

文章编号: 0253-2239(2004)11-1445-5

# 光盘系统中盘片径向倾斜对循迹伺服影响分析

王宇兴 巩马理 闫平 贾维涛 崔瑞祯 张海涛  
(清华大学精密仪器系数字光电研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 基于衍射理论,采用更接近光盘实际情况的椭圆型信息符模型并利用光盘的线性叠加原理得到光盘衍射模型的解析表达式,对三种主流盘片的盘片倾斜对循迹系统产生的影响进行定量的计算与分析。采用差动相位方式循轨的 DVD-ROM 盘片随径向倾斜的偏移系数为  $0.06 \mu\text{m}/(^{\circ})$ 。采用推挽方式循轨的 DVD-RAM 盘片循轨误差随径向倾斜的偏移系数为  $0.15 \mu\text{m}/(^{\circ})$ 。在相同的盘片参量情况下,差动相位检测方法获得循迹误差比推挽方法受盘片径向倾斜的影响更小,在读取过程中差动相位检测方法可以获得更好的伺服精度。分析了 DVD-RAM 盘片预刻槽深度与循迹误差信号受径向倾斜影响偏移量的关系。实验结果较好的验证了计算和结论。

**关键词:** 光数据存储; 径向倾斜; 巴比涅原理; 推挽; 差动相位; 循迹误差

中图分类号: TH867<sup>+</sup>.6 文献标识码: A

## Analysis of Crosstalk Between Radial Tilt Error and Tracking Error Signal of Optical Disc System

Wang Yuxing Gong Mali Yan Ping Jia Weipu Cui Ruizhen Zhang Haitao  
(Center for Photonics and Electronics, Tsinghua University, Beijing 100084)  
(Received 11 November 2003; revised 30 April 2004)

**Abstract:** Analytic description of disc diffraction model is obtained using elliptical pits model and Babinet principle. The influence of disc radial tilt on tracking servo system is analyzed and computed focusing on three common disc types. Tracking error offset caused by radial tilt is on DVD-ROM using DPD (Differential phase detection) method,  $0.15 \mu\text{m}/^{\circ}$  using push-pull method. Tracking error signal with DPD method exhibit analyzed better performance than push-pull method against disc radial tilt under the same disc parameters. Finally relationship between groove depth and tracking error signal offset of DVD-RAM disc is analyzed.

**Key words:** optical data storage; radial tilt; Babinet principle; push-pull; differential phase detection; tracking error

### 1 引言

在光盘读取系统中,为了保证光学头能正确读取盘片上面的信息,一般采用两维的伺服方式,即聚焦伺服与循轨伺服。对于数字多用途盘片(DVD),其聚焦伺服的平均精度要求为  $0.23 \mu\text{m}$ ,循轨伺服的平均精度为  $0.022 \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>。循迹误差信号通常通过两种方法进行,即推挽法(push pull)和差动相位法(differential phase detection)。在读取只读型光盘时普遍使用差动相位检测(DPD)方法<sup>[2]</sup>,在读取

或写入可擦写型 DVD-RAM 盘片时普遍采用推挽法。聚焦光斑在光盘信息轨迹扫描过程中,四象限探测器的信号相位会随着循迹误差的变化而不同,差动相位检测方法正是利用这一原理通过检测两对角探测器的相位差得到盘片的循迹误差信息,即

$$S_{\text{DPD}} \propto \text{phase}(I_A + I_C) - \text{phase}(I_B + I_D), \quad (1)$$

其中  $S_{\text{DPD}}$  为循迹误差信号(Tracking error signal, TES),  $I_A, I_B, I_C, I_D$  分别为四个探测器单元的检测电流,  $\text{phase}(I_A + I_C)$  和  $\text{phase}(I_B + I_D)$  表示将探测器单元 A、C 和 B、D 的电流信号相加所得到信号的相位角,两个组合信号的相位差将随着循迹误差的大小和方向发生变化。

E-mail: wangyx@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2003-11-11;收到修改稿日期:2004-04-30

