

- [7] Ohkoshi S I , Yorozu S , Sato O *et al.* Appl. Phys. Lett. , 1997 ,70 :1040
- [8] Sato O , Iyoda T , Fujishima A *et al.* Science ,1996 ,271 :49
- [9] Ohkoshi S I , Einaga Y , Fujishima A *et al.* J. Electroanal Chem. ,1999 ,473 :245
- [10] Ohkoshi S I , Abe Y , Fujishima A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999 ,82 :1285
- [11] Millar J S *et al.* Science , 1991 ,252 :1415
- [12] Holmes S M , Girolami G S . J. Am. Chem. Soc. ,1999 ,121 : 5593
- [13] Hatlevik Q , Buschmann W E , Zhang J *et al.* Adv. Mat. , 1999 ,11 :914
- [14] Ferlay S , Mallah T , Ouahes R *et al.* Nature , 1995 ,378 :701
- [15] Verdaguer M *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,1998 ,120 :11347
- [16] Verdaguer M , Bleuzen A , Marvaud V *et al.* Coord. Chem. Rev. ,1999 ,190 ~192 :1023

双光子吸收三维数字光存储*

张学如 陈历学

(哈尔滨工业大学应用物理系 哈尔滨 150001)

摘要 双光子吸收三维数字光存储是实现超高密度光存储的一种重要方法.双光子吸收几率与作用光强的平方成正比,使得只有位于焦点小范围内的记录介质受到激发.双光子吸收激发的光致聚合作用、光致变色作用、光致荧光漂白、光折变等效应,引起这一小范围内记录介质的光学性质发生改变.结果能将信息写到亚微米尺度的体积单元中,实现三维数字光存储.这种双光子吸收三维数字光存储的存储密度可达 10^{12} Bits/cm³.文章介绍了双光子吸收三维数字光存储的原理和进展.

关键词 双光子吸收,三维光存储,聚合物

THREE DIMENSIONAL DIGITAL OPTICAL DATA STORAGE BY TWO PHOTON ABSORPTION

ZHANG Xue-Ru CHEN Li-Xue

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract An important way to realize super high density optical storage is by three-dimensional digital optical storage based on two-photon absorption. The rate of two-photon excitation is proportional to the squared intensity of the incident light. This produces excitation only within a small region of the focus spot of the recording medium. The effects of two-photon excitation, such as photopolymerization, photochromic, photobleaching and photorefractive effects, change the optical properties of the excited fraction of the recording medium. As a result, information can be written as submicrometer volume elements, and three-dimensional digital optical data storage is achieved, the bit density of which may be as large as 10^{12} Bits/cm³.

Key words two-photon absorption, three-dimensional optical storage, polymer

1 引言

由于信息的多媒体化,我们需要处理和存储的数据量正以指数形式增长,到2001年预期超过 10^{20} 位,其中大约40%需要数字化存储^[1].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^[2,3].但在衍射效应的制约下,光存储点的尺寸大约只能降低到光波波长的一半,限制了存储密

度的进一步提高.目前传统的两维光存储几乎达到了这一极限.

两维光存储的堆积或多层两维光存储构成了三维光存储.三维光存储能将两维光存储的存储密度提高2—4个数量级.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

* 哈尔滨工业大学校基金资助项目

2000-01-19 收到初稿,2000-07-24 修回

双光子吸收激发的光存储能够提高层与层之间抗干扰能力.考虑一个聚焦高斯光束,入射到一个物理厚但光学薄的吸收样品中.对于与入射光强成线性关系的单光子吸收激发,垂直光传输方向的每一层吸收相同量的能量,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层的上下层.然而,对于依赖强度平方的双光子吸收激发,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层而不会严重干扰超过瑞利范围的邻近层.瑞利长度为 $z_0 = \pi a_0^2 n / \lambda$,这里 n 是介质折射率, λ 是激光波长,圆孔瑞利判据所能达到的最小光斑大小为 $a_0 = 1.22 \lambda / N.A.$, $N.A.$ 是数值孔径.

双光子吸收激发使记录材料的物理或化学性质发生变化,受激发点与未受激发点的光学性质出现差异,任何光学性质的不同,都可用作信息的光记录和光读出.双光子吸收激发的光致变色作用,光致聚合作用,光折变效应等所引起的吸收光谱不同,折射率不同,荧光量子产率不同,都可作为光存储的机理来记录数据.而从数据的存储方式来看,三维光存储主要有荧光存储单元型和位相存储单元型两种.本文介绍各种双光子吸收三维光存储的原理和进展.

