

文章编号: 0253-2239(2008)07-1353-06

一种新的多阶只读光存储方法的仿真分析和实验验证

唐毅 裴京 潘龙法 倪屹 胡华

(清华大学精密仪器系光盘国家工程研究中心, 北京 100084)

摘要 提出了一种波形调制的方法, 在原有记录符中加入一个短坑或短岸, 在读出信号上产生一个可辨识的“扰动”, 从而对读出信号波形产生调制。用简化的光刻模型和基于角谱分解的读出模型, 对该方法在 DVD 系统上的坑形和读出信号进行了仿真。仿真结果确定了各个游程可实现的阶次和各个阶次的刻写参量。对典型游程 6T 和 11T 进行了实验, 读出信号与仿真结果相吻合, 并分别得到了小于 1×10^{-4} 和 1×10^{-5} 的阶次误码率。实验结果验证了该方案的实际可行性。

关键词 光存储; 多阶法; 读出信号波形调制; 母盘刻录模型; 光盘读出模型

中图分类号 TQ591; TP333.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082807.1353

Simulation Analysis and Experimental Validation of a New Multi-Level Read-Only Optical Recording Method

Tang Yi Pei Jing Pan Longfa Ni Yi Hu Hua

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

Abstract A multi-level method using wave-shape modulation is presented. In this method, a short pit or land is added to the original marks, which leads to a recognizable “disturbance” in the readout signal and results in wave-shape modulation of readout signal. Using a simplified mastering model and angular-spectrum decomposition-based readout model, this method is simulated on the DVD system. Simulation determines how many levels can be realized for each run-length as well as the writing parameters for each level. Experiments on typical run-length of 6T and 11T are carried out. The readout signal agrees with the simulated one. Level error rates less than 1×10^{-4} and 1×10^{-5} are achieved. Experiments validate this new multi-level recording method.

Key words optical storage; multi-level method; readout signal wave-shape modulation; mastering model; optical disk readout model

1 引 言

光存储^[1,2]是信息技术的一个重要方面。而多阶存储是大容量存储方法的研究热点之一。它能在保持原来读出光学系统不变的情况下, 有效地提高存储容量。它的基本原理是, 让信息符具有大于 2 的状态数, 从而增加整体的存储容量。

只读光盘快速的复制性能和低廉的成本, 使其在电影和软件发行中具有不可替代的地位。目前, 已有多多种多阶光存储方案^[3~6], 其中文献^[5,6]是针对只读光盘的典型多阶存储方法, 本质上对读出信号作幅值上的调制。本文提出一种新的多阶存储方

法。在原有记录符中加入一个“扰动”, 对读出信号的波形产生调制。调制后的波形作为阶次识别的标志。变化“扰动”的大小和位置, 可以实现更多的阶次。突破了传统多阶存储把信息符整体幅值作为阶次识别标志的局限, 是一种全新的多阶存储方法。由于不再利用幅值来区分信息符的不同状态, “多阶 (Multi-level)”的说法似乎不再准确。但本质上还是让单位信息符具有多于 2 的状态数, 与传统多阶产生的效果是一样的, 所以本文还是沿用“多阶”的说法。本文首先从光盘存储原理的角度讨论了该存储方法的基本原理, 并与传统的多阶存储原理作了

收稿日期: 2007-12-06; 收到修改稿日期: 2008-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(60677036)资助课题。

作者简介: 唐毅(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事光存储方面的研究。E-mail: tangyi00@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 潘龙法(1946-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光存储、微细工程与精密机械等方面的研究。

对比;然后在 DVD 系统上用只读光盘母盘刻录模型和读出模型对坑形和读出信号进行了仿真,并对典型游程作了实验验证。

2 基本原理

光盘存储的基本原理是扫描显微镜的原理^[7]。在有坑的地方,坑内和坑外的反射光存在一个相位差,造成到达探测器光强的降低和读出信号幅值的减小。受衍射极限的限制,读出光斑的尺寸不能无限地小。因此,信息符的长度也严格受限的。各光

