

## 光存储

# 光数据存储

光盘已使信息存储方式发生革命。CD 唱片几乎已使乙烯树脂唱片消失, CD-ROM 现在正在代替百科全书和参考手册之类的较传统信息存储形式。CD 已成了数字信息分配的最廉价和最方便方式之一。

CD 也是数字信息时代计算机、通信系统和消费电子设备结合的最受欢迎的范例。最新式的 CD 已允许人们用个人计算机或家用 CD 记录设备来录制和编辑声音片断, 然后再用普通 CD 唱机收听编辑录制的音乐。为了预录的电影分配, 现正在推出一种数字视盘 DVD, 在研究实验室将很快出现录制数字视频信号的光盘系统。

这些较先进的系统将需用比现在达到的更高存储密度。现在单面 CD 存储 650 MByte 信息, 相当于每平方微米 1 bit。80 年代初, 该信息密度约为普通硬磁盘所达到的 100 多倍——那时, 存储容量仅为 1.4 MByte 的软盘已能存储个人计算机的整套操作系统。然而, 从那以后, 日益增长的存储容量和数量处理量已导致软件的爆炸, 其中许多现代计算机游戏很易存储于一张 CD 上。

可录和可重写 CD 只在几年前才出现, 已获得巨大商业成功。虽然只读 CD-ROM 市场仍在发展, 但预计可录或可重写光存储仍可占 40% 的光盘驱动器市场, 到 2000 年, 此项产值预计可达 100 亿美元。

但是, 光存储的长期追求目标是用光盘系统代替传统的盒式录像机。推出只读视频光盘的初步尝试只获得有限成功。早期尝试的称为 Laser Vision 的模拟视盘由于其图像

质量欠佳和消费者不需要不能录制的系统而彻底失败。CD-Video 因其在标准尺寸盘上只能存储 6 分钟模拟信号和 20 分钟数字音频信号而受挫。Video-CD 在中国取得巨大成功, 这种用数字压缩技术的 CD 可存储 74 分钟的数字音频和数字视频。

最新尝试的 DVD-Video 是另一种只读系统, 现在正在欧洲市场推出。高达 4.7 Gbyte 的存储容量和数字压缩技术的采用可使 DVD-Video 提供优质预录的视频信号、8 声道音频信号和 32 道字幕说明。

但是, 目前视频录制设备的“优秀接班人”将是同时具有 4 小时优质图像和优质声音的可重写光盘系统。这种优秀设备也能对光盘系统快速随机存取, 消除了盒式磁带系统固有的冗长重绕和复杂搜索。以光盘为基础的视频录制设备还可对数字视频片断进行录制和编辑, 使个人计算机成为真正多媒体平台。和联机服务及借助于电缆或卫星进行数字视频分配相结合, 预计将出现许多新应用。

这种应用要求光盘有 10 GByte 左右的容量, 写到光盘的数据速率和存取速率至少为 5~10 Mbit/s。现正在竞相开发这种高容量的数字视频录制设备。

## 1 可复制性和可卸换性

任何新式光数据存储都必须有工艺上的许多固有好处。例如, 由于 CD 提供了廉价、可靠分配信息的方法、可容易地更换、可使数据可靠地保存 30 余年、信息可迅速存取和检索, 它已变得很普及。CD 的成功还由于不同制造厂

家制作的光盘和唱机都完全兼容。世界性标准化是有关公司的策略,因此,也是开发任何光学存储器新工艺的关键性步骤。

CD 上的数字信息是以变长度凹坑图样编码的(图 1)。这种图样可进行低成本大批量复制,其工艺过程称为注入模压,也就是用含有所需图样的印模来压制厚 1.2 mm 塑料盘片的表面层。然后,再在此“信息层”上镀金属反射层并用保护漆复盖。