推挽法则通过检测四象限探测器沿左右两部分的信号幅值判断循迹误差信息,即

$$S_{PP} \propto (I_A + I_B) - (I_C + I_D), \quad (2)$$

其中  $S_{PP}$  为推挽法得到的循迹误差信号。

实际上,当盘片高速转动时不仅会产生聚焦与循迹误差,也会出现沿光盘径向和切向的倾斜。这种倾斜误差会对光盘系统的伺服精度产生影响。

Hopkins 建立了以二维周期光栅为基础的早期光盘模型<sup>[3]</sup>,Jipson 等<sup>[4]</sup>将快速傅里叶变换引入光盘计算当中,降低了计算时间。但由于这种模型的周期特点,不易对轨迹间的相互影响进行深入的计算和研究。Milster<sup>[5]</sup>提出了基于巴比涅原理的光盘线性分解模型,这种模型对于分析盘片表面不同部分对入射光波场的作用,例如分析轨迹间的相互干扰,提供了很实用的方式。在 Milster 提出的光盘模型基础上,本文加入了盘片产生倾斜后的分析与推导并给出了光盘模型傅里叶变换的解析表达式。

根据巴比涅原理,光盘可以被线性分解为以单独的轨迹为单位的衍射单元。本文对不同类型的光盘参量,对只读盘片(DVD-ROM)、随机存取数字多功能光盘(DVD-RAM)普遍采用的差动相位法及推挽方法在盘片产生径向倾斜时所受影响进行了详细的计算与分析。从数值上得到盘片产生径向倾斜时引入的循迹伺服偏差,得到盘片径向倾斜量与循迹伺服偏移量的关系。

## 2 计算原理

Shack 与 Harvey 讨论并建立了一种基于傅里叶变换的标量衍射理论,可以很好地应用于大数值孔径的光盘读取系统中<sup>[6,7]</sup>。Upton 等<sup>[8]</sup>在此基础上进一步计算了探测器表面的光场分布,得到如下公式:

$$O_{\text{COLL}}(\alpha, \beta) = O_{\text{ILL}}(\alpha, \beta) \otimes \tilde{C}(\alpha, \beta), \quad (3)$$

其中  $\otimes$  表示二维卷积,  $\alpha, \beta$  分别为光场沿径向和切向的方向余弦,  $O_{\text{ILL}}(\alpha, \beta)$  为入射到物镜的光波场分布,  $O_{\text{COLL}}(\alpha, \beta)$  为光波被光盘衍射后经过透镜后的光场分布,即探测器表面的光场分布。当光路中存在波像差  $W(\alpha, \beta)$  时,  $O_{\text{ILL}}(\alpha, \beta)$  为半导体激光器与光路中波像差共同作用的结果:

$$O_{\text{ILL}}(\alpha, \beta) = S_{\text{ILL}}(\alpha, \beta) \cdot \exp[-i2\pi W(\hat{\alpha}, \hat{\beta}/\lambda)], \quad (4)$$

$S_{\text{ILL}}(\alpha, \beta)$  为半导体激光器光源在光瞳处产生的光波场分布。根据泽尼克系数<sup>[9,10]</sup>,当盘片产生径向倾斜时所引入的波像差为

$$W(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \frac{1-n^2}{2n^3} t \theta [3(\hat{\alpha}^2 + \hat{\beta}^2) - 2] \hat{\alpha}, \quad (5)$$

其中  $n$  为盘片保护层材料折射率,  $t$  为保护层的厚度,  $NA$  为物镜的数值孔径,  $\theta$  为以弧度表示的盘片的径向倾斜角度,  $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$  分别对数值孔径  $NA$  归一化后沿盘片径向和切向的方向余弦。

$\tilde{C}(\alpha, \beta)$  为光盘方程  $C(\vartheta, \hat{a})$  傅里叶变换的方向余弦描述形式,即

$$\tilde{C}(\alpha, \beta) = \mathcal{F}^2\{C(\vartheta, \hat{a})\}, \quad (6)$$

$\mathcal{F}^2$  表示二维傅里叶变换,  $\vartheta, \hat{a}$  分别为用波长归一化后沿盘片径向和切向的二维空间坐标,即  $\vartheta = v/\lambda$ ,  $\hat{a} = u/\lambda$ 。如图 1,根据巴比涅原理,光盘对入射光波的衍射效果等同于光盘各个部分对入射光波的衍射效果的线性叠加。

