

二苯乙烯衍生物掺杂聚合物的双光子漂白 三维光存储研究

郭福全^{1,4} 谢富春¹ 郭斌² 梁浩³ 张其锦⁴ 唐火红⁵ 黄文浩⁵

¹洛阳理工学院材料科学与工程系, 河南 洛阳 471023
²南京林业大学化学与材料系, 江苏 南京 210037
³惠州学院化学工程系, 广东 惠州 516007
⁴中国科学技术大学高分子科学与工程系, 安徽 合肥 230026
⁵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 设计并合成了 3 种具有较高双光子吸收截面的新型二苯乙烯衍生物双光子生色团, 利用在飞秒激光下的双光子漂白现象, 在掺杂有 3 种二苯乙烯衍生物的聚甲基丙烯酸甲酯薄膜内进行了三维数据光存储实验, 研究了三者的双光子漂白能力并分析了激发功率对双光子荧光行为的影响。双光子漂白光存储的特性表明: 曝光时间一定时, 降低激发功率可以提高分辨率; 激发功率不变, 降低曝光时间也可以提高分辨率; 但要提高存储速度, 需用较大的激发功率。采用较大的激发功率(13.4 mW)和较短的曝光时间(20 ms), 利用双光子写入和读出方法在掺杂薄膜内部实现了三维超高密度光存储, 理论存储密度可达 14 Gbit/cm³。双光子漂白速率对激发功率的依赖关系的研究表明, 双光子漂白的机理涉及到三个光子的协同作用。

关键词 光数据存储; 双光子吸收; 三维光存储; 光漂白; 二苯乙烯衍生物; 生色团

中图分类号 TQ591 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1106001

Study on Three-Dimensional Optical Data Storage by Two-Photon Bleaching in Stilbene Derivatives Doped Polymer

Guo Fuquan^{1,4} Xie Fuchun¹ Guo Bin² Liang Hao³ Zhang Qijin⁴
Tang Huohong⁵ Huang Wenhao⁵

¹Department of Materials Science and Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China

²Department of Chemistry and Materials, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China

³Department of Chemical Engineering, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007, China

⁴Department of Polymer Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

⁵Department of Precision Machinery and Precision Instrument, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Three novel stilbene derivatives with high two-photon cross-section are designed and synthesized as two-photon chromophores. Three-dimensional (3D) optical data storage experiments are carried out by two-photon photobleaching with a femtosecond laser in three stilbene derivatives doped polymethylmethacrylate film. Research on the two-photon photobleaching ability of three two-photon chromophores shows that the chromophore with larger two-

收稿日期: 2011-07-15; **收到修改稿日期:** 2011-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(90201016)、河南省高等学校青年骨干教师计划(2010GGJS-173)、河南省科技厅(082102340026)和河南省教育厅(2009B430009)资助课题。

作者简介: 郭福全(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事聚合物光电材料和聚合物纳米复合材料等方面的研究。

E-mail: fqgzl@ustc.edu

photon cross-section could be photobleached at lower excitation power. The effects of excitation power on two-photon fluorescence behaviors are also analyzed. The characters of optical data storage reveal that the resolution in two-photon photobleaching could be increased by lowering excitation power when exposure time is kept the same or by lowering exposure time when excitation power is kept the same. However, larger excitation power is often used to obtain high data storage rate. Two-photon writing and two-photon reading experiment realizes 3D ultrahigh optical data storage with a theoretical storage density of 14 Gbit/cm³ in doped film under higher excitation power (13.4 mW) and shorter exposure time (20 ms). The cubic dependence of two-photon photobleaching dynamics on excitation power indicates that the mechanism of two-photon photobleaching concerns the joint action of three photons.

