

文章编号: 0253-2239(2005)10-1396-5

光致变色多阶光存储中的光学串扰分析*

沈全洪 徐端颐 齐国生 赵 辉 雷志军 张启程

(清华大学精密仪器与机械学系国家光盘工程研究中心, 北京 100084)

摘要: 利用光致变色材料的灰度分阶特性可以实现多阶光存储。以傅里叶光学和光致变色记录符的可叠加性为基础, 采用霍普金斯标量衍射理论的经典归一化坐标, 对光致变色多阶光存储中的光学串扰进行了理论建模和数值分析, 作为后续电通道补偿设计的前提。数值计算结果表明: 相邻记录符与盘基信号的交叉串扰项是光学串扰的主要成分, 且随着中心距的增加, 相邻记录符引起的串扰迅速降低; 当无寻道误差时, 邻道记录符引起的串扰可以忽略; 高阶记录符引起串扰要明显高于低阶的串扰, 且影响多阶存储的可分阶性; 实验结果很好地验证了所建立的模型的合理性。

关键词: 光存储; 光致变色; 多阶; 光学串扰; 标量衍射

中图分类号: TP333.4 文献标识码: A

Analysis of the Optical Crosstalk in Photochromic Multi-Level Optical Storage

Shen Quanhong Xu Duanyi Qi Guosheng Zhao Hui Lei Zhijun Zhang Qicheng

(Optical Memory National Engineering Research Center, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: It has been proved by experiments that multi-level optical storage can be achieved by photochromic media. A theoretical model of optical crosstalk in photochromic multi-level storage is proposed, which is the basic of compensation and equalization in subsequent electrical system. This model is based on the normalized coordinates presented by Hopkins in the classical scalar diffraction theory and the superposition of Fourier optics and photochromic marks. The results of numerical simulation show that the crosstalk will decrease if the center distance increases, hence the crosstalk of adjacent track could be neglected if no track error. The cross term of the adjacent mark and unwritten disk is the main component of crosstalk. The crosstalk rate is approximately a proportion function of writing power, that is, crosstalk caused by high level photochromic mark is much higher than low level one. The experiment has well certified the theoretical model.

Key words: optical storage; photochromic; multi-level; optical crosstalk; scalar diffraction

1 引 言

信息技术的快速发展要求光存储系统有更大的容量和更快的传输速度。光盘产品依靠缩短激光波长和增大数值孔径来提高光存储密度这一技术路线已接近物理极限, 因此近场技术、多阶存储等一些新技术得到了广泛的关注^[1~4]。应用多阶技术可以在不改变波长和数值孔径的前提下同时提高光盘的存储容量和数据传输率。目前, Calimetrics 公司的坑深调制 (pit depth modulation, PDM) 技术、Sony 公司的

记录符边沿位置调制 (single carrier independent pit edge recording, SCIPER) 技术和沟槽基频调制 (groove base band recording, GBR) 技术、Philips 公司的部分多阶受限调制 (limited multi-level, LML) 技术、Sharp 公司的记录符边沿和坑深调制 (pit edge and depth modulation, PEDM) 技术可用于多阶只读光盘, 此外 Calimetrics 公司采用记录符大小调制的方法成功实现了相变光盘的 8 阶存储^[5~8]。清华大学光盘国家工程研究中心基于灰度分阶的原理, 采用“光强调制

* 国家 973 计划重点基础研究规划项目 (G19990330) 资助课题。

作者简介: 沈全洪 (1980~), 男, 浙江宁波人, 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原理及伺服技术的研究。E-mail: quanhong99@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2005-03-21

十幅值检测”的存储结构对光致变色材料的多阶存储技术进行了研究^[9,10]。

本文以傅里叶光学和叠加分析法为基础,对光致变色多阶光存储中的光学串扰进行分析。

2 盘片模型

本文采用霍普金斯(Hopkins)经典光盘标量衍射理论中的归一化坐标系,像面和出瞳的归一化坐标分别用 u' 、 v' 和 x' 、 y' 表示。图 1 为灰度多阶光盘的模型示意图,它类似于一个二维光栅。 u' 和 v' 为盘片切向和径向归一化坐标, p 和 q 为光盘记录符切向和径向归一化周期, τ 为归一化岸宽。记录符为不同灰度的等大小信息符,不同灰度的记录符对入射激光表现出不同的反射率,等效于对返回光瞳的光强进行了调制。聚焦光斑沿道以速度 v 扫描记录符,对光强幅值进行分阶即可得到多阶信息。光致变色多阶存储的原理与之类似,但其记录过程是材料累积吸收光子并发生反应的连续过程,严格意义上记录符并没有明确的界限。当记录密度不高时,用图 1 的模型分析光致变色多阶存储的光学串