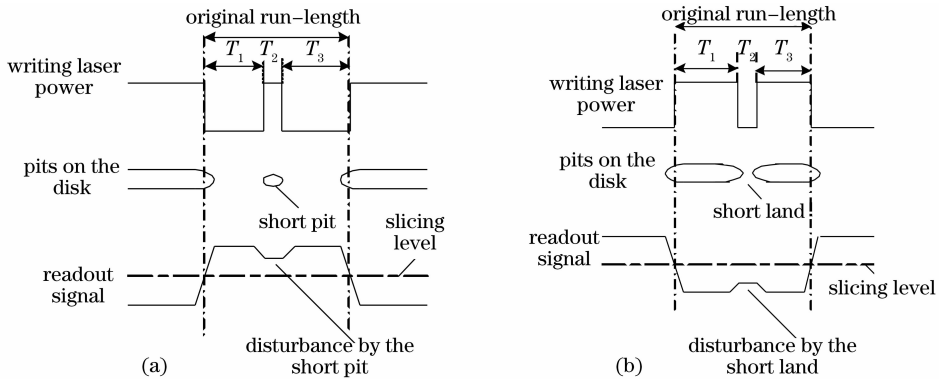


图 1 本方法基本原理。(a) 插入了短坑的岸,(b) 插入了短岸的坑

Fig. 1 Principle of this method. (a) Land with an inserted short pit, (b) pit with an inserted short land

在具体实施中,长信息符有更多的裕量去变换“扰动”的大小和位置,能够实现更多的阶次。短信息符则实现较少的阶次或者保留原来的二阶存储形式。

传统多阶存储^[5,6](图 2)是用几个功率值去刻写,获得深度和宽度都不相同的坑,让读出信号获得不同的幅值。从图 1、图 2 可以看出本方法与传统多阶本质上的不同。

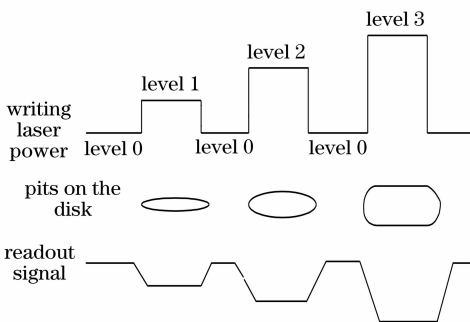


图 2 传统多阶存储原理

Fig. 2 Principle of conventional multi-level recording

3 仿真模型

3.1 只读光盘刻写模型

只读光盘的制作过程包括:母盘刻录、蒸镀和电

盘格式都严格规定了各自最短信息符的长度。以 DVD 为例,它的最短信息符对应 3 个数据时钟(称为 $3T$),长度约为 400 nm。

信息符过短时,引起的读出信号的变化会很小。对采用切割电平检测游程的系统来说,所对应的读出信号不能穿过切割电平,即不能被检测到。本文把这种短信息符引起的读出信号的变化看成一个“扰动”,这种“扰动”添加到原有读出信号中,作为阶次识别的标志。改变“扰动”的大小和位置,就能实现更多的阶次。图 1 为基本原理示意图。

镀形成压模(Stamper)、使用压模注塑成形、溅镀反射层和各层粘合完成光盘。坑点形貌的形成发生在母盘刻录过程,后面的工序只是在传递母盘刻录所形成的坑点。所以本文只对母盘刻录的过程进行建模。

当前母盘刻录多采用光刻胶工艺,它实际上是一个光刻过程。Dill 等^[8]建立了经典的光致抗蚀剂(Positive photo-resist)光刻的数学模型。但此模型较复杂,计算量大,实际运用较困难。Yuan 等^[9]建立了适用于光盘母盘刻录的简化光刻模型。该模型忽略了光刻胶对入射光的吸收和光刻胶层中的驻波效应。模型简单明了,计算量很小。本文将使用该模型对刻写的坑点形貌仿真。

为了验证该模型的准确性,对普通 DVD 的坑形做了原子力显微镜(AFM)扫描,对比结果如图 3。可以看出,仿真结果与实际测量结果吻合得很好。在坑的底部转角处,测量结果的转角比仿真结果平滑,这是因为后面的注塑过程会使这种尖锐的转角变得平滑。这种细微的差异对读出信号的影响很小。

