

蓝光高密度光盘驱动器中聚焦误差特性分析*

沈全洪† 裴 京 徐端颐 马建设 齐国生 李莉华

(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)

(2005 年 12 月 22 日收到, 2006 年 2 月 13 日收到修改稿)

高密度数字视盘(HD-DVD)是一种新型蓝光存储技术,可以满足数字高清视频节目的播放要求.介绍了用于HD-DVD驱动器中的刀口法调焦方案,基于菲涅耳公式和标量衍射理论,推导了刀口法调焦的HD-DVD驱动器中聚焦误差信号与离焦量之间关系的计算模型.应用该计算模型,分析了不同离焦量时探测器上光强分布情况.计算得到的聚焦误差信号与离焦量之间的关系曲线与实验测得的“S型”曲线相一致,证明了计算模型的正确性.进一步分析了正焦点时由于记录符调制而引起的聚焦误差的干扰信号,计算结果表明这种干扰的强度小于4.5%.分析表明,HD-DVD驱动器中刀口法调焦系统具有良好的线性范围,灵敏度高、受聚焦串扰噪声的影响小,可以较好地满足聚焦伺服的要求.

关键词:光存储,刀口法,聚焦误差,标量衍射

PACC:4230N,4240H

1. 引 言

数字高清视频节目的播放要求光盘系统具有更大的存储容量和更高的数据传输率,目前基于蓝色半导体激光器已成功开发出两种新的记录格式,分别称为蓝光(blue-ray)格式(波长 $\lambda = 405\text{ nm}$ 、数值孔径 $N = 0.85$)和高密度数字视盘(HD-DVD)格式($\lambda = 405\text{ nm}$, $N = 0.65$)^[1-8].随着记录波长的缩短以及物镜数值孔径的提高,聚焦光束的焦深(λ/N^2)减小,光存储对于系统的聚焦能力提出了更高的要求,其中聚焦误差信号的质量是光存储系统具备良好聚焦性能的前提.目前,聚焦误差信号的提取可以依靠多种光学方法实现,如像散法、刀口法、全反射法等,其质量取决于系统的光学增益、聚焦和道跟踪间光学串扰及元件调整等因素.像散法^[9]是光学头中检测焦点失调的最常用方法之一,在DVD系统中被普遍采用.然而,当记录密度进一步提高,如采用HD-DVD盘片时,由于系统的聚焦允许误差范围进一步缩小,像散法得到的聚焦误差受道串扰的影响加剧,使聚焦性能降低,因此像散法并不被认为是HD-DVD系统中的最佳方案.刀口法^[9]也是一种常用的调焦方法,具有光路简单、灵敏度高、受串扰噪声影

响小的特点,比较适合HD-DVD等高密度光盘系统中离焦量的检测.虽然刀口法对元件安装的精度要求较高,但在数字聚焦伺服系统中,可以通过误差补偿的方法弥补定位精度不足的影响.

本文所研究的HD-DVD驱动器中就采用了刀口法进行离焦量的检测,辅以误差补偿的方法获得了良好的动态聚焦性能.本文基于菲涅耳衍射公式和标量衍射理论,推导了HD-DVD驱动器中二象限探测器上获得离焦信号与盘片离焦量之间关系的计算模型,分析了聚焦误差信号的特性及其受串扰噪声的影响等.

2. 刀口法原理

光盘机调焦用的刀口法是由天文望远镜球面度测试的傅科刀口法演变而来的.HD-DVD驱动器中采用的刀口法调焦的原理如图1所示.图1(a)为调焦光路原理图,从盘片反射回来的光强信号经探测透镜汇聚到置于焦点处的二象限探测器上,刀口置于探测透镜后平面上,将出瞳面自中心直径以下挡去一半.当盘片信息面处于焦点位置时,探测器上获得中心对称的聚焦光斑,误差信号强度 $I_{FE} = I_A - I_B$

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G19990330)资助的课题.