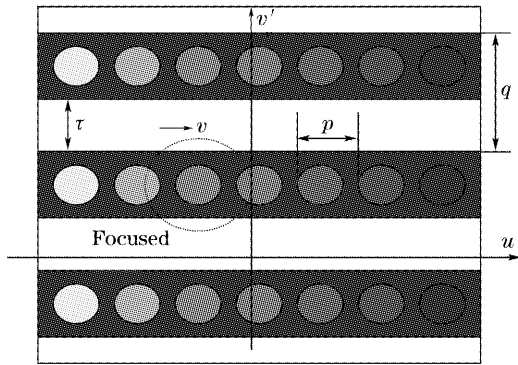


图 1 灰度多阶光盘示意图

Fig. 1 The schematic plan of gray multi-level optical disk

扰只是一种合理的简化。

3 光学串扰分析

光致变色材料样盘的反射率测定实验表明,光致变色记录过程是个渐变和非线性的过程,存在近似线性区和饱和区两部分(图 2)。光致变色多阶存储在近似线性区中进行,已实现 8 阶存储^[9]。

由图 2 中的近似线性区的拟合直线 A 可以看出,近似线性区中非线性因素的影响较小。假设光致变色多阶存储中幅值反射率随曝光量的变化是一个线性过程,那么记录符重叠区域的幅值反射率可以线性叠加。此外由于傅里叶变化和卷积运算同样具有线性可叠加性,因此可以采用叠加分析法^[11]来分析光致变色多阶光盘的光学串扰。于是,光致变色多阶光盘的衍射分析可以简化成对光致变色记录符在相对读出光斑中心不同偏移下的衍射分析和带有预刻槽的光盘面的衍射分析。

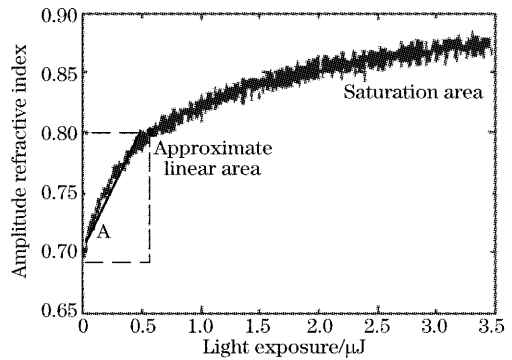


图 2 幅值反射率随曝光量变化曲线

Fig. 2 Amplitude reflectivity of photochromic media varies with light exposure

运用傅里叶变换和卷积运算,可以得到经单个光致变色记录符反射回到光瞳处的光幅值分布 $S_i(x', y')$:

$$S_i(x', y') = a\Delta t \cdot \tilde{U}_0(x', y') \otimes \{[\tilde{U}_1(x', y') \otimes \tilde{U}_1(x', y')] \exp[-j2\pi(x'\Delta u' + y'\Delta v')]\}, \quad (1)$$

其中 $\tilde{U}_0(x', y')$ 为读出光在光瞳处的幅值分布, $\tilde{U}_1(x', y')$ 为写入光在光瞳处的幅值分布, a 为材料灵敏度, Δt 为曝光时间, $(\Delta u', \Delta v')$ 是记录符中心相对与光斑中心的偏移, \otimes 表示卷积。

同理,可以得到经空白光盘的表面幅值反射回光瞳处的光幅值分布为 $S_F(x', y')$:

$$S_F(x', y') = \sum_n \tilde{U}_0(x', y' - \frac{n}{q}) \bar{U}_F(0, n) \exp(-j \frac{2n\pi}{q} \Delta v'), \quad (2)$$

其中 $\bar{U}_F(m, n)$ 为盘片表面幅值反射率 $U_F(u', v')$ 的傅里叶级数,

$$U_F(u', v') = \begin{cases} r, & |v'| \leq \tau/2 \\ r \exp(-ja), & \tau/2 \leq |v'| \leq q/2 \end{cases} \quad (3)$$

r 是岸反射率, a 为岸和槽的相位差。详细的推导过程可以参考文献[10]。

读出光在光瞳处的幅值分布可以表示为

$$\tilde{U}_0(x',y') = \begin{cases} 0, & \sqrt{(x')^2 + (y')^2} \geq 1 \\ A \exp\left[-\frac{(x')^2 + (y')^2}{2\sigma}\right], & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

