

环辛四烯。为防寄生振荡使效率下降,应在染料池两端面有 $3-5^\circ$ 倾角。

因 92km 高空逸散层钠原子共振激发波长 5896\AA 和 5891\AA ,故用布儒斯特角偏振器和双折射滤光器的精密转台在 $570-616\text{nm}$ 范围调谐,调谐宽度 1nm 。选用波长

$$\lambda = \frac{2x_0\Delta\mu}{K} \cos\alpha,$$

式中 K 是级数,晶体厚 $x_0 = 0.36\text{mm}$, $\Delta\mu$ 为双折射率。当光束发射角为 $\Delta\alpha$ 时,波长宽 $\Delta\lambda = -\lambda \operatorname{tg}\alpha \cdot \Delta\alpha$ 。当 α 角小时,则 $\Delta\alpha$ 也小($\alpha = 35^\circ-50^\circ$)。染料激光器谐振腔凹全反射镜 $R = 99\%$,曲率半径为 2m ,平面输出镜反

射率 $R = 60\%$,镀宽带介质膜厚 $550-650\text{nm}$,输出 1.2J 能量黄光射向 92km 高空,光束分散度为 0.2m (半径),每个脉冲发射光子数为 10^6 个,脉冲持续时间为 $0.4\mu\text{s}$,重复率为 100Hz 。

参 考 文 献

- [1] 马品仲,光学学报,14-4(1994),403.
- [2] 马品仲,大连理工大学学报,34-5(1994),527.
- [3] F. Merkle, Proc. VLT, ESO, No. 30 (1988), 639.
- [4] F. P. Schafer, Dye Lasers, Springer-Verlag, (1978).
- [5] Ma Pinzhong, Proc VLT, ESO, No. 42 (1992), 101.
- [6] 姜文汶,光学学报,8-5(1988),441.

磁光数据存贮技术进展¹⁾

王 荣 李锡善 千福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘要 介绍了光学数据存贮的基本原理。磁光存贮是目前备受重视的可擦重写光存贮技术,它在计算机外存贮设备中有着广泛的应用前景。详细介绍了磁光存贮技术的进展及未来的发展趋势。

关键词 光盘,磁光存贮,Kerr 效应。

1 光学数据存贮技术

随着社会的进步和科技的发展,人类积累的知识量和信息量也在迅速地增长,需要存贮、处理和传递的信息量也越来越大,因此迫切需要更大容量的信息存贮设备和更高速度的信息处理设备。光存贮技术就是在这样的背景下发展起来的。

光存贮技术是从本世纪70年代前后才开始大量研究和开发的一种新型数据存贮技术。它用激光束将数字信息或模拟信息记录于光存贮介质中,并可以用激光束再现和读出这些信息。相对于磁存贮而言,光存贮具有存贮密度高、存贮寿命长、采用非接触式读写、信噪比或载噪比高、信息位价格低等优越的性能^[1],因此

近十几年来,世界各发达国家都投入了大量的人力、物力和财力来开发这一新技术。80年代,光盘介质与光盘驱动器的研究取得重要进展,光盘在声像设备与计算机外存贮设备中的应用得到了很大的发展,例如激光唱片、激光视盘目前已进入普通家庭。光盘产业现在已经形成了一支重要的工业产业。仅1993年世界光盘介质及光盘驱动器的产值就超过150亿美元,销售了6500万套以上的光盘驱动器和数千万片光盘介质^[2]。近年来,由于光盘的容量、数据传输率、数据存取时间、信噪比等光盘的主要性能不断提高,因此在计算机外存贮设备的应用中得到了迅猛的发展。1988年,MO-500型

1) 中国科学院“八·五”重大项目。
1994年8月18日收到初稿,1994年10月17日收到修改稿。

的 $\phi 130$ 磁光驱动器被选作 Next 计算机的主存贮器,从而迈出了光盘应用于计算机外存贮设备的重要一步。

光存贮系统按其物理机制划分,主要有磁光存贮和相变光存贮两种。按其读写方式又可分为:(1)只读式(ROM)光盘系统,它只能用来再现或读出已经记录在光盘介质中的信息,不能录入,也不能重写;(2)一次写入(WORM)光盘系统,它可以一次性录入用户的信息,可以读出,但不能擦除或重写用户所录入的信息;(3)可擦重写光盘系统,它是新一代光存贮技术,既可以记录,也可以擦除和重写。可擦重写光盘很适合于作计算机外存贮设备,它是光存贮技术的一个重要发展方向。

