

高密度光数据存储技术的发展*

干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 讨论了信息技术发展中信息数据存储的重要性,比较了磁存储和光存储的各自特点,介绍了光盘存储技术的发展趋势和高密度光盘存储技术的关键问题,进一步讨论了超高密度光存储的发展可能。

关键词 光存储,光盘,CD光盘,DVD光盘

DEVELOPMENT OF HIGH DENSITY OPTICAL DATA STORAGE

Gan Fuxi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract This paper discusses the importance of data storage in information technology, the trend of optical disc storage technology and the key points for its development. A comparison of the features of magnetic and optical storage is given. The future of super - high density optical storage is also discussed.

Key words optical storage, optical disk, CD(compact disk), DVD(digital versatile disk)

1 引言^[1-3]

根据预测,全球的信息量今后几年会以更快的速度增长。由于信息的多媒体化,人们需要处理的不仅是数据、文字、声音、图像,而且是活动图像和高清晰的图像等。一页 A4 文件为 2 KB(千字节),一张 A4 黑白照片为 40 KB,而一张 A4 彩色照片就占 5MB(兆字节)。放一分钟 VHS 质量的全活动图像(full motion video, FMV)要 10MB,而放一分钟广播级的 FMV 就要占 40MB,因此信息量与日俱增。

在信息技术的几个环节(获取、传输、存储、显示、处理)中,信息存储是关键。20 世纪 80 年代到 90 年代,人们最关心的是信息处理,即如何提高计算机芯片的处理速率和效率,全球掀起了计算机主处理器(CPU)大战;90 年代后期

通信网络掀起,大家可以共享数据和通信,有人讲“网络就是计算机”;进入 21 世纪,人们要考虑如何有效地存储和管理越来越多的数据和如何应用这些数据,信息存储空间日益拥挤,信息数据的采集和数据管理体系的复杂性越来越高,以及网络的普及,Internet/ Intranet/ Extranet 逐步进入单位和个人,21 世纪信息技术的浪潮将在存储领域兴起。

以计算机系统存储为例,存储方式分为:随机内存存储、在线外存储、离线外存储和脱机存储,如图 1 所示。

随机内存存储器要求集成度高,数据速度快,一直以大规模集成的微电子技术为基础的半导体动态随机存储器(DRAM)为主。随着大规模

* 中国科学院重大项目

1998 - 10 - 23 收到初稿,1998 - 12 - 09 修回

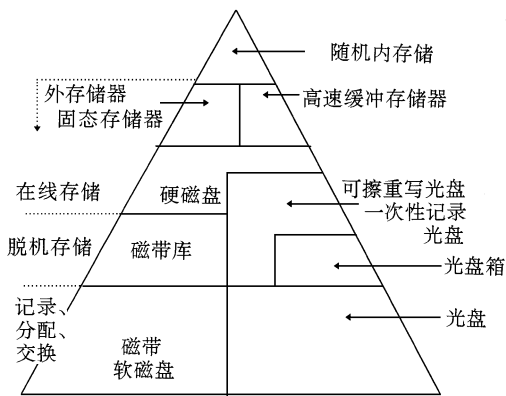


图1 计算机系统中各种方式的存储器

集成度的提高,光刻线度的不断缩小,存储容量也不断提高,见表1.

表1 半导体动态随机存储(DRAM)

时间	目前	1999年	2000年	2005年	2014年
容量	64—128M	256M	1—4G	10—20G	256G
光刻	0.3—0.2 μ m	0.18 μ m	0.15 μ m	0.1 μ m	0.010 μ m

在现代数字数据外存储中,磁存储技术早已先入为主.磁带、软磁盘和硬磁盘已普遍应用,形成了巨大的产业,而磁存储技术近年来仍然很迅速地发展着,差不多每5年增加10倍.表2反映了硬磁盘技术的进展情况.

表2 硬磁盘技术的进展

时间	1992年	1995年	1998年	2000年	2003年	2017年
存储容量/Gb	0.6	0.9	5—10	10	50—100	
存储密度/Gb/in ²	0.1	0.5—0.8	2—4	4—6	10—20	1000
数据率/Mb/s	16	100	150	300—400	400—500	
存取时间/ms	30	20	10	6	4—5	
飞行高度/nm	160		40		15	

光存储最早的形式为缩微照相,从本世纪初开始,经历了较长的时间,成为文档资料长期保存的主要形式.60年代初激光出现后,激光全息技术受人注目,因为它能实现三维图像存储,具有更大的存储容量.但是,由于不能进行实时数据存取,并和计算机不能联机,因此皆不能与磁存储相比.光盘存储技术是本世纪70年代开拓出来的.光盘存储技术发展到了80年代,便在视听领域内促进了激光唱片(包括声响唱片CD和激光视盘LD)和激光唱机产业的兴起.其发展之迅速,出乎人们的预料.

与磁存储技术相比,光盘存储技术具有以下特点:(1)存储寿命长.只要光盘存储介质稳定,一般寿命在10年以上,而磁存储的信息一般只能保存3—5年.(2)非接触式读/写和擦.目前光盘机中光头与光盘间约有1—2mm的距离,光头不会磨损或划伤盘面,因此光盘可以自由更换.而高密度的磁盘机,由于磁头飞行高度(几十纳米)的限制,较难更换磁盘.(3)信息的载噪比(CNR)高.光盘的载噪比可达到50dB以上,而且经多次读写不降低.因此光盘多次读出的音质和图像的清晰度是磁带和磁盘无法比拟的.(4)信息位的价格低.由于光盘的存储密度高,而且只读式的光盘(如CD或LV唱片)可以大量复制,它的信息位价格是磁记录的几十分之一.

