



## 光存储的三大前景

以不大于  $1\ \mu\text{m}$  直径的特征形状存储模拟和数字信息的可能性深深吸引着研究人员和技术工作者。用光来存储和检索这种由微小特征形状构成的信息已有一段时间,确定了一个光数据存储领域。该主题的第一次技术会议约在 25 年前召开,那时 CD 刚问世,许多公众对光数据存储的潜力并不熟悉。如今,CD 音响和 CD 计算机外设已经普及。但 CD 技术不是光数据存储的唯一形式,也不是盘式系统性能的极限。

以下介绍三类光数据存储技术:全息存储、CD 系统和近场技术的现状、潜力和前景。每类技术都因自身特殊优、缺点而不相同。这些技术的成败将基本决定消费者把它们作为娱乐产品或计算机产品用途的命运。

许多问题已超出本文的范围,无法回答。如存储高分辨率电视(HDTV)的解决途径是什么?是否用光带?近场技术还需多久?光学技术会与较传统的磁存储技术结合吗?人们会用汞灯之类非相干短波来进一步改善分辨率吗?

如光刻中所看到的,存储技术的预期“障碍”会随着对解决众所周知问题的新途径而瓦解。光数据存储技术的潜力尚未充分实现,这种技术仍是一个激奋人心的研究开发领域。

### 全息存储

60 年代后期和 70 年代初开始研究的全息存储器,在 90 年代再次卷土重来。学术界和工业界的研究(主要是美国)已导致许多令

人难忘的实验演示,证明全息存储器具有作为竞争性商品化产品所必需的存储密度、读出速度和保真度<sup>[1]</sup>。未解决的一个难题是合适记录材料;用于实验演示的材料(掺铁铌酸锂和聚合物薄膜)都不适合目前形式的产品。幸好全息存储系统的演示已激起对正在进行的材料和过程的兴趣。今后几年将有良机来生产与规划可与其它存储技术(光学 CD、磁存储和半导体存储器)相竞争的全息存储器。人们能否抓住这个良机推出全息存储器产品主要取决于能否及时开发出可用的记录材料。

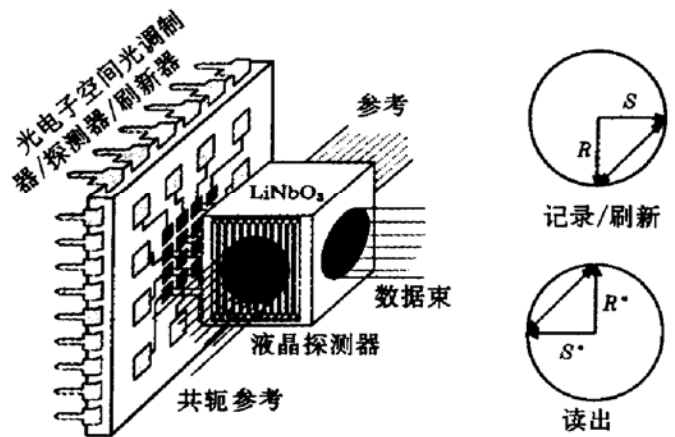


图 1 全息存储器,用相位共轭进行读出

可重写全息存储器一般都用光折变晶体演示。这种存储器由于是三维记录,具有很高存储密度,由于整页并行检索而有快速读出速率,并且比磁带有更快随机存取。同一位置可迭加 1000 多个全息图,每个全息图有 1 Mb 数据。因此在约相当于  $1\ \text{cm}^2$  体积的晶体中可存储 1 Gb 左右的信息。最近演示中,用相位共轭读出构造了一个无透镜系统,系统

的总体积约为晶体体积的4倍(图1)。已演示的最大读出速率为每秒1000个全息图,相当于每个全息图存储1Mb情况下的1Gb/s读出速率。最快读出的演示很重要,因为可重写全息存储产品可能只在比磁盘有更高速度以及比动态随机存取存储器(DRAM)更廉价的场合下找到应用。目前缺少合适记录材料是妨碍我们开发全息存储产品的主要障碍。光折变的最严重缺点是挥发性:即全息图在读出时衰减。现正在研究对此问题的几种解决途径,但所报导的方法那种都没有成熟到可商业化应用的程度。

全息存储器打入市场的另一途径是作为CD和DVD的后继接替物。全息三维光盘(图2)可通过对透明衬盘上的全息记录介质分层的方法制作,单个全息图的存储密度大致相当于表面记录法所达到的密度。当多个全息图迭加在一个位置时,面密度即成正比提高,并可实现甚高存储密度( $>100 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ )的光盘。