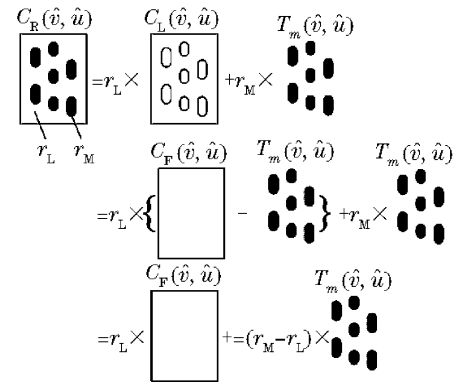


Fig. 1 Babinet principle

对于 DVD-ROM 只读盘片,光盘方程可以做如下分解:

$$C(\vartheta, \hat{a}) = r_L C_F(\vartheta, \hat{a}) + (r_M - r_L) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} T_m(\vartheta, \hat{a}), \quad (7)$$

式中  $r_L$  和  $r_M$  分别是光盘没有信息坑点部分与信息坑点部分的反射系数;  $C_F(\vartheta, \hat{a})$  为全反射平面。  $T_m(\vartheta, \hat{a})$  为轨迹  $m$  的描述函数,在坑点内部其值为 1,在其他位置值为 0。

光盘坐标系以透镜光轴与光盘平面的交点为坐标原点,处于光斑扫描位置的轨迹描述方程为  $T_0(\vartheta, \hat{a})$ 。同时轨迹描述函数还可以用如下函数的卷积进行表示,即

$$T_m(\vartheta, \hat{a}) = t_m(\vartheta - m\hat{p}, \hat{a} - \Delta\hat{a}_m) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\hat{a} - n \cdot 2\hat{l}_m), \quad (8)$$

$t_m(\vartheta, \hat{a})$  为中心位于坐标原点,坑点长度为  $\hat{l}_m$ ,宽度为  $\hat{w}$  的坑点函数,  $\delta(\hat{a})$  为狄拉克函数,  $\hat{p}$  为轨迹间距。将(7)式,(8)式代入(6)式得到

$$\tilde{C}(\alpha, \beta) = r_L \delta(\alpha, \beta) + (r_M - r_L) \sum_m \left\{ \exp[-j2\pi(\alpha m p + \beta \Delta \hat{u})] \cdot A_m(\alpha, \beta) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(\beta - \frac{n}{2\hat{l}_m}\right) \right\}, \quad (9)$$

其中  $A_m(\alpha, \beta) = \mathcal{F}^2\{t_m(\hat{v}, \hat{u})\}$

$$A_m(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\hat{l}_m} \left\{ \hat{w}(\hat{l}_m - \hat{w}) \text{sinc}[(\hat{l}_m - \hat{w})\beta] \text{sinc}(\hat{w}\alpha) + \cos\left[\frac{\hat{l}_m - \hat{w}}{2}\beta\right] \frac{\hat{w} J_1\left[\frac{\pi \hat{w} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2}\right]}{2 \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \right\}, \quad (10)$$

$J_1(x)$  为一阶第一类贝塞尔函数。

如果盘片为具有岸(Land)-槽(Groove)结构的 DVD-RAM 或 DVD-R/RW 盘片,则具有岸-槽结构形式的盘片描述函数表达式:

$$C(\hat{v}, \hat{u}) = r_L C_G(\hat{v}, \hat{u}) + (r_{ML} - r_L) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} T_m(\hat{v}, \hat{u}) + (r_{MG} - r_L) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} T_n(\hat{v}, \hat{u}), \quad (11)$$

其中  $C_G(\hat{v}, \hat{u})$  为岸-槽所构成光栅结构的描述函数,  $r_L$  为光栅的标量反射系数,  $T_m, T_n$  分别是记录在岸与槽的信息斑点描述函数,  $r_G$  为岸的复反射率。  $r_{ML}, r_{MG}$  分别是记录在岸和槽的信息斑点的反射系数并具有如下关系:

$$r_{MG} = r_{ML} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2d\right), \quad (12)$$

其中  $d$  为槽深。

(10)式即为具有长圆形坑点形状的光盘表面描述方程的二维傅里叶变换的解析表达式。根据(3)式,选用合适的入射光场的描述方程,就可以得到光瞳表面的光场分布,从而分析光盘所需的各类信号。

使用强度归一化的  $TEM_{00}$  模式的高斯光束,位于光瞳边缘的光振幅为其最大值的  $1/e$ ,则在光瞳面的光场分布方程为

$$S_{ILL}(\alpha, \beta) = \exp\left(-\frac{\alpha^2 + \beta^2}{NA^2}\right), \quad (13)$$