† E-mail: qianhong99@mails.tsinghua.edu.cn

= 0 其中 I_A 和 I_B 分别为探测器 A 象限和 B 象限的光场积分强度, 当其处于近焦或远焦位置时, 探测器

上获得光强信号不再中心对称, 如图 1(b) 所示, I_{FE} 分别大于零和小于零.

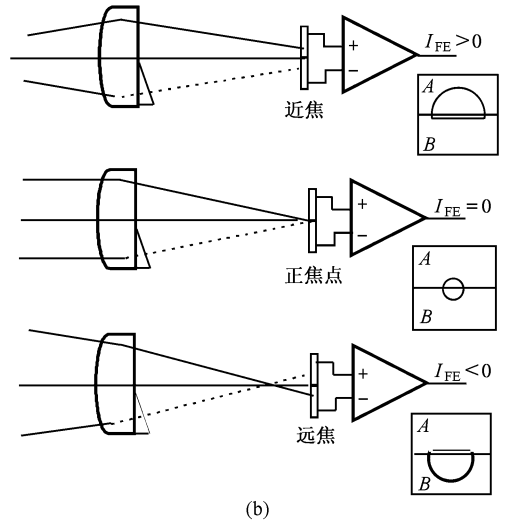
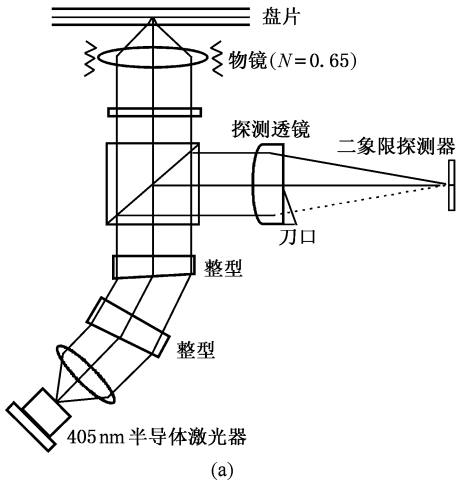


图 1 HD-DVD 系统中刀口法调焦原理示意图 (a) 刀口法光学原理, (b) 离焦探测原理

当离焦量 d 不是很大时, 根据几何光学原理可以比较直观地分析二象限探测器上获得的探测光斑随离焦量的变化情况. 不失一般性, 当盘片信息面处于离焦位置时, 探测光斑形成的几何光路以及光斑的几何尺寸如图 2 所示, 其中 d 为离焦量, θ 表示入射光的孔径角, D 为入射光束孔径, f_1 和 f_2 分别为物镜和探测透镜的焦距, s 为刀口与光轴之间的距

离, m 为反射光会聚点与探测物镜后焦面之间的距离, l 为透镜之间的距离. 由几何光学原理可以方便地求得探测器上光斑尺寸 R 和 a 的表达式

$$R = \frac{2df_2 \tan\theta}{f_1} \quad (1)$$

$$a = \frac{4dsf_2 \tan\theta}{f_1 D + 4d(l - f_1) \tan\theta} \quad (2)$$

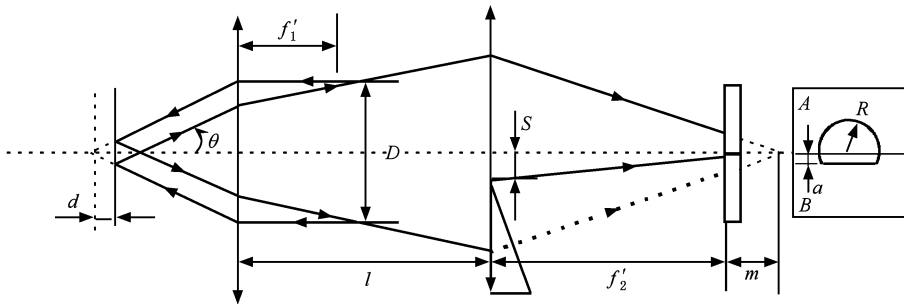


图 2 离焦量与检测光斑尺寸关系

3. 聚焦误差计算模型

基于几何光学原理的分析虽然可以直观地了解刀口法聚焦误差的形成过程及工作原理, 但它无法描述探测光斑的能量分布, 也就不能精确计算聚焦误差信号随离焦量的变化及分析实际调焦过程中聚焦误差信号受串扰噪声的影响情况. 下面基于衍射理论推导 HD-DVD 驱动器中刀口法调焦时探测器上