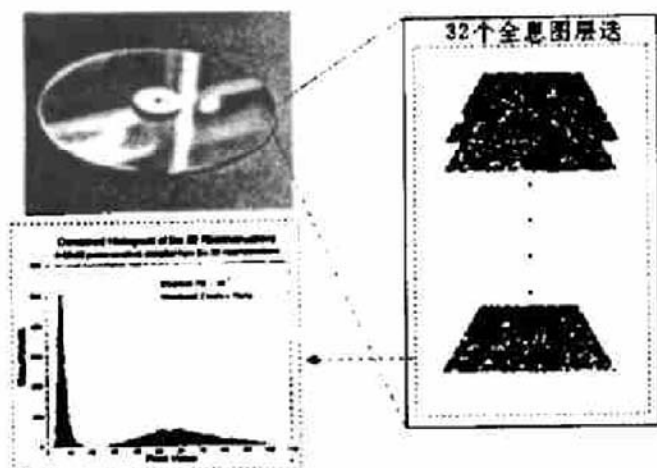


图2 全息存储器,通过在同一位置存储多页数据实现全息盘的甚高面密度

已经制成用光致聚合物材料的全息盘,与光折变材料不同,光致聚合物材料不可重写。因此,这种全息盘通常打算作为ROM盘使用。用杜邦公司的商业化聚合物材料已进行大量实验演示。这种材料有优良的衍射效率和良好灵敏度,但只是在较薄( $100 \mu\text{m}$ 以

内)时有效,因而全息盘的面密度仅限于  $10 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ ,即相当于DVD的有效面密度<sup>[2]</sup>。为使全息光盘具有竞争性,它的面密度应达到  $100 \text{ bit}/\mu\text{m}^2$ ,薄膜厚度也需增加到1mm。这种密度已被1mm厚的掺铁铌酸锂盘实验所证实。该厚度的聚合物薄膜至今尚未有报导,但最近已检验了几种有希望的材料。

记录材料的可得性将决定今后几年全息存储产品是否和何时推出。开发新光折变材料需化很长时间,近期不能产生作用。对LiNbO<sub>3</sub>之类现有材料进行改进仍是光折变存储的最好赌注,而光致聚合物是解决近期一次写入或只读存储(ROM)系统的有希望方法。

## CD 光盘

CD已有1亿台CD-ROM阅读机和5亿台以上的CD唱机,显然,它是最成功的一类光存储系统,事实上,它也是从来未有的最成功消费电子产品之一。现在,约90%的个人计算机都配置了CD-ROM阅读器。如此大的安装基数再加上盘片的低成本(只录制的一次CD为0.005美元/MB,大批量复制的CD更便宜)使CD成了分配和共享数字资料的理想方式。

CD家族的第一个成员——CD数字唱机(CD-DA)是1982年秋由索尼和飞利浦公司作为以数字方式廉价地分配高保真音频信息而推出的。麻省理工学院媒体实验室负责人N.Negroponte说,“比特终究是比特”。数字音频方式很快推广到包括数字数据(1984年,CD-ROM)、电视(CD-V)、交互式游戏和多媒体(1987年,CD-I)以及静止图像(1990年,Photo-CD)在内的应用。

### 如何写入

开始时,CD家族只有ROM盘。信息首先用激光录制到优质盘形衬底的光致抗蚀剂上,这个过程称为主录。然后,对抗蚀剂显影和镀上金属层,被镀制的衬底称为印模,在抗

蚀剂激光曝光过的地方有突起。

该印模作为模具的一个面使用,模压时注入熔融的聚碳酸酯塑料。塑料固化时形成直径120 mm,厚1.2 mm的衬盘,现在的这个衬盘是在光致抗蚀剂曝光处为凹陷。这些凹陷(或称“凹坑”)构成节距为 $1.6\ \mu\text{m}$ 的连续螺旋。凹坑宽度约为 $0.5\ \mu\text{m}$ ,凹坑长度在 $0.833\sim 3.054\ \mu\text{m}$ 范围分9挡变化。有凹坑一面的衬底镀铝或铝合金,反射层上再涂保护层(一般为紫外固化的丙烯酸盐)。