Key words optical data storage; two-photon absorption; three-dimensional optical storage; photobleaching; stilbene derivatives; chromophore

OCIS codes 190.4180; 190.4710; 190.7220; 210.4810

1 引 言

由于信息的多媒体化,目前需要处理和存储的数据正以指数形式增长,高密度光存储以其低价格、长寿命、易运输、大容量的特点而倍受重视。传统的二维光存储受可见及红外光的衍射效应制约,理论上存储面密度与 $1/\lambda^2$ (λ 是入射激光波长)成正比。即使使用无穷大的物镜进行读和写的操作,光存储点的尺寸最多只能降低到入射光波波长的一半,限制了面存储密度的进一步提高,目前二维光存储几乎达到了这一极限。二维光存储的堆积或多层二维光存储构成了三维光存储,理论上的存储体密度与 $1/\lambda^3$ 成正比,三维光存储能将二维光存储的存储密度提高 3~4 个数量级。如果激光波长为 500 nm,在一张 CD 大小的光盘上(直径 120 mm,厚度 1 mm)二维光存储的最大信息量为 4 Gb,而三维光存储的信息量将增加 2000 倍,可达 8 Tb。

双光子吸收^[1~4]过程跃迁几率与入射光强(功率)的平方成正比,这样双光子吸收被局域在激光焦点附近的很小区域内(体积数量级为 λ^3),之后发生的物理和化学变化如荧光、折射率改变或光诱导化学反应都被限制在这个微小的区域内,使双光子吸收具有极其优越的空间分辨率,将体空间的 z 轴作为第三维,利用双光子吸收过程即可实现真三维光存储。实现三维光存储的主要困难在于如何有效消除相邻数据层之间的相互干扰,利用双光子吸收的光存储能够很好地提高层与层之间抗干扰能力。一束聚焦高斯激光,入射到一个物理厚但光学薄的吸收样品中,对于与入射光强呈线性关系的单光子吸收过程,垂直光传输方向的每一层都会吸收相同的能量,每层的净激发与该层离焦点的距离无关,因此线性激发强烈干扰了需要存储信息的焦平面的上下层。然而对于依赖入射光强平方的双光子吸收,每层的净激发与该层离焦点距离的平方成反比。因此能够将信息写到某一特殊的焦平面而不会严重干扰

超过瑞利范围的邻近层。由于该存储方式是在光的激发下使电子产生跃迁而达到光存储的目的,所以具有快速响应和大容量的特点,而且容易与现有光盘存储技术兼容,是海量光存储器件的一个重要发展方向。本文研究了二苯乙烯衍生物掺杂聚合物的双光子漂白能力并分析了激发功率对双光子荧光行为的影响。

2 材料制备

荧光漂白有机材料是实现双光子三维超高密度光存储的主要材料之一^[5~11],本文设计并合成了 3 种如图 1 所示具有较高双光子吸收截面的二苯乙烯衍生物,分别为 4, 4'-双(二苯氨基-反式-苯乙烯基)联苯(BPSBP), 4, 4'-双(二乙氨基-反式-苯乙烯基)联苯(BESBP)和 4, 4'-双(9-咔唑基-反式-苯乙烯基)联苯(BCSBP)。双光子上转换荧光法测试表明,3 种双光子生色团在 800 nm 飞秒激光的激发下具有较大的吸收截面,分别为 892, 617, 483 GM^[12]。利用在飞秒激光下的双光子漂白现象,在掺杂有 3 种双光子生色团的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)聚合物薄膜内进行了多层三维数据光存储,并研究了影响光存储密度的材料设计因素与仪器参数因素,为实现三维超高密度光存储体系打下基础。

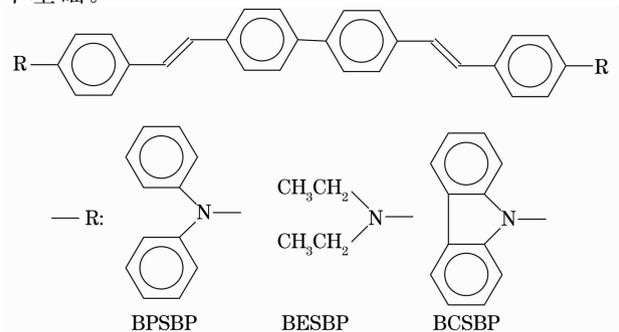


图 1 目标化合物的分子结构

Fig. 1 Molecular structures of the target compounds

双光子漂白光存储的原理为：掺杂体系在入射光的激发下辐射荧光，并且荧光强度随着入射光强的增加而增强。但当入射光强超过一定值，双光子吸收趋于饱和时，就会不可逆地破坏激发态分子，产生光漂白现象。在光存储中以漂白点来记录数据“1”和以未漂白区域来记录数据“0”，从而实现信息的光存储。在读出漂白光存储信息时，使用较弱强度的脉冲激光或连续激光对光存储介质进行双光子荧光或单光子荧光激发扫描，被记录信息的分子在激发光的照射下不会发出荧光，而未被记录的分子则会发出荧光，因此通过检测读出光照射下介质的荧光信号就可以读出被存储的信息。