2 双光子吸收三维光存储的原理

2.1 光致变色作用的双光子吸收三维光存储^[4,5]

光致变色材料有两种同分异构体 A 和 B,二者有着不同的吸收光谱,波长 1(记录光)和波长 2(读出光)的光对应不同的吸收系数.记录时,在波长 1 的光作用下通过双光子吸收将同分异构体 A 转化为同分异构体 B(光致变色作用).B 对波长 2 的光有吸收作用,但对波长 1 的光没有吸收作用.用两种同分异构体 A 和 B 状态代表数字“0”和“1”,实现数字式数据存储.光致变色材料能够实现荧光型^[4]和位相型^[5]光存储.读出时,对荧光型数据,读出光(波长 2)通过单光子吸收或双光子吸收激发受激点(同分异构体 B)辐射荧光,而未受激点(同分异构体 A)并不辐射荧光.通过检测荧光效应来辨别读出点处的记录介质的状态,从而读出记录信息.对位相型数据,受激点和未受激点对读出光的折射率不同.通过检测折射率差异来提取记录信息.

理想的数据存储技术应能实现可重复写-读-擦过程.基于光致变色作用的双光子吸收三维光存

储能够实现数据的擦除.在波长 3 的光波激发下(或通过加热),同分异构体 B 又转化到同分异构体 A.因此,这种原理能够实现单个数据点的擦除.应当指出的是,用波长 2 的光读取信息时,也可能发生由 B 到 A 的转化,结果在读出信息的同时也擦除了记录的信息.解决这种问题的一种方法是发展光致变色材料,使光致异构作用的发生与作用光的强度有关.在较低读出光强作用下,并不会发生同分异构作用,从而不会擦除信息.另一种方法是选择读出光的波长,使两种同分异构体都不存在吸收,但二者有不同的折射率.利用折射率的不同来记录位相信息.

实用的数据存储技术应保证存储信息的稳定性和信息记录(擦除)的快速响应.双光子吸收光存储的稳定性与记录材料及信息存储方式有关.A. Toriumi 等人^[5]用光致变色聚合物 BI536 实现的位相单元数据存储,经历了 10^4 写/擦循环后材料并没有出现明显的疲劳现象,记录的信息在 80 °C 环境下存放 3 个月后还是稳定的.应当指出的是,对荧光单元数据存储,多次读取荧光信息后,光致漂白效应使得检测的荧光信号逐渐降低而可能无法继续读取信息.位相单元数据存储不存在这一问题.另外,双光子吸收光存储记录(擦除)数据的速度与材料的光敏特性,作用光强(光强增加 10 倍,记录速度提高 100 倍)以及脉冲激光的重复频率有关,最终受脉冲激光的重复频率限制.目前擦除数据多用非相干紫外光源,响应时间在秒量级,难以达到实时要求.

2.2 光致聚合作用的双光子吸收三维光存储^[6-8]

聚合物材料在双光子吸收激发下发生光致聚合作用.光致聚合作用使介质密度增加,导致折射率增大.发生光致聚合作用和未发生光致聚合作用部分的折射率不同,这一差异可用来记录位相数据.J. H. Strickler 和他的同事用这一原理实现了 25 层光存储,成功地获得了 10^{12} Bits/cm³ 的存储密度^[6].他们用 100 μm 的 Cibacool 聚合物膜作为存储介质,用 620 nm 的脉冲激光(脉冲宽度为 100 fs)来记录数据,488 nm 的激光作为读出光.

基于双光子吸收的三维光存储,需要存储材料具有大的双光子吸收截面(或双光子吸收系数).最近的研究表明具有 D-π-D, D-π-A-π-D 和 A-π-D-π-A 结构的分子具有大的双光子吸收截面^[7].B. H. Compston 等人^[8]阐述了 D-π-D 结构分子的三维光存储.双光子吸收激发的光致聚合作用,使分子的荧光强度在聚合前后不同,达到 7.3:1.读出时,检测荧光强度来提取记录信息.

2.3 光致荧光漂白的双光子吸收三维光存储^[9]

掺杂荧光染料的聚合物,在双光子吸收的激发下辐射荧光.在低强度的光激发下,辐射的荧光强度与入射光强度的平方成正比.在高强度的光激发下,激发点的染料会被漂白,得到一个漂白点.在相同波长的光激发下,漂白点不再辐射荧光.因此,漂白点和未漂白点可用来记录数据.这种三维光存储的记录光(强光)和读出光(弱光)具有相同的波长. M. Gu 等人^[9]用 800nm 的脉冲和连续激光在荧光漂白染料中实现了双光子激发的 6 层光存储,存储密度为 6 Gbits/cm³.