### 如何读出

读出期间,激光通过衬底聚焦到反射层上。形成一个光强半高全宽值近似为 $2.35\times 0.25\lambda/NA$ 的光斑,此处 $\lambda$ 为激光波长, $NA$ 为聚焦透镜的数值孔径。在CD中, $\lambda=780\ \text{nm}$ 和 $NA=0.45$ ,因此半高全宽值近似为 $1\ \mu\text{m}$ 。

由于光盘是用透明塑料和铝合金反射层构成,凹坑和其周围区域(即“台面”)的反射率相同;干涉效应(不是由反射率变化形成)是凹坑检测的基础。由于凹坑窄于聚焦光斑的直径,当凹坑在光斑下面转过时,凹坑和周围的“台面”被照明。由于凹坑深度近似为 $\lambda/4$ ,由凹坑底部反射的光相对于从“台面”反射的光相移了 $\lambda/2$ 。因此,这两个区域反射的光便发生相消干涉,使凹坑显得较暗。

数字信息实际是储存在凹坑边缘位置上。还要产生一种时钟信号,该信号的半周期是时钟的时间窗口 $T$ ,这个时间相应于盘片上 $0.278\ \text{mm}$ (即最小凹坑长度的 $1/3$ )的距离。在窗口期间的任何时刻反射光从亮变暗或从暗变亮的过渡对应于“1”,非过渡位置相应于“0”。凹坑长度变化范围为 $3\sim 11T$ 。

在CD上,每一24 B用户数据都添加4个“奇偶字节”。这种由28字节构成的数据块和另外109个数据块交织,对这种移动了的24字节也要添加4个奇偶字节。这样就形成穿插交织的里德-索罗门码,这种码可以纠正随机信号字节错误和突发错误(如划痕产生

的错误),后者可以长达 $2.5\ \text{mm}$ 。用这种方案,一个CD盘上可以可靠地存储约650 MB数据或74 min的声音。

### 单CD(CD-R)

对许多应用来说,只需用一个或少数几个CD拷贝就行。这种情况的早期一例是柯达公司开发的Photo-CD。在Photo-CD上,一个照片转换成分辨率为 $3072\times 2048$ 像元,每一像元为8比特,具有红、蓝、绿颜色成份的数字化形式,一个图像总数据为18 MB。其它的例子还有商业化飞机维修手册的分配、硬盘信息的档案存储和新音乐品牌的促销拷贝等。

由于只需几个光盘拷贝,CD唱片和CD-ROM的大量生产技术就不适用。此时开发了一种最后用户可以在盘上直接录制信息的方法。结果,所录制的盘片在机械和光学特性上与大量复制生产的CD盘非常相似,以致所录盘片可在任何CD唱机或CD-ROM机上播放。这种可录CD(CD-R)技术首先由Taiyo Yuden公司开发。虽然对它接受程度缓慢,但最近二年内,CD-R写入装置的价格快速下跌,已使这种装置的年增长率达 $200\sim 300\%$ 。1997年该产业销售的CD-R盘片约为2亿张。

未录制的CD-R盘片在螺旋形CD数据轨迹位置有连续螺旋形槽纹。这种槽纹决定了数据记录于槽纹的特性。记录层为有机染料,它夹在衬底和反射器层之间。记录层一般是花菁染料和稳定剂的混合物或酞花菁染料。在希望光稳定和长寿命场合,如Photo-CD应用上,优先选用酞花菁染料。为在780 nm工作波长有足够反射率和确保光盘长寿命,用金来代替铝作反射层。

记录时,把激光聚焦到记录层上,并使信息对激光调制。光被染料吸收,使染料达到几百摄氏度的温度。对花菁染料记录层,该温度使染料漂白,从而大大降低实部和虚部折射率。对酞花菁染料记录层,记录层的化学反应

产生气泡。不论哪种情况,曝光区的光学性质都发生某种方式的变化,使反射光量减少,其减少量与模压 CD 凹坑引起的变化差不多。

### CD-RW

为使 CD 更象一个 650 MB 的软盘,开发了可重写 CD(CD-RW)。在此系统中,染料记录层改用无机材料层,无机材料层可在晶态和非晶态之间转换,并通过脉冲激光加热又可变回来。由于晶态比非晶态有更高反射,这种反射率差异就构成数据存储和数据检索的基础。为控制热时间常数和防止材料熔化瞬间(晶态到非晶态的转变时)材料的流动,相变层夹在其它无机材料层之间。这种额外夹层以及它们所需求的镀制精度使 CD-RW 盘价格比 CD-R 盘更昂贵。

