

光学头设计原理

文/吉 坤 转载自《电声技术》杂志

一、前言

自从1982年直径12cm的数字音频光盘CD问世以来,数字视频光盘DVD (Digital Video Disk) 一直是新一代光盘的一个梦想,虽然在几年前出现了VCD,但是对于光盘来讲,技术上没有改变,只是对数据进行了压缩,画质也只是VHS水准,不过是过渡性产品,在国外没有形成市场。

数字图像信号具有在被编辑时画质不劣化,容易被计算机处理等优点,所以能记录2小时以上高画质的数字图像的光盘,已经让人盼望已久。最近几年,短波长的半导体激光器技术,薄型化光盘基板技术,对物透镜的高数值孔径NA化技术等的进步,使光盘的记录密度高密度化成为可能,同时数字连续可变画面压缩技术也有很大的进步,使长时间高画质的连续可变画面收录在一张光盘里成为可能。

在以上这些技术基础被奠定之后,世界上的十家大企业共同制定了新世代数字视频光盘DVD (Digital Video Disk) 的标准,既在和原有CD同样尺寸下,记录容量为原来光盘7.5倍4.7G,并采用高画质的MPEG-2数字信号压缩方式,使之能够存储135分钟的电影。

DVD播放机主要是由光学头和MPEG-2解码器两个关键技术组成的,其中MPEG-2解码器由于是通用标准,目前开发出芯片的厂商不下十几家,而光学头的技术还主要掌握在日本厂商手中。

光盘技术就是一束被聚焦到回折界限的最小激光束照射到盘面,由于记录着信息的盘面的凹凸对光的反射不同,就可以读出盘上的信息。

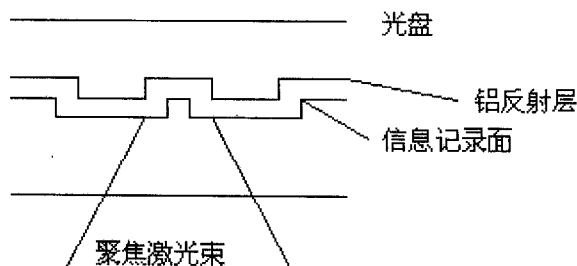


图1 激光光束聚焦在光盘表面上

对于光学头来讲,它特有的技术有如下几个:

a. 通过利用被聚焦到回折界限的最小激光束,穿过0.6mm的透明塑料层,从凹凸信息面取出信号。

b. 使用半导体激光二极管,使用数值孔径NA为0.6的对物透镜,把激光束聚焦为由波长决定的回折界限为止的最小光束。

c. 光盘外形的误差和不同光盘交换时带来的对物透镜的焦点位置在光盘信息记录面的位置变化,还有光盘回转时光盘面上下振动也会引起焦点位置变化,为了对焦点位置变化进行自动补正,必须把能够以精

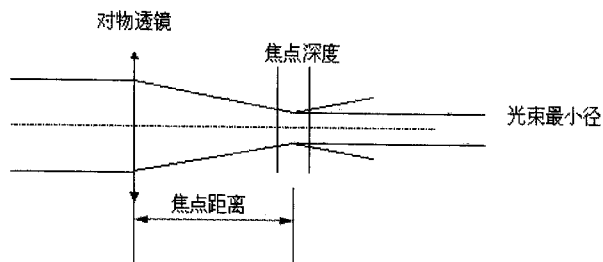
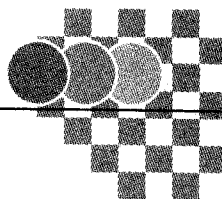


图2 焦点附近的激光光束



度为正负 $1\mu\text{m}$ 对焦点位置控制的误差检出机能和控制用的伺服机构内藏在光学头里。

d. 光盘的形状中心和光盘的回转中心之间的偏心补正, 还有对于在轨道间距为 $0.74\mu\text{m}$ 的轨道上, 精度正负 $0.1\mu\text{m}$ 控制激光束对轨道的追迹控制用误差检出机能和控制用的伺服机构内藏在光学头里。