其中 A 为光瞳中心处振幅, σ 为光瞳出射光能量分布系数。写入光的幅值分布 $\tilde{U}_1(x',y')$ 也可以作同样表示。

从图 1 中可以看出, 记录符的读出信号不可避免地会受到相邻记录符的影响。在我们的分析中, 将一个记录符的读出信号受到其它相邻记录符的影响称为读出的光学串扰。为了说明读出过程中不同阶次记录符所引入的光学串扰, 首先考虑两个记录符之间的影响情况。根据叠加原理, 经记录符 1 和记录符 2 反射后光瞳上的光强分布为

$$I_\sigma \propto |S_\sigma|^2 = |S_F + S_1 + S_2|^2 = (|S_F|^2 + |S_1|^2 + 2|S_F S_1| \cos \Delta\phi_{F1}) + (|S_2|^2 + 2|S_F S_2| \cos \Delta\phi_{F2} + 2|S_1 S_2| \cos \Delta\phi_{12}), \quad (5)$$

其中 S_1 和 S_2 分别代表记录符 1 和记录符 2 反射的光的复振幅。第一个括号中的表达式为记录符 1 对光瞳上的光强分布贡献, 即有效读出信号强度, 后一个括号中表达式为由于记录符 2 的出现而引入的串扰信号, $\Delta\phi_{F1}$ 、 $\Delta\phi_{F2}$ 和 $\Delta\phi_{12}$ 分别代表复振幅之间的相位差。可以看出, 串扰的组成可以分成三个部分: 记录符 2 在一定偏移量下的读出信号 ($|S_2|^2$)、记录符 2 与盘基交叉串扰项 ($2|S_F S_2| \cos \Delta\phi_{F2}$) 和记录符间的交叉串扰信号 ($2|S_1 S_2| \cos \Delta\phi_{12}$)。

4 数值计算

根据以上建立的光致变色多阶光盘的光学串扰模型, 对多阶记录符间的道内串扰和道间串扰进行数值计算。光致变色记录符是盘片运动过程中以极短的时间(或静态)写入的。光学系统使用 CD 盘片驱动器的光学头参量, 数值计算条件列于表 1 中。

表 1 用于光学串扰数值仿真的参量

Table 1 The parameters for optical crosstalk numerical simulation

λ	780 nm	Track pitch	1.6 μm
NA	0.45	q	0.923
σ	1000	Land width	1 μm
a	5×10^{-12}	τ	0.577
Δt	200 ns	r	0.63

当光斑中心与光致变色多阶记录符 1 中心重合时, 讨论同一道上距离记录符 1 为 ξ' 的相邻记录符 2 对记录符 1 读出信号的影响。相邻两个记录符中心间的归一化距离为 $p = \frac{NA}{\lambda} \xi'$ (ξ' 为实际距离)。当两个记录符的写入功率均为 1 mW, 读功率为 0.1 mW 时, 记录符 2 所引起的串扰各部分在光瞳上的光强分布随记录符中心之间的距离变化的情况如图 3 所示 (上: $|S_2|^2$, 中: $2|S_1 S_2| \cos \Delta\phi_{12}$, 下: $2|S_F S_2| \cos \Delta\phi_{F2}$)。