当然,光盘存储技术目前还有它的不足之处,如光盘机(或称驱动器)比磁带机或磁盘驱动器要复杂一些,因此目前价格还较贵.光盘机的信息或数据传输速率目前比磁盘机低,平均数据存取时间在20—100ms之间.

表3列举了光盘存储和磁存储的一些性能比较.

表3 光存储与磁存储比较*

光盘	硬磁盘	磁带
中等性能	高性能	中等性能
0.25—2Gb/in ² , 25Mb/s	2—4Gb/in ² , 150Mb/s	0.8—1Gb/in ² , 40Mb/s
随机存取	随机存取	序列存取
大容量	大容量	大容量
低价格	价格合理	低价格
DVD-ROM < 0.001USD/MB	0.1USD/MB	0.006USD/MB
CD-ROM 0.002USD/MB		
CD-R 0.008USD/MB		
CD-RW 0.03USD/MB		
可移动		
长寿命		

*表中DVD是直径为5英寸、容量为4.7Gb的光盘,ROM为直读式,CD是直径为5英寸、容量为650MB的光盘,R为可记录式,RW为可擦重写式

可以预测,今后10年内,磁存储和光盘存储仍为高密度信息外存储的主要手段.今后高性能的硬盘(1Gb/in²,100Mb/s)主要为计算机联机在线存储,以计算机专业用为主.高性能光

盘(0.5 Gb/in², 10Mb/s)为脱机可卸式海量存储和信息分配存储,以消费用为主。

根据内存和外存储以及联机和脱机存储的关系,预计今后10年内,半导体随机内存(DRAM)、硬盘(HD)和光盘(OD)存储技术的发展和相互匹配如表4所示。

表4 今后DRAM,HD,OD的发展和相互关系

DRAM	16—64M	1—2G	10G
HD	2—6G	10—20G	100G
OD	4.7G×10	10G×10	100G×10

2 光盘存储技术的发展趋势^[4]

提高存储密度和数据传输率一直是光盘存储技术的主要发展目标,同时,性能的多功能,即不仅能读出,能记录,而且能可擦重写,也是光盘存储技术的发展方向,也由此才能与日益发展的磁盘存储技术相竞争。

以往10多年光盘产品主要以CD(compact disk)系列光盘为代表,应用800nm波长的激光来记录和读出,5英寸直径光盘的信息存储容量为650MB,人们已经熟知和广泛应用的是只

读式CD,如CD-ROM,VCD,CD-A等已形成了巨大的产业。目前已有产品的可录式CD(CD-R)正在代替软磁盘作复印(copy)节目和软件。可擦写式CD(CD-RW)正在兴起,它可能代替磁带用作信息的外存、编辑和分配等。

光盘工作性能的扩展取决于存储介质的进展。CD-ROM光盘的信息数据是预刻在光盘母盘上的(形成凹坑),然后制成金属压膜,再把凹坑复制于聚碳酸酯(PC)的光盘基片上。靠记录凹坑与周围的反射率不同作为读出信号。

CD-ROM光盘由盘基、溅镀的金属反射层(一般为Al膜)和保护层(有机塑料)组成。可记录光盘在盘基上还要有记录层,以往一次记录多次读出(WORM)光盘用无机碲(Te)合金作记录层,面目前可录CD(CD-R)光盘用有机染料(如花菁、酞菁)作记录层,也靠记录凹坑与周围反射率的不同作为读出信号。由于CD-R光盘价格便宜,制作方便,目前已有大量应用。

可擦重写光盘的存储介质能够在激光辐照下起可逆的物理或化学变化。目前它主要有两类:磁光型(M-O)和相变型(P-C)。如图2所示,前者靠光热效应使记录下的磁畴方向产生