到目前为止,光存贮仍以磁光存贮和相变光存贮为主,并且都可以实现可擦重写功能。磁光存贮具有写擦时间短、读写功率较低、寿命长、读出信号信噪比高等优点,因此近年来得到了深入的研究和广泛的应用。磁光存贮利用了热磁记录原理。写入激光束是功率较高的脉冲激光,它聚焦于磁光记录介质表面,形成一个微小受热区域(本文将磁光存贮和相变光存贮中与聚焦光斑尺寸相当、用于记录 0 或 1bit 信息的微小区域称为记录畴)。当记录畴温度达到居里温度附近时,根据磁光记录介质膜的特性,此时记录畴内介质的矫顽力很小,因此只需要加一较小的($\sim 200\text{Oe}$)外加磁场,就可以使该记录畴的磁化矢量取向;写入激光束很快离开聚焦位置,在快速冷却过程中,记录畴的磁化矢量保持原来的与外加磁场一致的方向磁化方向,因此只需要调整外加磁场的方向,就可以实现 0 或 1bit 信息的记录,这就是磁光记录的写入过程。其读出的原理是 Kerr 磁光效应。Kerr 磁光效应表明,当平面偏振光入射到磁性介质膜时,其反射光偏振面会发生旋转,这个旋转角称为 Kerr 角。激光束在垂直入射到磁化矢量方向平行或反平行于其传播方向的记录畴时,偏振光的偏振面分别沿顺时针和反时针方向旋转。当用低功率的激光束照射记录畴时,不会使记录畴的结构发生变化,但却可以根据记录

畴是记录的 0 或 1bit 信息而检测到不同的偏振转角,实现信息的读出。信息的擦除与记录类似,并可以实现可擦重写。目前已有大量的磁光介质和磁光驱动器问世。

相变光存贮的原理是:相变光盘用的记录介质薄膜一般先结晶成颗粒微小($< 1\mu\text{m}$)的多晶态。将高功率、短脉宽激光束聚焦于记录膜的表面,介质吸热后温度迅速升至熔点,并在骤冷的条件下形成非晶态,这是写入过程;由于晶态和非晶态材料的折射率不同,因此记录畴的反射率与周围区域有明显反差,读出过程就是用小功率激光束检测出这种反射率的差异;一般用较长脉宽和较低功率的激光再作用于记录畴,使其温度上升到低于材料的熔点而高于非晶态的转变温度,使其产生重结晶而恢复成多晶态,这就是擦除过程。近年来,围绕着降低擦除时间、提高晶态和非晶态反衬度以及材料的稳定性等方面进行了大量的工作。现在已有直接重写相变光盘和驱动器产品问世。

除磁光存贮和相变光存贮之外,近年来还提出了多种新型光存贮机制。(1)电子俘获光存贮^[1,3]。它利用介质不同能级之间的电子跃迁进行信息的写入、读出和擦除。电子跃迁是一种快速过程,其写擦时间小于 5ns。在电子跃迁过程中,介质本身的物质状态和结构不发生变化,因此从理论上说可以进行无限多次写擦循环。电子俘获光存贮具有很多优点。例如,写入、读出和擦除的速度很快,存贮密度很高,介质寿命长,易于擦除和重写,并可以实现三维存贮等。但目前还处在基础研究阶段,要达到实用化还有待深入研究。可以预期,下一代光存贮完全有可能是电子俘获光存贮。(2)有机光色存贮。它利用有机化合物的光致变色(光色)光化学反应实现对信息的写入、擦除和读写功能。目前的主要问题是:光色材料,特别是对长波长($> 0.65\mu\text{m}$)敏感的材料对光、热的稳定性较差,因此记录畴会在多次读出中失真,而且写擦时间过长,写擦循环次数少。目前已在实验室制备出了一些有机光盘样品,但还没有达到实用化水平。(3)光子选通光存贮。