光强分布的计算模型, 并以此为基础获得不同离焦量对应的聚焦误差信号, 分析串扰噪声的影响.

在光盘读出信号的建模方面, 目前已经有了一些理论参考. Hopkins^[10]建立的标量衍射理论可以较好地描述 CD, DVD 系统的读出信号及循迹伺服信号; Upton 和 Milster^[11]在标量衍射的基础上进一步采用叠加分析法, 开展了光盘读出信号的串扰分析; Cheng 等^[12]提出了一套矢量衍射理论, 适用于大数值孔径光盘存储系统读出信号的分析. 然而这些方

法都是基于聚焦误差为零的假设基础上的,当盘片处于离焦位置时,它们都不适宜直接应用. Hnilicka 等^[13]虽然采用曲线拟合的方法分析了 DVD 播放机中聚焦误差信号的特性,但也仅仅是对出瞳上的光强分布直接进行假设而已,无法体现串扰噪声的影响.

本文基于菲涅耳公式和标量衍射理论,推导了 HD-DVD 驱动器中盘片处于离焦位置时探测器上光强分布的计算模型,采用的坐标系和分析模型如图 3(a)所示. 本文对于 HD-DVD 盘片结构的描述仍然

沿用 Hopkins 分析中所采用的二维周期性光栅结构模型^[10],如图 3(b)所示. 图 3(b)中 q 为道间距, p 为切向周期, β 为记录符长度, γ 为记录符宽度. 二象限探测器模型的尺寸如图 3(c)所示.

物镜孔径的有限范围可以表示为

$$g_{0l}(x, y) = \begin{cases} 1 & (x^2 + y^2 \leq r^2), \\ 0 & (x^2 + y^2 > r^2), \end{cases} \quad (3)$$

式中 r 表示物镜孔径的半径,且 $r = f_1 N$. 假设透镜前的入射光满足高斯分布,那么其复振幅分布 $E_0(x, y)$ 表示为

$$E_0(x, y) = \exp[-\sigma(x^2 + y^2)/2r^2], \quad (4)$$

式中高斯因子 σ 反映截面的光能分布. 透镜的作用相当于对入射光进行了一次相位调制,因此透镜出射光的复振幅分布 $E_1(x, y)$ 为

$$E_1(x, y) = E_0(x, y)g_{0l}(x, y) \times \exp\left[-i\frac{k}{2f_1}(x^2 + y^2)\right]. \quad (5)$$

当盘片信息层处于离焦量为 d 的位置时,到达信息层的光场复振幅分布 $E_2(\xi, \eta)$ 根据菲涅耳衍射公式计算^[14],得

$$\begin{aligned} E_2(\xi, \eta) &= \frac{\exp(ik(f_1 - d))}{i\lambda(f_1 - d)} \exp\left(\frac{ik}{2(f_1 - d)}(\xi^2 + \eta^2)\right) \\ &\times \iint_{-\infty}^{\infty} E_1(x, y) \exp\left(\frac{ik}{2(f_1 - d)}(x^2 + y^2)\right) \\ &\times \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda(f_1 - d)}x + \frac{\eta}{\lambda(f_1 - d)}y\right)\right] dx dy \\ &= C \exp\left(\frac{ik}{2(f_1 - d)}(\xi^2 + \eta^2)\right) \\ &\times F_{f_{\xi} = \frac{\xi}{\lambda(f_1 - d)}, f_{\eta} = \frac{\eta}{\lambda(f_1 - d)}} \left\{ E_1(x, y) \right. \\ &\times \left. \exp\left(\frac{ik}{2(f_1 - d)}(x^2 + y^2)\right) \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $F\{\cdot\}$ 为傅里叶变换, C 为常数.