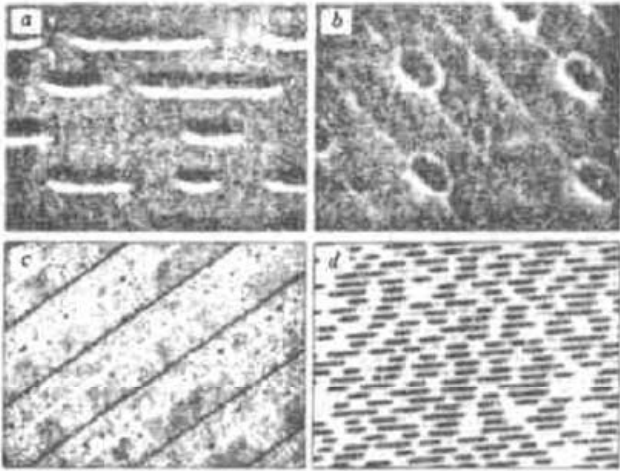


图 1 光盘存储信息图。光盘上的信息存储有多种方式。其中 (a) 普通 CD 上信息是一系列复制产生的压制凹坑; (b) “一次写入”光盘用激光烧孔方法产生数字化图样; (c) 可重写光盘用激光在多晶材料层上写入非晶区; (d) 迷你盘用磁光记录方法写入信息

在读出数据时,激光束透过光盘衬底被聚焦到光盘的信息记录层上,光电二极管探测器接收穿过透镜的反射光(图 2)。凹坑区域反射的光弱于凹坑之间的反射。

由物镜产生的聚焦光点由于衍射的影响,其直径并非无限小,约为  $\lambda/2NA$  值,这里  $\lambda$  是光波长,  $NA$  是透镜的数值孔径, CD 唱机使用 780 nm 波长的红外激光,物镜数值孔径为  $NA = n\sin\theta_{\max}$ , 这里  $n$  是透镜介质的折射率(空气的  $n = 1$ ),  $\theta_{\max}$  为由会聚光束形成的外锥角。由于斯奈尔(Snell)折射定律——即  $n\sin\theta$  是个常数,数值孔径在从空气过渡到塑料衬底时并不改变。CD 唱机中的  $NA$

一般为 0.40~ 0.52, 所给出的光点直径约为  $1\ \mu\text{m}$ 。

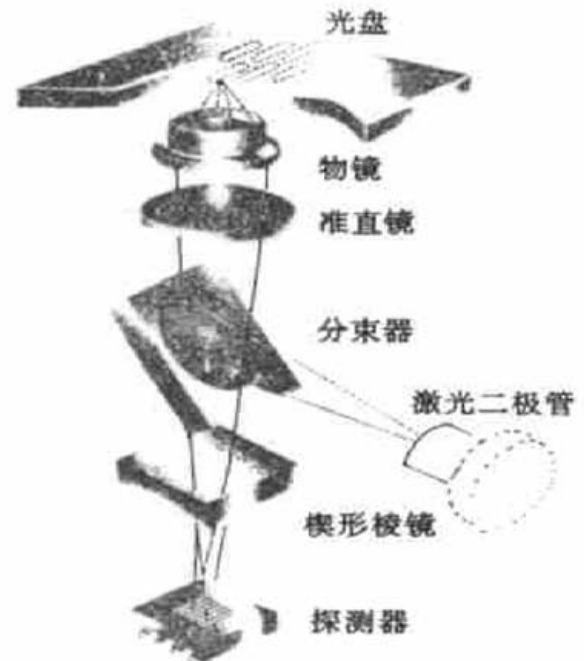


图 2 CD 唱机的光记录系统。半导体激光通过分束器由准直镜变成平行光。物镜把此光束聚焦到光盘的后表面。物镜安装在执行机构上,可以调整光盘和物镜的间距(以控制聚焦效果)和使光径向位置聚焦。从光盘反射的光通过楔形棱镜后由光电二极管探测器收集,探测器检测聚焦位置的任何误差,也检测相应于光盘上数据的高频信号

由于读取信息时要透过衬底,光盘表面的尘埃粒子和细小划痕对信号读出无影响(图 3)。进入光盘衬底时的光束直径一般约为 0.7 mm,这个直径确保光盘上的任何污点或缺陷都在离焦的位置。

由于光盘衬底是光路的组成部分,衬底厚度、角度取向和光学均匀性、双折射和表面平度的控制都是重要的。另外,激光束在穿过衬底时可能很易产生畸变,也就是球差会在光聚焦点周围形成同心环,使得信息凹坑阅读困难,虽然非球面物镜可补偿球差,但在盘片厚度变化时严格保持聚焦仍很关键。在读出期间,光盘的任何倾斜都会产生不易补偿的其它像差。