尽管 CD-RW 盘的重写次数仅限于约 1000 次,但它适合许多应用,如大量数据的瞬间存储、硬盘后备或需对音频或图像文件进行编辑的场合。遗憾的是,由于 CD-RW 盘的反射率较低,它们不可能被目前在用户手中的大量 CD-ROM 机和 CD 唱机阅读。它们只能用 CD-RW 写入机和满足“多阅读规范”(由美国光存储技术协会发布)的新 CD 机来阅读。

### 数字多用盘

数字多用盘(DVD)是市场上最新的光盘系统。原来设想是作为分配和放映电影故事片的一种新方法。此系统的要求主要由电影制片厂代表组成的 DVD 顾问团制定。他们推荐此系统能在单面盘片上存储 135 min 时间的电影,视频质量超过激光视盘(LD)、5.1 声道(前右、前左、后右、后左和次低音)、音频达到 CD 音质、3~5 条语言声迹、至少有一个字幕说明通道、多种图像纵横比、可以拷贝方式制作、价格与 CD 盘差不多等。

许多人承认,通过对各种应用权衡设计而获得的 CD 格式是成功的。计算机系统公司的代表组成了一个特别技术工作组。研究了 DVD 顾问团制订的规范,他们建议 DVD

也应有一种能适合计算机和电视等有关应用和能够阅读现有 CD 盘片的格式,DVD 应当有与将来读-写盘和一次写入盘兼容的只读盘系统,对所有内容和盘片种类使用单一文件系统,对顺序存取和随机存取具有高性能。

为满足电影界和计算机业界的要求,DVD 的三家成员已推出: DVD-Video、DVD-ROM 和 DVD-RAM(随机存取存储器)。DVD-Video 可在电视机上播放电影; DVD-ROM 是种计算机外部设备,基本上是一种能播放电影和具有更高容量的 CD-ROM; DVD-RAM 是用作计算机外用设备可重写光盘。在推向市场的第一代产品中还能充分实现完全兼容的目标,所谓完全兼容,定义为在 ROM 和 RAM 格式之间某种格式硬件阅读另一种格式盘片的能力。然而,第二代 DVD 硬件已宣布要解决此问题。产业界向第二代 DVD 快速转移的一个标志是在第一代产品完全进入销售渠道前宣布第二代。

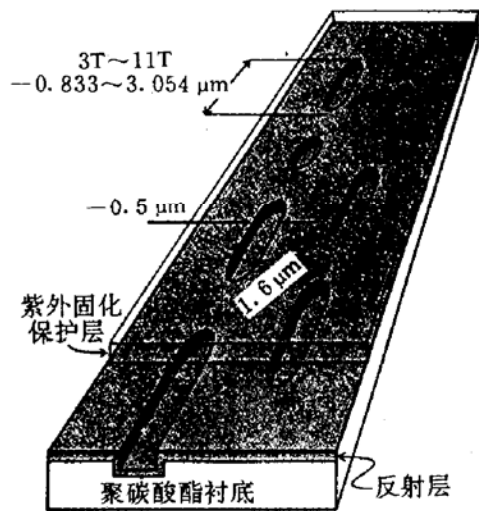


图3 大量复制的 CD 盘用聚碳酸酯衬底做成,其上模压有微米尺寸的凹坑。然后镀上铝合金反射层和紫外固化保护层。对于 DVD,特征尺寸约比图中数据小一半,衬底也减薄一半,然后将两个衬底如图 4 所示方式层压在一起

DVD 是一种直径 120 mm、厚 0.6 mm。用聚碳酸酯衬底制作的盘片,数字信息以凹



坑形式模压在其中。压制面一侧镀铝或铝合金反射层。然后,第二个0.6 mm厚的衬底层压到第一个盘镀反射层的一侧。第二个衬底可以模压另外的信息,这样就成一个双面盘。这种盘看起来很像如图3所示的两个盘片层压在一起。

最小凹坑长度和光道之间的间距(分别为 $0.4\ \mu\text{m}$ 和 $0.74\ \mu\text{m}$ )比CD系统相应参数小一半。这是通过使用较短波长( $650\ \text{nm}$ )和较大数值孔径透镜( $NA=0.60$ )达到的。数据编码使用更有效方法。这样,可使DVD-Video和DVD-ROM盘每面存储4.7 GB信息。这种方法也适合每个衬底为双信息层的盘片,这时有效容量加倍。DVD-RAM盘的目前容量为2.6 GB,可重写性是以容量降低为代价的。