基于上述的光盘模型,根据目前被普遍使用的可擦写光盘参量(见表 1)对盘片读取过程中的循迹误差信号在盘片产生径向倾斜的情况下的变化进行计算。

Table 1 Disc parameters

Parameter	DVD-ROM	DVD-RAM
Wave length $\lambda / \mu\text{m}$	0.65	0.65
Numerical aperture $NA$	0.6	0.6
Thickness $t / \text{mm}$	0.6	0.6
Width $w / \mu\text{m}$	0.3	0.615
Pitch $p / \mu\text{m}$	0.74	1.23
Pits length $l_0 / \mu\text{m}$	0.53	0.4
Land reflectivity $r_L$	0.8	0.9
Mark reflectivity $r_{ML}$	—	0.002
Pit (Groove) depth $d$	120 nm	$\lambda/6$

### 3 计 算

#### 3.1 DVD-ROM 盘片

在计算中采用与实际情况相同的检测方法,将聚焦光斑沿轨迹方向扫描一段距离,计算在扫描过程中两对角象限信号的相位差,从而得到光盘的差动相位循迹误差信号,如图 2 所示,在计算中采用与实际情况相同的扫描方式。在计算中仅计算中央轨迹的扫描信号,这样可以避免旁轨信号引入的轨迹间串扰的影响。得到 DVD-ROM 盘片在产生径向倾斜时的差动相位检测循迹误差信号(如图 3 所示)。

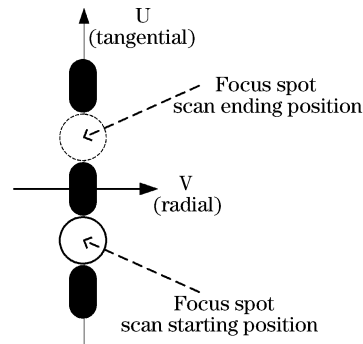


Fig. 2 Process to simulate DPD TES

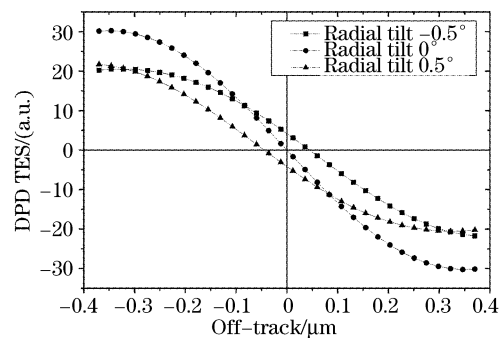


Fig. 3 DPD TES when radial is  $-0.5^\circ, 0^\circ, 0.5^\circ$

当盘片产生径向倾斜时,将使循迹误差信号的整体产生偏移,而循迹伺服系统仍然按照没有偏移的误差曲线,通过监视循迹误差信号的幅值判断此时的循

迹误差大小。因而径向倾斜的存在将使循迹伺服系统获得有偏差的循迹误差信号,降低了循迹精度。

图 4 为 DVD-ROM 盘片循迹误差信号偏移量与盘片径向倾斜角度的关系,盘片产生径向倾斜时,循迹误差的偏移量与径向倾斜角度的关系为  $0.06 \mu\text{m}/(^{\circ})$  即  $0.08 \text{ pitch}/(^{\circ})$ 。

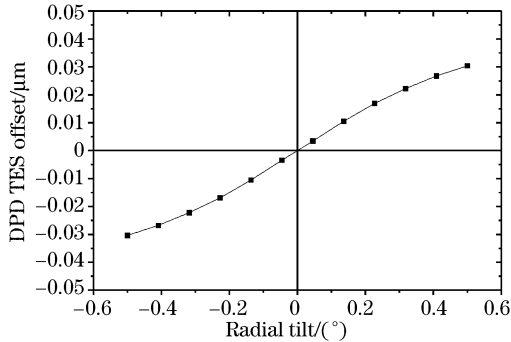


Fig. 4 Relationship between DPD TES offset and radial tilt angle

### 3.2 DVD-RAM 盘片

DVD-RAM 盘片具有槽岸的结构,在进行读取和写入的过程中,光学系统通过采用推挽方法保证聚焦光斑始终定位在被读取的轨迹中心线。与 DVD-ROM 盘片的计算类似,根据 (14) 式计算得到当盘片产生  $\pm 0.5^{\circ}$  的径向倾斜时,采用推挽方式获得的循迹误差信号将出现如图 5 所示的信号偏移。

