

# DVD 光盘 / 驱动器 的物理基本原理介绍

While the market is matured for DVD reaching of 1.5 billion discs in 2002, there are still pockets of initial enquiry about the DVD disc format standard specification and construction and format. This article introduces the physical basics of disc and drive.

◇夏雨人译

2002年DVD的市场销售已达到15亿张,人们还会提出关于DVD的标准、结构和格式方面的一些问题。为满足读者的要求,本文介绍DVD光盘/驱动器系统的一些物理基本原理。

单面DVD光盘只能从一面读出,双面DVD光盘可从两面读出。由于DVD光盘的每一读出面可能有两个信息层,可以用几种顺序读出,如图2所示。

## 一、DVD的概述和主要参数

表1是根据影视业和电脑业需要而给出的基本参数

参数	单位	CD	DVD	
			单层	双层
激光二极管波长	nm	780	650	
物镜数值孔径 NA		0.45	0.60	
基准扫描速度	m/s	1.2-1.4	3.49	3.84
通道位长度	μm	0.28-0.32	0.13	0.15
最小凹坑长度	μm	0.83-0.97	0.40	0.44
轨距	μm	1.6	0.74	
盘片直径	mm	120	120	
盘片厚度	mm	1.2	2×0.6	
数据区内半径	mm	25	24	
数据区外半径	mm	37.5/58	38/58	
最大盘片翘曲		0.6°	0.4°	
最大盘基厚度公差	μm	±100	±30	+40, -50
最大半径公差	μm	140	100	
用户数据容量	GBytes	0.68	4.7	8.54
用户数据位速率(最大)	Mb/sec	1.23	11.08	

### DVD 的家族

DVD光盘是由两片厚度为0.6mm基片组成,多层的数据存储可使容量达到17GB。只读DVD光盘家族有以下一些成员:

1. 12cm的单面单层光盘,最大存储容量为4.7GB;
2. 单面双层光盘,最大存储容量为8.5GB;
3. 双面单层光盘,最大存储容量为9.4GB;
4. 双面双层光盘,最大存储容量为17GB。

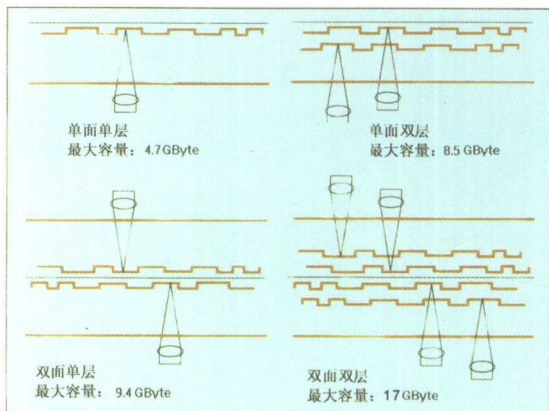


图1.只读DVD光盘家族

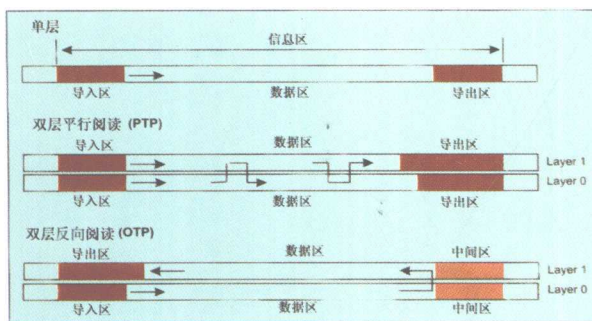


图2.几种读出顺序

### 双层平行循迹 (Dual-layer Parallel Track Path)

在双层盘片上使用平行循迹(PTP),该光盘的两层信息区内都有一个导入区和一个导出区。每层的导入区都在盘片的内径,导出区都在盘片的外径。这种布局结构和CD光盘的布局是相似的,像CD一样,盘片的读出对两个信息层都是从盘片的内径向外径读出。PTP方法可以在一个轨道上提供艺术家传略和其他背景资料,另一轨道上存放电影;或者通过层与层之间的快速访问实现快速响应的游戏结构。