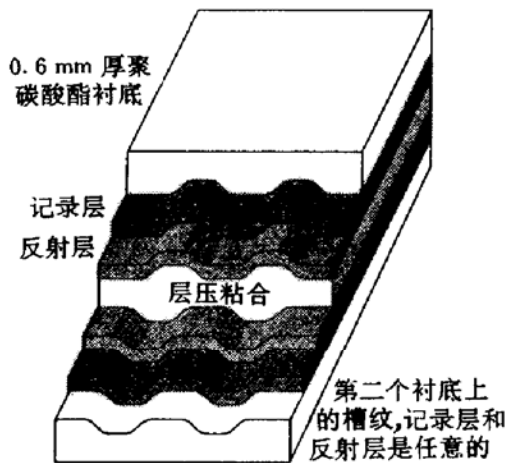


图4 DVD-R盘由刻槽的0.6 mm厚衬底、记录层和全反射层组成。作为一个完善组件,第二个衬底层压到第一个衬底上。第二个衬底也可以有记录层(可任意),此时形成一个双面盘。CD-R盘看上去像半个DVD-R盘的底盘,但它的槽纹节距和衬底厚度约大一倍。CD-R盘没有第二个衬底,反射层用紫外固化丙烯酸盐漆保护

对DVD-Video盘,图像信息的分辨率对NTSC制为 $720 \times 480$ ,对PAL制为 $720 \times 576$ ,并用MPEG-2压缩法编码。图像纵横比可为4:3或16:9。

DVD-Video和DVD-ROM的可录型即DVD-R很可能在1997年底前销售。遗憾的是,初始版本的DVD-R容量只有3.9 GB,但预计在不久的将来可提高到4.7 GB。图4为双面型DVD-R盘的示意。

## 近场光存储

CD类系统的一个缺点是由于存在保护性衬底,用来使激光聚焦到记录层的透镜必须与盘片保持一定距离。而没有衬底保护时,可使用基本上与记录层接触的透镜系统。这类系统称为近场系统,因为聚焦光点的电场部分是在透镜内、部分在记录层中。使用近场系统能产生尺寸更小的光点,因此可大大改善光盘的容量。

对近场光存储,正在发展一种新型近场光聚焦系统,即固体浸没透镜(SIL)。最简单的固体浸没透镜为如图5所示的一块半球玻璃或其它透明材料。物镜先作这样的聚焦,使

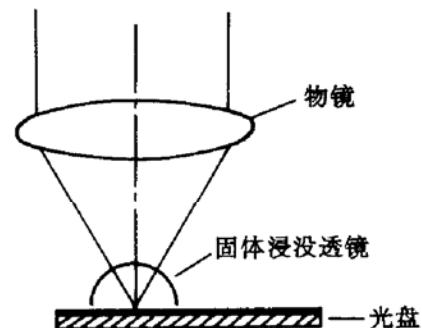


图5 半球形固体浸没透镜

光线无偏离地通过固体浸没透镜。由于固体浸没透镜内的有效波长缩短了相当于折射率值 $n$ 的倍数,因此光点尺寸相对于空气中的聚焦也减少了 $n$ 倍。对于一般玻璃,这意味着光点尺寸可减小2倍。而相应的面密度提高到CD盘片 $0.6\ \text{Gb}/\text{in}^2$ 的4倍。作为一个极端的例子,在使用折射率为3.4的GaP作透镜材料时,可使面密度改善到CD的11.5倍。通过减小波长和光点的某些重迭,还可使面密度进一步提高。

通过固体浸没透镜聚焦获得的微光点在透镜表面附近形成。大角度光线在透镜/空气界面处全内反射,因此,光场势必从透镜表面开始指数式下降。此时,只有在透镜表面和光盘非常靠近情况下才能获得良好的光盘图像。典型分离小于 150 nm。

在读-写头像硬(磁)盘那样使用的方式中,透镜可作为浮动空气轴承头的部件使用。在一次实验中,使用 830 nm 波长激光的系统能够对面密度为 2.5 Gb/in<sup>2</sup> 的旋转盘上的可擦式磁光存储层读/写。典型情况下,空气隙约为 150 nm。