参考 Hopkins^[10]在其标量衍射理论中对盘片记录符周期性结构的假设,用函数 $H(\xi, \eta)$ 来描述光盘表面的几何形状,设盘基折射率为 n_1 ,那么光盘的作用可用乘积因子

$$R(\xi, \eta) = \exp(-i4\pi H(\xi, \eta)n_1/\lambda) \quad (7)$$

来描述,该因子隐含地假设了光盘反射率为 1. 经过记录符调制后的光场复振幅分布 $E_3(\xi, \eta)$ 可用 $E_2(\xi, \eta)$ 和 $R(\xi, \eta)$ 的乘积来表示,即

$$E_3(\xi, \eta) = E_2(\xi, \eta)R(\xi, \eta). \quad (8)$$

出瞳上的光场复振幅分布可进一步表示为

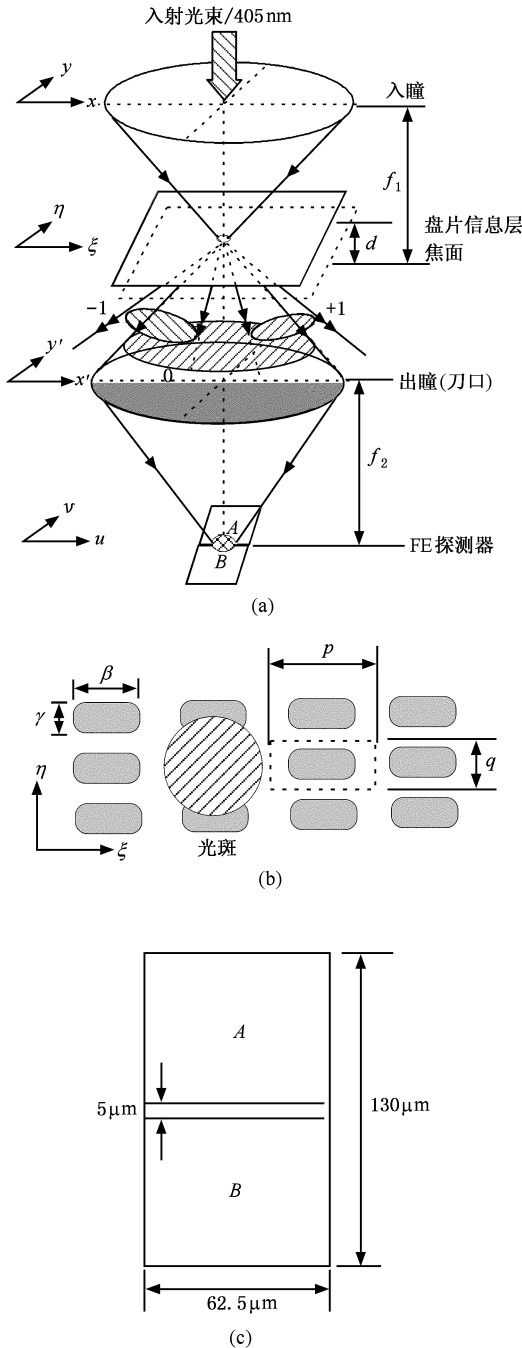


图 3 HD-DVD 系统中离焦探测分析模型 (a)分析模型及坐标系 (b)HD-DVD 盘片结构模型 (c)探测器尺寸

$$\begin{aligned}
 E_4(x', y') &= C \exp\left(\frac{-ik}{\lambda f_1 - d}(x'^2 + y'^2)\right) \\
 &\times \iint_{-\infty}^{\infty} E_3(\xi, \eta) \exp\left(\frac{-ik}{\lambda f_1 - d}(\xi^2 + \eta^2)\right) \\
 &\times \exp\left(i2\pi\left(\frac{\xi}{\lambda(f_1 - d)}x' + \frac{\eta}{\lambda(f_1 - d)}y'\right)\right) d\xi d\eta \\
 &= C \exp\left(\frac{-ik}{\lambda f_1 - d}(x'^2 + y'^2)\right) \\
 &\times F_{f_x = x', f_y = y'}^{-1}\left\{E_3(\xi, \eta)\right. \\
 &\left.\times \exp\left(\frac{-ik}{\lambda f_1 - d}(\xi^2 + \eta^2)\right)\right\}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中 $F^{-1}\{\cdot\}$ 为傅里叶逆变换。

假设刀口紧贴探测透镜出射平面中心放置,则探测物镜孔径的有效范围为半圆,即

$$g_{\text{DI}}(x', y') = \begin{cases} 1 & (x'^2 + y'^2 \leq r^2, y' \geq 0), \\ 0 & (x'^2 + y'^2 > r^2 \text{ 或 } y' < 0), \end{cases} \quad (10)$$