### 双层反向循迹 (Dual-layer Opposite Track Path)

对播放时间长或画面质量要求很高的电影,一个信息层的存储容量可能是不够的,这样我们就需要从一个信息层到另一层的无缝隙的连续播放。这种方法称为反向循迹(OTP)方法。它与平行循迹方法完全不同。

第一信息层从盘片内径的导入区开始,到盘片外径的中间区结束。第二信息层从盘片外径的中间区开始,到盘片内径处的导出区结束。读出存在盘片上的数据从第一信息层内径开始,一直到该信息层的中间区,然后切换到第二信息层的中间区,再由外向内继续读出数据,直到第二信息层内径的导出区。

## 二、DVD的物理格式

### 存储容量

和CD一样,DVD光盘也有120mm和80mm两种直径,它可以是单面或双面。每一面或有一个信息层,或



有两个信息层。单层单面格式的120mm光盘的基本容量为4.7GB，而CD的容量则为680MB，增益因子为6.9。同样，80mm直径的DVD光盘容量为1.46GB，同样直径的CD为195MB。由于DVD有单面双层和双面的单、双层的格式，所以DVD规格的最大的容量几乎可达到20GB(17.1GB)。

增益因子

图3是光盘容量增益的条形图，把如何达到从CD到单面DVD的总的容量增益用一个台阶表示。以CD的基准点100开始，DVD使用较短波长激光器达到容量增益1.44倍(正比于 $1/\lambda^2$ )。使用较大的数值孔径的读取透镜再增加1.78倍的因子(正比于 $NA^2$ )。DVD光盘更严格的生产容限在径向和切向分别贡献了1.35倍和1.31倍的因子。这些因子的乘积使总的物理密度增加为4.54倍(见表2)。

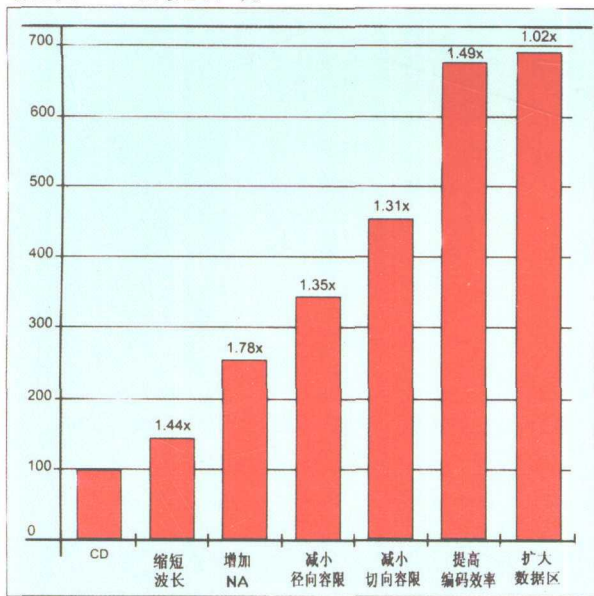


图3. 光盘容量增益的条形图

更有效的通道调制(EFM+和删除子码)，纠错(RSPC)和扇区格式(大大减少扇区管理开销)分别得到1.12, 1.16和1.14的增益因子。使数据密度又增加1.49倍。

再加上节目区的稍微扩大(1.02倍)，使单面单层(SL)DVD光盘的容量增益是CD的6.9倍。单面双层(DL)格式再使容量增加1.82倍，使单面双层DVD光盘容量增益是CD的12.6倍。双面格式再使容量倍增，双面单层容量增益是CD的13.8倍，双面双层容量增益是CD的25倍。

表2是DVD和CD-ROM的主要参数对照，可见DVD的凹坑尺寸和轨距都比CD小了一半多，使密度增加

4.5倍以上。同时，扇区格式的编码效率、纠错、和通道调制也增加接近1.5倍的因子，节目或信息区也稍微增大。正如前面所提，单面单层DVD光盘用户容量总增益是CD的6.9倍。