TeraStor 公司计划于 1998 年中向市场推出一种以固体浸没透镜为基础的新型大容量存储装置(图 6)。第一个装置的存储容量为每面 20 GB,并使用淀积在塑料衬盘上的可擦式磁光层,最上面的是一层薄保护层。磁线圈位于盘片附近的透镜表面上,用它进行磁光材料的直接重写。公司正在开发固定盘和可卸盘存储装置,成本相当低,而速度相当高,足以与标准硬(磁)盘竞争。开始时,这种装置首先是针对 PC 机市场。

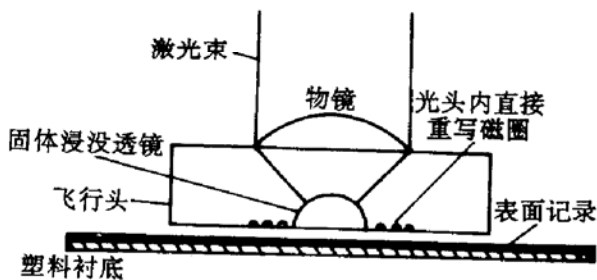


图 6 TeraStor 公司的近场系统

索尼公司采用了另一种途径。如图 7 所示,构想是产生比浮动头结构有更大透镜/盘片间距(允许存在灰尘)的光盘系统。公司使用了折射率与磁光材料上部 0.1 mm 厚塑料层相同(1.46)的固体浸没透镜(SIL)。透镜厚度约比半球小 0.1 mm。在此方式下光线通过透镜进入光盘材料。通过物镜的设计,使得边缘光线的  $NA$  小于固体浸没透镜内的

$NA$ ,透镜表面便不存在全内反。非球面透镜对球差和 75  $\mu\text{m}$  有限空气隙影响作了补偿。

为调整物镜和固体浸没透镜的垂直位置,用了两个控制系统。用这种方法可以补偿宽空气隙产生的球差。索尼打算把这个系统用于多记录层盘的读/写。他们用 690 nm 激光二极管得到 0.8 数值孔径和 3.5 Gb/in<sup>2</sup> 的面密度,数据速率为 8 Mb/s,快于 CD。

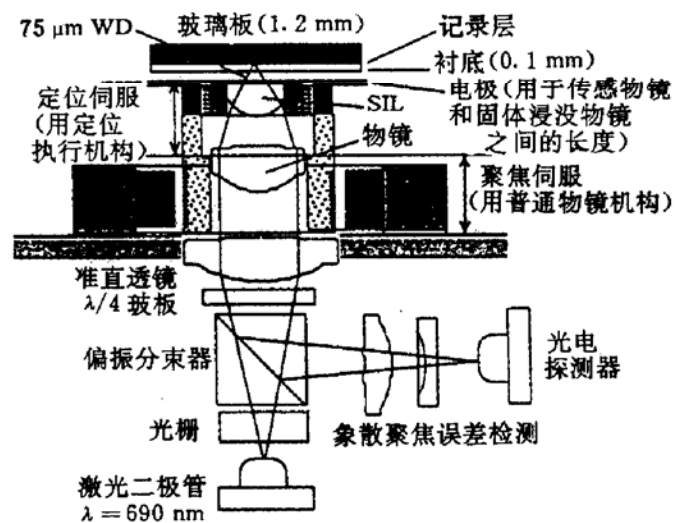


图 7 索尼公司光学装置简图

另一种近场技术是使用末端修饰到 50 nm 直径针孔的覆金属光纤。如果光盘位置距针孔相当近,通过光纤的光便在光盘上形成直径 50 nm 的光斑。针孔离光盘的间距采用(原子)力显微术控制。在透射成像情况下,可以 45 Gb/in<sup>2</sup> 密度向磁光盘写入或从该密度的磁光盘读出。相变材料也得到类似结果。

这种孔径技术虽能提供极高密度,但也存在缺点,这就是在针孔附近光波导处于截止模状态,因此光通过波导的衰减为 40~50 dB。换言之,每进入光纤 1 mW 光能,只有 0.1 nW 光功率从针孔射出,因此信噪比差,并且读/写速度极慢。

目前,TeraStor 公司的近场光成像系统看来是迄今最有希望的高密度读/写系统,它可与类似硬(磁)盘性能相竞争并可能超出。公司称,固体浸没透镜方法最终可在 5.25" 盘上存储 100 Gb 以上的数据。然而孔径方法