3.2 信号读出模型

标量衍射理论^[10]在计算小数值光盘系统时有较好的精度,但在计算较大数值孔径的光盘系统时

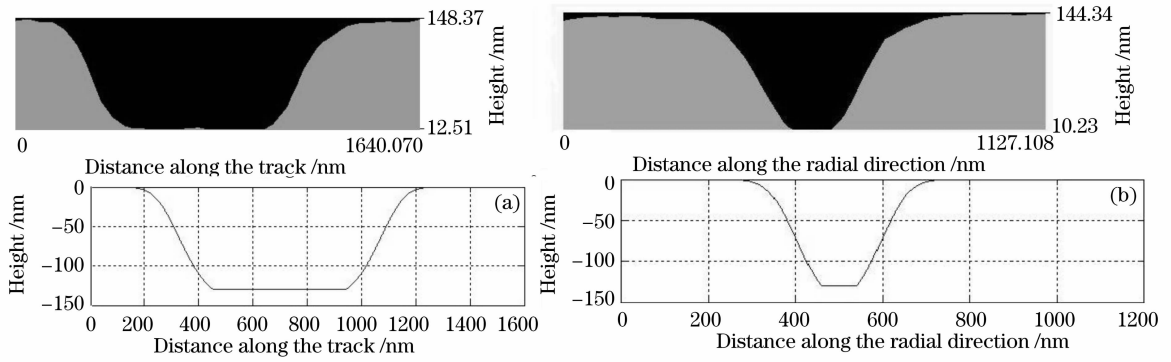


图3 AFM扫描与仿真所得6T坑点截面比较。(a)沿信息道方向中心截面,(b)沿半径方向中心截面

Fig. 3 AFM scanned and simulated 6T pit cross sections. (a) Center cross section along the pit track, (b) center cross section along the radial direction

精度较差。根据文献[11]的标量衍射理论在计算DVD系统时,误差很大。标量衍射理论[12]有较好的精度,但其计算量太大,计算时间太长。而基于角谱分解的衍射理论[13],计算量较小,而且有较好的精度。Shen等^[13]用该衍射理论计算了HD DVD系统(数值孔径为0.65,波长为405 nm)的读出信号,获得了较精确的结果。而DVD系统的数值孔径更小,波长更长,最小信息符更大,所以该计算模型用于DVD也会有较高的精度。出于计算量和精度的综合考虑,本文使用该模型来计算读出信号。

表1 DVD母盘刻录关键工艺参量

Table 1 Critical parameters for DVD mastering

Substrate	SiO ₂ glass	
Photo-resist	kind	microposit S1813
	thickness	130 nm
Exposure	Laser wavelength (λ)	405 nm
	Numerical aperture of objective lens (NA)	0.9
Development	Developer	3:1 D. I. Water; microposit developer concentrate
	temperature	22 °C
	time	12 seconds
Linear velocity	3.52 m/s (DVD 1X)	

对该方法仿真的目的是:1)验证该方法的可行性,看是否会得到图1所示的波形调制的读出信号;2)通过试探不同的刻写向量,确定每个游程产生多少个容易分辨的波形,即可以实现的几个阶次;3)为后面的实验提供初步的参考量。

对于3T~5T的坑岸,由于本身较短,不考虑在它上面加入短坑或短岸,仍保留二阶存储。

4.1 6T和7T的坑岸

对于6T长度的坑岸,它仍然较短,把“扰动”加在中间,不考虑扰动的位置变化。首先,试探性地对6T的坑和岸加入不同长度的短岸和短坑。仿真结果如图4所示。

4 仿真结果与讨论

本方法与传统DVD在制作设备和读出装置上完全兼容,只是在刻写过程中,对刻写激光的调制有所不同,多了一个产生“扰动”的短脉冲。为了描述方便,定义刻写向量 $T_r = [T_1 \ T_2 \ T_3]$,如图1所示。 T_1 、 T_2 、 T_3 的单位为一个数据时钟对应的时间。其中 T_2 反映了“扰动”的大小, $T_1 + T_2 + T_3$ 反映了坑岸整体的长度, T_1 和 T_3 决定了“扰动”位置。表1是DVD母盘刻录的关键工艺参量。仿真中的参量按此选用。