平均来说，DVD盘片的运行比CD快近3倍，从而使用户数据传输速率快9倍。

更大的存储容量和更快的传输速率合在一起，产生了完全符合甚至在许多方面超过了工业要求的工作参数。

表2. DVD和CD-ROM的主要参数对照

参数		CD-ROM	DVD-ROM	增益因子
		模式1, 74min	(单层)	
光斑直径	$W = \lambda / (2 \cdot NA)$	0.78 / (2*0.45) =0.87	0.65 / (2*0.6) =0.54	1.60 (注1)
轨距	P	1.6 μm	0.74 μm	2.16
相对径向密度	$= p/w$	1.85	1.37	1.35 (注2)
通道位长度	c	0.28 μm	0.133 μm	2.10
最小凹坑长度 3T	$= 3 \cdot c$	0.84 μm	0.40 μm	2.10
相对切向密度	$= 3 \cdot c/w$	0.97	0.74	1.31 (注2)
密度	$d = p \cdot c$	0.45 μm <sup>2</sup> /ch.bit	0.1 μm <sup>2</sup> /ch.bit	4.54 (注3)
线速度	v	1.21m/sec	3.49m/sec	2.88
光学截止频率	$F_c = v/w = v \cdot 2 \cdot NA / \lambda$	1.4MHz	6.44MHz	4.6
通道位速率	$f = v/c$	4.3218MHz	26.16MHz	6.05
最高EFM频率	$f_m = f/6$	0.72MHz	4.36MHz	6.05
相对带宽	$= f_m / f_c$	0.52	0.68	1.31 (注4)
编码效率	e	28.4%	42.3%	1.49
用户数据速率	$= f \cdot e$	1.2288Mbit/sec	11.08Mbit/sec	9.0
盘上节目区面积	$A = \pi (R_{out}^2 - R_{in}^2)$	25-58mm <sup>2</sup> =8600mm <sup>2</sup>	24-58mm <sup>2</sup> =8760mm <sup>2</sup>	1.02
用户数据容量	$(a/d) \cdot e$	682MBytes	4700MBytes	6.9

注1) 不牺牲系统容限的情况下，缩小光斑增加了光学分辨率；

注2) 相对径向和切向密度均提高后，减小了系统的容限。

注3) 总的物理密度的增加包括：光斑面积增益·相对径向密度增益·相对切向密度增益 =  $1.6^2 \cdot 1.35 \cdot 1.31 \approx 4.5$

注4) 相对带宽的增益 = 相对切向密度增益

三、密度、容限和系统稳定性

密度

DVD格式的物理密度(通道位)比CD高4.54倍。密度的增加主要是由于聚焦在信息层上的激光光斑缩小从而提高了光学分辨率。激光光斑的面积正比于 $(\lambda/NA)^2$ ，这里λ是激光波长，NA是聚焦透镜的数值孔径。对DVD来说，λ减小到650nm，而NA增大为0.6，两者合起来使光学分辨率改善2.56倍。轨距和通道位长度以1.6的因子减小，在不牺牲容限的情况下使密度增加为2.56倍。

容限

要达到DVD物理密度(4.5倍)还需要1.77倍的增益，这必须通过在DVD系统中减小容限来实现。相对轨道节距(=轨道节距/光斑直径)减小1.31倍，相对通道位长度(=通道位长度/光斑)减小1.31倍。因此在DVD光盘和驱动器的生产过程中必须严格控制公差。多



年的 CD 盘生产经验加上现在的生产设备的性能已经能够做到这种要求了。

由于 DVD 的切向密度高,使其 HF 信号的带宽比 CD 更接近光学截止频率,因此 DVD HF 信号中最高频率在“网眼图”上的幅值要小于 CD 的幅值。图 4 显示 CD 和 DVD (两者都为均衡后的信号)凹坑形状和网眼图。

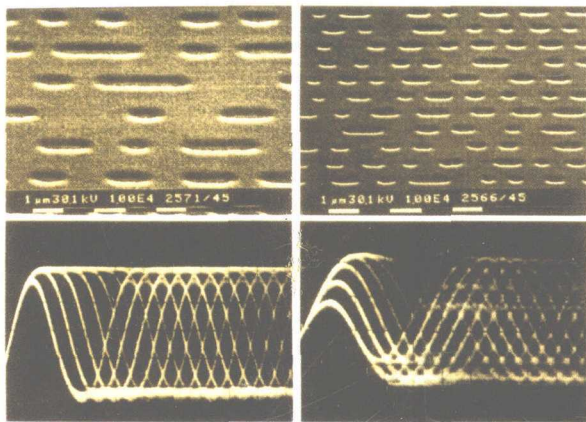


图 4. CD 和 DVD 的凹坑形状和网眼图。

波长值  $\lambda$  由所采用的激光二极管而定,固定为 650nm。物镜的 NA 设定为 0.6,是为了确保物镜生产的质量。由于 DVD 的基片厚度为 0.6mm,是 CD 的一半,Comma 的作用也减小了一半。

