

多阶光存储原理分析及其读写系统 前端信号处理研究^{*}

肖家曦 齐国生 胡 华 徐端颐

(清华大学精密仪器与机械学系光盘国家工程研究中心, 北京 100084)

(2004 年 4 月 7 日收到, 2004 年 8 月 24 日收到修改稿)

运用矢量衍射理论的计算方法(耦合波方法, 时域有限差分法)对两种多阶光存储方案(坑深调制, 坑形调制)进行了原理性分析, 并简略分析了利用相变材料的幅值调制实现多阶存储的原理. 由此得出多阶光存储技术的实现是利用了光与物质之间的相互作用, 使光对记录介质产生作用, 同时介质也对光的某些特性进行调制, 而这些特征的改变一般都不止两个状态 0 或 1, 用数字方式将这多个状态记录下来便实现了多阶数字存储. 此外, 还提出了多阶光盘前端信号处理系统的设计与开发. 该系统是多阶光存储实验系统的重要组成部分, 可输出 RF, TE, FE 等伺服与误差信号, 并将信号反馈给多阶处理芯片; 同时系统还可对光学头的激光读写功率及写入时间进行控制, 并能使其实现自动调焦和道跟踪.

关键词: 多阶光存储, 矢量衍射理论, 时域有限差分法

PACC: 4230N, 4240H

端信号处理系统.

1. 引 言

为适应人们对存储容量不断提高的需求, 光存储技术在不断探索, 不断发展以求实现超高密度超快速光信息存储. 主要有以下三种途径: 减小信息符的尺寸、提高存储的维数、采用多阶技术. 这三种途径产生了很多不同的光存储技术, 如蓝光存储, 多波长存储等, 但它们都只是利用减小信息符尺寸以获得更多的记录单元, 从而提高存储容量, 实际上每个记录单元可记录两个状态, 即二值存储方式. 与此不同, 多阶存储技术是在一个记录单元上记录多于 2 个状态, 从而在记录单元数不变的情况下, 也能显著增加存储容量, 因此多阶光存储技术是增大存储容量的重要途径.

对于光学头作用于多阶盘面后输出的 PD 信号进行运算以获得聚焦误差信号(FE), 道跟踪误差信号(TE)及各种伺服信号是研究开发多阶存储实验系统需要解决的问题. 就此, 本文将光盘视为二维光栅, 利用矢量衍射理论对多阶光存储技术原理进行了分析, 并在此基础上研究开发了多阶光存储前

2. 多阶存储技术原理分析

光是一种电磁波, 对于任意媒质, 由麦克斯韦方程组可知, 媒质的电磁参数会影响电磁场的分布, 同时媒质的某些特性也会因电磁场的作用而改变. 多阶存储技术正是利用了电磁场与媒质之间的这种相互作用, 使得光对充当记录介质的物质产生特定作用, 同时介质也对光的某些特性进行调制, 而这些特征的改变一般都不止两个状态, 如果用数字方式将这些改变记录下来便实现了多阶数字存储. 为分析光盘系统中的电磁场分布, 一般将光盘视为一个二维光栅, 返回探测器上的信号正是经光栅衍射调制后的信号. 而标量衍射理论^[1-3]和矢量衍射理论^[4]都已被用于分析和计算光盘系统的衍射场分布, 特别是矢量衍射理论, 因为它能得到较精确的结果而且对光盘系统的结构没有特殊要求, 所以更是引起了广泛的讨论, 下面将利用一些现有的矢量衍射计算模型对三种多阶存储方案进行原理性分析.

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G19990330)资助的课题.