对6T坑而言,从上到下各条仿真曲线使用的刻写向量依次为 $[2 \ 2 \ 2]$ 、 $[2.125 \ 1.75 \ 2.125]$ 、 $[2.25 \ 1.5 \ 2.25]$ 、...、 $[3 \ 0 \ 3]$ 。对6T岸而言,从上到下使用的刻写向量依次为 $[3 \ 0 \ 3]$ 、 $[2.5 \ 1 \ 2.5]$ 、 $[2.375 \ 1.25 \ 2.375]$ 、...、 $[2 \ 2 \ 2]$ 。仿真结果可以看出,1)对相同 T_2 值,短岸的干扰效应大于短坑;2)读出信号波形表现出整体幅值的高低变化,并没有表现出波形调制的效果,这是6T游程太短造成的;3)短岸仍然有一定深度,短坑的深度小于普通坑的深度,但这并不影响它们在读出信号上产生可被辨识的“干扰”;4)短岸和短坑干扰的引入,造成了整体游程的减小,这需要调整写策略(增大 T_1 和 T_3)值来补偿。

分别选定两个不同长度的短坑和短岸,加上原始的坑和岸,可实现 6 阶存储。图 5 是选定刻写向量(考虑了游程补偿)后的仿真结果。表 2 是仿真的

刻写向量。

7T 坑岸的仿真结果类似,也能实现 6 阶存储。

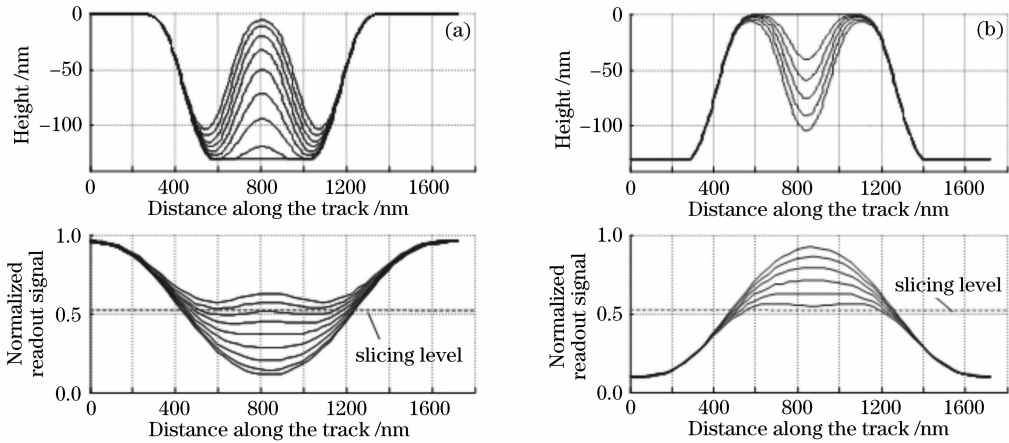


图 4 6T 坑(a)和岸(b)仿真结果(上)沿信息道方向的中心截面图,(下)读出信号图

Fig. 4 Simulation results of 6T pit (a) and land (b). Up: center cross section along pit track. Down: readout signal