### 系统的稳定性

正如前文所说, DVD 相对 CD 的物理密度的增加在存储容量增加中起了重要作用。加之系统容限的大大减小,我们不得不仔细考虑系统的稳定性。这里给出一些致使物理密度增加 4.5 倍的主要考虑的问题。

增加物理密度需要权衡利弊,一方面获得了较大的存储容量,另一方面却减小了制造容限并降低了系统稳定性。为了读出盘上较小的凹坑结构,必须缩短激光二极管的波长  $\lambda$ , 或者增大物镜的数值孔径 NA, 或者同时改变  $\lambda$  和 NA。缩短  $\lambda$  关系到激光二极管的技术成熟程度。增大 NA 则会增加对光学像差的敏感性。

光学像差是由系统中的以下误差造成的:

离焦引起的波前误差: 正比于  $NA^2 / \lambda$

盘片翘曲引起的慧差: 正比于  $t \cdot NA^3 / \lambda$  ( $t$  是基片厚度)

由基片厚度误差引起的球差: 正比于  $NA^4 / \lambda$

按激光二极管实用的波长  $\lambda$  可以确定为 650nm。物镜的 NA 设定为 0.60, 仍能确保物镜制作得相当好。DVD 基片厚度为  $t = 0.6\text{mm}$ , 是 CD 的一半, 慧差的贡献基本上也是 CD 的一半。把两片 0.6mm 厚的基片粘合在一起, 得到了一个刚性的盘片结构, 这种技术来自 LaserDisc (激光视盘), 这种结构在机械上与传统 CD 是兼容的。

给定  $\lambda$ 、NA 和  $t$  的值后, 上述误差和跟踪误差决定了实际的光学像差水平。现实的问题是, 什么时候或者说什么像差水平使系统性能受到不利的影 响。这里 (通道位) 密度起至关重要的作用, 在较高的密度情况下只能允许较小的像差, 否则系统的稳定性会变坏。

为了选择一个使系统仍有足够稳定性的物理密度, 下列步骤是很有用的:

- 定义一组公差“鸡尾酒”, 代表光盘和驱动器的组合后能勉强维持工作的最坏状况条件。在这个“鸡尾酒”中用到了所有的系统公差, 但并不是每个公差都到它们的极限, 而是它们的实际的组合。

- 然后选择通道位长度和轨距, 使得系统在即使出现上述定义的公差“鸡尾酒”情况下, 仍能可靠地阅读数据。

为了评估检测到的 RF 信号质量, 我们考虑数据对时钟的抖晃。抖晃是测量被测凹坑边缘相对于时钟 (恢复) 的偏离, 从而与误测概率相关。已知 RSPC (里德索罗门码) 纠错系统的能力, 我们使用抖晃值为小于通道位 (DVD 的通道位为  $38.23 \mu\text{s}$ -译注) 的 15%, 作为可靠的数据检测的准则。

以下的公差“鸡尾酒”被认为是现实的:

- 盘片和驱动器的径向翘曲  $0.5^\circ$  ;
- 盘片和驱动器的切向翘曲  $0.3^\circ$  ;
- 离焦  $0.4 \mu\text{m}$  ;
- 基片厚度公差  $30 \mu\text{m}$  ;
- 轨道跟踪误差  $50\text{nm}$ 。

自从 LaserDisc 发展以来, 与光盘读出有关的衍射理论已是众所周知。当今计算机能力的拓展, 已能进行计算机模拟。图 5 表示在没有上述定义的公差“鸡尾酒”和有公差“鸡尾酒”两种情况下 RF 信号的计算机模拟结果。从这些网眼图我们可以知道, 在有这种公差“鸡尾酒”的情况下,  $t$ 、 $\lambda$ 、NA 不变而物理密度增加, 信号变得很糟糕。