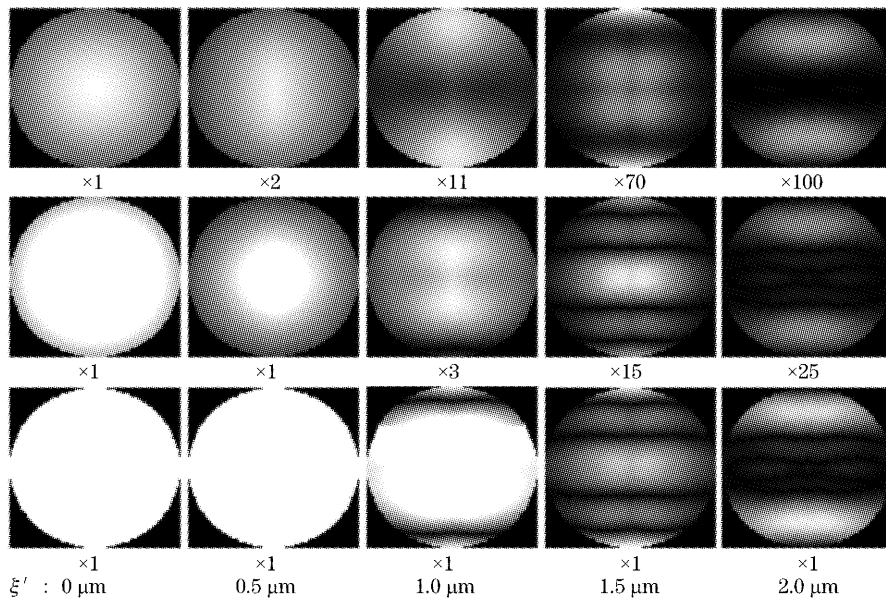


图 3 出瞳处光学串扰各部分强度随中心距 ξ' 变化情况

Fig. 3 Light intensity at pupil of each component of optical crosstalk varies with ξ'

所有计算得到的串扰读出信号都用 $|S_2|^2$ 信号的最大值进行归一化。为了便于观察,部分图的亮度有所放大。可见,记录符 2 与盘基的交叉串扰项 $2|S_F S_2| \cos \Delta\phi_{F2}$ 是串扰的主要成分。

定量计算记录符 2 引入的总串扰信号强度 I_c 与读取记录符 1 的有用信号强度 I_u 的比,探测的信号强度可以由光瞳内的光强分布积分得到。 I_c/I_u 随记录符中心距变化情况如图 4 所示。随着中心距的增加,记录符 2 引起的光学串扰迅速降低。当中心间距超过 $1.2 \mu\text{m}$ 时,串扰低于 1%,由此可知,当没有寻道误差时,邻道记录符引起的光学串扰可以忽略。

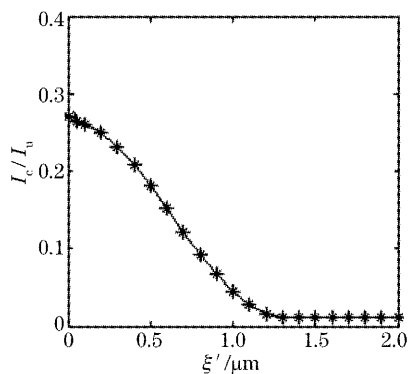


图 4 光学串扰随中心距 ξ' 变化情况

Fig. 4 Optical crosstalk varies with ξ'

由以上数值计算的结果可以看出,将记录符中心间距控制在 $1.0 \mu\text{m}$ 是比较合适的。进一步分析光致变色多阶存储中,中心距一定时不同阶次记录符引起的光学串扰。由于光致变色多阶记录符是通过调制写入功率形成的,因此不同阶次记录符间的串扰问题等价于分析不同写入功率下形成的记录符间的串扰。

设形成记录符 1 的写入功率为 1 mW ,形成记录符 2 的写入功率范围在 $0.1 \sim 5 \text{ mW}$ 之间。图 5 为不

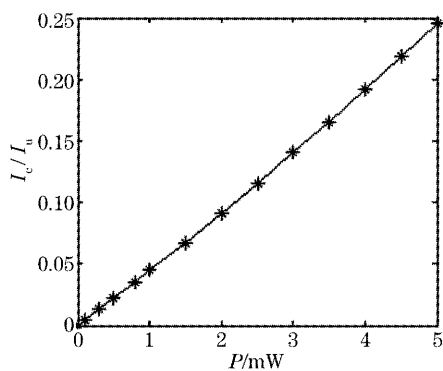


图 5 不同写入功率形成的记录符 2 引起的串扰

Fig. 5 The crosstalk caused by mark 2 with different writing power

同写入功率下形成的记录符 2 引起的串扰信号比值 I_c/I_u 。由图 5 可明显看出记录符的阶次越高,引入的光学串扰越大。高阶记录符对低阶记录符的光学串扰直接影响到光致变色多阶存储的可分阶性。

5 实验结果

光致变色多阶存储读写实验系统如图 6 所示,激光器波长 780 nm ,数值孔径 0.45 ,系统具备自动聚焦和道跟踪伺服功能。记录层材料采用俘精酸酐光致变色材料,由中国科学院感光化学所提供。实验中开启系统聚焦和道跟踪伺服。首先静态情况下在同一道上写入不同阶次的两个记录符,通过控制角度使两个记录符中心间距为 $0.6 \mu\text{m}$ 。读出过程中,令盘片以 1 r/min 恒定速度转动,读功率 0.1 mW 。从光电探测器上获得归一化读出信号如图 7 中实线所示。图 7 中虚线是基于文中建立的光学串扰模型所计算得到光瞳处的归一化读出信号强度,可见理论结果和实验结果相一致。