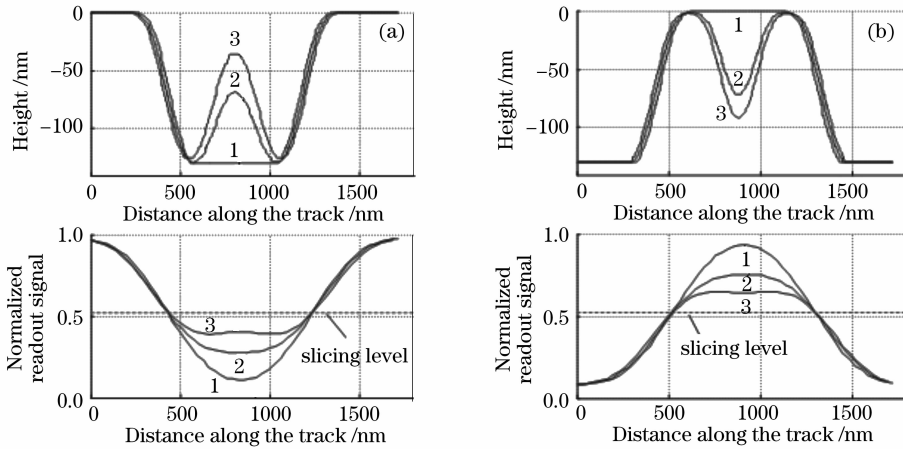


图 5 选定刻写向量后 6T 坑(a)和岸(b)仿真结果(上)沿信息道方向的中心截面图,(下)读出信号图

Fig. 5 Simulation results of 6T pit (a) and land (b) after selected write vectors. Up: center cross section along pit track. Down: readout signal

表 2 6T 仿真中使用的刻写向量

Table 2 Writing vectors used in 6T simulation

Pit		Land	
Level	Writing vector	Level	Writing vector
1	$[3 \ 0 \ 3]$	1	$[4.5 \ 0 \ 4.5]$
2	$[24.75 \ 7 \ 24.75]/9$	2	$[34 \ 13 \ 34]/9$
3	$[23.75 \ 11 \ 23.75]/9$	3	$[32 \ 17 \ 32]/9$

4.2 8T 和 9T 的坑岸

对于 8T 和 9T,经过反复仿真确定,可综合利用干扰大小和位置的变化,实现 10 阶存储。图 6 是 9T 的仿真结果,仿真所用到的刻写向量如表 3 所示。

仿真结果可以看出,1)读出信号波形呈现出了图 1 所示的波形调制的效果;2)短坑或短岸的加入没有引起游程的缩短,所以刻写向量中不需要做游

程的补偿,这是因为 8T、9T 坑岸本身较长,可以短岸或短坑离原有坑岸边缘较远,读出信号的上升和下降沿受到的影响就会很小。

4.3 10T 和 11T 的坑岸

对于 10T 和 11T,可实现 14 阶存储。图 7 是 11T 的仿真结果,仿真所用到的刻写向量如表 4 所示。

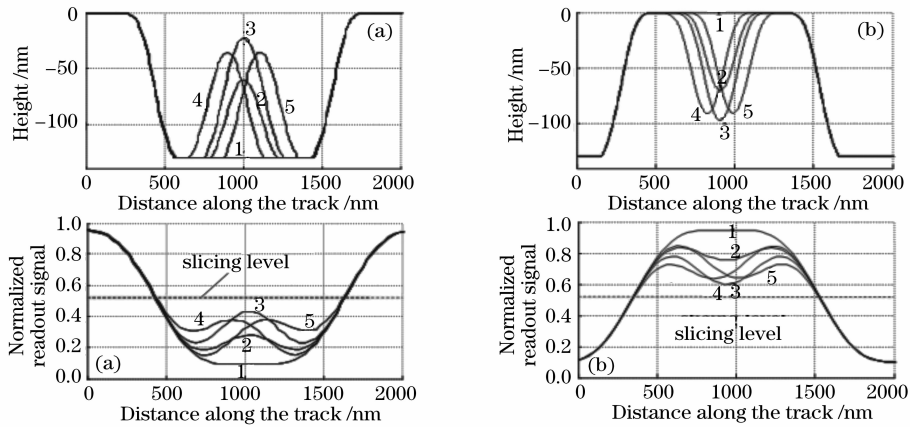


图 6 9T 坑(a)和岸(b)仿真结果。(上)沿信息道方向的中心截面图，(下)读出信号图

Fig. 6 Simulation results of 9T pit (a) and land (b). Up: center cross section along pit track. Down: readout signal

表 3 9T 仿真中使用的刻写向量

Table 3 Writing vectors used in 9T simulation

Pit		Land	
Level	Writing vector	Level	Writing vector
1	[4.5 0 4.5]	1	[4.5 0 4.5]
2	[36.5 8 36.5]/9	2	[34 13 34]/9
3	[34 13 34]/9	3	[32 17 32]/9
4	[28 11 42]/9	4	[27 16 38]/9
5	[42 11 28]/9	5	[38 16 27]/9