2.1. 几种多阶存储方案实现原理

2.1.1. 坑深调制(PDM)

PDM 是利用不同深度的信息坑记录信息^[5]。它的原理图如图 1 所示。如果信息坑深度不同那么发生的衍射效应就会有所不同,即反射光的光强就会随坑深变化而呈现多种状态。利用光强的多种状态即可实现多阶存储。

整个 PDM 的光学系统可用文献[6]中的矢量衍射理论进行分析,即先将入射的聚焦光束分解为平面波谱,得到每个平面波的振幅矢量,然后计算光盘对每个平面波的衍射,得到衍射波的振幅矢量,从而得到整个衍射波场的空间频谱,最后计算物镜光瞳上的能通量,得到光盘系统的读出信号。通过建模后可得到入射聚焦光束的 (m, n) 级前后向衍射波电矢量的振幅

$$u_{d2}(s, m, n) \Delta s_x \Delta s_y, u_{d1}(s, m, n) \Delta s_x \Delta s_y,$$

根据计算后显示由于坑壁可视为导体,其表面切向电场被嵌制,阻碍电磁场沿其表面传播,所以坑深在 0 到 $1/6$ 波长内变化时读出信号的幅值的确随记录坑深的变化而变化,但当坑深超过 $1/4$ 波长时,光便不能到达,读出信号幅值也不再变化。

利用该结果可在 $0-1/6$ 波长范围内通过不同的坑深来实现多阶存储。

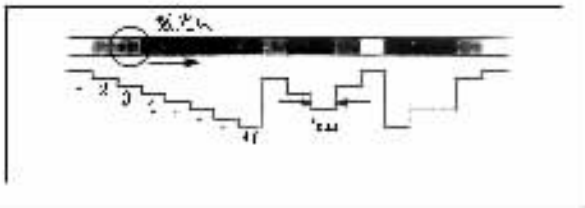


图 1 PDM 示意图

2.1.2. 坑形调制(LML)

在现有的 CD, DVD 系统中,在较短的信息坑(或岸)上,RF 信号的幅值比较低,而在较长的信息坑(或岸)上,RF 信号将上升到满幅值。LML 多阶存储方案就是在较长的信息坑(或岸)上加入一些“扰动”稍稍改变其信息坑(或岸)的形状^[7],使其读出信号降低,这样可以实现多阶存储。

以下将用时域有限差分法(FDTD)对这种多阶存储方案进行原理性分析。首先假设整个电磁场分为入射场和散射场^[8],且散射场是由入射场激励引起的,则有

$$E^{\text{total}} = E^{\text{inc}} + E^{\text{scat}}, \quad (1)$$

$$H^{\text{total}} = H^{\text{inc}} + H^{\text{scat}}. \quad (2)$$

由麦克斯韦方程组可得到光盘内散射场的微分表达式

$$\mu_0 \frac{\partial H^{\text{scat}}}{\partial t} = -\nabla \times E^{\text{scat}}, \quad (3)$$

$$\epsilon_1 \frac{\partial E^{\text{scat}}}{\partial t} = \nabla \times H^{\text{scat}} - (\epsilon_1 - \epsilon_0) \frac{\partial E^{\text{inc}}}{\partial t} - J, \quad (4)$$

其中 ϵ_1 是介质的介电常数, μ_0 和 ϵ_0 是真空的电特性参数。

在非色散介质中有

$$J = \sigma(E^{\text{scat}} + E^{\text{inc}}). \quad (5)$$

建立一个三维坐标系 (x, y, z) ,则 H, E 和 J 可表示为

$$H = H_x i + H_y j + H_z k, \quad (6)$$

$$E = E_x i + E_y j + E_z k, \quad (7)$$

$$J = J_x i + J_y j + J_z k. \quad (8)$$

然后利用偏微分差表示旋度运算,用 FDTD 方程(9)在 Yee 氏网格空间中分别在三个方向上用中心差分对微分方程进行离散

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i+1/2, j, k) - F^n(i-1/2, j, k)}{\Delta x} + O(\Delta x^2), \quad (9a)$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + O(\Delta t^2), \quad (9b)$$