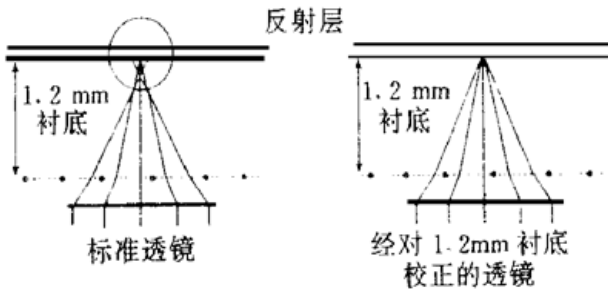


图 3 CD 唱机的透镜系统使激光束聚焦到信息层,并对 1.2 mm 厚聚碳酸酯衬底引入的像差校正。光盘衬底表面的尘埃粒子和划痕(如虚线上的黑暗所示)都在焦点之外,对信号几乎无影响

商品化光盘往往稍有挠曲,中心孔也不完全居中。为保持激光束的聚焦和定中心于凹坑轨迹上,物镜装在能调整垂直和径向位置的电子机械执行机构上。控制这种定位所需的电子信号由光学误差信号派生而来。

从盘的制作到光盘播放的整个过程可认为是种数据传输。为使光记录“通道”的传输功能最佳化,广泛采用信息论概念。首先为了在读出期间检测出差错数据位并作校正,数据上添加了附加数据位。由于光学通道的传输特性主要取决于用聚焦激光束读出数据时的物理过程,在光盘上建立数据图样时也必须特别小心。

由于光点尺寸并非无限小,光盘上的标记非得有某一最小长度才能探测。将二进制数据录制到光盘上时,数据要加上一种所谓的通道调制码,从而在光盘上形成编码式标记图样,以最佳地适应光通道特性。在读出数据时,这种调制码先于检错和纠错而解出(解码)。为确保数据位探测器有合适工作时间,以补偿通道的非理想频率响应并确定数据的位置,还需有额外的步骤。

为了改进普通 CD,以便能一次或多次记录信息,已考虑过很多不同方案。早期的磁光方案之所以失败是由于它与普通 CD 不兼容。一次写入多次回读的光盘早在 1984 年就

已推出。它是作为计算机中硬盘的替代品而出现的,其成功程度又一次受到限制。

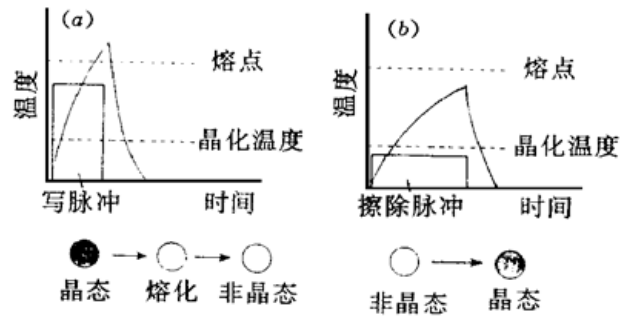


图 4 可重写 CD 用激光产生与普通 CD 中凹坑相似的非晶材料区。(a) 用高功率激光脉冲(方框)对记录材料加热至熔化而写入数据,温度分布用锯齿线表示。然后降低激光功率,使材料迅速冷却到低于结晶温度,防止晶相的形成。(b) 擦除过程是把非晶区加热到高于结晶温度,并保持相当长时间以重新获得结晶态

与普通 CD 相同、能存储 650 MByte 的新型可录 CD 于 1989 年标准化。这种可录 CD 由于与只读 CD 兼容而取得巨大成功。这种 CD 用激光记录数据,激光在镀有精心选择的有机染料膜的光盘衬底上建立凹坑。数据只能记录一次,但可多次阅读,这种光盘对制作 CD 拷贝、照片档案存储、数据后备和文件分配很理想。

1996 年,已可购到可重写 CD,这种光盘能多次记录数据,现在认为它可能成为软盘的“接替物”。记录技术是用激光脉冲改变材料表面的结构相态而不是以光盘表面的凹坑来存储信息。记录标志是一系列交叠的非晶点,这些点反射的光少于其周围晶态材料的反射。这种非晶区的形成过程是,首先用激光使材料熔化,然后迅速使熔化材料冷却到低于结晶温度(图 4)。而数据擦除可通过把材料加热到高于结晶温度而低于熔化温度,直至材料重新形成多晶态。这种记录称为相变记录。