在这里对于光盘装置系统, 能满足以上要求的光学头的基本光学系, 对物透镜OL(object lens), 作为光源的半导体激光二极管LD(laser diode), 准直透镜CL和其它一些光学头用的光学部品的原理及设计进行说明。

二、光学头基本原理

1. 光学头的基本光学系和光学部品的收差
光学头是DVD系统的最大关键部件之一, 它的基本原理图如下

光学头是由1. 对物透镜, 2. 准直透镜, 3. 偏光分光棱镜, 4. 分光棱镜, 5. 反射镜, 6. $1/4$ 波长板, 7. 焦点误差检出光学系, 8. 寻轨误差检出光学系等光学部品和光学系, 9. 焦点控制伺服机构(F-ACT), 10. 寻轨控制伺服机构(T-ACT)等伺服机械控制部品, 还有11. 半导体激光二极管, 12. 多分割光电二极管PD(photo diode)等光电部件构成的。

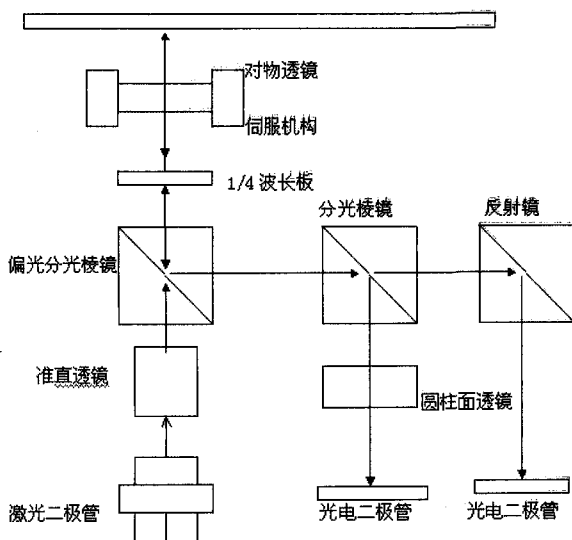


图3 光学头的原理

光学头能够读出光盘上的信号的原理是从激光二极管射出的发散P线性偏振激光通过准直透镜, 成为平

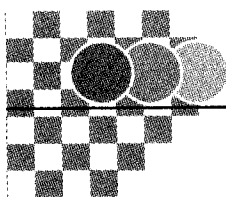
行光, 再通过 $1/4$ 波长片时, 偏振方向旋转 45° , 变为圆偏光, 这束平行的圆偏光被对物透镜聚焦到光盘的信息面, 再反射回来(根据盘面的凸凹对光的反射不同), 通过 $1/4$ 波长片时, 再一次偏振方向被旋转 45° , 成为S线性偏振光, 在偏光分光棱镜PBS处被反射到误差检出系和信号系, 反射光再一次被分为两路, 误差系的一路通过凸透镜、圆柱透镜, 投影到四分割的光电二极管上, 根据各象限光量的大小, 进行运算, 对聚焦和寻轨伺服机构控制, 使之读出正确的信号, 另一路信号系的光束由凸透镜会聚到光电二极管, 把光信号变为电信号。

要想把激光聚焦成由波长决定的最小光束, 必须把从LD发出的球面波的波面尽量无缺陷的传到光盘的情报记录面。也就是说, 从LD发光开始到光盘为止, 光学头成像系各部品全体的RMS波面收差必须限制在 0.07λ 以下, 不然不能把激光光束聚焦为由于干涉极限决定的最小光束。构成光头的各光学部品, 光盘盘面, 其中也包括对物透镜设置时的调整误差, 以上这些合计的成像光学系全体的波面收差, 必须限制在由Warechal Criterion($\delta\omega$)MC给出的允许最大波面收差 0.07λ 以下。光盘已经由光盘标准规定, ($\delta\omega$)DISK= 0.05λ , 一般对物透镜的象差($\delta\omega$)ADJT= 0.025λ , 要使全体($\delta\omega$)MC小于 0.07λ , 对于其他的光学部品的收差必须严格控制。从LD开始到光盘为止, 光头各光学部品的最大允许波面收差各用($\delta\omega$)LD, ($\delta\omega$)CL, ($\delta\omega$)PBS, ($\delta\omega$)QWP, ($\delta\omega$)MR, ($\delta\omega$)OL表示, Warechal Criterion给出我们如下公式:

$$(\delta\omega)_{MC} < \lambda/14$$

$$(\delta\omega)_{2MC} = (\delta\omega)_{2LD} + (\delta\omega)_{2CL} + (\delta\omega)_{2PBS} + (\delta\omega)_{2QWP} + (\delta\omega)_{2MR} + (\delta\omega)_{2OL} + (\delta\omega)_{2DISK}$$

下面具体DVD的数值带入来试算一下。半导体激光二极管激光射出侧有平面玻璃窗, 此外由于半导体激光器自身的特点, 不可克服的有非点间隔, 比理想波面要差, 普通($\delta\omega$)LD约为 0.013λ 。棱镜, 反射镜等平面光学部品比较容易的以波面收差 $0.01\sim 0.015\lambda$ 制造出来。但是准直透镜和对物透镜等



非平面光学部品, 波面收差要想抑制在 0.03λ 之内, 比较困难, 分别定为准直透镜 0.025λ 和对物透镜 0.035λ , 这样根据式(2)得出全体 $(\delta\omega)MC$ 的波面收差为 0.0694λ , 满足要求。即使对物透镜的波面收差被抑制在 0.035 以下, 如果准直透镜的波面收差大于 0.025 , 那样被聚焦光束的直径就会变大, 从信息面读出数据错误频度就会变高。由于以上的理由, 准直透镜的波面收差必须小于 0.025 , 但球面单透镜要想达到这个值非常困难, 一般采用球面玻璃组合透镜。

从DVD光头的对物透镜射出的激光光束, 需要一直跟踪光盘信息面上的轨道间距为 $0.74\mu m$, 最短凹坑长为 $0.4\mu m$ 的轨迹, 并正确读出凹坑信息。光强为光束中心强度 $1/e^2$ 的位置的光束直径被称为光束径 ω , 激光波长 $\lambda=650nm$, 对物透镜的数值孔径 $NA=0.6$,

$$\omega = k \times (\lambda / NA)$$

当对物透镜的入射光束的光强能量分布为均等分布时, 系数 k 是 0.96 , 光强能量分布为高斯分布时为 1.34 。从上式可以看出, 光束径正比例于 λ/NA , 既要想提高光盘记录密度, 缩小光束径, 就需要使激光短波长化, 并且提高对物透镜的 NA 。

还有对物透镜的焦点深度 Δz 正比例于 λ/NA 的平方, DVD焦点深度与CD相比变窄56%, 焦点误差的允许值变小。

$$\Delta z \sim \lambda / NA^2$$

光盘的倾斜引起的象差也会增加。对于焦点误差的允许值的减少, 就需要提高焦点控制精度, DVD为了减少光盘的倾斜引起的收差, 光盘的厚度减为CD的一半 $0.6mm$ 。

2. 成像光学系

2.1 激光二极管

一般LD发出的光为与PN结合面平行线性偏振光, 但短波长的LD中大多发出与PN结合面垂直的线性偏振光, DVD要求LD在光盘面上的能量为 $0.3mW$ 左右, 这就需要LD发出的激光能量是 $3\sim 5mW$ 。

2.2 LD的射出角特性和准直透镜

LD射出的激光是发散光, 从发光点离开一段观测到的光束断面强度分布, 被称为远视野象FFP(far field pattern), FFP垂直结合面方向宽, 平行结合面方向窄, 象下面图示的一样, 是纵长的椭圆形。

