

光致漂白材料的激光三维信息高密度存储

潘雪涛^{1,2,3}, 屠大维¹, 蔡建文^{2,3}

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 常州工学院 光电工程学院, 江苏 常州 213002;
3. 常州市光电子材料与器件重点实验室, 江苏 常州 213002)

摘要: 光信息存储是目前数字化信息存储的主要手段, 传统二维光信息存储中存在的不足限制了存储密度及存储容量的进一步提高。基于光致漂白材料的三维光信息存储机理, 建立了共焦/双光子扫描荧光显微镜系统。采用一种新型光致漂白茈类衍生物 ATFTBAr 作为存储材料, 利用飞秒激光实现了在该材料上的三维光信息存储和读取。存储层达到四层, 每层间距和信息点间距分别达到了 10 μm 和 8 μm 。对信息点进行了信号强度的识别和对比, 详细分析了由于折射率失配所引起的信号串扰问题。研究表明, 建立的实验系统和选用的存储材料能够较好地实现三维光信息存储。

关键词: 光信息存储; 光致漂白材料; 模糊 PID 控制; 飞秒激光

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)12-3249-05

Three-dimensional information high density storage by means of laser based on photobleaching material

Pan Xuetao^{1,2,3}, Tu Dawei¹, Cai Jianwen^{2,3}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
3. Changzhou Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Changzhou 213002, China)

Abstract: Optical information storage is the main method of digital information storage. The storage density and the possibility to further improve storage capacity were limited for the deficiencies existing in the conventional two-dimensional optical information storage. The confocal/two-photon fluorescence scanning microscope system was constructed based on the three-dimensional optical information storage mechanism on the photobleaching material. Three-dimensional optical information storage and retrieval were achieved by means of femtosecond laser on a new photobleaching ATFTBAr fluorene derivative as a storage material. The storage reached four layers and each layer spacing and information point spacing were respectively up to 10 μm and 8 μm . The signal intensity of the information point was identified and contrasted, and a detailed analysis of the refractive index mismatch caused by a signal crosstalk was

收稿日期: 2013-04-05; 修订日期: 2013-05-03

基金项目: 江苏省教育厅自然科学研究项目(10KJD460004); 江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养项目

作者简介: 潘雪涛(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光微纳加工、信息处理、光电检测技术方面的研究。

Email: pxtqz@163.com

made. Research shows that the experimental system and the establishment of the storage material can be used to achieve better three-dimensional optical information storage.

Key words: optical information storage; photobleaching material; fuzzy PID control; femtosecond laser

0 引言

目前在科学研究、工农业生产、航空航天、军事、医学等众多领域,信息的存储量正在以几何级数增加。信息数字化存储的主要方式之一是二维光信息存储,但因为存在衍射效应,信息点的尺寸最多只能达到二分之一的光波长,已经是瑞利分辨的极限值了,存储的密度受到了极大的限制。通常为了缩小记录斑点,提高存储密度,可以采用减小入射光波长或者增大系统物镜的数值孔径的方法。但会导致焦深的减小和信息失真。为解决这些问题,众多的研究人员提出了全息技术、近场光学存储技术、激光三维存储技术等诸多方法,并进行了较为深入的研究^[1-2]。其中基于飞秒激光的三维光信息存储技术,利用某些无机或有机材料的双光子非线性吸收特性^[3],可以极大地增加单位体积的信息存储容量。M. Akiba 等人利用飞秒激光与双光子敏化材料之间的作用机理实现了三维光存储^[4],Sasaki 等人采用飞秒激光对一种新型的双光子荧光材料进行读写实验研究,读取荧光强度可以达到 10~100 nW^[5],黄文浩等人在飞秒激光三维光存储系统搭建,存储材料的光致漂白特性等领域进行了较多相关研究^[6]。事实上,找寻一种高稳定性的双光子吸收存储材料是实现信息高密度存储的关键。文中采用了一种新型光致漂白材料茈类衍生物 ATFTBAr 作为信息存储介质,基于双光子吸收三维光信息存储原理,建立了共焦/双光子扫描荧光显微镜系统,利用飞秒激光对茈类衍生物 ATFTBAr 进行光信息的存储和读出实验,取得了良好的实验效果。