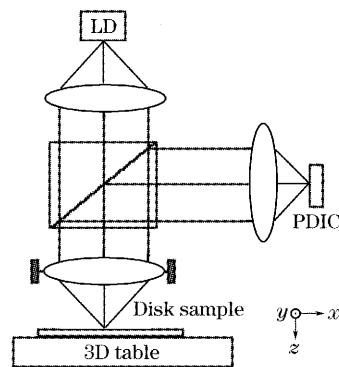


图 6 光致变色多阶存储实验系统

Fig. 6 Experimentak system for photochromic multi-level storage

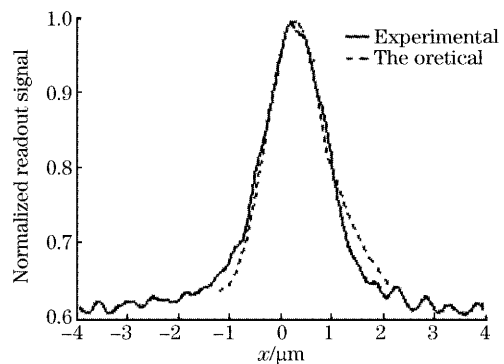


图 7 两个光致变色记录符读出实验曲线

Fig. 7 Reading experimental curve with two photochomic marks

6 结 论

数值计算结果表明,相邻记录符与盘基信号的交叉串扰项是光学串扰的主要成分,且随着光斑中心距的增加,相邻记录符引起的串扰迅速降低。当无寻道误差时,邻道记录符引起的串扰可以忽略。对于不同阶次记录符间的串扰计算结果表明,高阶的记录符引起的串扰要明显高于低阶的串扰。实验结果很好地验证了所建模型的合理性。本文中所建立的光致变色多阶光学串扰模型及其相关分析可以作为后续电通道补偿设计的前提。

参 考 文 献

- 1 Li Jinyan, Ruan Hao, Gan Fuxi. Calculation and analysis of multilayers for the read-only super-resolution optical disks[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(4): 366~370 (in Chinese)
李进延, 阮昊, 干福熹. 只读式超分辨光盘的膜层设计和分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4): 366~370
- 2 Wei Jingsong, Ruan Hao, Shi Hongren *et al.*. A novel approach to super-resolution pits readout[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 526~528 (in Chinese)
魏劲松, 阮昊, 施宏仁等. 一种新的超分辨记录点的读出技术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 526~528
- 3 Lu Yonghua, Wang Pei, Zhang Jiangying *et al.*. Investigation on near-field optical data storage using solid immersion lens[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 145~148 (in Chinese)
鲁拥华, 王沛, 章江英等. 利用固体浸没透镜的近场光学存储研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 145~148
- 4 Wang Yingli, Yao Baoli, Lei Ming *et al.*. Optical image storage using pyrryl fulgide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 616~618 (in Chinese)
王英利, 姚保利, 雷铭等. 吡咯俘精酸酐的图像光存储特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 616~618
- 5 Seiji Kobayashi, Hisayuki Yamatsu, Yoshihiro Takemoto. A polarization readout method applied to a groove baseband recording optical read-only memory discs[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 1704~1710
- 6 Geert Langereis, Wim Coene, Louis Spruijt. An implementation of limited multi-level (LML) optical recording[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 1711~1715
- 7 Junsaku Nakajima, Shigeo Terashima, Kenji Ohta. Readout of optical disk recorded by pit edge and depth modulation[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 1846~1849
- 8 T. Zhou, C. Tan, C. Leis *et al.*. Multilevel amplitude-modulation system for optical data storage[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4930**: 7~14
- 9 Hu Hua, Qi Guosheng, Xu Duanyi. Experiment study of multilevel data storage based on photochromism[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 951~954 (in Chinese)
胡华, 齐国生, 徐端颐. 基于光致变色原理的多阶存储实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 951~954
- 10 Zhao Hui. Studies on the characteristics of the photochromic multi-level data storage channel [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. 41~46 (in Chinese)
赵辉. 光致变色多阶光信息存储通道特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2003. 41~46
- 11 T. D. Milster, R. S. Upton. Fundamental principles of crosstalk in optical data storage[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(3B): 1608~1613