

文章编号: 0253-2239(2006)04-0685-5

双光头多层数据存储系统同步聚焦误差检测*

沈兆龙 江 兵 蔡建文 徐 敏 黄文浩

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

摘要: 为实现共焦双光头多层数据存储系统, 需要对双光头同步聚焦误差进行检测, 以确定聚焦伺服跟踪精度, 验证系统的可行性。首先利用几何光学的 ABCD 变换矩阵计算双光头输出能量与光头间距离的关系, 确定其线性工作范围; 其次通过输入不同频率的正弦信号驱动音圈电机, 获得静止状态、下光头运动状态以及双光头同步运动状态下, 四象限探测器的输出信号; 最后对输出信号进行频域分析, 可计算得到由于双光头参量失配而导致的同步聚焦误差在不同频率下的幅值。实验结果表明, 在 20 Hz、峰-峰值 0.5 V 正弦信号作用下, 同步聚焦误差幅值在 1 μm 以下, 可以满足共焦双光头多层数据存储系统的聚焦伺服跟踪要求。

关键词: 三维光存储; 误差检测; 光学拾取头; 音圈电机; 聚焦伺服

中图分类号: TQ591 文献标识码: A

Synchronizing Focus Error Detection of Dual-Pickup in Multi-Layer Data Storage System

Shen Zhaolong Jiang Bing Cai Jianwen Xu Min Huang Wenhao

(*Precise Machinery and Precise Instrument Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Abstract: To implement dual-pickup-head multilayer data storage system, it is necessary to measure the synchronizing focus error of the two pickup heads to validate the feasibility of the focus servo method. By using the ABCD transforming matrix method of the geometric optics, we calculate the relationship between the output energy and the space interval of the two pickup heads. After confirming the detection system working in linear area, the coil motors of the two pickup heads were driven by sine signal with different frequency and record the output signals of the photo-detector under different movement states respectively, such as rest, single pickup head movement and dual-pickup-head synchronizing movement. The synchronizing focus error, which is caused by the characteristic parameter mismatch of the two pickup heads, could be obtained through frequency-domain analysis of these output signals. The experimental result shows that the amplitude of synchronizing focus error under 20 Hz is less than 1 μm , which could satisfy the focus servo requirement of the multilayer data storage system well.

Key words: three-dimensional optical data storage; error detection; optical pickup head; coil motor; focus servo

1 引 言

作为信息的载体, 数据存储技术越来越受到重视, 而得到广泛应用的二维光盘存储技术, 由于受到衍射极限的限制, 其存储容量上升空间有限, 无法满足社会需求。1989 年, Rentzepis 提出了利用某些无机或有机材料的双光子非线性吸收效应, 实现三维高密度数据存储, 存储密度可达到 10^6 MB/

cm^3 ^[1]。为了使该技术更接近于实用化, 我们提出并构建了基于现有 CD/DVD 伺服跟踪技术实现的共焦双光头多层数据存储系统^[2]。写入光为波长 800 nm、重复频率 80 MHz、脉冲宽度 80 fs 的脉冲激光。利用下光头的聚焦伺服控制信号同时驱动上光头, 实现上下光头的同步聚焦, 使上光头焦点定位于存储材料中的某一层。同时利用音圈电机的线性

* 国家自然科学基金(50335050)资助课题。

作者简介: 沈兆龙(1980—), 男, 安徽巢湖人, 硕士研究生, 主要从事三维光存储系统方面的研究。

E-mail: zlshen@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 黄文浩(1944—), 男, 江苏武进人, 教授, 博士生导师, 主要从事 SPM 仪器及纳米技术方面的研究。

E-mail: whuang@ustc.edu.cn

收稿日期: 2006-06-15; 收到修改稿日期: 2006-08-30

位移特性,在上光头音圈电机聚焦致动器两端累加不同大小的直流电压,实现选层和三维读写^[3]。对于因聚焦光束不断深入光盘而产生的像差,会导致出现随着存储深度增加,信息点变大,信号强度变弱的现象。此问题可通过开普勒系统像差补偿的方法来解决^[4]。此外,虽然上下光头的型号是相同的,其标称传递函数也是相同的,但实际制造过程中,每个光头之间总是存在细微差别,其实际传递函数也是不一样的,在相同驱动信号作用下,上下光头的运动不能完全同步,使读写光束不能很好地定位于存储材料中的某一层,无法有效地写入和读出信息。因