那么置于探测物镜焦平面的二象限探测器上的光场复振幅分布 $E_5(u, v)$ 可最终表示为

$$\begin{aligned}
 E_5(u, v) &= \frac{\exp(ikf_2)}{i\lambda} \\
 &\times F_{f_u = \frac{u}{\lambda f_2}, f_v = \frac{v}{\lambda f_2}}^{-1}\{E_4(x', y')\} \\
 &\times g_{\text{DI}}(x', y'). \quad (11)
 \end{aligned}$$

在 HD-DVD 驱动器中,聚焦光斑的艾里斑半径由下式得到:

$$R_{\text{Airy}} = 0.61\lambda/N, \quad (12)$$

式中,数值孔径 $N = 0.65$, 波长 $\lambda = 405 \text{ nm}$, 那么 $R_{\text{Airy}} = 380 \text{ nm}$. HD-DVD 盘片的道间距为 400 nm , 最短记录符长度为 204 nm , 为了更好地分析衍射现象, 计算中取典型周期尺寸 $p \times q$ 为 $600 \text{ nm} \times 400 \text{ nm}$. 通过合理选择采样范围和采样密度, 用快速傅里叶变换 (FFT) 可以十分高效地计算上述推导过程中的傅里叶变换, 同时保证分辨率要求和计算范围^[15]. HD-DVD 驱动器中刀口法调焦光学系统和盘片结构参数列于表 1 中。

表 1 HD-DVD 驱动器中刀口法调焦光学系统和盘片结构参数

| 参量 | 数值 | 参量 | 数值 |
|-----------------|-------|--------------------|-----|
| f_1/mm | 3.0 | q/nm | 400 |
| f_2/mm | 20 | p/nm | 600 |
| D/mm | 3.9 | γ/nm | 200 |
| l/mm | 35 | β/nm | 300 |
| $u/^\circ$ | 40.54 | σ | 1.5 |
| $s/\mu\text{m}$ | 1 | n_1 | 2.0 |

4. 实验系统

本文实验采用的 HD-DVD 驱动器系统如图 4 所示, 高精度多自由度的机械平台结构和数字伺服控制系统实现对 HD-DVD 盘片信号的可靠读出. 光学头采用 405 nm 蓝紫半导体激光器和 0.65 数值孔径的聚焦物镜, 采用刀口法和一个二象限探测器提取聚焦误差信号. 盘片采用了 Memory-Tech 公司生产的 $15 \times 10^9 \text{ byte}$ 标准 HD-DVD 测试盘片。