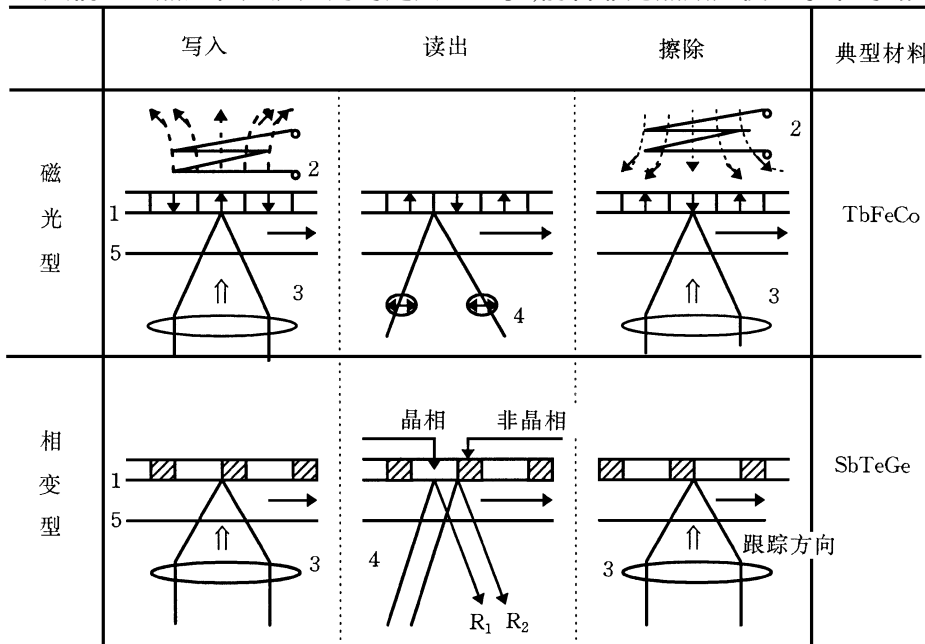


图2 磁光型和相变型可擦重写光盘工作原理

1——记录介质膜;2——磁场线圈;3——记录和擦除激光束;4——探测激光束;5——基板

可逆变化,不同方向的磁畴使探测光的偏振面产生旋转(即克尔角),并以此作为读出信号;后者靠光热效应在晶态与非晶态之间产生可逆相变,记录下晶态与非晶态不同的反射率,作为探测信号.这种可逆变化的稳定性决定了可擦重写的次数,一般要求在千次以上,甚至达百万次.目前,专业计算机上以磁光型光盘应用为主,而 CD - RW 光盘采用相变型.

这三种 CD 光盘的格式和性能列于表 5.对于光盘机来讲,不同的功能,其机器结构也有所不同,但能够兼容是十分重要的.如表 5 所示,由于 CD - ROM 和 CD - R 光盘的读出反射率一致($>65\%$),所以刻录好的 CD - R 光盘可在 CD - ROM 光盘机上读出.但 CD - RW 光盘的反射率低,在 CD - ROM 和 CD - R 光盘机上读出时需附加多种读出(multi-read)软件.

目前光盘存储技术中,载有信息的调制激光束通过物镜聚焦于光盘存储介质层上记录,属于远场光记录,记录点的尺寸决定于聚焦光的衍射极限.众所周知,在光的衍射极限下,光线的聚焦直径(d)与光波长(λ)成正比例而与

镜头的数值孔径(NA)成反比,即

$$d = 0.56 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

而存储密度正比于 $(\frac{NA}{\lambda})^2$.所以要提高存储的位密度,就要缩短激光波长和升高物镜的数值孔径.增加存储的道密度,就要缩短伺服道的间距(d_p).表 6 列出了今后光盘存储密度和数据传输速率的发展趋势.

表 5 CD 系列性能比较
($NA = 0.45, \lambda = 780\text{nm}, d_p = 1.6\mu\text{m}$)

性能	CD - ROM	CD - R	CD - RW
跟踪方式	记录码跟踪	摆动预刻槽	摆动预刻槽
马达控制		ATIP	ATIP
寻址		ATIP	ATIP
参考速度	1X=1.2~1.4m/s	1X, 2X	2X
写入功率	—	1X:4~8mW 2X:4~11mW	8~14mW
擦除功率	—	—	4~8mW
反射率	$R > 0.7$	$R_{\text{top}} > 0.65$	$0.15 < R_{\text{top}} < 0.25$
HF 调制	$I_{11}/I_{\text{top}} > 0.60$	$I_{11}/I_{\text{top}} > 0.60$	$0.55 < I_{11}/I_{\text{top}} < 0.7$
不对称性	$\pm 20\%$	$0 < < 8\%$	$-10 < < 15\%$
跳动	$< 35\text{ns}$	$< 35\text{ns}$	$< 35\text{ns}$
推一拉	0.04~0.07	0.04~0.09	0.04~0.11

表 6 光盘存储技术发展进程

时间	型号	记录波长/nm	5 单面容量/GB	存储密度/Gb/in ²	道间距/ μm	最小记录长度/ μm	扫描速度/m/s	存取时间/ms	数据传输速率/Mb/s
目前	CD 系列	780	0.6	0.25	1.6	0.83	1.2~1.4	100	4.32
~2000 年	DVD 系列	630/650	4.7	2.0	0.74~0.59	0.44~0.28	3.84	30	26~27
~2005 年	HD - DVD 系列	430~500	20~50	10~20	< 0.3	< 0.2	10~20	10~20	50~100
~2010 年	SHD	200~350	250	100	< 0.1	0.05~0.1	30	2~5	500~1000

表 7 远场光存储的进展

第一代光盘记录波长	CaAlAs 半导体激光器, 0.78~0.83 μm
第二代光盘记录波长	CaAlInP 半导体激光器, 0.63~0.65 μm
第三代光盘记录波长	ZnCdSe 半导体激光器, 0.50~0.55 μm
	CaN 半导体激光器, 0.40~0.45 μm

3 高密度光盘存储技术^[5-6]

如上所述,在远场光存储的范围内,缩短记录激光波长能缩小记录点.如表 7 所示,根据不同的半导体激光波长,将光盘存储技术的发展分为三代.目前,以 CD 系列为代表的光盘技术产品是处在第一代,正向第二代 DVD 系列发展.