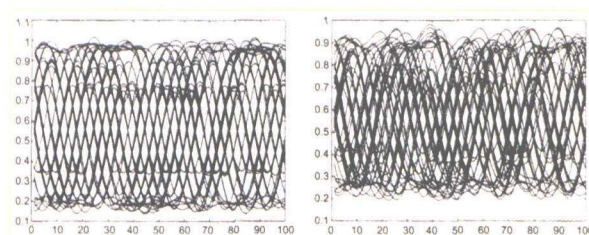


图 5 RF 信号的计算机模拟图 (没有公差“鸡尾酒”的情况) RF 信号的计算机模拟图 (有公差“鸡尾酒”的情况)

图 5. 在没有和有公差“鸡尾酒”两种情况下, RF 信号的计算机模拟图

图 6 显示了, 在无像差和在有公差“鸡尾酒”两种情况下, 数据对时钟的抖晃随 CD 的物理 (或面) 密度增加的函数关系。在无像差情况下, 对已选择的  $t$ 、 $\lambda$  和



NA 值, 物理密度达到 CD 的 6.2 倍是可行的。然而这样高的密度下不能得到一个稳定的系统。考虑到公差“鸡尾酒”, 为保证数据检测的可靠性和系统的稳定性, 必须将物理密度限制为 CD 的 4.5 倍。

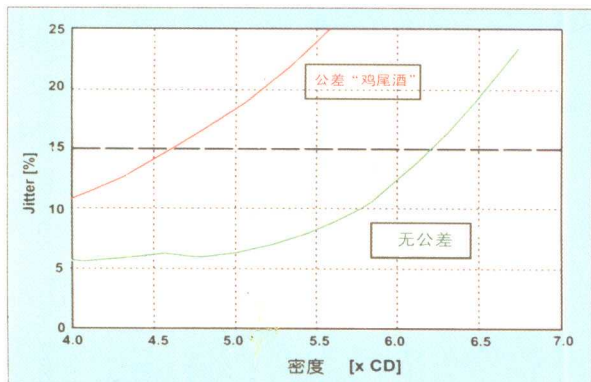


图 6. 数据对时钟的抖晃计算值与密度的函数关系

## 四、双层光盘

### 双面光盘

DVD 包含两个粘合起来的基片, 人们自然会想到把信息存放在光盘的两面。这样虽然能使总的容量增加一倍, 可是实用上有局限性。阅读另一面的信息层时必须翻转光盘, 除非在驱动器上安装特殊的装置(双面光学拾取头或者移动的拾取头), 这不可避免地增加了硬件的成本。从外观上看, 双面单层的 DVD 只有较小的标签面积, 它缺乏大面积的印刷标签的吸引力。由于这些原因, 单面双层的光盘被引入了。

### DVD-9 概述

双层光盘的两个信息层被一个间隔层分开, 见图 7。第一个信息层(L0)是半透层, 可以透过 L0 读出第二信息层(L1)。只要间隔层的厚度比成像光学头的焦深大得多, 就可容易地步进调节聚焦机构从同一面选读任一信息层。

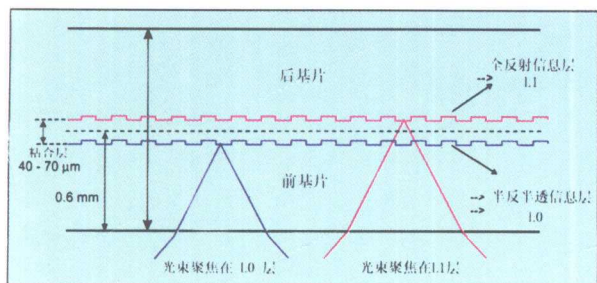


图 7. 双层光盘略图

### DVD-9 密度

用一个物镜(只对一个信息层的厚度作了校正)去阅读两个信息层时, 必然会引起半个间隔层厚度的误差。这就意味着即使是用理想的驱动器去读完美的光盘时, 系统

中也会出现相当大的球差。为了达到与单层光盘一样的稳定性, DVD-9 的切向的密度应该减少 10%。因此 DVD-9 相对于 CD 的物理密度的增加从 4.5 降为 4.1, 每层的总容量按同样比例从 4.7GB 减至 4.27GB, 整张光盘容量为 8.54GB。