3 实验

3.1 原料与样品制备

实验中，将合成的3种双光子生色团 BPSBP、BESBP 和 BCSBP 掺杂到 PMMA(分子量 30 万)基质中。首先将双光子生色团和 PMMA 一起溶解在精制过的三氯甲烷中形成溶液，采用涂膜法将溶液涂在干净的玻璃基片上(10 mm×10 mm, 光学显微镜盖玻片)，然后移到红外灯下进行烘烤，使三氯甲烷完全挥发得到透明均匀的掺杂薄膜，用来进行双光子光漂白三维存储的测试，掺杂浓度为 20 μmol/g, 膜厚约为 50 μm。

3.2 实验仪器

双光子光漂白三维数据光存储的实验装置如图 2 所示。飞秒激光光源的参数为：重复频率 80 MHz, 脉宽为 80 fs, 激光中心波长 800 nm, 使用的聚焦透镜的数值孔径为 0.66 (40×)。波长

800 nm 近红外激光对有机分子材料有优异的穿透性，保证了系统工作时有一定的纵向加工深度。样品置于 PZT 移动平台上，激发光源通过透镜聚焦到样品内部，首先在同一层上，按预先编好的 CAD 程序，通过调整激发功率达到分辨率最好，进行逐点漂白二维扫描；然后让激光焦点在 z 轴向上前进一个步距，在第二层上进行逐点漂白，这样可以进行多层数据位图案光存储。

存储数据读出时使用共焦荧光显微镜，由于共焦小孔、点光源和物镜焦面处于共轭位置，所以共焦显微镜的探测器只探测样品内与共焦小孔共轭点的荧光光强，而该点周围的点的光强均被共焦小孔阻挡不进入探测器，使其具有三维分辨能力，通过扫描不同层的点即可得到三维存储图案。激发出的荧光通过物镜或聚光镜到达显微镜的共焦小孔后，由小孔后面的探测接收器(PMT)接收光信号，由 CCD 传输到计算机数据处理后可以获得相应的荧光强度信号。在数据读出过程中，使用同一装置在较低的激发功率下进行双光子荧光读出。调整读出激光功率通过在样品体块内扫描，记录漂白部分和未漂白部分荧光强度差值从而形成光漂白的数据位存储图案。

数据的写入/读出的物理方式如图 3 所示。选择相互垂直的两侧面中的一面作为写入光束进入面，从写入面的边缘开始逐行逐层地进行三维光存储，这样在进行信息化读出时，就可实现信息的 xy 面读出和 xz 面读出。

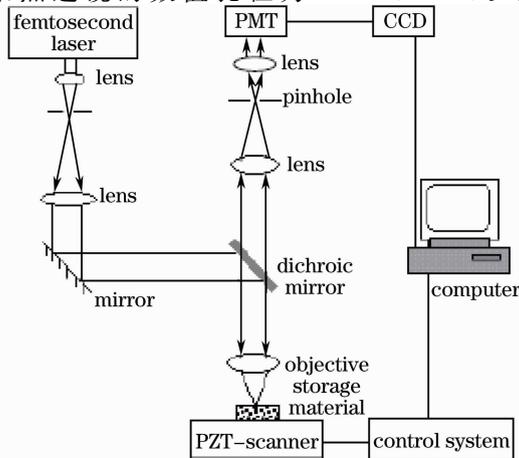


图 2 双光子漂白三维光存储的实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of three-dimensional photobleaching optical storage

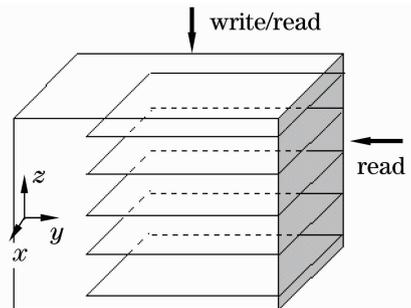


图 3 数据写入/读出方式示意图

Fig. 3 Diagram of data writing and reading

4 结果与讨论

4.1 掺杂薄膜的双光子漂白性质

为了比较 3 种双光子生色团掺杂薄膜的光漂白能力及荧光行为，以相同的双光子写入功率 (20 mW) 和相同的曝光时间 (35 ms) 分别在 BPSBP, BESBP 和 BCSBP 的掺杂 PMMA 聚合物薄膜中进行了光漂白实验。图 4 是在聚合物薄膜表面