3.1 高密度 CD 光盘(DVD)技术

利用目前已开发的新的刻录技术和红光半导体激光器(650nm 和 630nm),缩小记录点及其间距,可把现有光盘的记录密度提高 5~10

倍.最近两年就可能开发出高密度 CD 光盘系列,目前称 DVD(数字多用光盘)光盘系列.5 英寸光盘的存储容量可达 4.7GB,目前已在推广应用只读式 DVD(如 DVD-ROM, DVD-Video 等).表 8 列举了只读式 CD 和 DVD 的主要参数.由于缩短了激光波长(由 0.78 μm 缩短到 0.65 μm),提高了物镜数值孔径(NA 由 0.45 提高到 0.6),减小了伺服槽间距(由 1.6 μm 减小到 0.74 μm),使 5 英寸光盘的存储容量由 650MB 提高到 4.7GB(单面单层).因此,VCD 光盘用 MPEG-1 压缩器只可放映 74min 的活动图像(352 像素 \times 240 线 \times 30 帧/秒),而 DVD-Video 光盘采用 MPEG-2 压缩器可放映 135min 高清晰的活动图像(720 像素 \times 488 线 \times 60 帧/秒).只读式 DVD 正处于飞速发展之中,据 Info. Tech. 公司预测,到 2000 年,DVD-Video 光盘播放机的销售量将为 800 万台;

表 8 只读式 DVD、CD 主要参数

参数	DVD (A 格式本和 B 格式本)	标准 CD(红皮书)
光盘外径	120mm 80mm	120mm 80mm
光盘厚度	1.2mm(2 \times 0.6mm)	1.2mm
面数/基片	单面/双基片	单面/单基片
层间厚度	单层 双层	
	55 \pm 15 μm	
读出激光波长	650(630) nm	780nm
光学数值孔径	0.6	0.45
参考描述速度	单层 双层	1.2—1.4m/s
	3.49m/s 3.84m/s	
反射率(PBS)	单层 双层	70%
	45%—85% 18%—30%	
最小坑长度	单层 双层	0.83 μm
	0.40 μm 0.44 μm	
槽间距	0.74 μm	1.6 μm
双折射	100nm(最大值)	200nm
径向偏差(峰对峰)	100 μm	200 μm
抖动	/ T 8% = 3.06ns	35ns
播放时间	135min	74min
每面存储容量		688MB
120mm 光盘	单层 双层	
	4.7GB 8.5GB	
80mm 光盘	单层 双层	
	1.46GB 2.66GB	
误码纠正	里特-索罗门编码	CIRC

DVD-ROM 驱动器用于 PC 机的为 4700 万台,用于 TV 台顶(set-top)的为 480 万台.可录式和可擦写式(或随机存储式)DVD[DVD-R 和 DVD-RW(RAM)]正在开发之中.关键还在于存储介质和存取方式.目前初步统一的制式如表 9 所示.其关键技术是寻找新的存储介质,目前倾向于采用相变型材料作 DVD-RW(RAM)的存储介质,因为此类材料已经过多年的研究,比较成熟,但新的存储介质还在不断探索,特别是有机材料用于 DVD-R,它已具有 CD-R 应用的研究基础.可记录的 DVD 光盘必须有预制式的伺服槽,现在已明确将继续采用目前用于 CD-R 和 CD-RW 的摆动槽(wobbling groove),它们的制式必须与 DVD-ROM 兼容.一般估计在 CD-R 和 CD-RW 产品成熟后两年,将分别出现 DVD-R 和 DVD-RW(RAM).

表 9 DVD 系列制式和性能

性能	ROM	R	RW, RAM	
			2.6GB	4.7GB
跟踪方式	记录码跟踪	带地址码摆动预刻槽	带地址码摆动预刻槽	
记录波长、读出波长	650/635nm	635nm, 635/650nm	635nm, 635/650nm	
物镜数值孔径 NA	0.6	0.6	0.6	
记录方式	—	台、槽记录	台、槽记录	
记录功率	—	6—12mW	~15mW	
反射率	>45%	>45%	18%—30%	
道间距	0.74 μm	0.8 μm	0.74 μm	0.59 μm
最小刻录点长度	0.285 μm	0.44 μm	0.41— 0.43 μm	0.28— 0.3 μm
调制方式	8/16RLL	8/16RLL	8/16RLL	
通道位速度	26.6Mb/s	26.16Mb/s	26.16Mb/s	
扫描速度	3.84m/s	3.84m/s	3.84m/s	
使用数据容量	4.7GB/面	3.85GB/面	2.6GB/面	4.7GB/面
扇区长度、扇区分配	2048B, CLV		2048B, ZCLV	
擦写次数	—	—	>10 ³ 次	>10 ⁵ 次
纠错方式	里特-索罗门编码	里特-索罗门编码	里特-索罗门编码	

从图 3 可以看出,多功能的 DVD 系列光盘的发展要比 CD 系列快得多.从 CD-A 到 CD-RW 大概经历了 15 年的时间,而从 DVD-ROM 到 DVD-RAM 将只用 3—5 年时间.这当然是由于光盘及其驱动器的 R & D 的积累,