### 系统设计中的考虑

首先应考虑区分由双层光盘的两个信息层产生两个 S-聚焦曲线。很显然, 区分两个 S-聚焦曲线是可靠的聚焦跳变机构的必要条件。只要间隔层厚度足够就能做到。

其次, 必须研究在光探测器上有杂散光这一现象。从另一个信息层反射的光形成很大的照明区覆盖在光探测器上, 这样在电信号中叠加一个干扰的直流分量。同时还必须了解, 由于激光的相干性很强, 干涉也会影响读出信号。系统给定了 NA, 由这一现象可推算出间隔层厚度的最小值。

最后一个问题也是系统设计中最重要, 系统可容许的总的球差决定了间隔层厚度指标的上限。

综合上述考虑, 间隔层厚度范围确定为 40-70 μm。一方面能保证可靠地检测读出信号和聚焦跳变能力, 另一方面使双层光盘的生产成为可能。

### 双层光盘的生产方法

最直接的双层光盘生产方法是将两个信息层复制在每个基片上。一个基片上覆盖半反射层(电介质), 另一个基片上覆盖金属反射层。然后将两个基片背对背用光学透明粘合方法(例如紫外粘合)粘合起来, 这个方法只适合制作单面双层光盘(8.5GB)。

另一个方法是 2P(光致聚合)法, 在 L0 复制以后先覆盖一层电介质半反射层, 然后上面沉积一层 2P 胶的薄膜层, 在 2P 层上再复制 L1 层, 最后再镀金属反射层。这个方法是由 3M 公司首先提出, 可以生产双层双面的光盘, 总容量可达到 17.1MB。

双层光盘生产中最关键的是要控制电介质半反射层和间隔层的均匀性。高质量双层光盘的生产技术正在发展之中。

### 轨道跟踪方法

在 CD 中径向跟踪方案有几种, 其中推挽法(Push Pull)在红皮书的系统描述中已作了详细的解释。同样, DVD 也有几种跟踪方案。只有相位差检测法(DPD)在 DVD 系统描述中被指定。下面将介绍 DPD 的基本原理和它的优点。

### 轨道跟踪的工作原理

光盘上的凹坑分布可以看作是在径向和切向的二维光栅, 衍射光的级次分布如图 8 所示。光盘上的主反射光为 0 级光(0, 0), 径向 1 级光有 (+1, 0) 和 (-1, 0), 切向 1 级光有 (0, +1) 和 (0, -1), 在对角线上还有 1 级光 (+1, -1), (-1, -1) 和 (+1, -1), (-1, +1)。

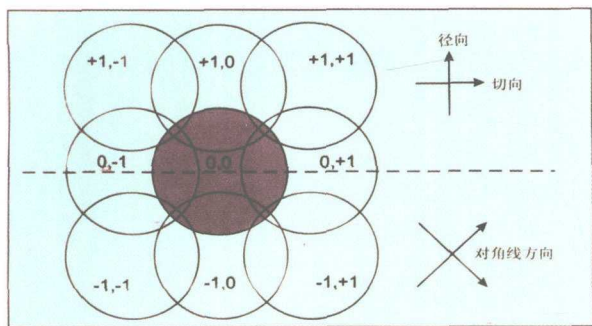


图8、二维光栅的衍射花样

与大多数传统的CD播放机一样，DVD播放机也装有四象限光电探测器（见图9），激光光斑成像在光电探测器上，影像中包括1级光的部分，1级光与主反射光（0级光）叠加后产生工作信号。