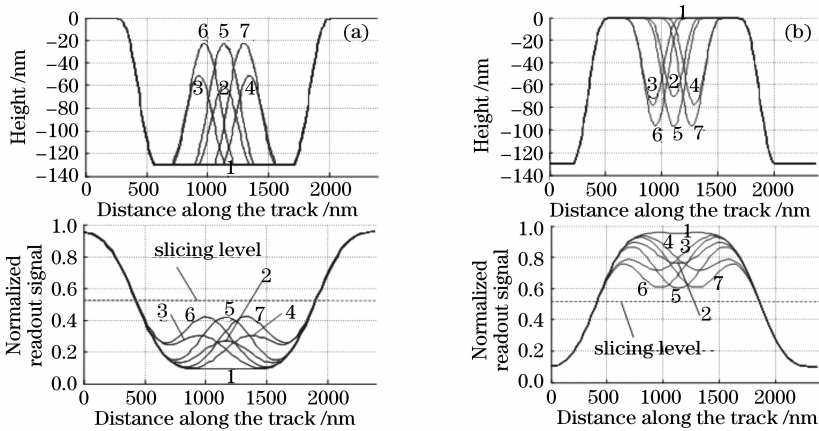


图 7 11T 坑(a)和岸(b)仿真结果。(上)沿信息道方向的中心截面图，(下)读出信号图

Fig. 7 Simulation results of 11T pit (a) and land (b). Up: center cross section along pit track. Down: readout signal

表 4 11T 仿真中使用的刻写向量

Table 4 Writing vectors used in 11T simulation

Pit		Land	
Level	Writing vector	Level	Writing vector
1	[5.5 0 5.5]	1	[5.5 0 5.5]
2	[45.5 8 45.5]/9	2	[43 13 43]/9
3	[31 9 59]/9	3	[30 14 55]/9
4	[59 9 31]/9	4	[55 14 30]/9
5	[43 13 43]/9	5	[41 17 41]/9
6	[32 13 54]/9	6	[30 17 52]/9
7	[54 13 32]/9	7	[52 17 30]/9

4 实验验证

对典型游程 6T、11T 进行了实际的刻录读取实验。实验中采用普通 DVD 的生产设备、参量和条

件,读取时也采用普通 DVD 的光学头、机芯和伺服电路。唯一不同就是母盘刻录中采用了该方案的方法来控制刻写激光功率脉冲[采用 ECIIPSE 公司的

ESP-7000 格式器, 脉冲时间调节的分辨率最小可以达到 $(1/1280T)$ (T 为一个信道时钟长度)]. 刻写向量按照仿真中的值设定. 最后得到 6T 的阶次误

码率小于 1×10^{-4} , 11T 的阶次误码率小于 1×10^{-5} . 读出信号的波形如图 8 所示.

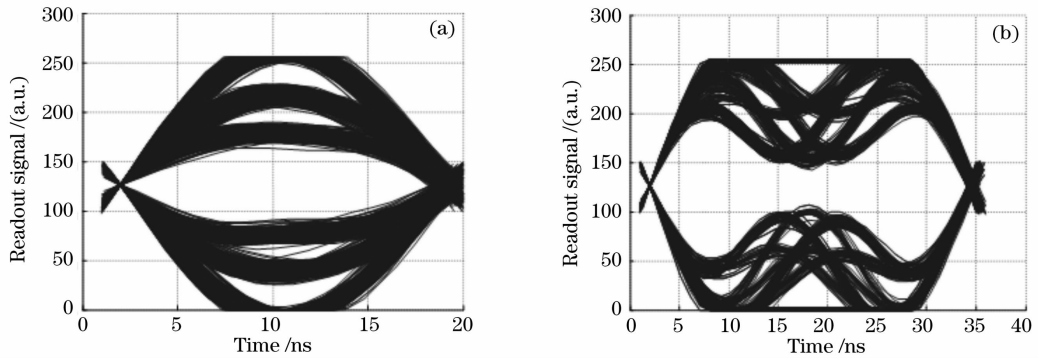


图 8 6T (a), 11T (b)各阶次的实际读出信号

Fig. 8 Actual readout signal of different levels for 6T (a) and 11T (b)