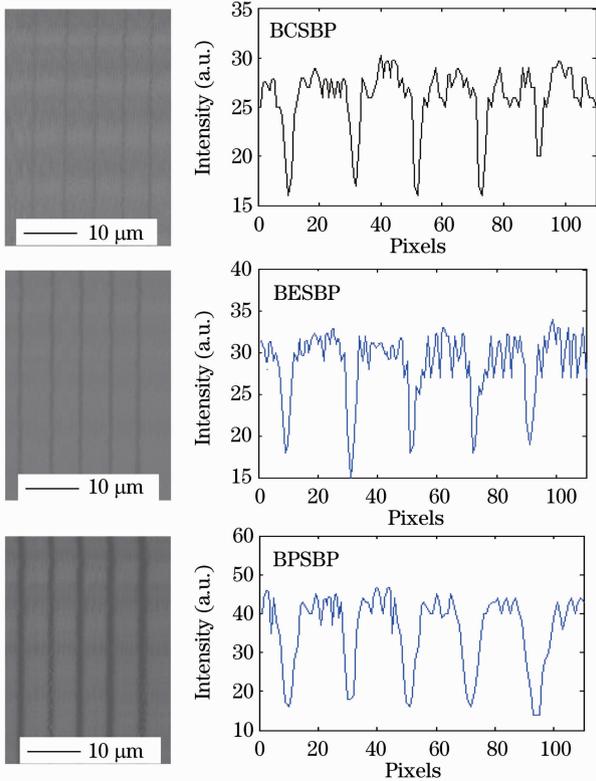


图 4 3 种生色团掺杂 PMMA 薄膜的双光子漂白线条(左)和读出信号强度(右)

Fig. 4 Lines of two-photon photobleaching (left) and the intensity of reading signals (right) in three chromophores doped PMMA films

下 $10\ \mu\text{m}$ 处进行直线扫描的实验结果及读出信号强度,读出条件为低激发功率下 ($46\ \mu\text{W}$) 进行双光子荧光读出。可以看出在相同的漂白条件下,光漂白程度大小的顺序为 $\text{BPSBP} > \text{BESBP} > \text{BCSBP}$,这一结果与材料双光子吸收截面的大小是一致的。因

为激光焦点处的光强为高斯分布,如果在高斯曲线上某处的激发光强大于材料的漂白阈值,则在该处以上的激发光强都能满足双光子漂白条件。BPSBP 有最大的双光子吸收截面,相应地就会有最小的双光子漂白阈值,在相同的漂白条件下,光漂白程度最大,且漂白点也会最大。通过比较这些结果,可以认为 BPSBP 的光漂白阈值最低,较小的激发功率即可实现双光子漂白,测试中选择 BPSBP 的 PMMA 掺杂薄膜作为双光子漂白的存储介质。

4.2 掺杂薄膜双光子荧光性质

为研究 BPSBP 的 PMMA 掺杂薄膜作为双光子漂白的存储介质在不同激发光强下的荧光发射及光漂白特性,采用了双光子荧光扫描系统,研究了存储介质的双光子荧光强度对激发功率的依赖关系。图 5 为在不同激发功率下得到的双光子荧光强度与激发功率的对数关系。图 5(a)为低激发功率下(小于 $2.4\ \text{mW}$)二者的对数关系,通过对数据点进行线性拟合,得到直线的斜率为 1.99 ± 0.02 ,这表明激发功率较低时,双光子荧光强度与激发功率成二次方关系,即在 $800\ \text{nm}$ 的波长激发下,BPSBP 的 PMMA 掺杂薄膜在低激发功率下发生的是纯粹的双光子吸收。随着激光功率增加,可以从图 5(b)看出双光子荧光强度与激发功率的对数关系明显地偏离二次方关系,直线斜率为 1.74 ± 0.10 ,这说明在较高的激发功率下(大于 $6.0\ \text{mW}$),双光子生色团发生了光漂白,从而导致了荧光发射的降低。

