波长的小型激光器和更大数值孔径的物镜。另外一些提高存储密度的方法,如光谱烧孔^[1]、体全息存储^[2]以及近场光学存储^[3-4]等也被广泛研究,但在实用化过程中遇到的阻力比较大。另外一种被广泛研究的方法是利用飞秒激光与材料之间的相互作用实现三维信息存储和微加工^[5-10]。相对于二维平面的光学信息存储,三维存储增加了轴向的一维,能够实现多层信息存储,因而存储容量大大提高。而光致漂白材料、光致变色材料、以及一些微爆材料是目前最被广泛研究的几类材料。双光子吸收在一些透明材料中产生的微爆炸也被用于了三维光学信息存储中。微爆炸后信息点中心为空心结构,折射率对比非常大,因此用普通的透射式显微镜就能清晰地读出信息点的图像。因此,对微爆材料进行存储性能实验研究具有重要的意义。文中对一种新的微爆材料(以 PMMA 为基质掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料)存储性能进行了详细的分析和实验研究,实现了四层存储。

1 飞秒激光微爆存储机理

飞秒激光微爆三维光存储是以飞秒激光为写入光源,利用材料的多光子吸收特性来实现三维光存储。高功率的飞秒脉冲激光通过物镜紧聚焦到存储材料中,由于激光与物质之间的相互作用产生单光子或多光子电离激励现象,从而在材料内部聚焦局部区域迅速产生高密度的等离子体结构,后续通过吸收大量飞秒激光能量在材料聚焦区域产生物质消融,从而形成微小的空腔。由于飞秒激光具有较好的冷激光特性,因此几乎不会在材料内部产生热损伤等现象,能较好地更精确地完成物理化学过程,飞秒激光三维光信息存储就是基于飞秒激光与光存储材料之间作用的非线性特性,从而改变物质内部聚焦点位置上的结构,实现存储材料的折射率或者荧光特性等方面的改变,从而达到记录信息的目的^[11]。

2 飞秒激光微爆材料的制备及性质

掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料的以 PMMA 为基质的材料为文中实验所采用的微爆材料, $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 的合成方法见参考文献 [12]。3 个 DBM 基与中间的稀土离子相连接,稀土离子右边的 Phen 基可显著增强材料的荧光强度。该材料的制备方法如下:取 6 ml 的 PMMA、0.012 g AIBN(引发剂)、指定量的 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$,然后把三种材料进行均匀混合。再通过水温加热使所得混合物获得较高的粘度,放进方型磨具内获得所需要的块状介质。在烤箱中放入所获得的块状材料样品,将温度设置为 40℃ 烘烤 48 h 后,将温度调整为 75℃ 继续进行烘烤直至样品成为固体。 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 掺杂 PMMA 的材料中稀土离子的质量浓度是 3:1 000。对上面固体材料进行切割抛光获得实验所需要的长方体形状样品。该样品的吸收光谱可通过采用分光光度计 (SHIMADZU UV-2401PC) 测量获取。材料所需要的激发光源采用的是 514.5 nm 的 Ar^+ 做激发光源的 LABRAM-HR 共焦激光。并通过旋转共鸣光谱分光光度计 (JES-FA200) 测量获取该样品的电子旋转共振光谱。

以 PMMA 为基质掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料的吸收光谱如图 1 所示。从图 1 中可看出,在 350~550 nm 之间样品有较强的吸收强度,在 600 nm 以后样品的吸收强度下降明显,PMMA 在 200~350 nm 之间有较强的吸收强度,DBM 基在 400 nm 附近有较宽的吸收峰,DBM 的该特性使得实验样品的吸收光谱有很好的红移,在 400 nm 附近表现出较强的吸收特性。因此,在 800 nm 处该染料样品比 PMMA 具

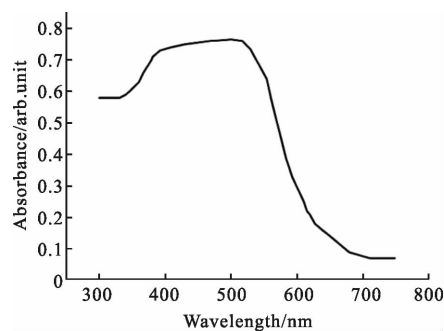


图 1 样品的吸收光谱

Fig.1 Absorption spectra of samples

有更大的吸收系数,表现出更好的非线性吸收特性。所以,样品可以被 800 nm 的双光子光束激发。

样品在激光 514.5 nm 激发前后的光致发光光谱如图 2 所示。从图 2 可看出,激光激发处的光致发光光谱在 600 nm 处有一个宽带,其最大可能性是 PMMA 的粘合分离缺陷所致。通过荧光读取来获得激光照射前后样品的光致发光改变。