可重写 CD 也可在现代 CD-ROM 或 CD

播放机上回放,尽管它的数据以非常不同的格式存储。

## 2 视频信号迈向数字化

光数据存储的最新进展是最近只读数字视盘 DVD 的推出。这种新一代 DVD 可存储 4.7 GByte 数据,为普通 CD 的 7 倍。容量增大是由于几个关键发展的结果。基础性的改进是使读出数据的光点变得更小,其方法是用较短波长激光(650 nm 而不是 780 nm)和具有更大数值孔径( $NA = 0.6$ )的透镜。这样就有可能减小凹坑的间距和最小凹坑长度,但为了使系统变成现实,其它方面的推进也是必要的。

DVD 的更高存储密度意味着这种光盘对缺陷更灵敏。光盘和驱动器的制造公差必须很严格。数据格式和通道调制码也必须改变并要用更有效的纠错方案。为使光盘倾斜度和聚焦误差之类的工作参量保持在可接受水平上,光盘衬底厚度必须为 0.5~0.6 mm。但为了保持机械稳定性和有与普通 CD 相同的外观,DVD 用两片背向粘合的 0.6 mm 厚衬底做成。

DVD 和 CD 的共存,要求发展能适应这两类光盘的播放机。然而,由于物理参数的差异,这并不是一项简单的任务。比如,光学系统必须要能穿过可能是 1.2 mm 或 0.6 mm 厚度的衬底而对信息层读出,而物镜不可能同时对不同球差量校正。一种解决办法是建立带有一个红光激光器和两个不同物镜(可切换到同一激光束)的光路。另一种办法是仍然用一个物镜,但采用供 CD 读出的红外激光器和供 DVD 读出的红光激光器。在此情况下,物镜前方要安置双色光阑,使其数值孔径自动适应所用的激光。

但总容量为 4.7 GByte 的可重写 DVD 存在重大技术难题。作为迈向这个目标的基石,产业界的两个联合体已发展很适合实时随机存取的较低容量系统。DVD 讲坛中的一

个工作组——由 16 个公司(包括荷兰飞利浦)操纵的一个工业组已提出 2.6 GByte 的 DVD-RAM 建议,而由美国惠普公司、日本索尼公司和飞利浦组成的一个联合体已提供 3.0 GByte 的 DVD+ RW 给欧洲计算机制造商协会(ECMA)进行标准化,ECMA 是一个积极从事计算机技术标准化的团体。

为弄清上述两种系统间的差别,有一点很重要,那就是要知道可重写 DVD 光盘的衬底有压制槽,目的是为空白盘片提供跟踪。随机存取 DVD(即 DVD-RAM)方式把数据记录在槽纹内和槽纹之间的“台面”上。通过对槽纹形状和几何结构的最佳化,可以抑制槽纹和相邻台面之间的干扰。与此相反,可重写 DVD(即 DVD+ RW)只在槽纹内记录数据,与可重写 CD 相似。

存储容量之所以不同,是由于每种方式在盘上提供地址信息的不同所致。DVD-RAM 用了标头方式,也就是数据被含有物理地址信息的压制数据凹坑区隔断。相反,DVD+ RW 盘把地址信息编码于迭加在槽纹凹坑图样的“摆动”中。虽然跟踪机构速度很慢,无法跟随这样的高频摆动,但这种摆动很易为轨迹跟踪电子线路所探测。DVD+ RW 中所用的寻址方法由于不存在标头间隙而显得更为有效。

目前的开发研究是以发展全容量(即 4.7 Gbyte)的可重写或可录 DVD 为重点。作者认为,在不改变现有方式下便可获得这种容量,但改善记录材料、改变信息层上下部叠层材料的设计以及数据写入策略的最佳化都很重要。

## 3 数字视频信号的记录

可靠可重写 DVD 系统的发展是个不大不小的成就。但我们必须超越这个目标和研究数字录像机。用目前水平的计算机芯片进行实时视频信号压缩的片子将至少要求有 9 GByte 的存储容量和 5 Mbit/s 的数据传输