5 结 论

短坑或短岸的加入可以在读出信号中产生一个可分辨的“干扰”, 对读出信号产生波形调制的效果. 仿真结果初步确定了各个游程可实现的阶次和各个阶次的刻写向量. 还可以看出, 1) 相同时间长度对应的短岸的“干扰”效果大于短坑; 2) 对于短的游程, 短坑或短岸的加入可以引起整体幅值的变化; 3) 对于短的游程, 短坑或短岸的加入会引起游程的变短, 需要通过调整刻写向量来补偿. 实验所得波形跟仿真吻合得较好. 同时, 实验所得的低阶次误码率也证明了在当前 DVD 生产设备和读出条件下, 相同游程相同阶次有较好的一致性. 该方案在实际实施中也是可行的.

本多阶方案的优点有, 1) 只需要让激光器设定到两个功率值, 与现有二阶光盘母盘刻录设备兼容; 2) 传统多阶只是产生不同的坑, 对岸没有充分利用, 而本方法在岸上和坑上都可以插入干扰; 由于坑和岸都能实现多阶, 能够让光盘坑岸相间, 利于盘片的制作. 传统多阶方法, 由于只用一种岸, 如果它采用坑岸间隔的方法, 就会使所有第偶数个(假设第一个信息符为坑)信息符都为岸, 这种编码方式大大降低了效率和容量; 而如果不采用坑岸间隔的形式, 就会形成很长的坑, 这在只读光盘复制中很难实现. 3) 可以实现更多的阶次, 传统多阶在所有游程上能实现 4 阶存储, 而根据后面的仿真结果, 本方法在 6T~11T 上实现的阶次数目都大于等于 6.

参 考 文 献

1 Shen Zhaolong, Jiang Bing, Cai Jianwen *et al.*. Synchronizing

focus error detection of dual-pickup in multi-layer data storage system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 685~689

沈兆龙, 江 兵, 蔡建文等. 双光头多层数据存储系统同步聚焦误差检测[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 685~689

2 Cai Jianwen, Cheng Zeng, Shen Zhaolong *et al.*. Influence of refractive index mismatch on the optical aberration in two-photon three-dimensional optical data storage[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 443~446

蔡建文, 程 增, 沈兆龙等. 折射率失配对双光子三维光存储中像差的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 443~446

3 Spielman S, Johnson B V, McDermott G *et al.*. Using pit-depth modulation to increase capacity and data transfer rate in optical discs[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3109**: 98~104

4 Nakajima J, Terashima S, Ohta K *et al.*. Readout of optical disk recorded by pit edge and depth modulation[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(3B): 1846~1849

5 Song Jie, Xu Duanyi, Qi Guosheng *et al.*. Multilevel read-only optical recording methods [J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(8): 1788~1792

6 Song J, Ni Y, Xu D Y *et al.*. Modeling and realization of a multilevel read-only disk[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(3): 1199~1207

7 Bouwhuis G, Braat J, Huijser A. *Principle of Optical Disc Systems* [M]. Bristol: Adam Hilger Ltd, 1985. 8~20

8 F. H. Dill, A. R. Neureuther, J. A. Tuttle *et al.*. Modeling projection printing of positive photoresists[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1975, **22**(7): 456~464

9 H. Yuan, D. Xu, Q. Zhang *et al.*. Dynamic model of mastering for multilevel run-length limited read-only disc[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(7): 4176~4181

10 H. H. Hopkins. Diffraction theory of laser read-out systems for optical discs[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(1): 4~24

11 Cheng Xianfu, Jia Huibo, Xu Duanyi. Validity analysis of scalar diffraction theory in optical system of optical disk [J]. *J. Tsinghua University (Sci & Tech)*, 1999, **39**(8): 53~55

陈先富, 贾惠波, 徐端颐. 光盘光学系统标量衍射理论的有效性分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1999, **39**(8): 53~55

12 X. F. Cheng, H. B. Jia, D. Y. Xu *et al.*. Vector diffraction analysis of optical disk readout[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(34): 6436~6440

13 Shen Q. H., Xu D. Y.. Analysis of the effects of disk tilt on the differential-phase-detection signal in a high-density DVD read-only disk driver[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(17): 3998~4004