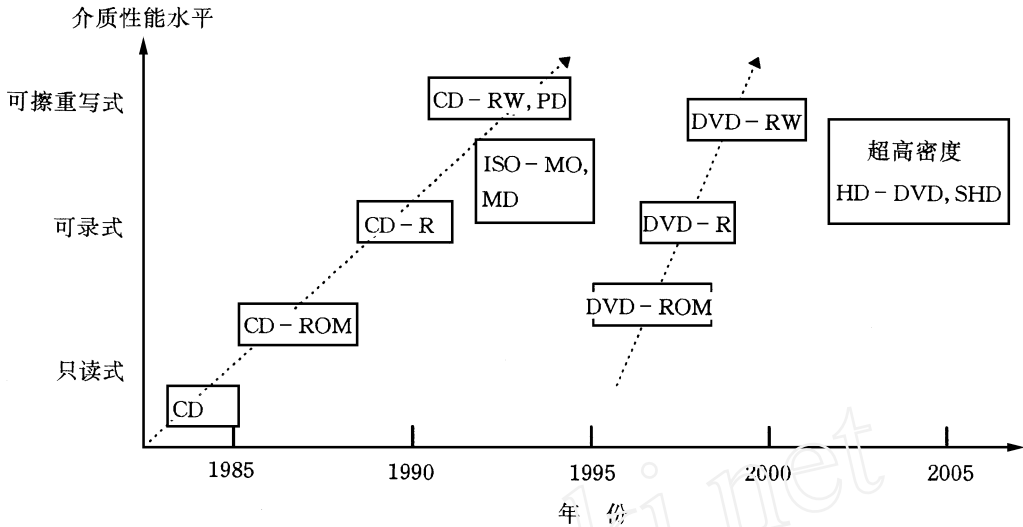


图3 CD与DVD系列的发展进程

以及 CD 系列生产的经验. 由此可见, DVD 系列光盘和驱动器的市场发展也会是很快的.

3.2 超高密度光盘存储技术^[5-7]

近年来, 蓝绿光半导体激光器有很快的发展, 特别是 GaN 半导体激光器(其性能如表 10 所示), 不久将实用化, 因此光盘的容量可达到 10GB 的目标已可实现. 这方面目前各国都在研究开发, 希望下世纪初 (~ 2005 年) 能实用化, 称之为高密度 DVD (HD - DVD) 或超高密度光盘存储技术, 其目标和措施见表 11. 通过各种方法来达到提高存储密度的目标, 见表 12.

探索新的超高密度的光盘存储介质仍然是关键. 要代替磁存储, 超高密度光盘主要用于可擦写型或随机存储型, 对超高密度光盘材料的要求见表 13. 目前已在一些无机、有机相变材料、磁光材料、光色材料和电光材料中找到一批较好的新型短波长材料, 正在深入进行各类材料基本光记录特性的应用基础研究, 在实验室水平上已在某些方面接近预期目标. 经过近年来多方面的试验, 有希望能达到实用化的短波长磁光存储介质大概有以下几种: (1) 成分调制的金属多层膜. 比较典型的为 Pt/Co 多层膜. 调制多层膜形成单轴磁各向异性而可以垂直存储, 在短波长 (~ 400nm) 情况下, 磁克尔角可达 $0.3^\circ - 0.5^\circ$, 矫顽力 H_c 可达到 0.1 T (Pt/Co) 和

0.2 T (Pd/Co). (2) 近年来发展的掺杂的 Mn-BiAl 在 450—750nm 具有很大的磁光优值. 经过多年努力, MnBiAl 为基础的薄膜已能进行垂直记录. (3) 稀土掺杂的钇铁石榴石薄膜的克尔或法拉第的极大值在 500nm 左右, 经过进一步掺入 Cu, 薄膜的 H_c 也得到提高, 可达到 0.1 T, 因此可以实现垂直存储.

表 10 GaN 激光管性能*

阈值电流	16mA	工作电压	4.5V
输出波长	380—440nm	最大输出功率	400mW(R. T.)
调制频率	3.5 GHz	寿命	10,000h(估计)
脉冲宽度	300ps	最短波长	370nm(几年后)

* 1998 年 4 月的测量结果

表 11 超高密度光盘 (HD - DVD) 存储技术的目标和措施

目标	存储密度	10—20 GB/in ²
	最小记录尺寸	< 200nm 接近或小于光衍射极限
措施	缩短记录激光波长和记录点尺寸	
	短波长 GaN 激光器: 波长 400—450nm	
	高数值孔径物镜: NA = 0.65—1.0	
	短波长多层膜结构存储介质	
	超分辨率检测	
	· 光学超分辨率技术	
	· 热虹食 (iris thermal eclipse) 技术	
	· 磁致超分辨率技术	
缩短道间距: 300—400nm		
改进存储格式、编码和记录/读出方式		
改进存储格式: 区域等角速度 (ZCAV)、区域等线速度 (ZCLV)、取样伺服 (SS)		
编码方式: 标记边缘记录		
记录方式: 槽脊和槽沟同时记录		

表 12 各种措施对提高存储密度的贡献

波长/nm	780	630	410
线密度	1 ×	1.5 ×	2 ×
道密度	1 ×	2 ×	4 ×
区域等角速伺服(ZCAV)	1 ×	1.5 ×	1.5 ×
标记边缘编码	1 ×	1.5 ×	1.5 ×
台、槽记录	1 ×	2 ×	2 ×
总增长	1 ×	13 ×	36 ×
总容量(5 光盘)GB	0.64	8.3	23

表 13 对超高密度光盘材料的要求

光学常数(吸收、反射、折射率)适用于蓝绿光范围存储
单波长激光记录、读出和擦除
清晰和稳定的亚微米(~200nm)的记录点,读出次数 > 10 ⁵
适用于光学超分辨率记录和读出的多层膜结构
记录/擦除次数 > 10 ³
快速响应,记录/擦除时间 < 200ns
长寿命,记录信息保存时间 > 10 年

至于相变型存储介质,载噪比(SNR)正比于记录点与周围的反射率对比度(R/R)。几种典型的无机相变材料如 Ge - Te - Sb, In - Sb - Ag - Te 等,晶态与非晶态的复式折射率差值在短波长仍较大,还可以应用,并已获得一系列可喜的实验结果。