此在进行共焦双光头多层数据存储系统的存储实验之前,必须对双光头同步聚焦误差进行检测,以确定是否能满足聚焦伺服跟踪定位精度要求。

2 误差检测原理

图 1 为我们构建的共焦双光头多层数据存储系统示意图,图 2 为双光头同步聚焦误差检测系统原理图。 L_1 、 L_2 为上下光头物镜,通光孔径 $2a$,焦距 f_1 ,间距为 d 。 L_3 为双凸透镜,通光孔径 $2b$,焦距为 f_2 ,与 L_2 的间距为 x ,与四象限探测器表面距离为 c 。设 e 为四象限探测器有效感应区边长。

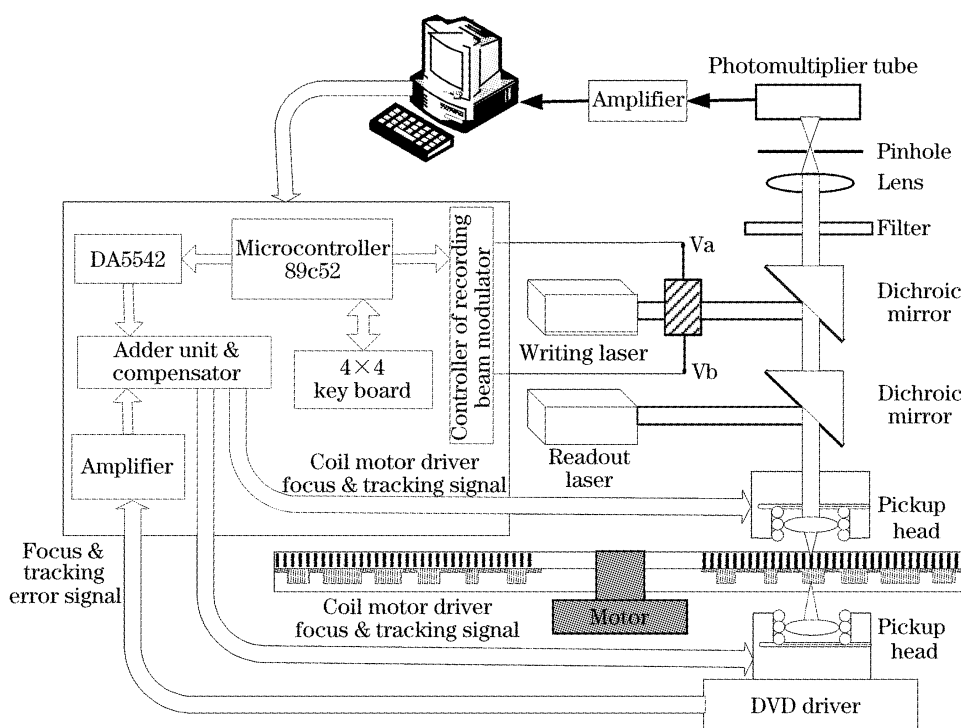


图 1 共焦双光头多层数据存储系统

Fig. 1 Schematic of confocal dual-pickup-head multilayer data storage system

由几何光学 ABCD 变换矩阵计算方法^[5],输入光线及各变换矩阵如下:

1) 输入光线:

$$U_i = \begin{bmatrix} a \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

2) 各透镜变换矩阵:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad L_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

3) 自由空间传输变换矩阵:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_3 = \begin{bmatrix} 1 & c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则各光学器件输入面上输入光线坐标可计算如下:

$$U_{1i} = U_i, \quad U_{2i} = M_1 L_1 U_{1i}, \quad U_{3i} = M_2 L_2 U_{2i}, \quad U_{4i} = M_3 L_3 U_{3i}, \quad (4)$$

为使四象限探测器的输出随透镜 L_1 与 L_2 之间的距离 d 变化而变化,且只与 d 有关,各输入面输入光线坐标必须满足下式:

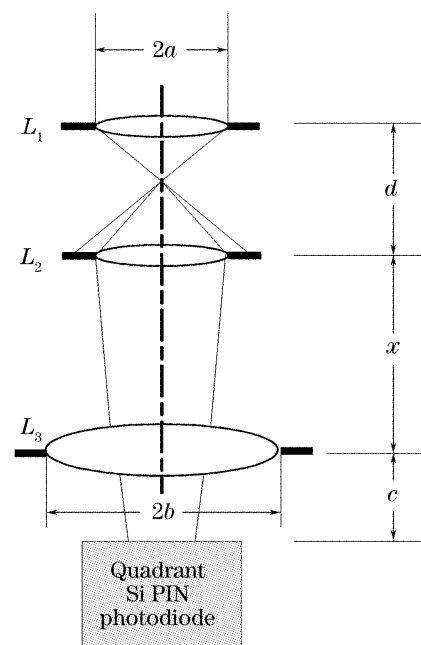


图 2 同步聚焦误差检测原理图

Fig. 2 Schematic of synchronizing focus error detection system

$$\begin{cases} |U_{2i}(1,1)| > a \\ |U_{3i}(1,1)| < b \\ |U_{4i}(1,1)| < e \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} |a(1-d/f_1)| > a \\ |a(1-x/f_1)(1-d/f_1) - a(x/f_1)| < b \\ |(1-c/f_2)[a(1-x/f_1)(1-d/f_1) - ax/f_1] - a(c/f_1)(d/f_1)| < e \end{cases} \quad (5)$$

此时从 L_2 输出的高斯光束能量可由下式计算：

$$\begin{cases} I(r,z) = \frac{I_0 w_0^2}{w^2(z)} \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right], \\ Y(z) = \int_0^a \int_0^{2\pi} r I(r,z) dr d\theta = \frac{\pi I_0 w_0^2}{2} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{2a^2}{w^2(z)}\right] \right\}, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $z = d - f_1$ ，为 L_2 到输入高斯光束束腰距离， I_0 为输入高斯光束束腰中心光强， w_0 为束腰半径， $w(z)$ 为高斯光束束宽。则输出能量 $Y(z)$ 与距离 z 的关系曲线如图 3 所示。由图可知该曲线存在一段线性区，在此区间可以将光头间的距离变化线性转换为四象限探测器的输出电信号的变化。此外，由于输入高斯光束是经过准直的，且物镜位移量不超过 1.5 mm，故可近似看作平行光。上光头物镜的运动并不会引起输入光的明显变化，因此当上下光头同步运动时，可近似看作上光头不动，下光头微动。

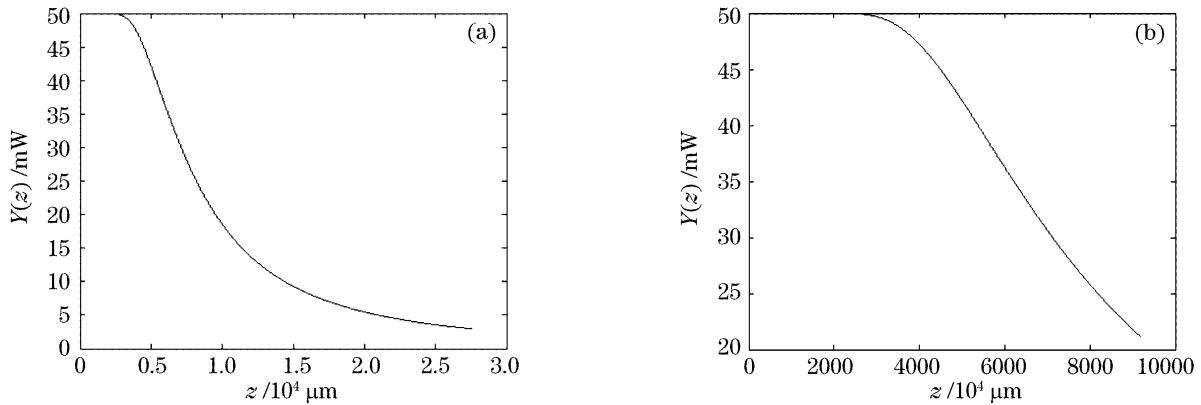


图 3 (a)输出能量与距离关系曲线图,(b)输出能量与距离关系曲线局部放大图

Fig. 3 (a) Relationship of output energy and distance, (b) partial enlarged detail