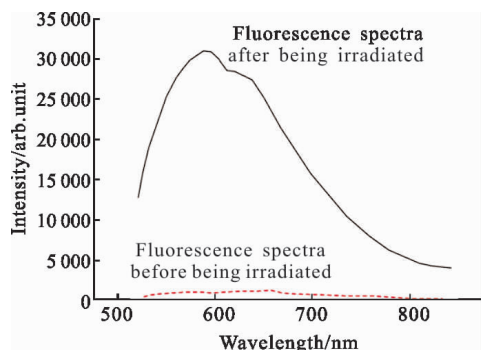


图 2 PMMA 为基质掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料被飞秒激光照射前后的荧光光谱

Fig.2 Fluorescence spectra of $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ dye doped with PMMA as substrate before and after being irradiated by a femtosecond laser

在室温下样品在激光激发前后的电子旋转共振 (ESR) 光谱如图 3 所示。从图 3(a) 可看出,样品在没有被激光激发时无明显的信号,从图 3(b) 可看出,样品被激光激发后可在光谱中看出信号,激光激发前后信号存在明显差异,主要由于该材料产生了多光子激发现象,PMMA 键断链形成自由基从而产生明显信号。

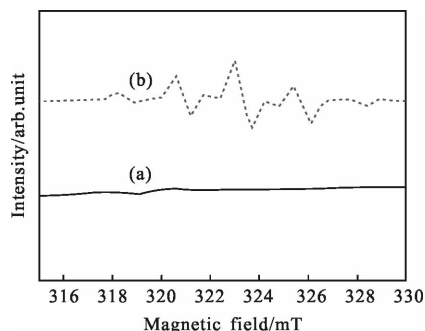


图 3 PMMA 为基质掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料被飞秒激光照射前后的电子旋转共振光谱

Fig.3 Electron rotation resonance spectra of $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ dye doped with PMMA as substrate before and after being irradiated by femtosecond laser

3 飞秒激光三维光存储系统

实验中使用的飞秒激光系统如图 4 所示。实验中所用激光器为钛宝石激光再生放大器,钛宝石激光器抽运源为可输出 532 nm 连续光的二极管固体激光器,飞秒激光双光子写入光源为 Ti:Sapphire 激光器产生的激光,其中心波长为 800 nm,脉宽为 200 fs,重复频率 1 kHz,平均功率为 800 mW。激光光束通过扩束器、中性衰减器、最后通过显微镜物镜 (40×, NA=0.65) 将光束聚焦在以 PMMA 为基质掺杂的 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料样品中。在压电传感器扫描台上放置实验样品,平台由计算机进行控制,当对平台按照预定指令进行扫描时,数据点依次被单脉冲写入记录下来;在聚焦物镜正下方放置一波长为 405 nm 的照明光源,存储数据信息经过照明光源的照射成像于 CCD 上,CCD 连接在 50× 数值孔径 0.85 的目镜上,采用透射光方式读取三维信息。

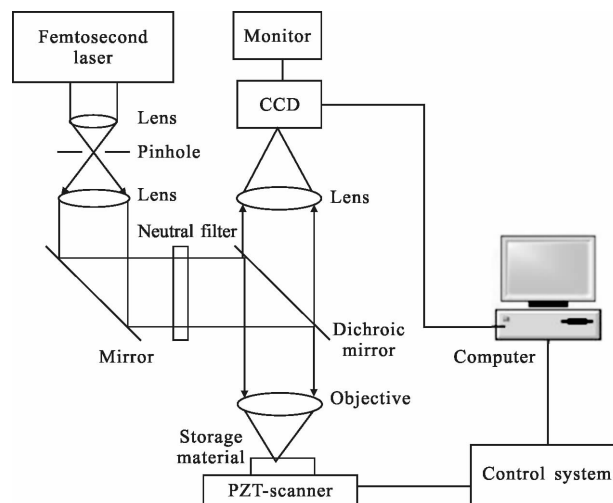


图 4 飞秒激光三维光存储系统

Fig.4 Three dimensional optical storage system with femtosecond laser

实验系统的计算机控制软件的主要功能:通过控制工作台的扫描和激光开关来实现数据的写入和读出。在数据写入时,工作台进行连续地二维扫描,根据事先输入的数据,工作台运动到某些位置时打开激光对该点进行曝光,在写入的同时,对存储数据进行实时显示;在数据读取时采用显微镜目镜上的 CCD 进行并行读取。