随着工作波长的缩短,寻找吸收范围在 500—600nm 区域,甚至更短波长的有机存储介质显得越来越有意义。酞菁化合物、菁化合物、螺环化合物、俘精酸酐化合物等有机材料在 500—600nm 区域有较大吸收,但这些化合物有较为复杂的分子结构,包括不同的取代基等,对光和热的稳定性较差,而且结构变化和光致变色的时间响应较慢,还需做更多的深入研究,探索新的化合物,并需要对这些材料在薄膜状态的光谱进行仔细研究。

我们在研究有机单分子薄膜的光学性质时,发现某些有机材料的 LB 膜在激光和热作用下可发生分子尺度的可逆聚集度变化而引起可逆相变,从而使 LB 膜的某些物理量(如光吸收率、反射率等)发生可逆变化,显示出可逆的分子记忆功能。最近在某些金属有机化合物的

甩胶涂敷薄膜中也发现了相似的变化,它具有极大的应用可能性。

在高密度光盘存储技术中,由于记录点的尺寸小于光斑的尺寸,在远场记录中,光斑的尺寸受光的衍射极限的限制,所探测记录点的信号要用超分辨技术。常采用热虹食的原理,即采用两层工作薄膜,一层是记录层,另一层是读出层。对于磁存储和磁光存储来说,采用磁致超分辨技术(magnetic superresolution, MSR)或用磁畴放大技术(magnetic amplifying magneto-optical system, MAMOS),见图 4。前者利用磁光盘的记录层、读出层以及中间层的磁静耦合或磁交换耦合等原理产生热虹食,在光盘表面形成磁罩或磁窗,从而缩小有效读出光斑;后者也用多层磁性薄膜的磁交换耦合在读出层瞬间放大记录层的磁畴尺寸,使易于读出,所以高密度光盘是多膜结构。各类光盘的多层膜结构见图 5。按照记录、读出和擦除的各方面要求,合理地设计多层膜结构和选择各膜层的材料,以及精细地制备出多层膜光盘都是十分关键的。