LD垂直结合面的放射角和平行结合面的放射角分别是 $\theta_{\perp}$, $\theta_{\parallel}$ 。根据LD的放射角和对物透镜对光束强度的分布要求, 确定准直透镜的焦距距离。

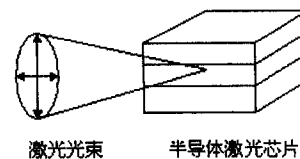


图4 半导体激光器发出的发散激光

2.3 LD的噪音特性和高频叠加

LD有单模发光和多模发光两种激光发振方式。单模发光的最大问题是从光盘反射回来的光进入激光共振器, 形成干涉, 成为噪音, 影响SN, 为了消除噪音, 需要对驱动电流进行高频叠加。而多模的LD抗干扰能力强, 不需要高频叠加。

2.4 偏光分光棱镜和1/4波长板的作用

激光二极管射出的发散P线性偏振激光通过准直透镜, 成为平行光, 无反射折射的通过PBS, 再通过1/4波长片时, 偏振方向旋转45度, 变为圆偏光, 这束平行的圆偏光被对物透镜聚焦到光盘的信息面, 携带信息再反射回来, 通过1/4波长片时, 再一次偏振方向被旋转45度, 成为S线性偏振光, 在偏光分光棱镜PBS处被反射到误差检出系和信号系, 使入射光和带有信号的反射光分离。

2.5 对物透镜

DVD光头要求对物透镜一定要象差小, 特性优良, 能够把光束聚焦到回折界限, 也就是能够补正各种收差, 使点象的大小完全由回折界限来决定。一般使用非球面光学树脂透镜。

3. 误差检出系统

非点收差法

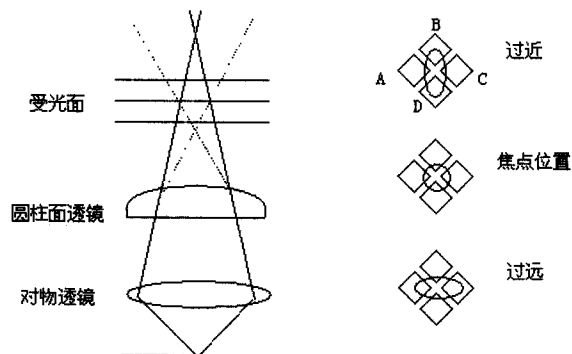
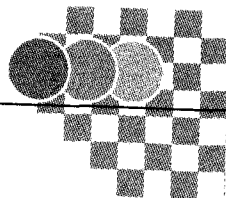


图5 非点象差法的示意图



焦点误差检出方式一般采用非点收差法, 非点收差法就是根据光盘反射面位置的变化, 反射光的聚焦位置移动, 通过圆柱面透镜对投影光形状进行变化, 用4分割PD差动检出。

$$\text{聚焦误差检出信号} = (A+C) - (B+D) / (A+B+C+D)$$

$$\text{寻轨误差检出信号} = (A+B) - (C+D) / (A+B+C+D)$$

PD把光信号转变成电信号、前置放大、模拟运算, 再经过相位补偿, 把信号输入驱动放大器, 驱动透镜驱动线圈, 完成聚焦和寻轨控制 (图6)。

2.4. 信号系统

从PBS分离的含有信息的反射光, 除一部分进入伺服机构的控制系, 大部分进入信号系, 由PD转变成电信号, 前置放大, 成为RF信号。

3 光学头光学系的设计

DVD光学头主要包括对物透镜驱动系ACT (ACTUATOR) 和光学系, 对物透镜驱动系有两个功能, 一个是把从半导体激光器发出的激光聚焦在光盘的信息面上 (即聚焦focusing), 另一个是使光束在轨道上并追随轨道 (即寻轨tracking), 因为聚焦是对于光盘的面振动, 以