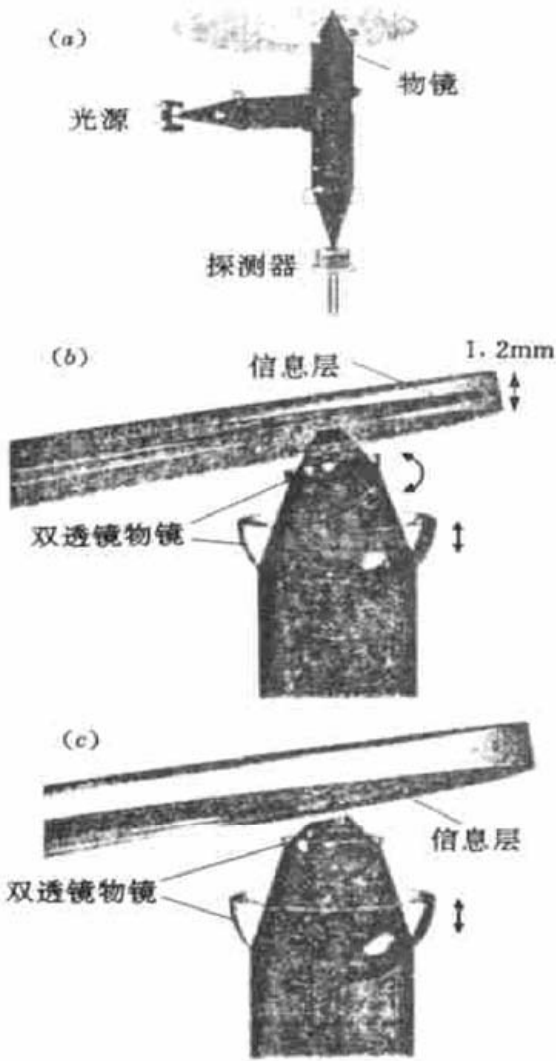


图 5 高密度光记录系统。(a) 在这种高密度记录系统中, 激光束通过准直透镜、偏振分束器和  $\lambda/4$  波板(图中未示出)。数值孔径接近 1 的双透镜物镜把激光束聚焦到光盘上。反射光通过  $\lambda/4$  波板和偏振分束器返回, 然后聚焦到光电二极管上。(b) 当信息层是安置在两块 0.6 mm 厚的粘合衬底之间时, 要用具有有效倾斜控制的双透镜物镜来防止由于光盘倾斜产生的像差。(c) 当信息层是通过 0.1 mm 厚的透明复盖层而写入或读出时, 不需要作倾斜校正, 但为了控制双透镜的分离度, 以补偿复盖层厚度的变化, 可能仍要使用执行机构

率才能提供播放时间为 4 小时以上的优质视频图像。另一种情况是必须设计一种能提供 2 小时甚优质视频图像和以 10 Mbit/s 速率录制的系统。

为达到 9 GByte 的容量(该容量约为目前 DVD 数据密度的 2 倍), 可有两种基本选择。第一是用蓝光激光器替代 DVD 中的红光激光器。波长 410 nm 的蓝光激光器是 1995 年首先由日本日亚化学工业公司的 S. Nakamura 演示的。日亚宣布, 1998 年底将向市场推出具有足够功率、足够光束质量和寿命的蓝光器件。然而, 大量生产基于蓝光激光器的光记录系统可能仍需几年时间。

另一种选择是把物镜的数值孔径增大到 0.85, 相比之下, DVD 物镜的  $NA$  为 0.6。这么大的数值孔径将对光盘倾斜度和盘片厚度变化提出严格的要求, 因为所要求的公差与  $NA$  的较高次幂成反比并造成较短的焦深。对较短波长, 也存在同样情况, 但在此情况下, 所要求的公差与波长成线性关系。

在这么大数值孔径时, 透镜设计所遇到的第一个问题是在透镜和盘片之间必须要足够间距, 以防止碰撞。这要求使用双合透镜, 换言之用至少具有两个非球面的两块透镜的组合(图 5)。第二, 必须找到一种允许盘片有一定倾斜变化的系统。飞利浦研究实验室已研究一种用执行机构来保持第二透镜与盘片平行的系统。这种有效倾斜校正的优点是它达到了与只读 DVD 的兼容, 因为它允许透过 0.6 mm 衬底进行录制和读出。然而它要用复杂的执行机构, 这种机构依赖很多不相关的误差信号对其电子电路进行控制。