它是基于光子烧孔的光存贮技术。光子烧孔现象在激光光谱中早已发现。固体光谱中的不均匀线宽是由很多不同格位的分子或离子的均匀线宽组成的。如果用一线宽很窄的激光进行选择激发,就能造成在均匀线宽的光谱中“烧孔”。用窄线宽调谐激光束进行载信息波的二进位调制,并在不均匀线宽的光谱中扫描,就能形成光谱烧孔的编码。因此光子选通光存贮除了空间光存贮外,又用了频畴光存贮。它有很高的潜在存贮密度,可以上千倍的提高存贮密度。然而目前尚难达到实用化,主要是烧孔时间很长,并且需要在液氮温度下工作;其所用的光色存贮材料和激光系统也比较昂贵。(4) 由于目前光记录受到光学衍射极限的限制,记录畴不可能非常小,故记录密度也受到光学衍射极限的限制。因此,近年来还提出了一些基于各种高分辨率显微镜的光存贮技术^[4]。例如利用原子力显微镜,近场光学显微镜,以及各种扫描显微镜。这类存贮方式的都主要是为了提高分辨率,并大大提高存贮密度。如近场扫描光学显微镜,其记录畴的分辨率可以达到 60nm,比目前光存贮的线密度要高 10 倍以上。但这类装置庞大,离实用化尚远。目前,这类新的光存贮技术还在积极的开发之中。

2 高性能磁光存贮系统

光盘存贮技术正在与磁盘存贮技术展开激烈的竞争。近几年,磁盘存贮技术发展很快。日本已能生产 50MB 的软磁盘和 200MB 的硬磁盘。并且磁盘的数据存取时间约为光盘的 1/5,数据传输率约为光盘的 5 倍。虽然光盘在存贮容量、信息位价格、使用寿命和可御换性等方面优于磁盘,但是光盘要最终占领市场还必须进一步提高其存贮密度和速度等主要性能。近年来的工作基本上都是围绕开发高性能的光存贮介质和高密度、高速度、小型化的光盘系统而展开的。磁光存贮技术是目前研究和应用得比较广泛的光存贮技术,它的很多性能都颇具竞争力。下面将介绍高密度和高速度磁光存贮系统

近年来的进展情况及发展趋势。

2.1 高密度磁光存贮系统

存贮密度高是磁光存贮优越于磁存贮的最主要的特点。近年来,人们为提高磁光存贮密度进行了多方面的努力。据估计,按目前的发展速度,在今后的 5—10 年内单片光盘的容量将超过 20GB。

目前,IBM 公司的 0632CHA 型、13.13cm、1.3GB 磁光盘,TDK 公司的 MOR128 型、8.75cm、128MB 磁光盘等都已实现商品化。现在从事光盘生产和研究的公司越来越多,已有很多公司相继推出了自己的光盘产品。随着研究的深入,很多新的技术已应用于磁光存贮技术,因此提高存贮密度很有潜力。

以目前典型的 128MB 的 8.75cm 光盘或 650MB 的 13.13cm 光盘为基准,通过采用各项新技术,存贮密度还可以提高 1—2 个数量级^[5-6]。由于记录畴的尺寸受光学衍射极限的限制,因此可以通过减小记录光波长和增大物镜数值孔径来提高存贮密度。其中,采用短波长激光器写入可提高 1.5—3.8 倍,增大数值孔径可以提高 1.39—1.8 倍。短波长激光记录是近年提高存贮密度的重要方法。1993 年以来,短波长半导体激光器的研制取得重要进展,激光器的输出功率和稳定性有较大提高。目前,半导体激光器的输出功率可达 35mW 以上,这已能完全满足磁光存贮的要求;采用二次谐波倍频技术,可以输出波长为 400nm 左右的激光。市场上已有商品化的短波长激光器出售。由于光盘刻槽技术的提高,磁光盘的道密度还可以提高 1.2—2.3 倍。日本报道了在预刻槽的槽内和刻槽的台阶上同时记录的技术,这样可以将记录密度提高两倍,但由于道间干扰较大,读出信号的信噪比较差,因此其实用性还有待进一步研究。一般磁光记录采用等线速度或等角速度控制光盘的转动。等线速度法在整个光盘上记录的密度都相等,但控制比较复杂;等角速度法控制较简单,但内径记录密度大,外径记录密度小。为此提出了分区等角速度法作为二者的折衷,以尽量提高存贮密度。编码技