$1 \mu\text{m}$ 以下的误差来追随, 设计聚焦伺服驱动线圈时, 必须使驱动线圈的加速度超过光盘面振动的加速度。寻轨驱动线圈是以 $0.1 \mu\text{m}$ 以下的误差对轨道进行追随, 设计中特别要注意的是防止对高频的机械共振。

设计一般是以光盘的国际标准为目标值, 要考虑到光盘的面振动, 光学头的装配误差, 光学头的移动误差, 主轴电机的轴振动, 光盘的放置误差等诸多因素。具体的结构, 主要有轴转动型, 弹性线材支持型等。ACT的基本特性可以看成有弹簧的进退结构, 驱动是由线圈和电磁回路构成。具体设计时, 有PMESH、PMAG等计算机辅助设计软件。

以下主要介绍DVD光学头的光学系的设计。

3.1 成像光学系

成像光学系的设计, 无非是满足聚集后的光斑点足够小, 以便能准确读出光盘上信息。光斑的直径 $\omega = k (\lambda / \text{NA})$, 系数k与对物透镜入射光强分布有关, 光强分布越接近均一分布, k值越小。在相同数值孔径NA的条件下, 若想得到最小聚集光斑。

a. 入射光波面收差小

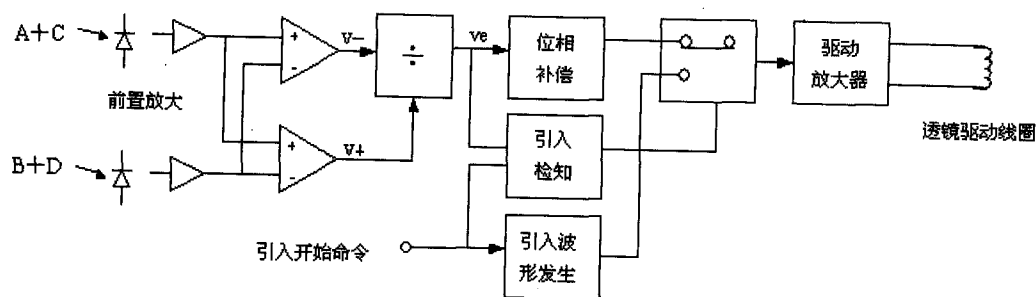


图6 聚焦伺服机构的基本构成图

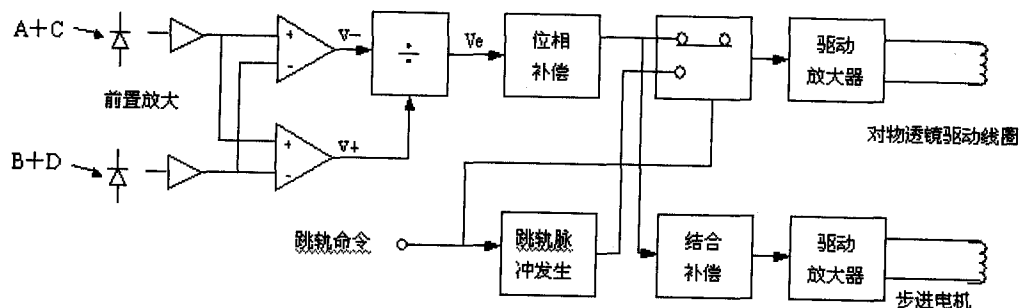


图7 寻轨伺服机构的基本构成图

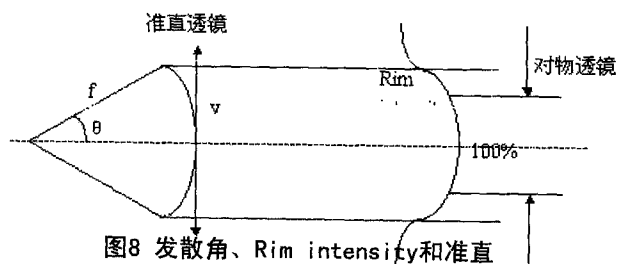
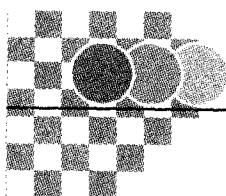