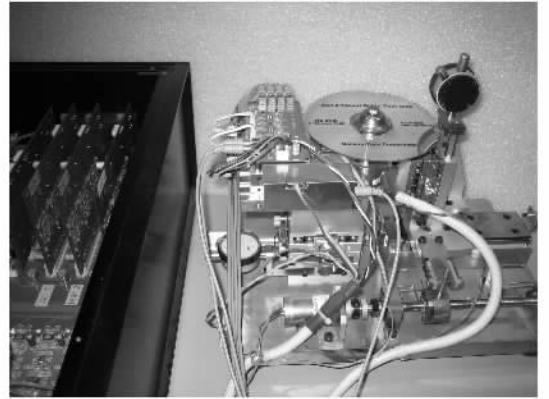


图 4 实验采用的 HD-DVD 驱动器系统照片

5 结果及分析

采用本文建立的计算模型, 得到不同离焦量时二象限探测器上光强的分布情况如图 5 所示, 探测器的实际尺寸为 $62.5 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ (见图 3(c)). 光强分布范围随离焦量的变化趋势与几何光学中的分析结果一致. 随着离焦量的增加, 探测器上光斑迅速扩散, 而且光强的分布明显体现了刀口直边衍射的特点. 将 A, B 象限中的光强分布进行积分后相减即可得聚焦误差信号 I_{FE} . 图 6 中实线所示即为理论计算得到的归一化聚焦误差信号 I_{FE} 随离焦量 d 变化的“S 型”曲线. 盘片处于焦点位置 (即离焦量为零) 时, 探测器上光斑呈聚焦对称分布, 此时的聚焦误差为零. 离焦量增大, 且探测器上光斑没有溢出探测器表面时, 聚焦误差信号关于离焦量近似线性增大, 离焦方向不同, I_{FE} 变化方向也不同. 当离焦量进一步增大时, 探测器上的光斑进一步弥散而超出了探测范围, 聚焦误差逐渐减小, 直至归零, 该零点也被称为“伪焦点”, 在聚焦伺服中应当避免“伪焦点”切入.

控制聚焦力矩器输出三角波信号, 驱动物镜上

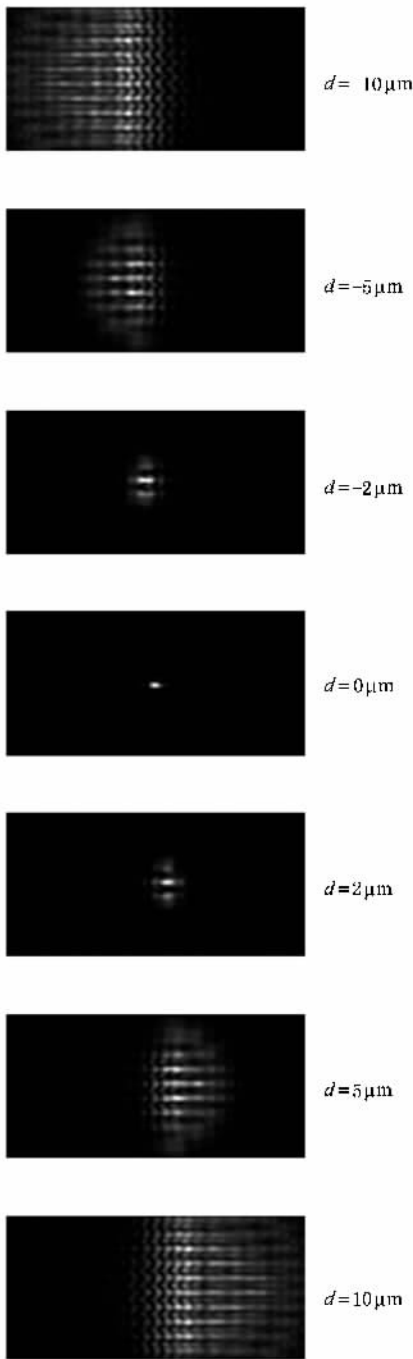


图5 离焦时二象限探测器上光强分布

下运动进行焦点预搜索,用 TDS3054B 型数字存储示波器测试并存储聚焦误差信号的输出,实验测定表示聚焦误差信号与离焦量之间关系的“S 型”曲线.由于刀口安装存在误差,因此聚焦误差信号可能存在一个固有偏差,在数字控制系统中通过设定偏置实现对该偏差的校正,从而一定程度上降低对刀口安装精度的要求.此外,为了减少测量随机误差的影响,实验中采用多次测量取平均值的方法.测定焦