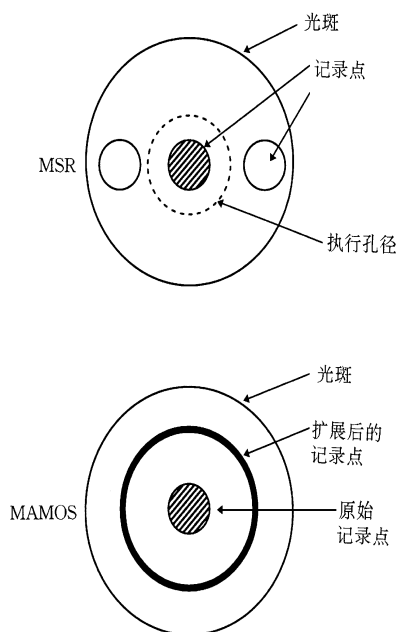


图 4 磁致超分辨技术(MSR)和磁畴放大技术(MAMOS)的示意图

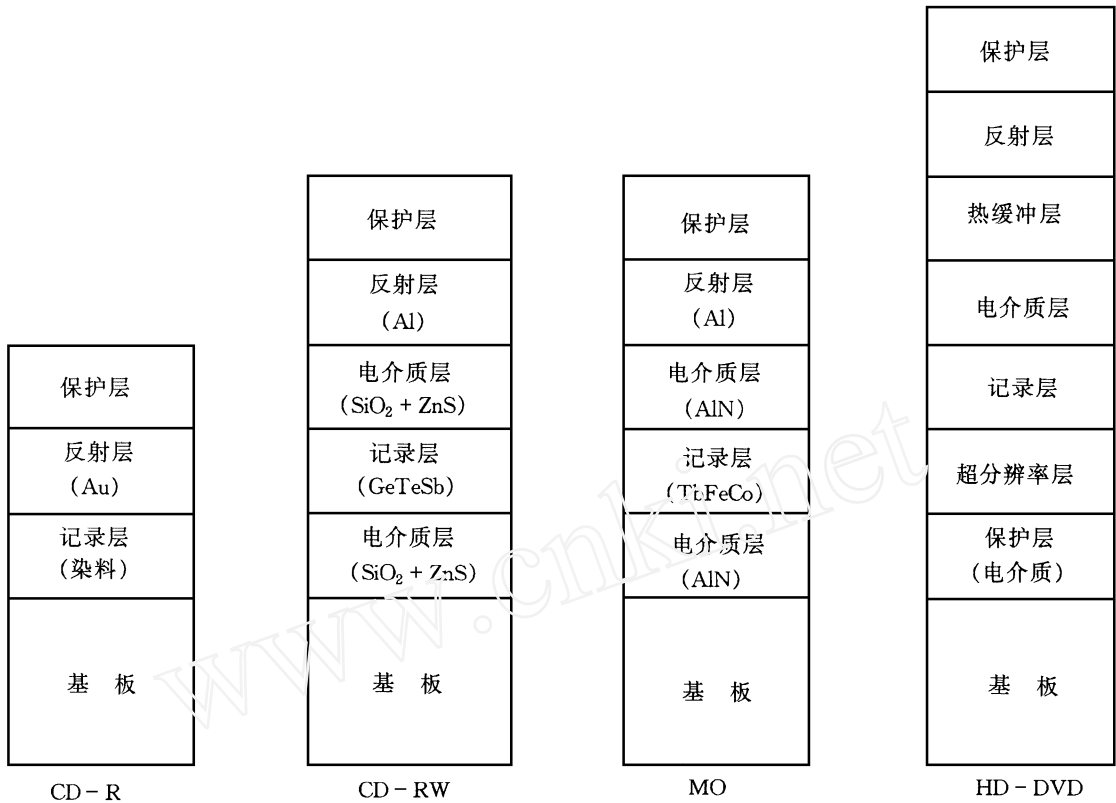


图5 各类光盘的多层膜结构

4 超高密度光信息存储技术

光存储技术的发展趋向为:由远场光存储到近场光存储;由二维光存储到多维光存储;由光热存储到光子存储。

4.1 近场光存储

目前的各种光盘驱动器均以包含物镜的光学镜头进行读或写,并完成聚焦与轨迹跟踪伺服控制。由于物镜离介质较远(毫米级),故称为远场记录。如上所述,虽然在未来的几年中,采用短波长激光器和超分辨(SRC)等技术,光盘记录密度还会有数十倍的提高,然而,由于物镜所聚焦的光斑尺度受波长制约,光斑尺度进一步缩小的希望只在于波长的缩短,这种缩短即使从目前的红外光切换到紫外光(目前只能到蓝光),也只是几倍的关系。因此,必须打破光的衍射极限的限制,从光的远场记录发展到近场记

录是超高密度光存储技术的主要途径。

80年代发展起来的扫描微探针技术,给超高密度光存储带来了全新的概念和实现的可能。扫描隧道显微镜(STM)可在介质中加入一很强的电场,强电场使材料微区的物理化学性质发生变化而实现超高密度存储。目前发展起来的电光材料和电致变色材料均可采用STM技术实现超高密度存储。扫描近场光学显微镜(NSOM)技术克服了光学衍射的物理极限,其横向分辨率可达数十纳米量级,这种光学显微镜技术也可实现超高密度光存储。它取消了物镜,直接将激光用锥形光纤或光导管引向被测物,在极近的距离内(亚微米级)形成分辨率为几十纳米的光点,用扫描方式形成显微图像。利用扫描微探针显微技术(PSM)进行超高密度信息存储,国外已有许多成功的报道。记录畴尺寸可以小于50nm,存储密度可达100Gb/in²。

但是采用扫描探针技术,探针的移动速度

很慢,扫描的范围很窄,很难获得实用化.最近在近场光学镜头和扫描机构上有重要的革新.首先采用高折射的浸沉透镜,制成数值孔径(NA)大于2的近场物镜,同时采用气浮移动磁头的机构,做成气浮移动的光头.图6为IBM飞行近场光学头的示意图.聚焦物镜的直径为1mm,浸沉透镜的折射率为1.83,滑竿尺寸为 $4 \times 3\text{mm}$,空气轴承的垫隙为 $3\mu\text{m}$,飞行高度为150nm.这种近场光学系统也在超高密度的光辅助的硬磁盘机上应用.

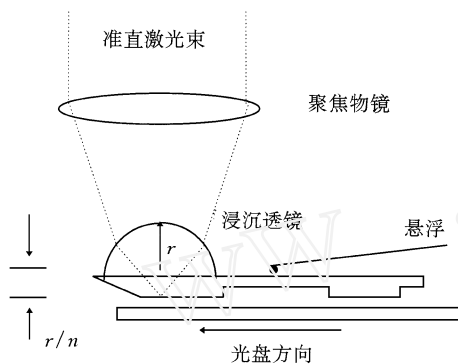


图6 IBM飞行近场光学头示意图

4.2 全息光存储

全息存储技术近年来有了复兴,即向图像数字化方向发展.全息数据存储是用改变激光束波长或入射角度的方法实现的,这种方法可使数据传输率超过 125MB/s ,信息写入速度也较快,因为它是使整组数据一次记录到某处的,而不像光盘那样需要移动,一次记录1bit.因此,这种技术具有可并行传输和处理的速度以及高的存储密度.最近有实验报道,在8个位置上每个都记录了500个左右的全息图,使存储器容量达到千兆位量级.使用 1000×1000 像素的空间光调制器和在200个位置上每个都记录5000个全息图,这是今后可以实现的目标.全息存储技术可能成为两种存储系统(如RAM与光盘驱动器)之间的快速缓冲数据存储的手段.

图7表示结构紧凑的数字全息存储装置.空间调制器、CCD探测器和恢复器做成一块光电集成元件,另一块固体元件把液晶偏转器和体存储介质集成在一起.但是全息存储材料问

题仍然是当前的关键.为了使全息存储变成有效技术,介质必须有很高的数据保存率,而且没有缺陷.作为体存储常用光折变材料,这种材料曝露于激光束干涉图样时,折射率必须发生永久性变化,否则,信息就会因激光束断开而擦除.需要寻找具有低比特差错率和几乎没有缺陷的介质.以目前常用的光致折变晶体为例,如掺铁铌酸锂(Fe LiBbO_3)和掺铈铌酸锶钡(Ce SrBaNbO_3).它们可以用于角多重全息存储和光谱多重全息存储.实验证明,全息的衍射效率达0.3%,而为探测数字化数据图的最小衍射效率约需0.05%,因此探测的灵敏度是足够的.但曝光时间约需0.1s,因此,响应时间是慢的,而保存时间依赖于温度,由于受温度影响,在20℃时只能保持1天,保存10年时只能在低温下(-4°C),因此还需用记录后的光或热固定,这些正是实时全息存储技术的弱点.为了获得可擦重写(或随机存储)全息存储的目的,最关键的是探索快速响应的全息存储介质,写入、读出和擦除的响应时间短于微秒.正在探索有机、无机晶体和玻璃材料.目前的研究工作集中在有机聚合物、光折变晶体和电子俘获材料方面.