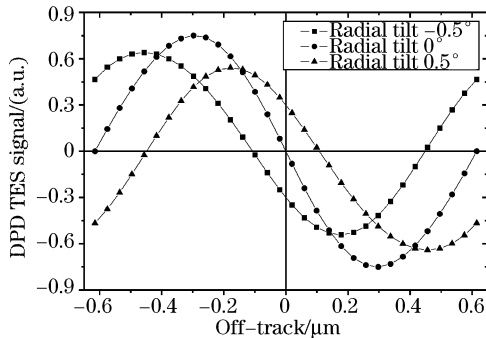


Fig. 5 Push-pull TES when radial tilt is  $-0.5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $0.5^{\circ}$

图 6 为 DVD-RAM 盘片采用推挽方式获得的循迹误差信号的偏移量及采用差动相位检测方式获得的循迹误差偏移量与盘片径向倾斜角度之间的关系。对于 DVD-RAM 盘片,采用推挽方式获得循迹时因径向倾斜所导致的循迹误差偏移量约为  $0.15 \mu\text{m}/(^{\circ})$  即  $0.12 \text{ pitch}/(^{\circ})$ ,而采用差动相位检测方式获得循迹误差在同样情况下的偏移量为  $0.12 \mu\text{m}/(^{\circ})$  即  $0.10 \text{ pitch}/(^{\circ})$ 。当径向倾斜角度较小时,循迹误差的偏移与径向倾斜角度成线性关系。采用差动相位检测方式与采用推挽方式所获得的循迹误差在同样的径向倾斜条件与盘片参量情况下前者受径向倾斜的

影响小于后者。因此在读取 DVD-RAM 盘片时,采用差动相位检测方式可以获得更准确的循迹误差信号,提高盘片的抗倾斜能力。

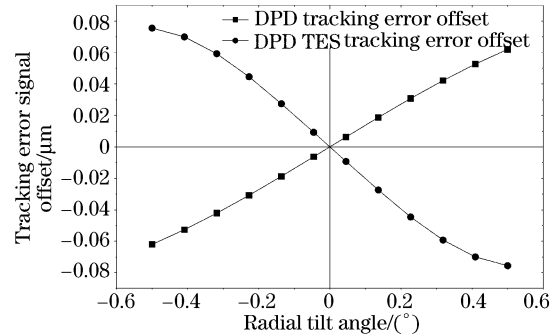


Fig. 6 Comparison between DPD and Push-Pull TES offset as a function of radial tilt angle

图 7 为 DVD-RAM 盘片产生  $0.5^{\circ}$  的径向倾斜时,槽深与循迹误差偏移量的关系,当盘片的预刻槽深度越小时,其循迹误差受径向倾斜的影响越小。

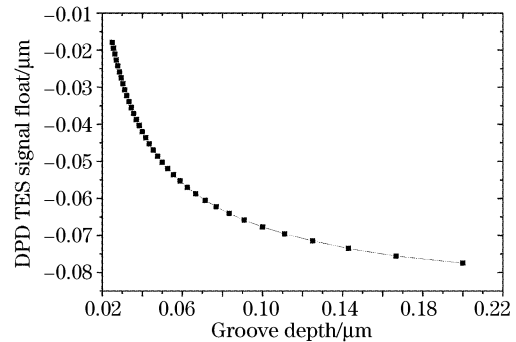


Fig. 7 Relationship between push-push tracking error signal offset and groove depth

## 4 实验及分析

实验中采用标准测试盘片(标号为 TDV-520 的 DVD-ROM 盘片)进行读取实验,在读取中,调整光学头的光轴相对盘片信息面的径向角度分别为  $-0.5^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$ ,  $0.5^{\circ}$ ,观察其循迹误差信号,波形如图 8 所示[图中的实验波形为采用横河电机公司(Yokogawa Inc)的 DL7200 数字示波器测量得到]。

波形下部为跳轨信号,使聚焦光斑沿盘片径向移动一个轨迹,上部为差动相位检测循迹误差信号。为消除系统读取时的随机误差,每张图中都是 100 个信号的叠加波形。当盘片的径向倾斜角度不同时,盘片的循迹误差信号确实受到影响。