点附近的 HD-DVD 驱动器聚焦误差的归一化“S 型”曲线如图 6 中虚线所示.将两者进行比较后不难发现,理论计算和实验测得“S 型”曲线的线性区一致,该 HD-DVD 驱动器中调焦线性区范围约为 $-4.5 \mu\text{m} \sim 4.5 \mu\text{m}$,可以满足 HD-DVD 系统线性调焦范围的要求.由于离焦量增大引起探测器上光斑的扩大和弥散,理论计算和实验结果中线性区外的“S 型”曲线符合的精确度变差,但其变化趋势基本一致.由此可见,所建立的计算模型可以较好地描述聚焦误差信号的分布.

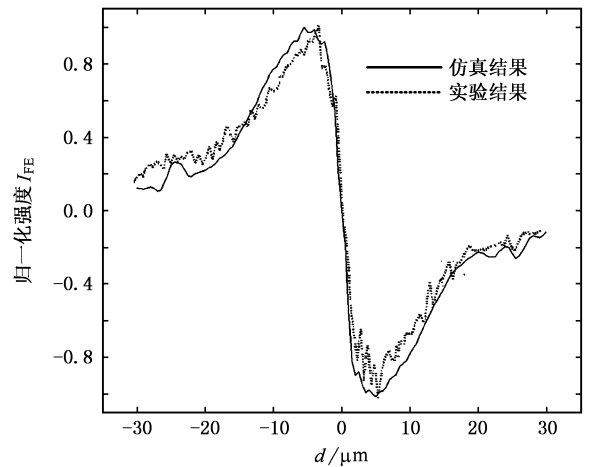


图6 HD-DVD 系统中的“S 型”曲线

由于受到盘片记录符的调制,聚焦误差信号将不可避免地受到一定的影响.即使当盘片处于正焦位置时,聚焦误差也会随着光斑在盘片上扫描位置的不同而变化,而不是理想情况下的 $I_{FE} = 0$,这也是聚焦噪声产生的主要原因之一.以光斑中心与记录符中心相重合的位置为原点(图 3(b)),当盘片沿切向 ξ 和径向(道间距方向) η 产生偏移时,探测器上

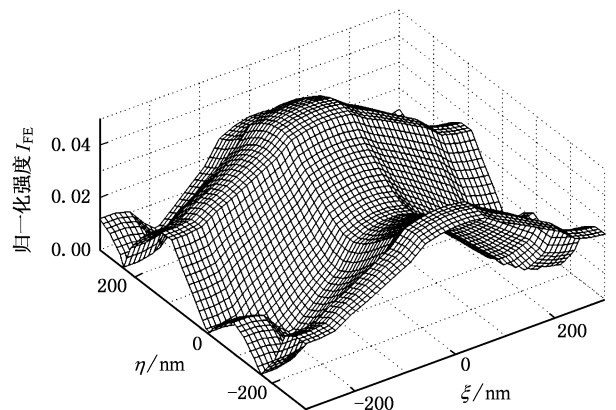


图7 盘片位于正焦点时聚焦误差的变化

获得的归一化聚焦误差信号分布如图 7 所示. 随着聚焦光斑扫描位置的变化, 焦点处探测到的聚焦误差信号会产生周期性变化, 而且径向变化比切向变化更剧烈, 即道跟踪误差会对聚焦误差信号产生一定的影响. 由计算结果可知, 采用刀口法调焦的 HD-DVD 驱动器中, 正焦点位置处由于扫描位置不同所引入的聚焦误差小于 4.5%.