从理论上分析,双光子发射的荧光强度 I_f 与激发光强 I 和样品中的双光子生色团总数 N 有关,它们之间的关系为

$$I_f = CI^2N, \quad (1)$$

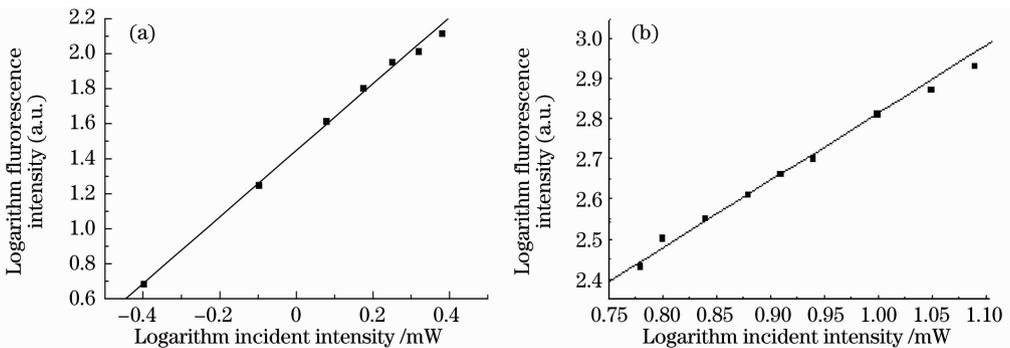


图 5 BPSBP 掺杂 PMMA 薄膜的双光子荧光强度与激发功率的关系。(a)较低激发功率;(b)较高激发功率
Fig. 5 Relationship between two-photon fluorescence intensity and excitation power in BPSBP doped PMMA film.

(a) At lower excitation power; (b) at higher excitation power

式中系数 C 为常数。如果样品在光照下没有发生光漂白反应,双光子生色团的总数应该保持恒定,检测到的荧光强度和激发光的强度关系遵守(1)式给出的二次方关系,如图 5(a)为所示,说明 BPSBP 的 PMMA 掺杂薄膜在低功率激发下没有发生光漂白反应。如果双光子吸收达到饱和,而继续增加激发功率就会引起双光子光漂白,即一部分 BPSBP 分子因发生光化学反应而丧失了荧光发射特性。而且随激发光增强,丧失荧光发射能力的分子数也越多,因而测量得到的荧光强度和激发功率的关系将小于二次方,如图 5(b)所示。双光子荧光强度与激发功率的对数关系明显地偏离二次方关系,说明存储介质在较高功率激发下发生了双光子漂白。综上所述,在存储介质中,用较大的激发功率进行漂白和较小

的激发功率进行荧光读出,可实现双光子漂白信息的存储和读出。选择适当小的读出功率可以保证存储材料的荧光稳定性,在一定程度上不破坏多次读出信息,使读出信号具有较高的信噪比。

4.3 双光子漂白三维光存储

存储数据点的分辨率与激发功率和激发时间有密切的关系。图 6(a)是将曝光时间固定在 35 ms,激发功率逐渐增大时在 BPSBP 的 PMMA 掺杂薄膜内部扫描所得的光漂白结果。从图中可以看出,存储点的尺寸几乎随着激发功率的增加而线性增加,这与激光聚焦点光强的高斯分布有关,当激发功率增加时,发生双光子吸收而造成光漂白的范围就会增大。