第三种选择是用自适应光学法抵消波前感生的像差。最近日本先锋公司演示的一个有趣构思是用分段液晶池来实现这种构想。

但最近, 索尼公司提出一种简单而更优良的方法: 即通过 1.1 mm 塑料衬底上部 0.1 mm 复盖层来对信息层存取(图 5), 该复盖层用旋涂法或把一张薄塑料片粘合到光盘而制作。这种方法允许盘片有较大倾斜, 而复盖层的厚度变化可做得相当小, 从而使球差降至最低限度。唯一问题是由于复盖层表面的光点尺寸很小, 因而盘片对尘埃和指纹较

敏感,但这个问题可通过把光盘放在盘盒内而克服。

综合考虑所有因素,对数字录像机而言,使用  $NA = 0.85$  的透镜再配透过薄复盖层的读出是种较引人选择。用红光激光应能实现 9 GByte 的存储容量,而用蓝光激光器,也许可达到 18 GByte。这种容量将可满足家庭将来对甚高比特速率数字视频存储的要求,同时可与高清晰度数字广播电视的标准兼容。在一个盘片上存储、编辑和检索几部电影所需的长记录时间也将成为可能。

## 有关近场记录的问题

美国刚起步的几个公司正在开发使光记录与硬(磁)盘产业结合的盘式存储系统。例

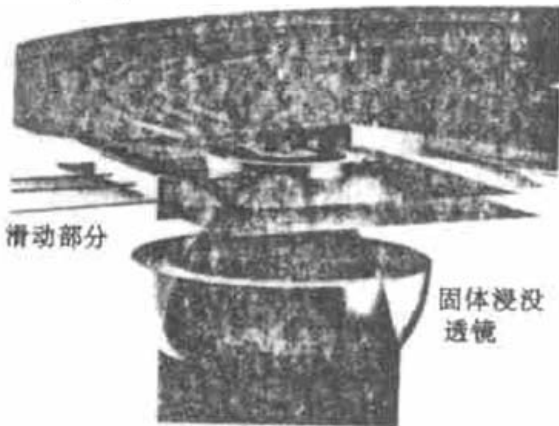


图 6 固体浸没透镜的原理。用固体浸没透镜(SIL)可在数值孔径大于 1 的条件下进行光记录。这种透镜实际上是个半球面透镜。它使光束刚好在高折射率透镜材料内聚焦成一个甚小光点。用空气轴承使透镜和光盘之间的空气隙保持恒定值。这个空气隙相对光波长而言是小的,允许光子通过该间隙“隧穿”。滑动部分还可架设一个磁场调制用的微型磁线圈,就像普通磁光记录那样进行写入

如,加州 TeraStor 公司正在发展一种物镜数值孔径大于 1 的光盘驱动器。采用这种称为固体浸没透镜(SIL)的物镜技术是由美国加州大学 G. Kino 等人开创的。

这里的关键概念是:如果光在透镜玻璃内聚焦,由于玻璃的折射率大于 1,所以物镜的数值孔径也可大于 1。最简单的固体浸没透镜是半球面透镜,它会使会聚光束在透镜平出射表面附近处聚焦成一个甚小光点(图 6)。遗憾的是,所有  $n\sin\theta > 1$  的光线由于在透镜平底面处的全内反射而变得无用,因此难以对光盘信息层寻址。

这个问题可通过采用一种称为受抑全内反射的现象而解决。诀窍是使透镜和光盘的分离远小于所用的光波长(间隙的典型值约 50 nm)。在此情况下,通常在玻璃-空气界面处经受全内反射的光子可“隧穿”过两种高折射率材料的间隙,其情况很像电子可穿过甚薄的绝缘层。这种光子隧穿通常称为消逝波或近场耦合,耦合效率可达 50%。

在此方案中,很重要一点是要精确控制透镜和光盘表面的间隙大小,这可以通过使用通常用于磁存储的使读/写头很贴近硬(磁)盘表面的空气轴承滑动机构来实现。此外,把第二个透镜贴附到滑动机构上,可以消除对主动聚焦控制的需要(图 6)。