2.4 光折变效应的双光子吸收三维光存储^[10,11]

如图 1 所示,在聚焦高斯光束作用下,焦点处位于施主能级的电子同时吸收两个光子而被激发到导带,其他位置的电子几乎不被激发.受激电子在导带中运动,最终被施主空穴重新俘获.受激电子的运动产生电荷的非均匀分布.电荷的分布形成电场,由普克耳效应调制折射率.由于折射率的变化,记录了一个位相数据. Y. Kawata 等人^[10]用钛蓝宝石激光输出的 762nm 脉冲激光(脉冲宽度为 130fs),在无掺杂铌酸锂晶体中实现了双光子激发的三维数据存储.每个存储点的大小为 1.2 μ m \times 1.8 μ m \times 14.2 μ m,存储密度达 33 Gbits/cm³.

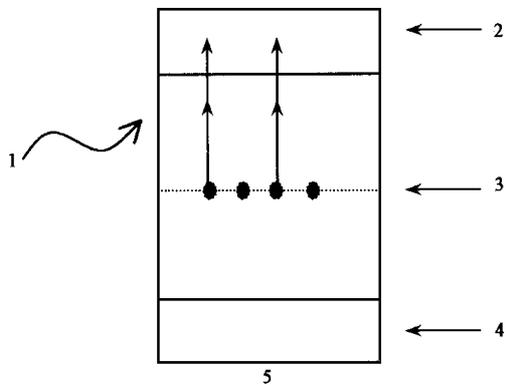


图 1 双光子吸收激发处于施主能级的电子
(1 入射光; 2 导带; 3 施主能级; 4 价带; 5 光折变晶体)

光折变晶体作为三维光存储介质,其优势在于记录信息前后无须对晶体进行预处理和后处理.由于光折变晶体中折射率的变化是可逆的,还能够实现可擦除光存储.通过加热的方法即可擦除存储的信息.但目前还没有实现单个数据的可重复记录.

由于光折变材料昂贵而且制备困难, D. Day 等人^[11]提出用光折变聚合物材料作为记录介质来实现可擦除 - 可重写的双光子吸收三维光存储.他们

用聚乙烯基咔唑(PVK)、光敏材料 TNF、生色团 DMNPAA 和乙基咔唑(ECZ)组成的复合材料作为记录材料.其中 TNF 用来吸收紫外到可见光范围内的光;DMNPAA 既用来吸收紫外到可见光范围内的光,又能提供电光效应;ECZ 能降低玻璃跃迁温度.记录光为 800nm 的脉冲激光,脉冲宽度为 80fs,平均功率为 800mW.在这一波长处,复合材料不存在单光子吸收,只发生双光子吸收.位于焦点处的随机取向的生色团,在强光电场的作用下,诱导出可探测的电 - 光效应,改变该位置材料的折射率,从而记录一个信息.读出光为 632.8nm 光波,平均功率小于 5mW.他们采用紫外光照射实现了信息的记录 - 擦除 - 重写,得到的存储密度为 5 Gbits/cm³.

3 双光子吸收三维光存储的光路系统

3.1 记录系统

双光子吸收三维光存储的记录方式如图 2 所示.主要有两种模式.第一种为正交模式:激光束 1 和激光束 2 相互正交,激光束 2 用来选择工作面. λ_1 和 λ_2 既可以是等能量的光子,也可以是不等能量的两个光子.只有两束光在空间和时间上叠加时才会有较强的双光子吸收发生,从而实现光信息记录.由于两束光通过不同的光路 and 控制系统,在记录速度和系统紧凑性方面很难达到实用化要求.另一种记录模式为分层记录:两束光通过同一方向入射到存储体上.如果两束光的波长相同,就是单光束记录.单光束记录利用双光子吸收来降低层与层之间干扰.这是目前常用的双光子吸收三维光存储记录系

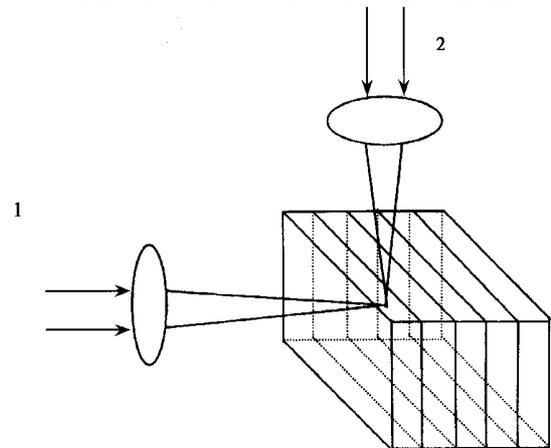


图 2 三维光存储的记录系统
(1 激光 1, λ_1 ; 2 激光 2, λ_2)

统.