空间调制器、CCD探测器
恢复器
集成块

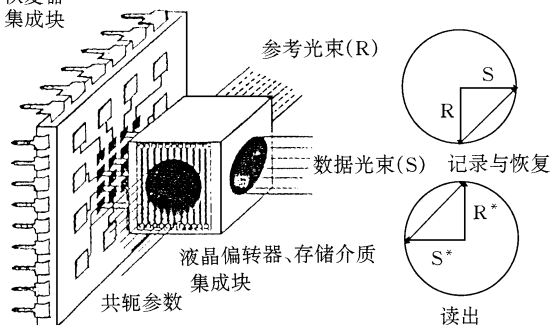


图7 结构紧凑的数字全息存储装置

4.3 光子多维存储

存储材料中的激活中心,在光激发下使电子产生跃迁而达到光存储的目的,称为光子存储(photon-induced optical memory).它是一种不经过材料吸收光子后产生热效应阶段而产生的光存储,区别于目前一般应用的光热存储方式.

利用光色、光电和电子俘获等效应,都可以

用作光子存储,这些效应对光的敏感性高,但对光和热的稳定性始终是比较难以解决的问题。

为了增加光存储密度,在 80 年代中期,有人提出了把频率作为附加的存储因素,用光谱烧孔的方法,在同一空间的光斑上可将存储密度提高千倍以上。

“光谱烧孔”可分为单分子和双分子(称选通激发)两类过程。但是,两类材料的光子选通烧孔都是在低温下进行的,在液氮温度下可烧 1000 个孔,而在液氮温度下(77 K)就不到 100 个孔,这是因为材料谱线的均匀变宽 W_H 随温度升高而迅速增大。光谱烧孔是在不均匀变宽 W_T 的谱线中烧出以均匀变宽为孔宽的孔,即烧孔数目成正比于 W_T/W_H 。同时,由于目前材料的电子俘获陷阱不能深,因而烧孔的孔深较浅,而且在序列烧孔过程中,先烧出的孔容易出现逐渐被填充的现象,因而寻找室温下能烧孔的材料是关键。目前,一些稀土掺杂的玻璃态材料,由于非均匀变宽大,如果室温下均匀变宽小,有可能在室温下实现几十个孔的烧孔效应。基于微腔共振理论,应用超微粒子作为微腔,易于在室温下实现光谱烧孔。

光子存储的另一种方式为双光子三维存储。双光束以 90° 相交移动,实现三维存储。双光子的激发过程十分类似上述“光谱烧孔”。因为是电子跃迁过程,所以记录的速度应该是快的。存储介质可用不同方法做成多层薄膜。有机光子材料如卟啉、酞菁、紫红质等,无机材料如电子俘获、光致折变等。光子存储材料的记录时间应在纳秒级,记录功率也应该是低的($\sim \text{nJ}/\text{cm}^2$)。要使这些光子存储材料实用化,必须解决工作温度低、存储寿命短及存取循环过程中抗疲劳性差等问题。

5 提高光存储中数据传输速率

在今后海量数据信息存储中,信息的存入

与取出速率要求越来越高。半导体内存储器的数据存取时间希望降至纳秒量级或更短,而外存储器的数据存取时间能从毫秒降至微秒量级。

与磁存储技术相比较,光盘存储技术存在着数据传输率偏低的缺点。目前最先进的可擦重写光盘驱动器的数据存取时间也在 20ms 以上。它主要受光头的重量太大、光盘的转速较低、以及目前商品的可擦重写光盘驱动器还不能直接重写等限制。提高光盘存储的数据传输率技术的主要方向为:减轻光头重量,简化结构,使光头实现光电集成化;借用磁头飞行技术采用薄膜飞行光头;实现可擦重写过程中的直接重写技术;提高光盘驱动器的转速和光盘的写、擦的响应时间;改进数据编码和信号处理;采用多光头记录和读出等。但作为光盘介质本身的改进来讲,就是实现直接重写,即信息的记录和擦写是可以随机进行的。这首先要求记录和擦除的时间响应要快,希望能在纳秒量级范围进行。这也是对今后所有存储介质的要求。可以这样理解,存储过程的物质变化主要依赖原子、离子和分子的自旋变迁、电子跃迁、光子感应,以及原子、离子和分子在它们最临近位置的移动。

参 考 文 献

- [1] 干福熹. 光电子技术和产业的发展. 见:周光召、朱光亚主编. 共同走向科学. 北京: 新华出版社, 1996. 364—375
- [2] 干福熹. 中国科学院院刊, 1998, 4: 268—271
- [3] Strasser G. Layer, 1996(2): 10—12
- [4] 干福熹等编著. 数字光盘存储技术. 北京: 科学出版社, 1998. 277—316
- [5] 干福熹. 世界科技研究与发展, 1997, 1(19): 21—24
- [6] 干福熹. 新型光存储材料、器件和技术. 见: 张焘主编. 科学前沿与未来. 北京: 科学出版社, 1996. 125—158
- [7] 干福熹. 材料科学与工程, 1998, 16(2): 1—8