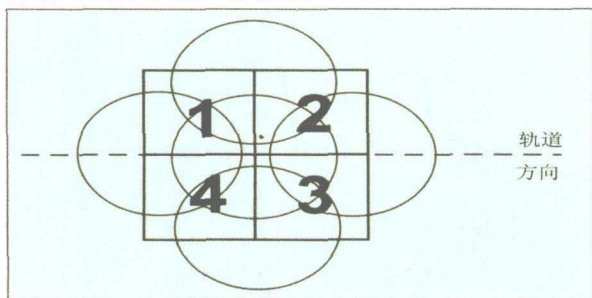


图9、用于CD的正交衍射花样

HF 信号是由切向1级光产生的，而横交轨道信号（track crossing）是由径向衍射光产生的。

由四个象限部分的总和（1+2+3+4）得到HF信号，由径向两半探测器相减（1+2）-（3+4）可得到径向推挽信号。

### DPD跟踪原理

DPD跟踪的工作主要借助的是对角线的一级衍射光，见图10，因此是径向和切向检测的混合。

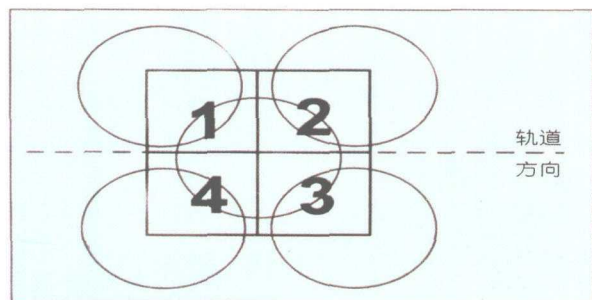


图10、用于DVD的对角线衍射花样

对角线上的象限两两相加，由（1+3）、（2+4）得到的对角线信号（两者都包含HF信号）作相位比较： $\phi(1+3) - \phi(2+4)$ 。如果扫描的光斑偏到轨道的一侧，其中一个对角线信号将稍稍超前另一对对角线信号。光斑偏到轨道的另一侧时，则情况正相反。因此，从相位比较

电路输出一个锯齿形的信号（见图11），这是一个很好的跟踪伺服信号，适合跟踪细小的凹坑式样。

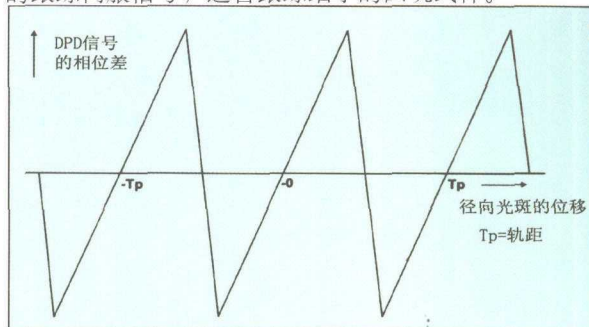


图11、相位差信号和轨道偏离的函数关系

### 对角线光栅模型

DPD跟踪法的数学表达非常复杂，超出了本文的范围，下面介绍一个简单的模型，它有助于我们理解DPD跟踪的原理。

考虑激光光斑扫描光盘上的凹坑，见图12。当光斑进入或离开凹坑的边缘时，除了上面提到的径向和切向光栅，我们还能够想象一个正交光栅，它与凹坑形成 $45^\circ$ 的夹角。这个对角线光栅是由凹坑的自然圆弧形而产生，在对角线的象限上产生各级衍射光。当激光光斑从偏离轨道的一侧进入凹坑时，其中一个光栅比另一个提前被“看”到，因此与该光栅所对应的对角线信号也比另一个提前。当光斑从轨道另一侧进入凹坑时，情况则相反。

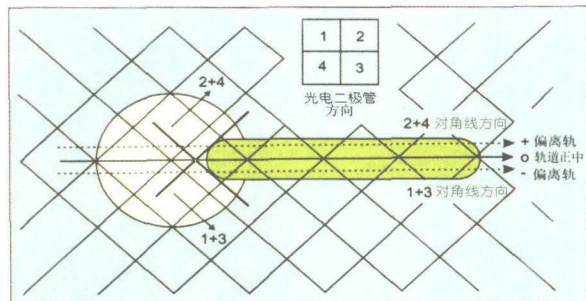


图12、简化的对角线光栅模型

### DPD跟踪法的优点

为了检测CD的推挽信号，CD上凹坑深度必须对获得最佳的HF检测信号的凹坑深度稍有偏离。但是在DVD系统中，考虑到DVD系统有比CD系统严格的容限，凹坑深度不能允许对获得最佳的HF检测信号的凹坑深度稍有偏离。而且，坑深容许的范围宽可提高光盘生产的合格率。

正如前文所述，杂散光是读出双层光盘存在的一个潜在问题，杂散光会在推挽信号和三光束跟踪误差信号上叠加有害的直流分量。而DPD跟踪方法与推挽和三光束跟踪方法不同，它使用的是高频交流信号，直流分量对它没有影响，这是DPD跟踪的一个很大的优点。◆