6. 结 论

本文基于菲涅耳公式和标量衍射理论, 推导了

刀口法调焦的 HD-DVD 驱动器中聚焦误差信号与离焦量之间关系的计算模型. 计算得到的聚焦误差信号与离焦量之间的关系曲线与实验测得的“S 型”曲线相一致, 证明了计算模型的正确性. 正焦点位置处, 由于记录符调制而引起的聚焦误差的干扰信号强度小于 4.5%. HD-DVD 驱动器中刀口法调焦系统具有良好的线性范围、灵敏度高、受聚焦串扰噪声的影响小等特点, 可以较好地满足聚焦伺服的要求.

感谢日本 DSC 公司的 Aoyagi T 博士以及 Ohtomo T, Suzuki T 等工程师在光学系统构造和分析方面给予的帮助.

-
- [1] Qi G S , Xiao J X , Liu R *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1076 (in Chinese) [齐国生、肖家曦、刘 嵘等 2004 物理学报 **53** 1076]
- [2] Xiao J X , Qi G S , She P *et al* 2003 *Chin. Phys.* **12** 1241
- [3] Xiao J X , Qi G S , Hu H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 102 (in Chinese) [肖家曦、齐国生、胡 华等 2005 物理学报 **54** 102]
- [4] Shen Q H , Xu D Y , Qi G S *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4718 (in Chinese) [沈全洪、徐端颐、齐国生等 2005 物理学报 **54** 4718]
- [5] Jian J Q , Ma C , Jia H B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3604 (in Chinese) [管冀祁、马 骋、贾惠波 2005 物理学报 **54** 3604]
- [6] Cheng G H , Wang Y S , Liu Q *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 112 (in Chinese) [程光华、王屹山、刘 青等 2003 物理学报 **52** 112]
- [7] Topiwala P 2003 *Proc. SPIE* **5203** 448
- [8] Stek B , Otte R , Jansen T *et al* 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 912
- [9] Bouwhuis G 1984 *Principles of Optical Memory Systems* (Adam Hilger : Bristol) p75
- [10] Hopkins H H 1979 *J. Opt. Soc. Am.* **69** 4
- [11] Upton R S , Mister T D 2001 *Opt. Eng.* **40** 1030
- [12] Cheng X F , Jia H B , Xu D Y 2000 *Appl. Opt.* **39** 6436
- [13] Hnilicka B , Besancon-Voda A , Schroder H J *et al* 2002 *Proc. IEEE* **2** 629
- [14] Yan Y B 1989 *Applied Physical Optics* (Beijing : Mechanical Industry Press) p239 (in Chinese) [严瑛白 1989 应用物理光学 (北京 机械工业出版社) 第 239 页]
- [15] Bakx J L 2002 *Appl. Opt.* **41** 4897

Analysis of the focus error characteristic in high density optical disk driver^{*}

Shen Quan-Hong[†] Pei Jing Xu Duan-Yi Ma Jian-She Qi Guo-Sheng Li Li-Hua

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

(Received 22 December 2005 ; revised manuscript received 13 February 2006)

Abstract

High density digital video disc (HD-DVD) is one of the high density optical data storage technologies to meet the demand of high definition TV. The knife-edge method for focus error detection in HD-DVD driver is proposed in this paper. The calculation model for optical intensity distribution on photo detector under different defocusing amount is deduced on the basis of Fresnel formula and scalar diffraction theory. The S curve obtained theoretically showing how the focus error intensity varies with defocusing amount is in agreement with the experimental one for HD-DVD driver ,which validates the calculation model. Furthermore , the focusing noise caused by pit-modulation in HD-DVD driver is analyzed and indicated to be less than 4.5% . It is concluded that a satisfactory focus range of linearity is realized in HD-DVD driver with knife-edge method which has high sensitivity and low focusing noise .

Keywords : optical storage , knife-edge method , focus error , scalar diffraction

PACC : 4230N , 4240H

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

[†] E-mail : quanhong99@mails.tsinghua.edu.cn