也可能有重大改善。显微机械加工的探头比早期探头将有更高效率,最终可提供极高的

存储密度。

(从 征供稿)

## 衬底对光盘数据存储系统的微妙影响

### 1 引言

在光数据存储领域,光盘衬底和它对系统性能的影响一直被广泛研究<sup>[1~12]</sup>。众所周知,衬底双折射使磁光数据存储系统产生诸多问题。为测量垂直双折射和横向(面内)双折射<sup>[1~9]</sup>,以及搞清衬底双折射如何影响这种系统的性能<sup>[10~12]</sup>,已作了很多研究。特别是,衬底双折射使磁光系统产生像散和偏振椭圆性,这两个因素均可使系统总性能降格。本文处理一种较微妙的衬底双折射效应,即光向激光腔的反馈。本研究的一个结果是发现了测量衬底双折射的新方法。本文同时也处理当激光束通过光盘衬底聚焦时对焦深的影响。

### 2 向激光器反馈

为提高功率效率和防止向激光腔的反馈,CD系统都采用类似图1(a)所示的激光隔离方案<sup>[4]</sup>,由于图1(a)的光束通过偏振分束器和 $\lambda/4$ 波片时产生发散,它变成像差,导致在光盘存储层上产生比衍射极限系统应有的光斑稍大。发散光束通过偏振分束器和 $\lambda/4$ 波板传输,还引起激光与反射光的隔离不完善。由于目前CD系统中数据密度较低和转速较慢,信噪比的余量相当大,这种问题还是可允许的。然而,在下一代CD、特别是数字多用盘(DVD)系统中,数据标记尺寸将缩小,光盘转速变得更快。因此DVD制造商将对光束质量更为谨慎,以便达到令人满意的信噪比水平。因此,在DVD系统中必须采用类似图1(b)所示的系统。在此系统中,如果使用玻璃光盘,与激光器便有完善的隔离。

作者对图1(b)玻璃光盘系统用计算机DIFFRACT程序建立了模型,发现反射回激光器的反射光基本为零。然后又对双折射塑

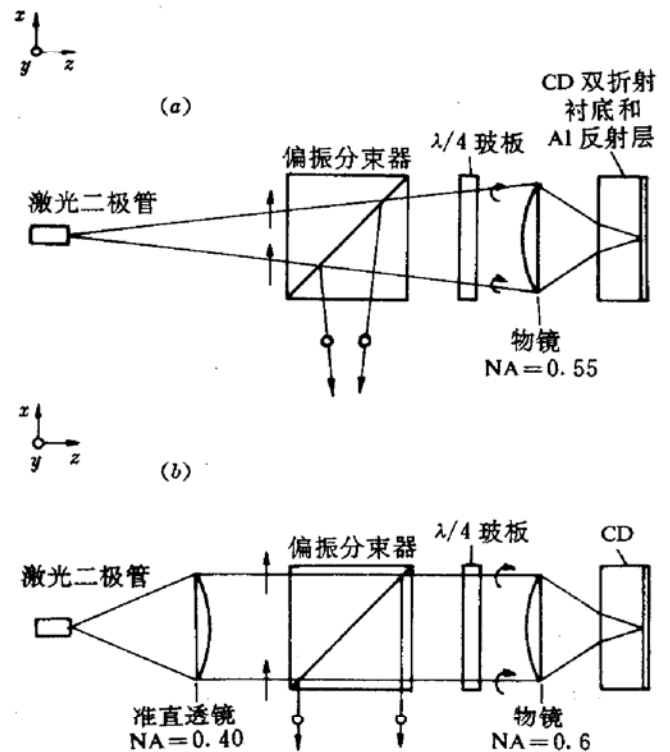


图1 (a) CD唱机的典型光学头简图,用偏振分束器和 $\lambda/4$ 波板使反射光与激光二极管隔离。由于光束通过偏振分束器和 $\lambda/4$ 波板时发生发散而稍有像差。(b)数字多用盘(DVD)播放机光学头简图。用偏振分束器和 $\lambda/4$ 波板使反射光与激光器隔离。由于光束经准直再通过偏振分束器和 $\lambda/4$ 波板,不存在像差

料光盘的上述同样系统建立了模型,发现以典型聚碳酸酯作衬底的光盘系统,反射回激光器的反射光约为10%左右。为了消除由CD数据产生衍射级次而引起的影响,用没有数据的光盘区域进行了模拟和实验,发现返回激光器的光有相当强度,并有相位图样。