设上下光头聚焦致动器的标称传递函数为 $G(s)$ ，实际传递函数分别为 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ ，输入驱动信号为 $U(t) = A_0 \sin(2\pi ft)$ ，初始静止状态、下光头运动和双光头同步运动时，四象限探测器的输出分别为 $Y_0(t)$ 、 $Y_s(t)$ 、 $Y_d(t)$ 。 $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$ 分别为上、下光头位移， $\Delta(t)$ 为同步聚焦误差。对应的频域信号分别为 $U(s)$ 、 $Y_0(s)$ 、 $Y_s(s)$ 、 $Y_d(s)$ 、 $X_1(s)$ 、 $X_2(s)$ 和 $\Delta(s)$ ，则双光头同步误差幅值可由下式求得：

$$\begin{cases} X_1(s) = G_1(s)U(s) \\ X_2(s) = G_2(s)U(s) \\ Y_s(s) = KX_2(s) + Y_0(s) \\ Y_d(s) = K[X_2(s) - X_1(s)] + Y_0(s) \end{cases} \Rightarrow |\Delta(s)| = \left| \frac{Y_d(s) - Y_0(s)}{Y_s(s) - Y_0(s)} \| G_2(s) \| U(s) \right|, \quad (7)$$

其中 $U(s)$ 已知， $G_2(s) \approx G(s)$ 且 $G(s)$ 可通过计算得到^[6]， $Y_s(t)$ 、 $Y_d(t)$ 、 $Y_0(t)$ 均由实验测得，故可求得同步误差信号 $\Delta(s)$ 的幅值。

3 实验结果与分析

实验所用同步聚焦误差检测装置，包括三维移动平台、SANYO 公司的 SF-HD60S 光头、K9 双凸透镜 GCL-010215、滨松公司 (HAMAMATSU) 生产的 S4349 四象限探测器、信号处理及控制电路，以及 800 nm 的连续光光源。各器件参量如下 $f_1 =$

3.07 mm, $N_A = 0.47$, $a = f_1 N_A = 1.44$ mm, $f_2 = 15.0$ mm, $b = 4.5$ mm, $e = 3.0$ mm。根据 (5) 式、(6) 式的要求，为使检测系统工作在线性区，设定各位置参量初始值如下： $d = 7.0$ mm, $x = 9.0$ mm, $c = 7.0$ mm。输入驱动信号为：峰-峰值 0.5 V，频率依次为 0.8 Hz, 1~10 Hz (间隔 1 Hz), 20~100 Hz (间隔 10 Hz) 的正弦信号。对任一频率驱动信号，分别记录初始静止状态下四象限探测器的输出信号一次，下光头运动时的输出三次以及双光头同步运动时的输出三次。其间保持输入光功率为 16 mW 不