术对提高磁光存贮也有很大影响。磁光记录若用记录畴的边界而不是用记录畴的中心来编码,则可提高存贮密度 1.2—1.9 倍。另外,采用磁致超分辨记录和读出可以突破光学衍射极限的限制,可以进一步提高存贮密度。运用边界记录编码已在实验上实现了 2GB、13.13cm 的磁光盘^[7];用倍频激光器结合 RLL(1,7) (run-length-limited) 编码,已实现了 0.39GB/cm² 的记录密度。

上述提高存贮密度的技术,很多已达到实用化程度。但目前基本上是仅利用一、两个参数去提高存贮密度,综合运用上述技术提高存贮密度的研究,还有待深入。这实际上也是遵循了其自身的发展规律,因为只有选取单独一个参数,才能清楚其具体的影响。综合运用这些技术只有在各单项技术成熟之后才有可能实现。

2.2 高速度磁光存贮系统

磁光存贮虽然在存贮密度上大大优越于磁存贮,但磁光存贮的速度一直未能达到磁存贮的水平。磁光存贮只有在存贮速度上达到和接近磁存贮的水平,才可能在计算机外存贮设备中得到广泛的应用,并最终被用户接受。磁光存贮的速度包括记录数据的速度、数据存取时间和数据传输率,其中数据存取时间又包括寻道时间和等待时间。为提高速度,一方面可以减小驱动系统可动部分的质量,如光学头和磁头;另一方面可采用先进的读写和寻道控制技术。

为减小光学头可动部分的质量,采用了分离式的光学头和强度较高、密度较小的高分子材料制作机械元件,使可动部分的质量减小到了几克的范围。由于可动部分的质量轻,惯性小,容易加速和减速,所以还可以提高光学头的控制精度和定位精度。为减少光学元件的数量,已有采用全息光学头的报道。另外,采用空气轴承,已使光盘的转速普遍达到 1800—3600 rpm,这就减小了等待时间。近年来发展起来的直接重写磁光记录技术是提高数据传输率的一项重要技术。从 1986 年提出这一问题以来,磁光直接重写得到了广泛而深入的研究^[5-8],目

前已有了一些较为成熟的技术。为缩短寻道时间,提出了直接寻道方案。此外,采用多光束读写,可以成倍提高数据传输率。

经过多年的努力,目前数据传输率已可达到约 5—10MB/s,数据存取时间已降低到约 20—30ms。

3 几项新的磁光存贮技术

磁光驱动系统整体性能的提高,依赖于各项单元技术的成熟,其中包括磁头的设计,光学头的光学与机械设计,伺服系统,读写系统,控制系统等。为提高光存贮系统的性能,近年来提出了一些重要的磁光存贮技术。例如,磁光直接重写技术,直接寻道技术,差分聚焦伺服技术及集成化光学头等。

3.1 磁光直接重写技术

为了提高磁光存贮的数据传输率,近年来磁光直接重写技术受到了广泛的重视。在此之前,人们提出了各种重写机制。例如,在重写之前,先把原记录的信息读出并擦除,因此,每重写一次,磁光盘要转 2—3 圈,这就大大降低了读写速度;也提出过写前预读方案,边读边写,在证实了原写入的信息之后,再确定写入新的信息,这也使运行速度受到一定的限制。

磁光直接重写技术要求磁光盘在原记录畴直接实现重写功能,即在磁光盘转动一圈过程中,要同时实现擦除和重写功能。目前主要有两种直接重写方法:光强调制和磁场调制直接重写。