1 基于光致漂白材料的三维光信息存储原理

掺杂荧光染料的某些无机或有机分子材料聚合物,如二苯乙烯衍生物、茈类衍生物等,受低功率紫外光激发,能够辐射与入射光强度的平方成正比的荧光。而受高功率紫外光激发,激发点染料产生漂白

现象,不辐射荧光。双光子光致漂白反应中任何一个光子都可以穿透存储介质,但不会被吸收。而当较高功率的双光子同时入射到存储介质并且聚焦于同一点,就会出现能量共振叠加效应,发生漂白反应,聚焦点处就能够记录携带的信息。双光子三维信息存储就是利用聚合物中生成的漂白和未漂白点来实现的。

单光子吸收时,在光束途径部分的存储介质都会受到激发,造成相邻数据层的信号干扰。而双光子吸收呈非线性,可以将信息存储密度提高几个数量级。这是由于双光子吸收时,除了位于光强很高的聚焦点周围很小区域的聚合物会受到激发,其余区域几乎不会被激发。因此,携带的信息可以精确的存储到某一焦平面层,不受相邻平面层的严重干扰。

信息读取时,与入射光波长相同但光强较弱的飞秒激光对聚合物进行扫描,聚合物中存储信息部分不会发出荧光,其余部分则会激发荧光,存储信息的读取就可通过检测存储介质的荧光效应加以实现。

2 飞秒激光三维光信息存储实验

2.1 实验系统及存储介质

实验中建立了共焦/双光子扫描荧光显微镜系统,实现双光子三维光信息存储及读取,如图 1 所示。掺钛蓝宝石(Ti:Sapphire)激光器作为三维光信息存储与读取的光源,中心波长 800 nm,脉宽 80 fs,重复频率 80 MHz。

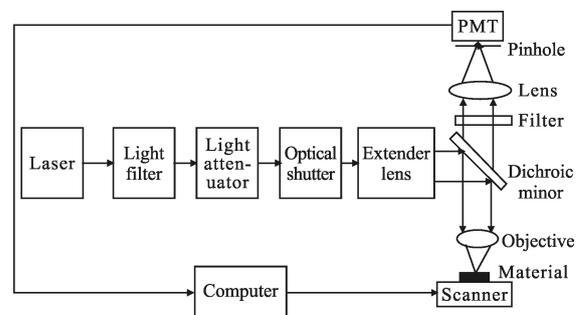


图 1 共焦/双光子扫描荧光显微镜系统

Fig.1 Confocal/two-photon fluorescence scanning microscope system

存储介质为光致漂白茈类衍生物 ATFTBAr, 其分子结构式如图 2 所示。实验中, 按照重量比 1:50 将茈类衍生物溶解在 Poly(methyl methacrylate) 溶液中, 并利用涂膜技术制备成透明薄膜, 其厚度一般为 120 μm 左右。

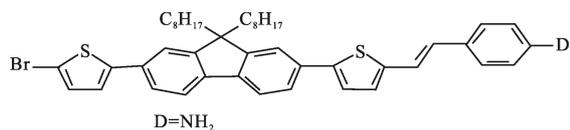
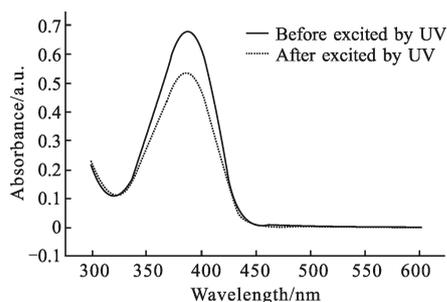


图 2 ATFTBAr 的分子结构

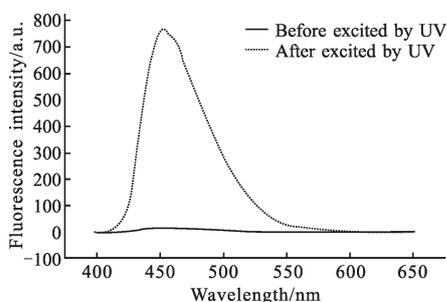
Fig.2 ATFTBAr's molecule structure

茈类衍生物 ATFTBAr 在 400 nm 紫外单光子照射下会产生漂白现象, 其激发前和激发后的吸收光谱如图 3(a) 所示。显然, 该聚合物能够吸收波长为 400 nm 的紫外光, 但不能吸收波长为 800 nm 的红外光, 因此共焦/双光子扫描荧光显微镜系统可以用 800 nm 激光作为光源实现三维光信息存储。图 3(b) 为存储介质受紫外光激发前后的荧光光谱, 荧光强度具有较大的对比度, 便于存储信息的读取。



