

文章编号: 0258-7025(2004)08-0951-04

# 基于光致变色原理的多阶存储实验研究

胡 华, 齐国生, 徐端颐

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要** 多阶存储是一种无需减小记录波长或增大数值孔径而显著提高光存储容量的新颖方法。对光致变色材料采用不同的光能量写入, 读出时则具有不同的吸收率, 该特性可用于实现多阶数据存储。在研究光致变色材料曝光特性的基础上, 提出了基于光致变色原理的多阶存储数学模型, 该模型反映了光致变色材料吸收率与曝光量之间的非线性关系, 为光致变色材料的多阶存储写策略的优化提供了理论依据。在 4 阶和 8 阶静态存储实验结果中, 各信号峰值之间有明显的阶次变化, 且信号之间没有交叠现象, 从而验证了利用该材料进行多阶存储的可行性。将该多阶技术应用在实际光盘存储中, 可实现两至三倍于普通光盘容量的高密度存储。

**关键词** 信息光学; 高密度光存储; 多阶; 光致变色; 曝光特性

**中图分类号** TP 333.4      **文献标识码** A

## Experiment Study of Multilevel Data Storage Based on Photochromism

HU Hua, QI Guo-sheng, XU Duan-yi

(Department of Precision Instruments and Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Multilevel recording, which allows multiple status in each recording pit, is an alternate way to increase the recording density, but need not to directly reduce the spot size by increasing NA (numerical aperture) or reducing  $\lambda$ . The absorption of photochromic material varies with the different optical writing energy, which can be used to realize multilevel data storage. At first, the exposure characteristic of this material as the media of multilevel storage is studied, and the mathematical model of multilevel storage using this material has been achieved. The nonlinear relation between absorption and exposure energy is reflected in the model, which supports to optimize the write strategy of photochromic multilevel data storage. In the results of 4-level and 8-level static multilevel storage experiments, each level of signal amplitude varies obviously without overlap, which proves the possibility of applying this material to multilevel data storage. The capacity of optical disk will be improved by double or treble if this multilevel technology is implemented into practical optical disk storage.

**Key words** information optics; high density optical data storage; multilevel; photochromism; exposure characteristic

## 1 引 言

信息技术的高速发展对光存储系统的容量和数据传输率提出了越来越高的要求。传统的光存储受到光学衍射极限的限制, 采用缩短激光波长和增大数值孔径的方法来提高存储密度是十分有限的。多阶存储是在不改变光学数值孔径的情况下, 显著提

高存储容量和数据传输率的一种新技术。例如采用坑深调制(PDM)方式的多阶只读光盘<sup>[1]</sup>, 该光盘上单个的记录坑点有多种可能的坑深, 从而得到不同反射阶次的信号。由于在标准坑深内可分阶的深度有限, 限制了该方案所能达到的阶数。多阶存储技术也可应用于可擦写式相变光盘<sup>[2,3]</sup>, Calimetrics 公司利用幅度调制多阶技术<sup>[4]</sup>, 在 CD-RW 上成功

收稿日期: 2003-04-23; 收到修改稿日期: 2003-06-23

基金项目: 国家 973 计划(G19990330)资助项目。

作者简介: 胡 华(1979—), 男, 江西南昌人, 清华大学精密仪器与机械学系博士研究生, 主要从事高密度光存储的研究。

E-mail: hh01@mails. tsinghua. edu. cn

实现了 2 GB 的存储容量。

光致变色材料与相变材料类似,如果采用不同的光能量写入,读出时则具有不同的吸收率。清华大学光盘国家工程研究中心对光致变色材料的多阶存储特性进行了研究<sup>[5]</sup>。本文在改进光致变色材料性能的基础上,实现了更高阶次的存储实验结果,并探讨其中的存储机理。

## 2 多阶存储实验研究

### 2.1 光致变色原理

光致变色是指某物质在不同波长光照射下所产生的在不同化学状态之间发生快速可逆转换的现象,如图 1 所示,A 和 B 两种稳定的化学状态所对应的吸收谱是完全不同的,以这两种状态来表示数字“0”和“1”,从而实现基于光致变色材料的数字式存储。