软件的设计采用了 windows 的多线程技术。一

个工作者线程可在后台完成工作台的扫描操作、激光的开关操作以及存储点信号图像的采样等工作。主线程主要实现人机交互的界面以及工作参数的调整,如扫描范围、扫描步长等。采用多线程技术能够在扫描图像或数据写入时,根据现场的情况随时改变工作参数,以获得理想的结果。

4 实验结果及分析

样品在不同脉冲能量下的存储数据点图如图 5 所示。数据点从飞秒激光入射方向观察如图 5(a)所示,从垂直于入射方向观察如图 5(b)所示。数据点从样品表面下 10 μm 左右开始存储。从图 5 可以看出,单脉冲能量在 10.2 nJ 以下在材料上记录的数据点对比度比较小,在 11.1 nJ 以上记录的数据点的对比度较好,并且随着飞秒激光单脉冲能量的增加,存储点的横向和纵向尺寸也随之增加。存储数据点尺寸与单脉冲能量具体关系如图 6 所示。

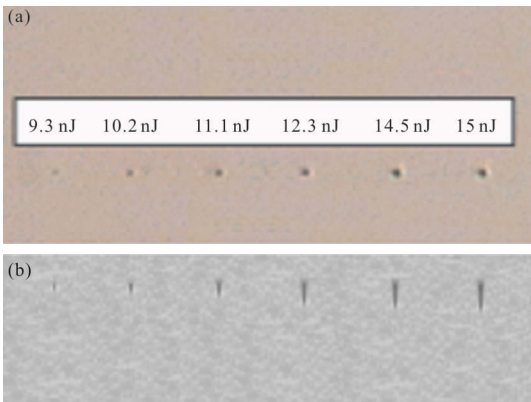


图 5 实验结果。(a)从激光入射方向观察;(b)从垂直于入射光方向观察

Fig.5 Experimental results. (a) viewed from laser incident direction;

(b) viewed from the vertical direction of incident light

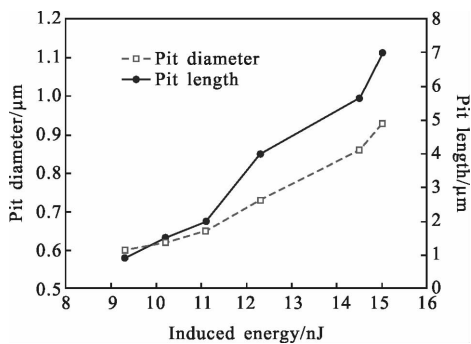


图 6 存储数据点尺寸与脉冲能量关系图

Fig.6 Relation between storage data point dimension and pulse energy

随着飞秒激光写入单脉冲能量的变化,存储点的灰度值也在发生变化,具体关系如图 7 所示。从图 7 可以看出,单脉冲能量从 9.3 nJ 增加 11.1 nJ 的过程中随着单脉冲能量的增加,存储点信号灰度值随之减小,当单脉冲能量大于 11.1 nJ 后,信号灰度值便没有明显的变化,呈现出饱和状态。由图 6 和图 7 可得,随着单脉冲能量的增加,信号强度随之增强,但是存储点会随之增大,信号存储密度会减小。为了实现高密度信息存储,又保证信号读取时有较高的对比度,应该选择合适的单脉冲能量。

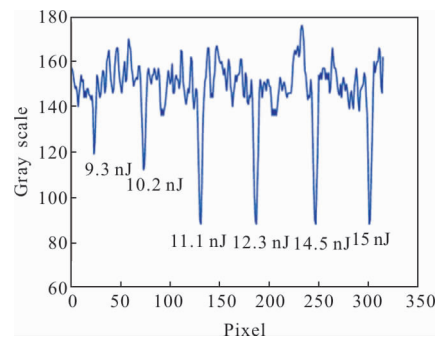


图 7 存储数据点灰度值与单脉冲能量的关系

Fig.7 Relation between storage point gray value and laser pulse energy

飞秒激光微爆现象可以很好地应用于三维光存储。以飞秒激光作为写入光源对以 PMMA 为基质掺杂的 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料样品进行光存储实验研究,每个存储点的飞秒激光写入能量均为 15 nJ,写入数据通过接在 50×(0.85-NA)的显微镜目镜上的 CCD 并行读取,实现 4 层数据存储,点间距为 4 μm,层间距为 16 μm,存储结果如图 8 所示。存储点 X-Y