(a) 吸收光谱

(a) Absorption spectrum



(b) 荧光光谱

(b) Fluorescence spectra

图 3 ATFTBAr 紫外光照射前后的吸收光谱及荧光光谱

Fig.3 Absorption spectra and fluorescence spectra before and after ATFTBAr UV irradiation

2.2 光信息存储与读取实验

掺钛蓝宝石(Ti:Sapphire)激光器发出的 800 nm 脉冲激光经过滤色、衰减和准直扩束, 通过数值孔径为 0.60 的 DVD 光头聚焦在光致漂白茈类衍生物薄膜上, 信号存储功率 21.5 mW, 单点存储时间 30 ms。PMT 扫描台在计算机控制下, 使存储介质在 XY 平面移动, DVD 光头在音圈电机的控制下延 Z 向移动, 实现三维光信息存储。

读取信息实验中, 800 nm 脉冲激光通过二向色镜, 由 DVD 光头聚焦于光致漂白茈类衍生物薄膜上进行连续扫描, 信号读出光率为 3 mW。存储介质辐射出的荧光信号返回显微镜系统, 经分色镜、小孔光阑后入射到光电倍增管。光电倍增管获取荧光信号并将其转换为电信号, 经过计算机采集、处理后输出光信号的灰度值, 从而在监视器上逐点产生存储信号的光强图像。这种反射式荧光共焦扫描的信息读取方式具有光学系统简单、轴向分辨率高等优点。同时还能够减小存储层之间的信号串扰, 消除由于存储介质和衬底的不均匀性带来的影响。

2.3 基于模糊 PID 算法的音圈电机移动控制

音圈电机控制 DVD 光头的移动, 具有一定的非线性, 限制了扫描范围。此外, 系统应实时跟踪光盘位置的变化, 模糊 PID 控制算法能够较好地解决这些问题^[7]。实验系统中使用的 DVD 光学头为三洋公司的 SF-HD60S, 其聚焦致动器的传递函数为^[8]:

$$G(s) = \frac{1.7197 \times 10^5}{s^2 + 65.7240s + 1.7197 \times 10^5} \quad (1)$$

系统采用两输入(e, ec)三输出(Kp, Ki, Kd)的模糊控制器形式, 模糊集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 其中 e, ec 的论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$; Kp, Ki, Kd 的论域为 $[-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$ 。建立 Kp, Ki, Kd 的模糊规则表, 进行输出参数的实时自适应整定。设输入和输出参数均服从正态分布, 得到各模糊子集的隶属度, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊控制矩阵表, 获得修正参数后代入公式(2)计算出实际输出参数, 实现在线自动校正。

$$Kp = Kp' + \{ei, eci\}P; Ki = Ki' + \{ei, eci\}i;$$

$$Kd = Kd' + \{ei, eci\}d \quad (2)$$

采用 MATLAB 软件对控制系统进行仿真, 设定 DVD 光学头控制系统采样时间为 0.5 ms, 输入单位阶跃信号, 由模糊 PID 算法获得的单位阶跃响应如