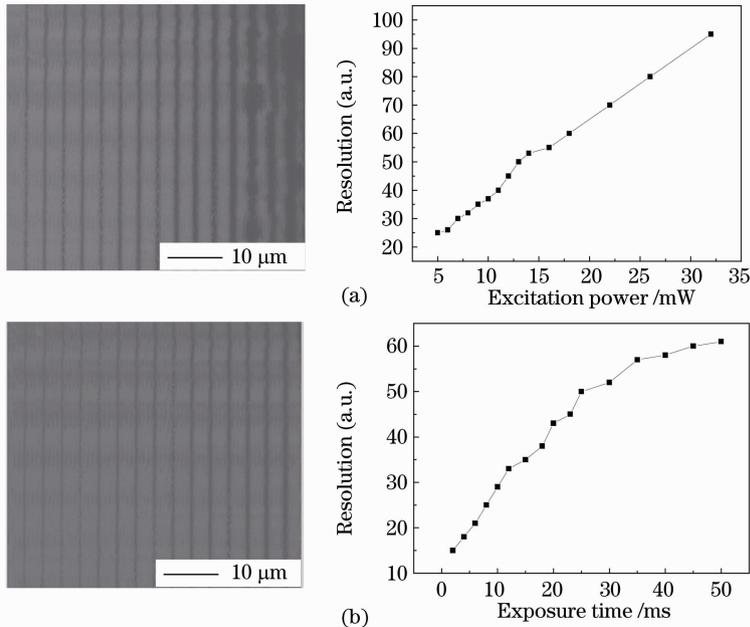


图 6 BPSBP 掺杂 PMMA 薄膜的存储分辨率与激发强度和曝光时间的关系。(a)激发功率不同时的漂白结果;
(b)激发时间不同时的漂白结果

Fig. 6 Relationship between storage resolution and excitation intensity and exposure time in BPSBP doped PMMA film.

(a) Photobleaching lines at different excitation powers; (b) photobleaching lines under different exposure time

当激发功率在 6 mW 以下时,发现漂白效果变化不明显,以该激发功率作为双光子漂白的存储阈值,飞秒激光的重复频率为 80 MHz,这样激光单脉冲的能量为 0.67 nJ。这一存储阈值要远低于利用微爆方式进行三维光学数据存储的结果^[13,14],微爆结果表明对于 $\text{Sm}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ 掺杂的 PMMA 和纯 PMMA 的存储阈值分别为 10.2 nJ 和 20.3 nJ。存储材料存储阈值的降低,有利于信息的并行和高速存储。

逐渐增加时扫描所得到的漂白结果。从图中可以看出,在一定范围内(小于 35 ms)随着激发时间的增加,存储点的尺寸有明显的增加,而当曝光时间大于 35 ms,存储点的尺寸几乎不变。这些存储特性说明曝光时间一定时,降低激发功率可以提高分辨率;激发功率不变,降低曝光时间也可以提高分辨率。

图 7(a)是在 BPSBP 的 PMMA 掺杂薄膜中的双光子漂白的数据位光存储的英文字母图案。双光子漂白时激发功率为 13.4 mW,曝光时间为 20 ms。采用双光子激发方式读出时,读出功率为 46 μW。

图 6(b)是激发功率固定在 13.4 mW,激发时间

字母 A、B、C 和 D 代表漂白过的区域，数据点之间距离为 $3 \mu\text{m}$ ，层间距为 $8 \mu\text{m}$ ，按此参数进行多层存储，三维数据光存储密度可达 $14 \text{ Gbit}/\text{cm}^3$ 。该部分的荧光强度在漂白后发生很大的衰减，和未漂白的