图8 发散角、Rim intensity和准直透镜、对物镜的关系

b. 入射光强分布均匀。

对于a应力求使每个光学部品有最小的像差，对于b因为从LD发出激光为发散光，经准直后，光强分布为高斯分布。如果只利用中心部的激光，可以较接近均一分布，但是对LD光能量的利用率低下，可能得不到到达盘面所要求的能量，因此要折中考虑这相矛盾的两个要求，定出横向对物透镜利用光强分布百分比 R_x (Rim intensity X)，纵向利用光强分布百分比 R_y (Rim intensity Y)，这两个条件是设计光学系的依据。

3.1.1 激光二极管LD (Laser Diode)

LD是光学头中的发光器件，它发出光的特性决定了光头的结构、特性。

a. 基本特性

只读型DVD光头用LD一般为635nm或650nm，它的激光共振阈值电流一般为40mA左右，工作电流（即LD出射激光能量约3mW时，为50mA左右，各制造商极力减少其工作电流，以使其工作在较低温度下，因为温度变化（升高）会使其发出激光波长发生漂移，在设计光头时应尽量使其得到良好散热。

b. 偏光性

LD发生的激光，多为不完全的线性偏光，在设计PBS时要考虑线性偏光的方向性。

c. 放射角及非点间隔

从LD半导体激光共振腔中发出的发散激光，从水平和垂直方向来看，并不是从同一点发出，水平发射点和垂直发射点之间的距离，称为非点间隔，它使从LD发出的激光波面产生非点象差。

由于从LD放出激光为发散光，并且水平与垂直方向发散角不同分别为 $\theta_{\perp}$ 和 $\theta_{\parallel}$ ，整形透镜和准直透镜设计要以 $\theta_{\perp}$ 和 $\theta_{\parallel}$ 为依据。

d. 发振方式和高频叠加及RIN

相对噪音强度RIN是评价LD的一个重要指标，

$$RIN = (\Delta P / P)^2 / \Delta f \text{ (单位Hz}^{-1}\text{)}$$

其中 ΔP 是LD射出光的交流成分，P是直流成分， Δf 是测量的频带宽度。

多模方式的LD一般RIN较低，但抗反射光干扰能力强，驱动电流不需叠加高频，对于单模方式发光LD，反射光对光信号影响很强，必须对驱动电流叠加高频，一般在500~700MHz范围内。

e. 内藏光电二极管PD (photo diode)

LD内部为了使出射光能量保持一定，一般内藏光电二极管PD，做APC (auto power control) 用。

3.1.2 准直透镜

准直透镜是把LD发出的发散光转换成平行光，它由以下3个条件决定它的焦距f：

a. 对物透镜纵向的光强分布 R_y 。

b. 对物透镜直径 ϕ 。

c. LD的垂直放射角 $\theta_{\perp}$

由高斯光强分布公式：

可以计算出准直透镜的焦距f。再由

a. 准直透镜的焦距f。

b. 对物透镜要求的光束直径。

c. 公式 光束直径 = (对物透镜直径) + (光盘偏心量) + [裕量]

$$2f \text{ NA} = \text{光束直径}$$

可以求出准直透镜的数值孔径NA。

3.1.3 整形棱镜

由于DVD使用的激光波长短，所以对光波面象差要求严，所以尽量使用LD发光的中间部分，即波面收差较小的部分，同时还要考虑光能的利用效率。这样就与一般的CD用光头不同。需要整形棱镜，它的作用是把椭圆形的平行光，变换成正圆形的平行光（如图9），

根据以下4个条件，可以求出整形棱镜的整形倍率m及顶角：

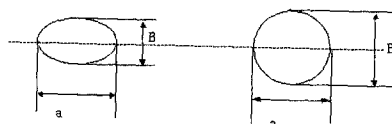


图9 整形棱镜对于光束的整形

(未完待续)