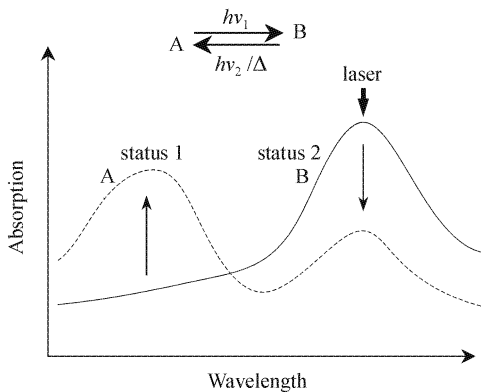


图 1 光致变色记录的原理  
Fig. 1 Principle of photochromic recording

与传统光存储的“热模式”不同,这是一种光子型的记录方式,反应时间极短且反应尺度在分子量级,可实现超高密度光存储。由于光致变色材料的双光子吸收特性,目前国内外开展的相关研究主要集中在三维和全息光存储方面<sup>[6~8]</sup>。

### 2.2 实验样片准备

实验使用的光致变色材料为:1,2-双(2,5-二甲基噻吩-3-基)全氟环戊烯,其成色前的分子式和吸收谱线如图 2 所示。实线表示成色前该材料的吸收特性,即对紫外波段的光有着强烈的吸收。虚线表示成色后该材料的吸收特性,即成色以后,该材料可吸收 600~700 nm 波段的光照,并返回到成色前状态。

在实验中采用 650 nm 激光作为该材料的写入

和读出光源,即与 DVD 光盘所用的激光光源相同。

实验样片采用旋涂制作工艺,首先将该材料溶解在 PMMA 溶液中,然后旋涂于镀有银反射膜的 1.1 mm 液晶制版玻璃上。实验样片的结构如图 3 所示。

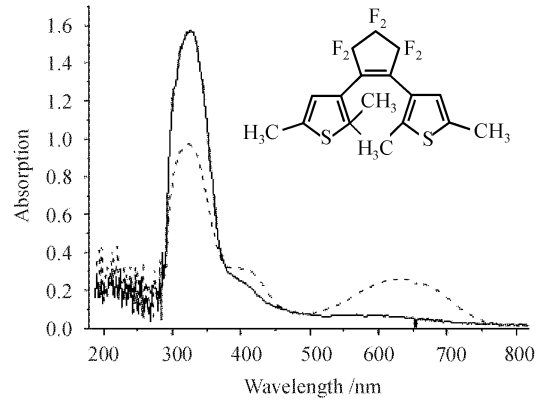


图 2 实验材料的分子式(成色前)以及吸收谱线  
Fig. 2 Molecular formula (before illumination) and absorption curve of the photochromic material

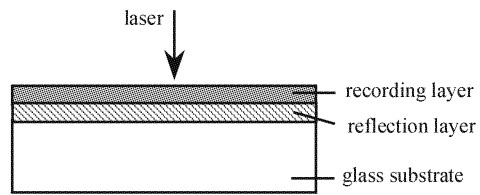


图 3 实验样片结构示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of sample

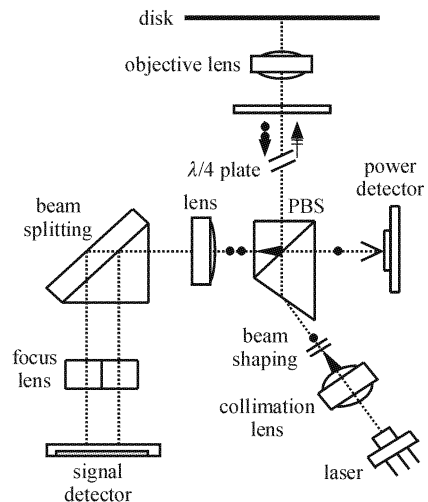


图 4 多阶存储实验系统光路示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of optical pickup of the multilevel storage experiment system

### 2.3 多阶存储实验系统

图 4 是多阶存储实验系统的光路示意图。半导

体激光器发出 650 nm 波长的连续激光,其功率和脉宽均可调,最大功率为 20 mW。激光束经过准直和整形后,通过偏振分光棱镜以及 1/4 波片,被物镜聚焦到实验样片上进行读写。激光束被样品反射后经过 1/4 波片、偏振分光棱镜后进入光电探测器得到读出信号。实验样片置于三维精密工作台上,可由计算机程序控制各方向的移动,最小步距为 0.1 μm。

### 2.4 光致变色材料曝光特性

在光致变色材料的存储特性研究中,发现样片材料上记录点(曝光点)的反射率与该点用于记录的曝光量之间有着一定的关系,反射率随着曝光量的增加而非线性增大,随后趋于稳定。

在对光致变色材料的曝光特性进行理论分析与推导的基础上,根据光化学定律,可建立光致变色材料多阶存储的理论模型,即

$$W = \int_{R_0}^R \frac{P}{\alpha \cdot (1 - R) R \ln^{\tau} R^{-1}} dR$$

其中

$$\alpha = \frac{10^3}{4 \cdot 6^{\tau-1} L^{\tau} N_a h c} \cdot \frac{P \lambda}{S} \cdot \frac{c_{\phi}}{\epsilon^{\tau-1}}$$