3.2 读取系统

双光子吸收三维光存储的读取系统有透射式和反射式两种.各种类型的显微镜,包括位相反衬显微镜、普通透射显微镜、差分干涉反衬显微镜、差分位相反衬扫描显微镜等,都可用作三维光存储的读出系统.其中一种重要的读出系统是反射共焦显微镜,如图3(b)所示.这一读出系统有很高的轴上分辨率,而且消除了由于存储介质和衬底的非均匀性带来的背景影响.如图3(a)所示的透射共焦显微镜系统,很难消除这一背景的影响.反射共焦显微镜作为读出系统的困难在于,为了保证记录数据的空间频率分布与反射共焦显微镜系统的相干传递函数叠加,需要读和写物镜有着极高的数值孔径^[5,12].

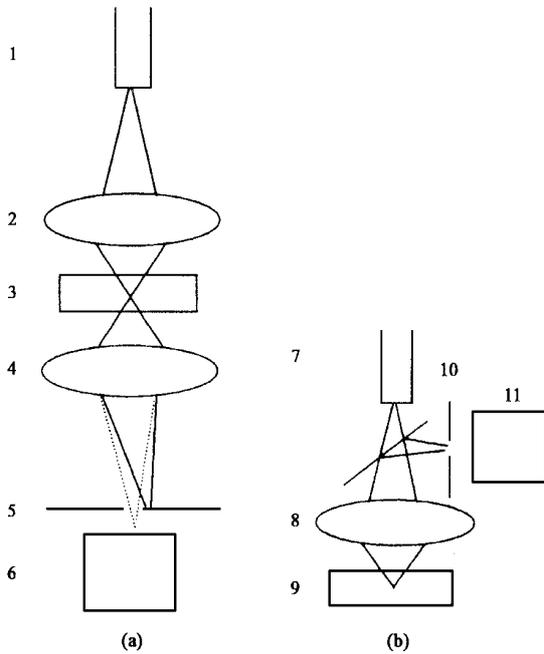


图3 三维光存储系统的共焦读取系统^[5]

(a)透射式;(b)反射式

(1 激光(点源);2 透镜;3 存储介质;4 透镜;5 针孔;6 探测器;

7 激光(点源);8 透镜;9 存储介质;10 针孔;11 探测器)

4 结束语

在聚合物材料中,利用双光子吸收激发的光致变色作用、光致漂白作用、光致聚合作用、光折变效应等实现数字式三维光存储.这种存储方式是在光激发下使电子产生跃迁而达到光存储的目的,具有快速响应、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.应当强调的是,虽然目前还处在原理性研究阶段,报道的实验结果也是在系统未进行优化的情况下得到的,但双光子吸收三维数字光存储的最高存储密度已达 $1000 \text{ Gbits}/\text{cm}^3$.可以相信,随着双光子吸收材料,尤其是大双光子吸收截面有机聚合物材料的合成,三维光存储光学系统的优化,基于双光子吸收的高密度三维数字多用光盘走向市场已为期不远.

参 考 文 献

- [1] Mansuripur M, Sincerbox G. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(11) :1780
- [2] 干福熹.物理,1999,28(6) :323[GAN Fu Xi. Wuli (Physics), 1999, 28(6) :323 (in Chinese)]
- [3] 徐端颐.激光与红外,1998,28(6) :325[XU Duan Yi. Laser & Infrared, 1998, 28(6) :325 (in Chinese)]
- [4] Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Science, 1989, 245 :843
- [5] Toriumi A, Kawata S. Opt. Lett., 1998, 23(24) :1924
- [6] Strickler J H, Webb W W. Opt. Lett., 1991, 16(22) :1780
- [7] Albota M *et al.* Science, 1998, 281 :1653
- [8] Cumpston B H, Ananthavel S P *et al.* Nature, 1999, 398 :51
- [9] Gu M, Day D. Opt. Lett., 1999, 24(5) :288
- [10] Kawata Y, Ishitobi H, Kawata S. Opt. Lett., 1998, 23(10) :756
- [11] Day D, Gu M, Smallridge A. Opt. Lett., 1999, 24(14) :948
- [12] Wilson T, Kawata Y, Kawata S. Opt. Lett., 1996, 21(13) :1003