背景部分有很大的双光子荧光反差。由于读出时使用了较低功率的激发光，所以存储的数据图案可以反复读取而不会因背景荧光部分被漂白而破坏，如图 7(b)所示。

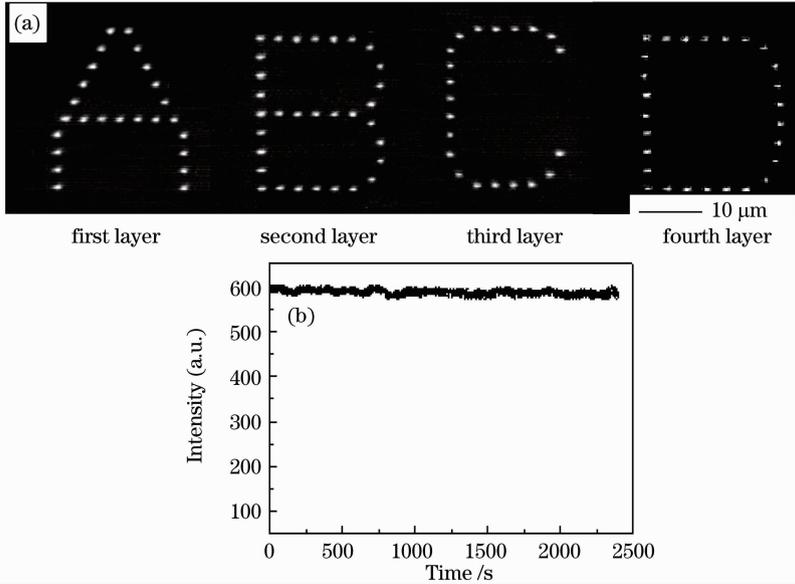


图 7 BPSBP 掺杂 PMMA 薄膜的双光子写入和双光子读出数据位存储。(a)存储图案 A、B、C 和 D；(b)双光子读出时荧光强度与曝光时间的关系

Fig. 7 Data bit storage with two-photon writing and two-photon reading in BPSBP doped PMMA film, (a) Storage pattern of A,B,C and D; (b) relationship between fluorescence intensity and exposure time in two-photon reading

4.4 双光子漂白机理的研究

为了进一步探索双光子光漂白的机理，对 BPSBP 掺杂 PMMA 薄膜进行了双光子漂白的动力学研究。图 8(a)是在不同大小的激发功率下，荧光漂白过程随时间变化的关系。从左到右激发功率依次降低(从 13.4 mW 到 6.7 mW)，可以看到彻底光漂白所需时间也越来越多，也即光漂白速率越来越慢，可见要提高存储速度，在曝光时间不变的情况下，要用较大的激发功率。

对每条荧光强度随时间衰减曲线用单指数方程进行拟合，

$$y = A\exp(-x/t) + y_0, \quad (2)$$

式中 t 为荧光衰减时间，这样得到不同激发功率下的荧光衰减时间 t 。

采用双光子光漂白速率来表示荧光衰减时间，对激发功率进行对数做图，得到的数据点如图 8(b)所示，通过直线拟合得到斜率为 2.98 ± 0.21 ，表明双光子漂白速率正比于激发光强的三次方。这说明

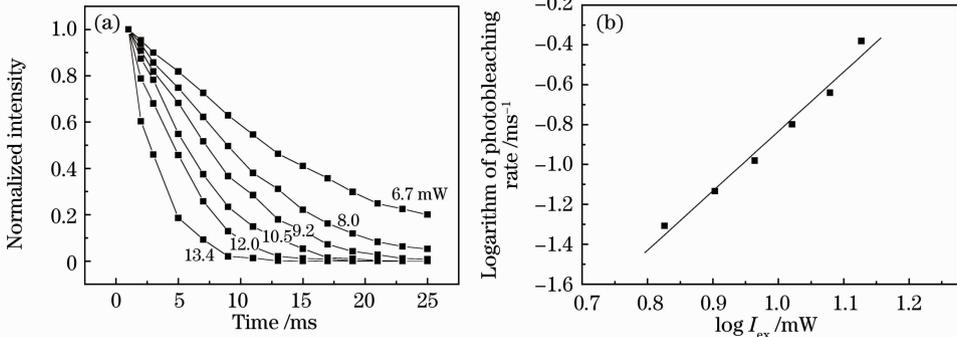
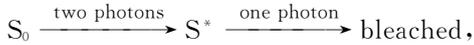


图 8 BPSBP 掺杂 PMMA 薄膜的双光子漂白动力学曲线。(a)在不同的双光子激发功率下的荧光衰减曲线；(b)双光子漂白速率与激发功率的对数关系

Fig. 8 Two-photon photobleaching decay kinetics curves of BCSBP doped PMMA film, (a) Fluorescence decay curves at six different excitation powers; (b) logarithmic relationship between photobleaching rate and excitation power

双光子漂白过程并不是在双光子吸收的同时生色团分子被漂白,而是通过双光子吸收生色团分子首先跃迁至激发态,处于激发态的分子是一个能量较高的不稳定状态,再与一个高能光子相互作用,分子结构就会发生不可逆的改变,从而导致荧光淬灭,其过程可简单表示为