上式中各参数含义如下:W 为曝光量,R 为反射率,L 为膜层厚度,S 为反应面积,P 为激光功率, $N_a$  为阿伏伽德罗常数, $h$  为普朗克常数, $c_{\phi}$  为量子产率系数, $c$  为光速, $\lambda$  为波长, $\tau$  为常数, $\epsilon$  为摩尔消光系数。

图 5 是按上述表达式用 MathCAD 运算工具进行数值计算的结果及其与实验数据的比较,其中虚点线为理论计算结果,锯齿线为实验数据。理论计算和实验数据吻合良好,实验样片的反射率在 0.28~0.69 之间非线性变化,不同的曝光量对应于不同的反射率。该理论模型建立了记录点反射率 R 与曝光能量 W,反应面积 S 以及盘片本身特性之间的

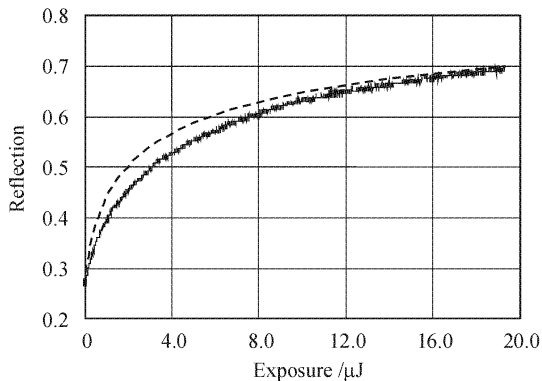


图 5 反射率和曝光量关系的理论计算及实测数据  
Fig. 5 Dependency of the calculated and measured reflection on the exposure

关系,从而为光致变色材料的多阶存储写策略的优化提供了理论依据。

## 3 多阶存储实验结果与分析

根据多阶存储理论模型,采用不同曝光量获得不同反射率可实现多阶存储。在此基础上进行了 4 阶和 8 阶静态存储实验研究。

### 3.1 4 阶静态存储实验

在实验样片上依次写入三组记录点,每组都包含三个记录点,分别对应不同等级的曝光量。用写入激光沿写入方向的反向扫描记录点,从而得到各个记录点不同的反射信号电压值,如图 6 所示。其中纵坐标为电压值(V),横坐标代表扫描方向,各个记录点等间距分布,其间隔为 20 μm。

图 6 中不同的峰值电压对应着不同的记录点,电压值正比于该记录点的反射率。实验中各记录点对应的曝光量和电压幅值数据见表 1,各阶次信号之间的电压值差别明显,利用现有的信号处理技术足以将各阶信号提取并加以区分。

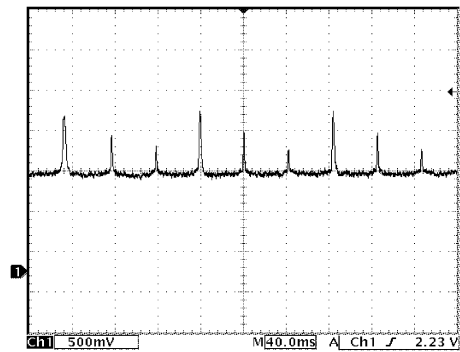


图 6 4 阶静态存储实验结果  
Fig. 6 Results of 4-level static experiment

表 1 4 阶静态存储实验数据  
Table 1 4-level static experiment data

Signal level	Min. /V	Max. /V	Aver. /V	Exposure /μJ
0	0	0	0	0
1	0.28	0.30	0.29	2.85
2	0.48	0.50	0.49	7.53
3	0.69	0.74	0.72	17.64

4 阶静态存储实验结果表明,该光致变色材料可以在吸收不同光能的情况下呈现多阶特性,4 阶信号各阶次之间没有交叠,从而证实了该材料应用于多阶存储的可行性。

根据理论计算,在采用相同的激光波长和数值孔径的前提下,多阶存储的容量是传统二值存储的  $l_b N$  倍,其中  $N$  为存储阶数。因而本实验所得到的 4 阶存储结果,如果应用在实际光盘存储中,将获得两倍于普通光盘的存储容量。如果是 8 阶存储,则容量增长为 3 倍。

### 3.2 8 阶静态存储实验

与 4 阶静态存储实验方法类似,在实验样片上依次写入七个记录点,分别采用从低到高不同的曝光量。激光沿着相反的方向扫描实验样片,得到各个记录点不同的反射信号电压值,如图 7 所示。