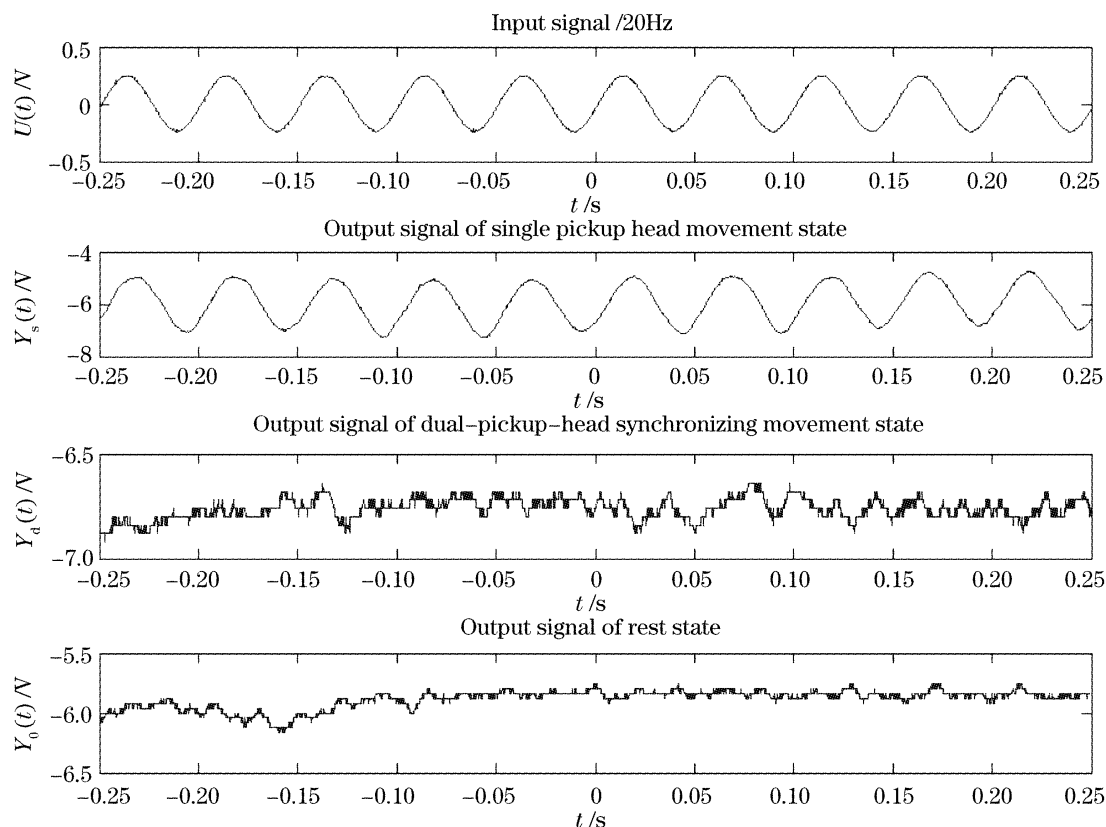
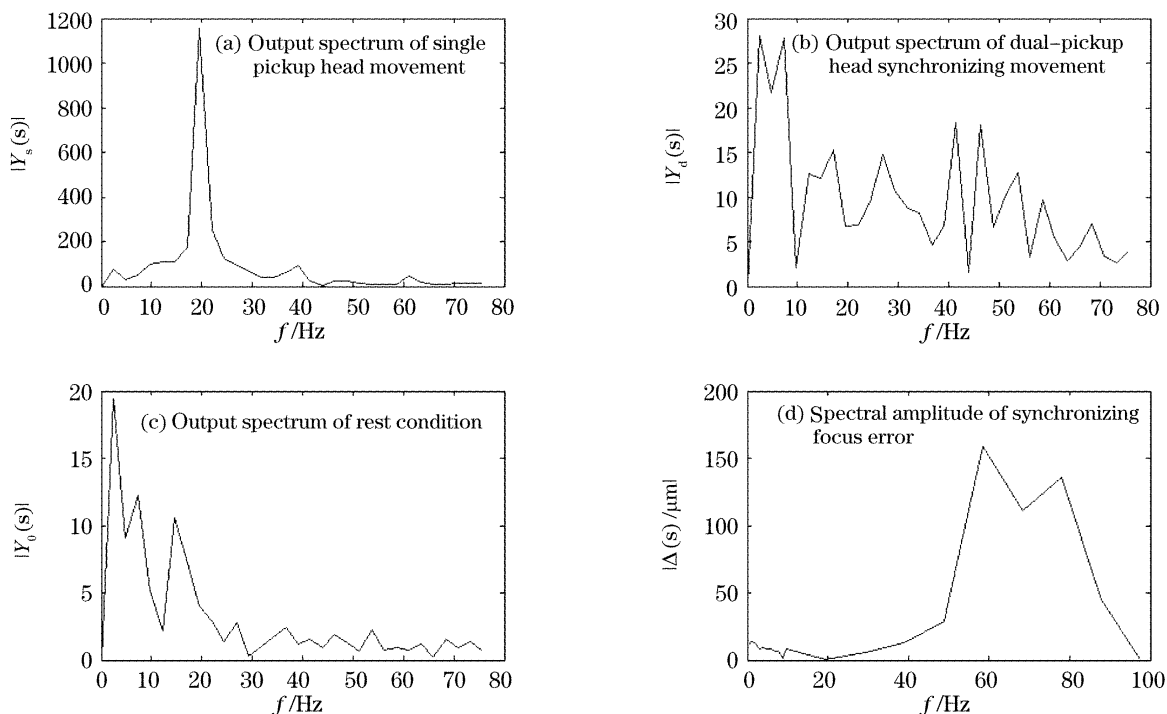