式中 S_0 和 S^* 分别表示基态和激发态能级。

5 结 论

以设计合成的新型二苯乙烯衍生物作为双光子生色团,利用其在飞秒激光下的双光子光漂白现象,以漂白前后两个不同的稳定状态作为数据位 0 和 1,在掺杂有双光子生色团的 PMMA 聚合物薄膜内进行了三维数据光存储。对双光子漂白的能力研究表明较大的双光子吸收截面有助于在较低的激发功率下实现光漂白,而具有较小双光子吸收截面的生色团则意味着较大的光存储阈值。双光子漂白特性研究表明降低激发功率可以提高分辨率,降低曝光时间也可以提高分辨率,而较大的激发功率则可以提高存储速度。综合考虑影响材料的光漂白因素,采用高激发功率的双光子写入和低激发功率的双光子读出方法在 BPSBP 掺杂 PMMA 薄膜内部实现了三维双光子漂白信息存储,实现了高达 14 Gbit/cm^3 的理论存储密度。双光子光漂白速率对激发功率的依赖关系则表明双光子光漂白的机理涉及到三个光子的协同作用。实验结果说明具有高双光子吸收截面的二苯乙烯衍生物在基于双光子漂白的三维超高密度信息存储方面有重要的应用前景。

参 考 文 献

- Li Zuanfang, Huang Zufang, Chen Rong *et al.*. Two-photon fluorescence imaging of thyroid tissue[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 765~768
李钻芳,黄祖芳,陈荣等. 甲状腺组织的双光子荧光成像[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 765~768
- Di Jianke, Zhou Ming, Yang Haifeng *et al.*. Manufacturing micro-biological device and scaffold research with two-photon femtosecond laser technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 249~254
狄建科,周明,杨海峰等. 飞秒激光双光子制造生物微器件支架[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 249~254
- Yang Wei, Zou Qianli, Zhou Yang *et al.*. Study on water-soluble

benzylidene cyclopentanone dyes for two-photon induced photodynamic therapy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100118

杨威,邹千里,周扬等. 水溶性苄叉环戊酮染料的双光子光动力性能研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100118

- Guo Fuquan, Hu Zhiyuan, Fu Xinjian *et al.*. Photopolymerization behaviors of novel two-photon absorption initiators and fabrication of microdevices[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1528~1534
郭福全,胡治元,付新建等. 新型双光子引发剂光聚合行为及微器件制备[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1528~1534
- B. H. Cumpston, S. P. Ananthavel, S. Barlow *et al.*. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication[J]. *Nature*, 1999, **398**(6722): 51~54
- A. D. Xia, S. Wada, H. Tashiro. Optical data storage in C_{60} doped polystyrene film by photo-oxidation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(10): 1323~1325
- D. Mephail, M. Gu. Use of polarization sensitivity for three-dimensional optical data storage in polymer dispersed liquid crystals under two-photon illumination[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(7): 1160~1162
- D. Ganic, D. Day, M. Gu. Multi-level optical data storage in a photobleaching polymer using two-photon excitation under continuous wave illumination[J]. *Opt. Laser Engng.*, 2002, **38**(6): 433~437
- Tang Huohong, Zhou Yongjun, Jiang Zhongwei *et al.*. Experimental study on photochromic three-dimensional optical storage under two-photon absorption[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 92~96
唐火红,周拥军,蒋中伟等. 双光子吸收光致变色三维光存储实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 92~96
- Tang Huohong, Xing Hui, Huang Wenhao *et al.*. Two-photon three-dimensional optical data storage with equal exposure energy and time increase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1347~1351
唐火红,邢卉,黄文浩等. 等曝光量时间递增双光子三维光存储[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1347~1351
- 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
蔡建文,沈兆龙,江兵等. 基于 DVD 光头的双光子光致漂白三维光存储[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1401~1405
- Guo Fuquan, Sun Xiaolao, Xiong Fei *et al.*. Synthesis and spectral properties of stilbene derivatives as two-photon absorption materials[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(9): 2462~2466
郭福全,孙小捞,熊飞等. 双光子吸收材料二苯乙烯衍生物的合成及光谱性质[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(9): 2462~2466
- Xing Hui, Tang Huohong, Jiang Bing *et al.*. Three-dimensional optical storage in a PMMA polymer doped with Ce^{3+} [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 874~877
邢卉,唐火红,江兵等. 聚甲基丙烯酸甲酯掺杂 Ce^{3+} 的飞秒激光三维信息存储[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 874~877
- H. F. Jiu, H. H. Tang, J. L. Zhou *et al.*. $Sm(DBM)_3$ phen doped PMMA for three-dimensional multi-layered optical memory[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 774~776