各记录点对应的曝光量和信号幅值数据见表 2。各信号峰值之间有明显的阶次变化,且信号之间没有重叠现象。由于该光致变色材料本身的吸收特性导致信号幅度增大。

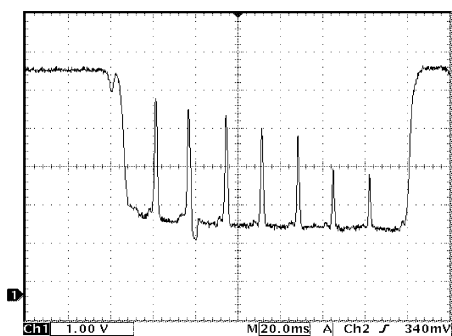


图 7 8 阶静态存储实验结果

Fig. 7 Results of 8-level static experiment

表 2 8 阶静态存储实验数据

Table 2 8-level static experiment data

Signal level	Amplitude /V	Exposure / $\mu$ J
0	0	0
1	1.30	2.35
2	1.46	4.32
3	2.36	6.34
4	2.50	8.65
5	2.88	11.82
6	3.01	15.61
7	3.28	19.25

由于光致变色材料存储为光子型存储,记录层材料厚度的均匀性,以及材料浓度的均匀性对于多阶存储的效果影响很大,这主要与样片的制作工艺相关。材料厚度或者浓度均匀性方面的缺陷,可能会破坏反射信号的一致性,使曝光量与多阶信号的阶次不对应,并导致多阶信号的背景噪声。

按照多阶存储理论模型的计算,各阶信号的变化应接近于线性规律,然而由于材料的均匀性和记录层厚度的均匀性问题,导致各阶信号的变化有一定的波动,图 7 中第 6 阶信号的底部还受到了轻微的干扰。

为实现更高阶次的存储结果,需要进一步改善样片的旋涂制作工艺,并提高材料曝光性能,使其具有更为宽广的吸收率变化范围。结合利用有效的信号处理与均衡技术,可进行动态多阶存储实验研究。

## 4 结 论

提出了在光致变色材料上实现静态多阶存储的方法,并探讨其中的存储机理。通过控制不同的曝光量可得到不同的反射率,从而实现多阶存储。4 阶和 8 阶静态存储实验结果证实了利用光致变色材料进行多阶存储的可行性。

与 DVD 光盘(650 nm 激光波长,单面单层 4.7 G 容量)相比较,如能在其基础上应用多阶存储技术,将获得单盘 8 Gb(4 阶存储),或单盘 13 Gb(8 阶存储)的容量,并大大提高光盘读写的传输率。

## 参 考 文 献

- B. V. Johnson, G. A. McDermott, M. P. O'Neill *et al.*. Using Pit-depth Modulation to Increase Capacity and Data Transfer Rate in Optical Discs [C]. Conference Digest of Optical Date Storage Topical Meeting, 1997. 44~45
- Takeo Ohta, Kenichi Nishiuchi, Kenji Narumi *et al.*. Overview and the future of phase-change optical disk technology [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**(Part 1, 2B):770~774
- Kenjiro Kiyono, Michikazu Horie, Takashi Ohno *et al.*. Rewritable multilevel recording by mark-size modulation on growth-dominant phase-change material [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(Part 1, 3B):1855~1856
- M. O'Neill, K. Balasubramanian, J. Stinebaugh. Phase-change multilevel recording for 2 GB CD-RW [C]. PCOS, 2001. 43~50
- Hua Hu, Duanyi Xu, Guosheng Qi *et al.*. Multi-level storage based on photochromic recording material [C]. *SPIE*, 2002, **4930**:258~260
- Denis A. Akimov, Andrei B. Fedotov, Nikolai I. Koroteev *et al.*. Optimizing two-photon three-dimensional data storage in photochromic materials using the principles of nonlinear optics [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(Part 1, 1B):426~428
- Kyohei Iwamoto, Tsuyoshi Konishi, Jun Tanida *et al.*. Angular selectivity in nondestructive readout of hologram on photochromic protein bacteriorhodopsin [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**(Part 1, 3B):1864~1865
- Yao Huawen, Huang Mingju, Chen Zhongyu *et al.*. Optimization of acrylamide-based photopolymer and its holographic character investigation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):972~974  
姚华文,黄明举,陈仲裕等.光致聚合物材料中引发剂浓度的优化和全息存储[J].中国激光,2002,**A29**(11):972~974