图 4 20 Hz 输入驱动信号及不同运动状态下的输出信号

Fig. 4 20 Hz input signal and the output signals of different movement states

图 5 最小同步误差计算结果。(a)单光头运动输出频谱,(b)双光头同步运动输出频谱,(c)平均静止状态输出频谱,
(d)各频率下同步聚焦误差幅值Fig. 5 Calculation results of minimum synchronizing focus error. (a) Output spectrum of single pickup head movement,
(b) output spectrum of dual-pickup head synchronizing movement, (c) output spectrum of rest condition,
(d) spectral amplitude of synchronizing focus error

变。图 4 所示为 20 Hz 输入驱动信号及各运动状态下,四象限探测器的输出信号。由图 4 可知,下光头

运动时,探测器输出信号 $Y_s(t)$ 是与驱动信号 $U(t)$ 同频的正弦信号,说明系统工作在线性区,能很好地

检测出光头的位移。双光头同步运动时,探测器输出信号 $Y_d(t)$ 中除了同步误差信号外,其主要成分为静止状态下的输出信号 $Y_0(t)$ 。根据(7)式,对各频率下的输出信号进行频域分析,计算得到不同频率下同步误差幅值 $|\Delta(s)|$,如图 5 所示。由于输入连续光源功率的不稳定以及探测器本身的噪音,使得静止状态的输出信号 $Y_0(t)$ 在时域表现出很大的随机性和高幅低频振荡。因此,在计算过程中, $Y_0(s)$ 取各频率下测得的 $Y_0(t)$ 信号快速傅里叶变换的平均值。计算结果表明,输入信号在 40 Hz 以下时,同步聚焦误差幅值不超过 $13 \mu\text{m}$,其中在 20 Hz 附近达到最小值 $0.6795 \mu\text{m}$,其次为 9 Hz 附近的 $1.2556 \mu\text{m}$ 。而频率在 $60 \sim 80 \text{ Hz}$ 之间时,同步误差达到 $100 \mu\text{m}$ 以上,这是由于音圈电机的标称共振频率为 66 Hz,系统处于共振频率附近而导致的。因此在工作频率选择适当的情况下,共焦双光头同步聚焦伺服跟踪方式是可以满足多层数据存储系统要求的。

4 结 论

在共焦双光头多层数据存储系统的研制过程中,为了确定共焦双光头同步聚焦伺服方法的可行性需要对双光头同步聚焦误差进行检测。本文提出了利用光头间距与输出光能的线性关系进行位移检测的方法:首先利用 ABCD 矩阵变换方法计算出检测系统的线性条件,其次利用频域分析方法计算出各输入

频率下的同步聚焦误差。结果表明,同步聚焦误差是与频率相关的,存在一个误差最小的频率点。因此在进行系统设计时,应该尽量使音圈电机驱动信号的频率靠近该频率点,以减小同步聚焦误差,提高同步聚焦伺服跟踪精度,以利于数据的写入和读出。

参 考 文 献

- 1 D. A. Parthenopoulos, P. M. Rentzepis. Two photo volume information storage in doped polymer systems [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(11): 5814~5818
- 2 B. Jiang, Z. Shen, J. Cai *et al.*. New method of two-photo multi-layer optical disc storage [C]. *Proc. SPIE*, **6150**: 61503Q-1~61503Q-6
- 3 Cai Jianwen, Shen Zhaolong, Jiang Bing *et al.*. Two-photo photobleaching three-dimensional optical storage with DVD pickup head [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1401~1405
蔡建文,沈兆龙,江兵等. 基于 DVD 光头的双光子光致漂白三维光存储 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1401~1405
- 4 Cai Jianwen, Chen Yezen, 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 (in Chinese)
蔡建文,程晔增,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
- 5 Lü Baida. *Laser Optics: Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics* [M]. Beijing: High Education Press, 2003. 33~94 (in Chinese)
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 33~94
- 6 Jen-Tse Huang, Wen-Liang Chen. Analysis of disk oscillation effect on optical intensity of pickup and focusing control in an optical drive [D]. China Taiwan: National Tsinghua University, 2003. 76
黄仁泽,陈文良. 碟片晃动对光碟机读取头光强及聚焦控制之影响分析 [D]. 中国台湾: 清华大学, 2003. 76