图 4 所示。从仿真结果可以看出,采用模糊 PID 算法控制,单位阶跃响应的超调量比传统 PID 控制要小,调整时间也相对较短,系统较快地达到稳定。

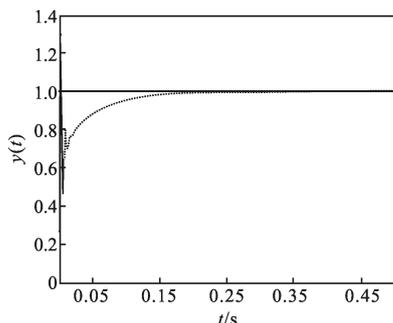


图 4 模糊 PID 控制单位阶跃响应曲线

Fig.4 Fuzzy PID control unit step response curve

3 实验结果分析

采用茈类衍生物 ATFTBAr 作为存储介质,使用共焦/双光子扫描荧光显微镜系统进行三维光信息存储实验的结果如图 5 所示。数据点采用二进制方式写入,共四层,存储层间距为 $10\ \mu\text{m}$,每层中存储信息点间距为 $8\ \mu\text{m}$ 。随着存储深度的增加,光信息图像强度的对比度逐渐减小。第一层存储信号的信噪比约为 $16.5\ \text{dB}$,而第四层时信噪比约为 $7.8\ \text{dB}$ 。这表明当信息存储深入到一定层次后,层与层之间会出现信号串扰,影响存储效果。这种信号串扰主要是由于不同材质之间的折射率不同(折射率失配)引起的。

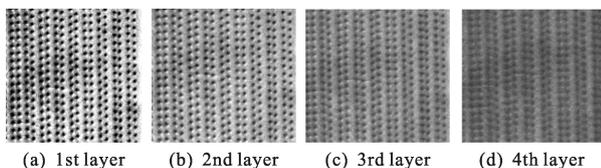


图 5 ATFTBAr 茈类衍生物光信息存储实验结果

Fig.5 Experimental results of ATFTBAr fluorene derivatives optical information storage

ATFTBAr 受双光子激发前后的荧光强度有明显不同,激发前荧光强度明显强于激发后的。实验中开发了基于 MATLAB 的信号识别软件,对实验结果进行每层存储信息的荧光强度归一化反向分布分析,如图 6 所示。由图可见,存储光信息区域与未存储区域具有很明显的对比度,信息存储点的荧光强度远低于未存储信息区域的荧光强度。同样,随着存

储深度的增加,信号串扰带来的影响也更大,这与实验结果吻合。

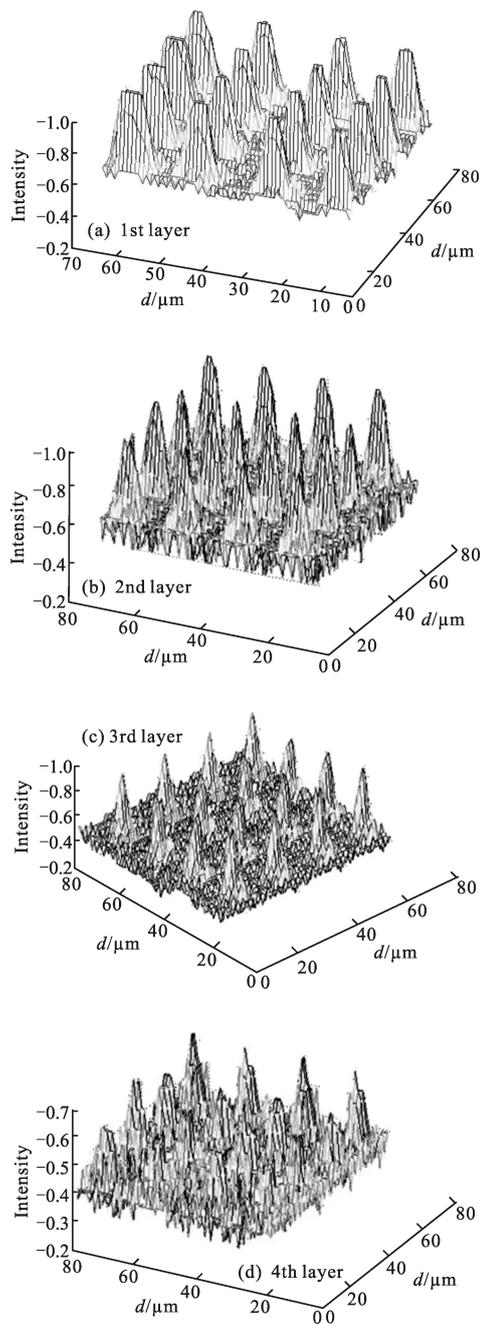


图 6 四层数据的荧光强度反向分布图

Fig.6 Reverse distribution of the fluorescence intensity of four layer data

4 折射率失配引起的误差分析

存储达到一定深度,光束通过 DVD 光学头先后进入空气和存储介质。两者的折射率不同会导致折射率失配,从而产生初级像差^[9]。实验中存储介质水

平放置,则初级像差中的彗差、像散、场曲、畸变的系数均为 0,即初级像差仅与球差有关。若 n 为折射率, NA 为光学头数值孔径, d 为存储深度,根据波像差函数以及平行平板条件可以获得初级像差的表达式:

$$W(m, \theta) = a_1 m^4 \quad (3)$$

其中 $a_1 = -\frac{1}{8} \frac{n^2 - 1}{n^3} NA^4 \cdot d$ 为球差系数。

若飞秒激光波长为 800 nm,存储介质的折射率为 1.56, DVD 数值孔径为 0.60,对初级像差进行数值模拟,可以得到存储深度与球差的关系,如图 7 所示。显然,球差系数随着存储深度的增加而线性增大。

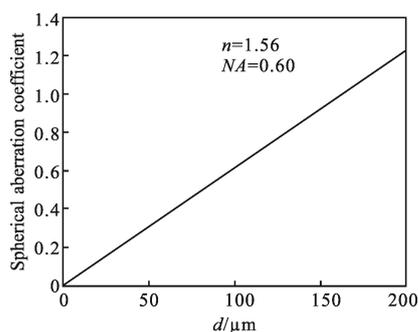


图 7 球差和存储深度的关系曲线

Fig.7 Relation of spherical aberration and storage depth

由此可见,随着存储深度的增加,初级像差也会随之加大,从而引起衍生物中的点扩展函数出现畸变,导致延光轴方向上的点扩展函数的半高宽显著增大,而最大光强减小,不同存储层之间的信号干扰就会增加,影响存储效果。

5 结 论

文中采用光致漂白材料的三维光信息存储原理,基于茆类衍生物 ATFTBAr 的双光子非线性吸收特性,搭建了共焦/双光子扫描荧光显微镜系统,使用双光子 800 nm 脉冲飞秒激光实现了三维光信息的存储及读取,数据存储达到四层,存储层间距 $10 \mu\text{m}$,每层中存储信息点间距 $8 \mu\text{m}$ 。在此基础上,结合读取光信息层的荧光强度分布,分析了由于折射率失配引起的信号串扰对存储效果的影响等问题。实验

表明,基于新型光致漂白材料 ATFTBAr 的飞秒激光双光子三维光信息存储技术可以极大地增加单位体积的信息存储容量,这对实现多层高密度和超高密度光信息存储是有意义的工作。

参 考 文 献:

- [1] Li Zhanhua, Zhang Heling, Shao Jibao, et al. Study on full-color water-resisting photopolymer for holography [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, 20(4): 488-490.
- [2] Li Zhanhua, Zhang Heling, Li Quan, et al. Study on holographic characters of two-wavelength sensitive water-resisting photopolymer[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, 20(3): 350-354.
- [3] Li Zhongguo, Ge Jianfeng, Yi Chuanxiang, et al. Optical nonlinearity of novel cyanine compound solution Optical nonlinearity of novel cyanine compound solution at picosecond timescale at picosecond timescale [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1727-1731. (in Chinese)
- [4] Akiba M, Goto-Takahashi E, Takizawa H, et al. Two-photon sensitized recording materials for multilayer optical disk [C]// SPIE, 2010, 7730: 773018-1-773018-6.
- [5] Sasaki T, Mikami T, Mochizuki H, et al. Readout signal intensity for the two-photon sensitized fluorescent recording materials [C]// SPIE, 2010, 7730: 77301F-1-77301F-8.
- [6] Cai Jianwen, Shen Zhaolong, Jiang Bing, et al. Two-photon photobleaching three-dimensional optical storage with DVD pickup head [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(10): 1401-1405. (in Chinese)
- [7] Li Bangjun, Wang Luqiang, Luo Mianwei, et al. Design of the control system of the optical scanner based on TMS320F2812 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2386-2389. (in Chinese)
- [8] Shen Zhaolong, Jiang Bing, Cai Jianwen, et al. Confocal dual-pickup-head multilayer data storage system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(7): 98-101. (in Chinese)
- [9] Guo Xiarui, Liao Zhibo, Wang Chunyu, et al. Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 436-441. (in Chinese)