其中 $F^n(i, j, k) = F(i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z, n \Delta t)$,即可求得在非色散介质中任意时间步上空间网格任意点上的电场和磁场值的循环递推式,其中 E_x^{scat} 的递推表达式为

$$\begin{aligned} E_x^{\text{sact}, n+1/2}(i, j, k) &= E_x^{\text{sact}, n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon(i, j, k)} \\ &\times \left[\frac{H_z^{\text{sact}, n}(i, j+1/2, k) - H_z^{\text{sact}, n}(i, j-1/2, k)}{\Delta y} \right. \\ &\quad \left. - \frac{H_y^{\text{sact}, n}(i, j, k+1/2) - H_y^{\text{sact}, n}(i, j, k-1/2)}{\Delta z} \right] \\ &\quad - \frac{\Delta t \cdot [\epsilon(i, j, k) - \epsilon_0] \cdot \frac{\partial E_x^{\text{inc}}}{\partial t}}{\epsilon(i, j, k)} \\ &\quad - \Delta t \cdot \sigma(u, j, k) E_x^{\text{scat}, n}(i, j, k) \\ &\quad - E_x^{\text{inc}, n}(i, j, k) \end{aligned} \quad (10)$$

同时 y, z 方向上的电场值和三个方向的磁场值的递推式也可类似推导得到。从(10)式可以看出在任意时间步上空间网格任意点上的电场取决于该点上一时间步的电场值,与该电场正交平面上邻近点处

在上一时间步上的磁场值,以及媒质在空间不同点的电参数 $\alpha(i, j, k)$ 和 $\epsilon(i, j, k)$. 磁场值也与此相似. LML 也正是利用了这点. 当信息坑或岸的形状改变时,在坑和岸的边沿处的 Yee 氏网格单元的电常数分布会改变,该点的电场值会发生改变,从而影响下一点的磁场值,这样迭代下去最终造成散射光场分布改变. 由于 FDTD 法得到的是物镜焦点附近的光场分布,探测器上的信号需利用 Rayleigh-Sommerfeld 衍射公式对其进行积分得到. 而因坑形改变而改变的光场分布最终也会使探测器上的信号改变,由此多阶光存储便得以实现.

以上原理性分析是基于媒质为非色散介质进行的,当然光盘结构中还有色散介质,此时介质的电参数会随频率而急剧变化. 在这种情况下,可采用色散媒质中的 FDTD 算法(FD²TD)对光场分布进行计算,但此时的光场分布仍会受媒质电参数的分布影响,故改变坑形仍会改变探测器上的信号.

2.1.3. 利用相变材料的幅值调制

目前相变材料在光存储领域应用得相当广泛,它具有晶态和非晶态两种状态. 在晶态下物体内部的原子呈周期性的有序排列,而在非晶态下原子则呈随机排列. 这两种状态在相当大的波长范围内折射率都有较大差别,而且当非晶态记录符的半径宽度不同时,它们对光的吸收率也会有所不同,通过介质上不同状态点反射回的光不同的强度变化,便可进行多阶存储. 目前还利用相变材料与多层记录技术相结合实现在不同层上进行非晶态记录符记录信息,从而进一步提高了存储容量.

实验已证明,当采用波长为 514nm 的短波和数值孔径为 0.85 的光在其上进行记录时,最小记录符的长度可达到 220nm,直径为 12cm 的单层记录盘面的容量可达到 17GB^[9,10],相变材料的运用前景相当乐观.

2.2. 多阶光存储实验系统

多阶光盘系统较之标准 CD 系统最大的不同就在于增加了一个功能强大的专用芯片(ML ENDEC)及相应电路,该芯片具有利用通用 CD 光学器件读写多阶盘片所需的全部模拟和数字功能. 而芯片工作所需的伺服信号、误差信号、wobble 信号等均需从模拟前端获得,该模拟前端可通过本文研究的处理系统来实现.

3. 前端信号处理系统的组成与基本原理

整个实验系统的结构框图如图 2 所示,选用 SHARP 的 CDR/RW 光学头作为前端信号拾取部分,控制部分则采用上下位机控制方式,上位机发布控制命令和传送参数,下位机接收命令和参数并对光盘读写信号进行处理控制并输出所需的信号.