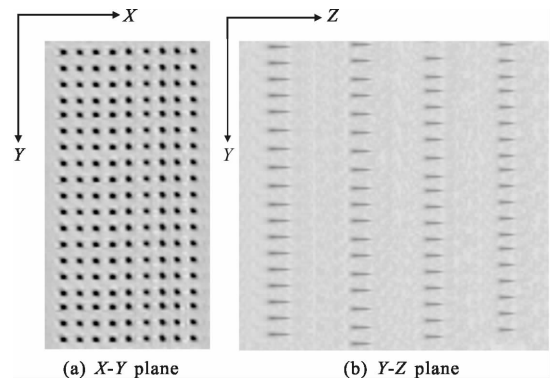


图 8 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}/\text{PMMA}$ 的 4 层微爆存储图

Fig.8 Four layer micro explosion storage map of

$\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}/\text{PMMA}$

平面的信息存储点阵如图 8(a)所示, Y-Z 平面方向的信息存储点阵如图 8(b)所示。从图 8 可看出, 4 层的存储数据都比较清晰, 不存在信息串扰。

5 结 论

文中对一种新的以 PMMA 为基质掺杂 $\text{Sm}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 染料材料的吸收光谱进行了测量和分析, 以波长为 514.5 nm 的激光作为激光光源获得了激发前后的荧光光谱, 以 800 nm 飞秒激光作为激发光源得到激发前后的电子旋转共振光谱特性, 分析了不同激光脉冲能量下存储数据点尺寸和存储点读出灰度值的变化情况, 并实现了该材料的飞秒激光 4 层光信息存储, 点间距为 4 μm , 层间距为 16 μm , 实验结果表明在 PMMA 中掺杂稀土离子的微爆材料可以很好地应用于三维光信息存储。

参考文献:

- [1] Hirao K, Todoroki S, Cho D H, et al. Room-temperature persistent hole burning of Sm^{2+} in oxide glasses[J]. *Opt Lett*, 1993, 18(19): 1586–1587.
- [2] Mok P H, Tackitt M C, Stoll H M. Storage of 500 high-resolution holograms in a LiNbO_3 crystal [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(8): 605–607.
- [3] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R, et al. Near-field magneto-optics and high density data storage [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(2): 142–144.
- [4] Terris B D, Mamin H J, Rugar D, et al. Near-field optical data storage using a solid immersion lens [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 65(4): 388–390.
- [5] Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Three-dimensional optical storage memory[J]. *Science*, 1989, 245(4920): 843–845.
- [6] Wada S, Xia A D, Tashiro H. 3D optical data storage with two-photon induced photooxidation in C60 -doped polystyrene film[J]. *RIKEN Review*, 2002, 49: 52–54.
- [7] Cai Jianwen, Pan Xuetao, Zhang Meifeng, et al. Transverse spot superresolution in femtosecond laser microfabrication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (6): 1790–1793. (in Chinese)
蔡建文, 潘雪涛, 张美凤, 等. 飞秒激光微加工中光斑横向超分辨研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1790–1793.
- [8] Zhang Juzhan, Wang Yuqian, Zhang Ying, et al. Effect of feeding speed on micro-hole drilling in TiC ceramic by femtosecond laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1565–1571. (in Chinese)
张军战, 王禹茜, 张颖, 等. 飞秒激光进给速度对 TiC 陶瓷微孔加工的影响[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1565–1571.
- [9] Yu Junli, Meng Qinglong, Ye Rong, et al. Analysis on damage thresholds of optical rectification crystals under femtosecond lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106004. (in Chinese)
于军立, 孟庆龙, 叶荣, 等. 飞秒激光作用下光整流晶体的损伤阈值分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0106004.
- [10] Jing Shimei, Zhang Xuanyu, Liang Jufa, et al. Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 449–454. (in Chinese)
敬世美, 张轩宇, 梁居发, 等. 飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 449–454.
- [11] Liu Qing, Cheng Guanghua, Wang Yishan, et al. Three-dimensional optical storage inside silica glass using femtosecond pulse and mechanism study [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(3): 276–279. (in Chinese)
刘青, 程光华, 王屹山, 等. 飞秒脉冲在透明材料中的三维光存储及其机理[J]. 光子学报, 2003, 32(3): 276–279.
- [12] Min Gu Daniel Day. Use of continuous-wave illumination for two-photon three-dimensional optical bit data storage in a photobleaching polymer [J]. *Optics Letters*, 1999, 24 (5): 288–290.