这个思想也可推广到磁光记录,只要把微型磁线圈安装到滑动机构上。线圈可与脉冲激光束组合使用,在光盘上产生甚小磁畴,是一种称为磁场调制的技术。这种技术对超高密度存储是吸引人的,因为它所写入比特间距可小于光点直径。许多人认为,在极高比特存储密度下,磁光记录的性能可以超过相变记录,主要是因为后者记录中多晶相的有限颗粒尺寸产生噪声。

人们预计,以固体浸没透镜为基础的数据存储系统开始时将瞄准专业化市场,如用作 PC 机的外围存储,其原因是它很难与其它 CD 家族成员兼容。另外,普通硬盘在其进一步发展的进程中可能会遇到不可逾越的障碍:即顺磁限制。在存储密度达到约 5 Gbit/cm<sup>2</sup> 时,预计会出现这种限制<sup>[2]</sup>,也就是到达这个限制点时,普通记录介质中的磁畴会变

得如此之小,以致变得不稳定。但也存在一些挽救的希望,那就是用近场光学系统,磁场调制和先进磁光介质的组合,过去 20 年,已实现存储容量的迅速增长,今后还将继续增大。

从 1982 年推出 CD 以来,光盘已对我们

的生活和工作方式产生重大影响。随着基础工艺的发展和数字视频信号记录之类新应用的兴起,光数据存储似乎同样会对我们今后生活产生深刻的影响。

(友 清供稿)

## 全息存储在空间应用上是否有生命力

由于空间任务进一步深入宇宙深处和进一步远离地球,促使工程师们发明了证明具有更多功能和更加可靠的数据存储系统。虽然全息数据存储至今尚未选为空间任务的应用,但它的大存储容量、快速记录和存取时间以及牢固的设计总有一天能使它用于空间应用。

全息存储的开发始终将眼睛盯在一般计算机市场上,希望能代替 CD-ROM 和数字视盘之类其它光盘。但如果这种技术的价格有朝一日能降到可竞争地步,它必然在合适市场(如需要巨大容量和甚快检索时间的档案存储应用方面)获得成功。

空间应用可能利用全息存储的功能。对美国航空航天局所提议的到冥王星的飞行,据加州喷射推进实验观测系统部经理 Tom Frascetti 说,该局打算加强存储器功能。由于从冥王星来的数据速率是如此缓慢,飞行任务将必须把一些数据储存在飞行器上而其它数据送发回地面。可以想像,这种需求会不断增长。

但空间业界并不会因技术先进就过渡到一种新技术上。新技术还必须证明它有价值,证明它比过去的设计有某些更显著优点和使用时不使户化更多费用。

全息存储有它的优越性。它的存储容量为其它存储技术的 100 倍,在 1 秒时间内能检索 10 亿比特的数据,但如果不能以可竞争的价格来实现这些指标,设计者如果不能使用户相信他们需要这类功能,这种技术就将

一事无成。

### 1 全息存储如何工作

全息存储实际已存在几十年,60 年代首次提出了建议。由于光子技术的几个重要进展,尤其在过去的 10 年中,使全息存储系统变得更加现实。空间光调制、探测器列阵和材料的改善帮助了全息存储器的进展。其它元件,如激光二极管将允许设计人员把系统做成适宜小尺寸。

全息存储采用体全息术,将信息存储在整个材料体积内。其它系统如 CD-ROM 和磁光技术则是把信息存储在表面上。全息存储中,每一比特数据都以存储介质上干涉图样形式存储。首先,图像或比特列阵形式的数据安放在空间光调制器——一般是液晶显示器件上,数据表示成由断续像元组成的纵横填字谜般的图样。当一束激光通过空间光调制器时,这种光束便带有数据的特征,这种光和参考光束干涉,在存储介质上产生干涉图样,从而把数据存储起来。以后,所存数据可用产生全息图时的相同角度的参考光束照射存储介质而检出。

### 2 一次存储的页数

使记录和检索时间很快(约 1 Gbit/s 的速度)的原因是由于信息以一次一页方式存储。系统在一次发射中能存储的页数越多,则存取时间越快和存储容量越大。因此研制者正在使用角分复用法,在每页写入时,参考光