系统采用 89C52 单片机作为核心控制芯片来实现下位机对整个系统控制功能,选用 AK8566 作为核心处理运算芯片. 整个系统的外围电路包括驱动模块(力矩器驱动和激光器驱动)、单片机与上位 PC 机的通讯模块、AK8566 外围模块以及系统供电模块等几个部分. 整个系统的工作过程是驱动模块通过光学头上的 32 帧软排线将控制信号输入到光学头上,光学头受到控制后会产生聚焦与道跟踪两个方向的运动,于是光学头上的信号探测器和功率探测器就会产生八个 PD 信号和功率探测信号,这些信号再通过 32 帧软排线传送到 AK8566,AK8566 将这些信号经过运算和处理后便可得到聚焦(FE)信号,道跟踪(TE)信号,功率控制信号等,于是系统的功能得以实现. 以下将对系统的重要模块进行分析.

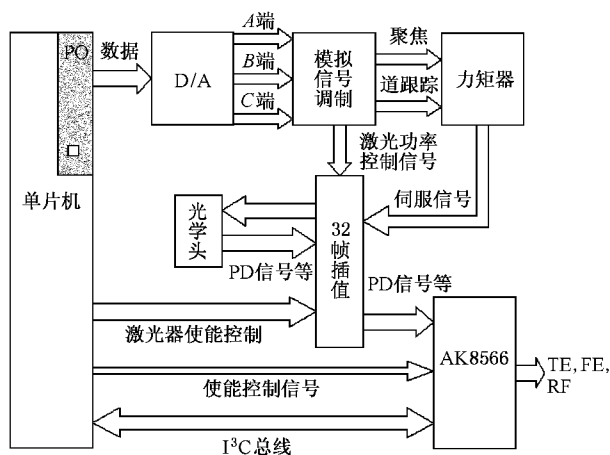


图 2 信号读出系统结构框图

3.1. 驱动模块

该模块是利用 89C52 的数据输出口输出数据到 D/A,通过单片机对 D/A 不同输出端的选择可按不同的时序输出三路模拟信号,这三路模拟信号经过调制以后可分别作为光学头力矩器的聚焦驱动和道跟踪驱动以及激光器使能信号. 三个驱动信号通过 32 帧软排线作用到光学头,于是光学头上的激光器

可按系统要求的功率工作,同时光学头可作上下方向上的聚焦运动和寻迹道跟踪运动,光学头上的激光束作用到多阶盘面后产生八象限 PD 信号和功率探测信号以备后续 AK8566 处理运算芯片所需。

3.2. 运算处理模块

系统采用的核心处理运算芯片 AK8566 是 AKM 公司的一款模拟信号处理的集成芯片,它集成了很多读出信号的必须电路,如产生各种信号的矩阵计算电路、聚焦和道跟踪信号处理电路、激光功率控制电路等系统用其实现道跟踪驱动、聚焦驱动、PD 信号处理等功能。

PD 信号首先经过采样与矩阵计算模块,其与参考电压的差值作为输入信号,当采样脉冲到来时采样保持电路会对八个输入信号进行采样,再经过矩阵计算电路后将会得到如下信号:

$$FEO = ((A + C) - (B + D)), \quad (11)$$

$$MPP = \chi(A + D) - (B + C), \quad (12)$$

$$RFO = -0.5(A + B + C + D), \quad (13)$$

$$SBADO = K_1(E + F + G + H), \quad (14)$$

$$SPPO = -K_2((F + H) - (G + E)), \quad (15)$$

其中 K_1, K_2 可通过对寄存器置数来选择。

以上信号经芯片内部的道跟踪和聚焦信号处理电路后即可得到 TE, FE 等误差信号。激光功率控制信号及其他读出信号都可通过配置芯片内部的寄存器而在相应的管脚得到。

芯片的配置是由单片机 89C52 通过芯片内部的 I²C 模块通过 I²C 总线进行的。

3.3. 单片机与上位机通讯模块

单片机与上位 PC 机通过串口进行通讯,由于单片机串口的最高输出电平 +5V 与 PC 机需要的电平之间有较大压差,故选用 MAX232 作为串口控制芯片。该芯片实质是一种双组驱动器/接收器,片内含有一个电容性电压发生器以便在单 5V 电源供电时提供 EIA/TIA-232-E 电平。每个接收器将 EIA/TIA-232-E 电平输入转换为 5VTTL/CMOS 电平,这些