将波形数据进行整理,去除波形前后的多余数据,并将多次测量的有用数据进行平均,得到图 9 的波形处理数据。

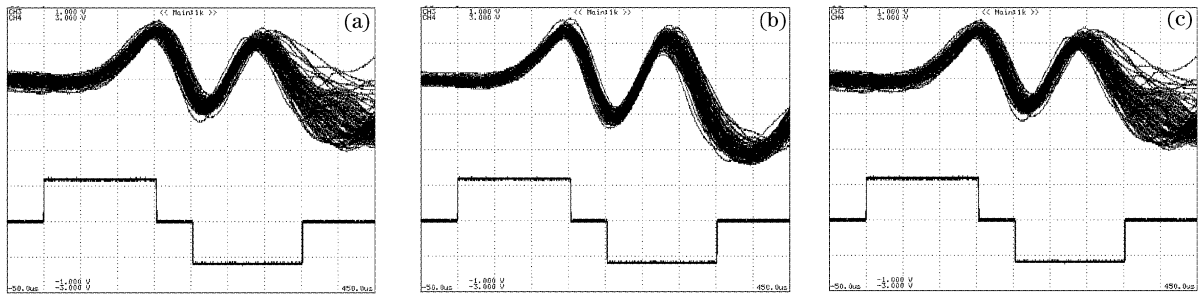


Fig. 8 Experimental waveforms of radial tilt effects on DPD tracking error signal. (a) Radial tilt  $-0.5^\circ$ , (b) radial tilt  $0^\circ$ , (c) radial tilt  $0.5^\circ$

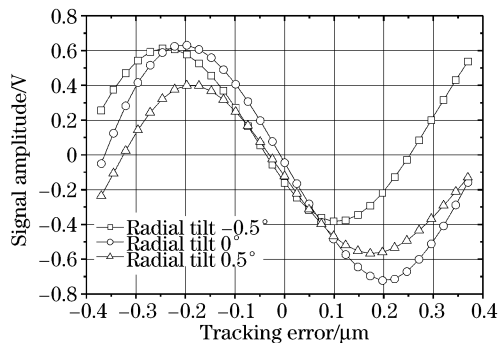


Fig. 9 DPD Tracking error signal waveforms under radial tilt

图 9 中当循迹误差绝对值大于  $0.2 \mu\text{m}$  时,循迹误差信号逐渐减小,这是因为在盘片的读取过程中,当聚焦光盘偏离被读取轨迹时,将向相邻的轨迹靠近,当处于两条轨迹中间时,循迹误差信号又降低为 0,这与在计算时所设定的只有一条轨迹的情况不同。在循迹误差小于  $0.2 \mu\text{m}$  的情况下,循迹误差信号随盘片径向倾斜角度的变化行为较好的验证了前面计算的结果。

**结论** 在对盘片进行合理建模的基础上,综合计算分析了 DVD-ROM, DVD-RAM 盘片在读取时盘片的径向倾斜对循迹伺服误差信号所造成的影响,并通过标准 DVD-ROM 盘片的实验测试验证了部分计算结论,即盘片的径向倾斜引起了循迹误差信号

的平均值的变化,使误差信号波形发生漂移。结果还表明,采用差动相位检测方式获得循迹误差信号比采用推挽方式对盘片的径向倾斜具有更好的抗干扰能力。

#### 参 考 文 献

- 1 Consortium D. DVD Specifications for Read-only disc version 1.0, M, Tokyo, Toshiba Corporation, 1996
- 2 Shibara T. Signal detection system for use in an optically reproducing apparatus, P, U. S. Patent 4, 467, 462, Aug. 21 (1984)
- 3 Hopkins H H. Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(1): 4~24
- 4 Jipson V B, Williams C C. Two-dimensional modeling of an optical disk readout. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(14): 2202~2209
- 5 Milster T D. New way to describe diffraction from optical disks. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(29): 6878~6883
- 6 Wang Xianying, Zhang Yuepin, Run Hao *et al.*. Optimization of Magneto-optical disk for blue laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(9): 1090~1094 (in Chinese)
- 7 Harvey J E. Fourier treatment of near-field scalar diffraction theory. *Am. J. Phys.*, 1979, **47**(11): 974~980
- 8 Upton R S, Milster T D. Detector patterns from optical disks. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(6): 1030~1044
- 9 Harvey J E, Shack R V. Aberrations of diffracted wave fields. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(18): 3003~3009
- 10 Shannon R R, Wyant J C. *Applied Optics and Optical Engineering*, Volume XI, M, Chpt. 1, Academic Press, Inc. Boston San Diego New York