接收器具有 1.3V 的典型门限制及 0.5V 的典型迟滞,而且可以接收 $\pm 30V$ 的输入。每个驱动器将 TTL/CMOS 输入电平转换为 EIA/TIA-232-E 电平。

通过以上硬件系统及相应的软件设计就可实现对多阶光盘进行读写并产生多阶存储系统所需的伺服信号及多阶编解码所用的 wobble 信号、时钟及数据信号等。

4. 试验结果

图 3 是利用光致变色材料作为记录介质,通过静态存储记录方法得到的各记录点对应的曝光量和信号幅值图。从图中可以看出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。

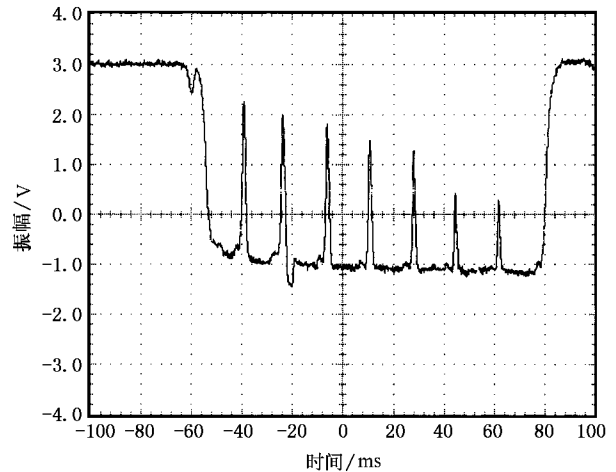


图 3 8 阶静态存储实验结果

5. 结 论

前端信号处理系统不仅可提供激光读写功率调制信号,而且也给出多阶编解码芯片所需的各种信号,还可根据系统输出的 RF 信号验证新的多阶存储方案,同时系统还可兼容于其他普通可擦写 CD 类光盘,因此整个系统有较广的应用范围和较好的应用前景。

[1] Korpel A 1978 *Appl. Opt.* **17** 2037

[2] Hopkins H H 1979 *J. Opt. Soc. Am.* **1** 4

[3] Jipson V B and Willams C C 1983 *Appl. Opt.* **14** 2202

[4] Sheng P 1978 *RCA Review* **39** 512

[5] Haeiwa H et al 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 4841

[6] Cheng X F et al 2000 *Opt. Tech.* **26** 325 [in Chinese] 成先富等 2000 光学技术 **26** 325

[7] Langereis G, Coene W and Spruijt L 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**

1711

[9] Liu B *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 107[8] Holland R , Simpson L and Kunz K 1980 *IEEE Trans. Electromagnetic Compa.* **22** 203[10] Liu B *et al* 2002 *Chin. Phys.* **11** 293

Analysis on the principle of multilevel optical data recording and the study on the processing of the front signals of a multilevel read-write system *

Xiao Jia-Xi Qi Guo-Sheng Hu Hua Xu Duan-Yi

(*Optical Memory National Engineering Research Center , Department of Precision Instrument and Mechanics , Tsinghua University , Beijing 100084 , China*)

(Received 7 April 2004 ; revised manuscript received 24 August 2004)

Abstract

This paper utilized the calculation methods in vector diffraction theory , such as the wave-coupled method and the finite difference time domain method , to analyze two multilevel optical recording methods in principle. Meanwhile the principle to achieve multilevel optical recording by modulating the amplitude of phase-change media is also discussed. According to these analysis , the multilevel data recording utilizes the mutual action between laser and recording media. Laser beam has some special effects on the media ; simultaneously the media will modulate some characteristics of the light. Generally , the diversities of these characteristics are more than two states , so the multilevel data recording can be achieved by recording these different states. Besides , the design and development of the front signals processing system is also presented. It is an important part of the experimental system for multilevel recording. It can output some servo and error signals such as TE , FE and RF etc , which will be fed back to the appropriate chip for multilevel recording. Additionally the processing system not only can control the laser power and the writing time of the optical pickup , but it also can make the pickup realize focusing and tracking automatically.

Keywords : multilevel optical data recording , vector diffraction theory , FDTD

PACC : 4230N , 4240H

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No. G19990330).