光强调制直接重写是根据所要记录的信息来调制光强,通过改变光强并辅以外加偏置磁场来实现直接重写。T. Ohtsuki 等用长短脉冲相结合的方法实现了光强调制直接重写。其实质是利用了热传导的温度梯度。在用长、短脉冲分别照射记录介质的过程中,特别是用 1ns 量级的脉冲光照射时,在记录畴的边界形成明显的温度梯度。他们实现了对双层膜介质的直接重写。K. Tsutsumi 等认为用四层膜结构可以不用外加偏置磁场,因为参考膜层本身

就相当于一个初始化磁场。他们在文中详细地描述了四层膜的结构及其重写机制。Fumisada 等用光调制实现了三层膜结构、单面记录的 650MB、13.13cm 磁光盘的直接重写。并显示了光强调制可以实现很高的数据传输率，而且容易实现双面记录。Masayuki Arai 等在用光调制直接重写过程中，在每记录一位信息之后，将激光束关闭一段时间，从而减小了记录过程中的热扰动，可以提高记录信噪比。结合 RLL(2,7) 编码，他们实现了单面 1.3GB、13.13 cm 磁光盘的直接重写。

磁场调制直接重写是近年来很受重视的一种直接重写方法。磁场调制直接重写适合于边界记录编码，因为这种记录方式能产生很明显的记录边界，在边界处有很陡的温度梯度。而且记录畴之间没有热干扰。因此这种方案有利于提高数据传输率、记录密度及信噪比等。M. Ojima 等用这种方法实现了 2.2MB/s 的数据传输率和 0.6 μ m/bit 的存贮线密度。Makoto Hiramatsu 等也报道了类似的结果。

一般磁场调制直接重写是用激光束连续照射记录介质，而磁场则根据所要记录的数据来调制。Tamotsu Yamagami 等将短脉冲激光与磁场调制直接重写结合起来，让脉冲激光与磁场同步作用于介质，可得到很清晰的记录边界，提高了激光功率利用率，减小了记录畴边界的漂移和起伏，降低了误码率。他们还采用了边界记录编码，从而提高了记录密度的和载噪比 (CNR)。

S. Sugaya 等在实验中采用了浮动式磁头。为了保持光存贮可卸换性和非接触式读写的优点，并避免在盘片高速转动过程中磁头划伤介质表面，他们对磁头与光盘表面之间的距离进行了控制，使磁头与盘片之间的距离在整个读写过程中保持恒定。

磁光直接重写因其特殊的优点而受到广泛的重视，其研究与开发仍不断取得进展。光强调制与磁场调制各有其优点，就目前来看，磁场调制直接重写的信噪比、写擦循环等性能优于光强调制直接重写，是一个重要的发展方向。

3.2 磁光记录直接寻道技术

数据存取时间包括寻道时间和等待时间，它是光存贮用作计算机外存贮设备的一项重要指标。直接寻道是新近发展的一种缩短数据存取时间的手段。一般寻道要经过粗寻道和精细寻道两步过程。粗寻道经过一个大的跳道过程，只要求它到达目的道附近，因此粗寻道的控制机构的误差允许范围大；精细寻道是在小范围内寻找目的道，因此精细寻道的控制机构的误差允许范围小。两步过程要花费较多的时间。

直接寻道要求一步到位，因此要求在道跟踪伺服过程中，随时控制光学头的速度和当前位置与目的道的相对距离，这就需要提高道跟踪的启动能力和控制速度的精度。理论上，可以通过增大伺服带宽来解决；然而实用上，伺服带宽受到传感器机械共振频率的限制，而且道跟踪误差信号为正弦形，因此道跟踪伺服的线性范围窄。Motoyuki Suzuki 等用波形变换的方法来提高道跟踪伺服系统的牵引能力，用线性化的道跟踪误差信号的斜率来检测光学头的速度，实现了直接寻道。A. Takahashi 等报道了用直接寻道技术的实验结果，其平均寻道时间已低于 18ms，接近磁记录的数据存取时间。

3.3 差分聚焦伺服

光斑在记录介质表面的聚焦质量是通过检测聚焦误差信号来反映的。聚焦越好，激光功率利用率越高，记录光斑尺寸越小，记录密度越高。一般采用象散法、刀刃法、临界角棱镜法、光瞳模糊法、及光斑尺寸检测法等来检测聚焦误差信号^[4]。这些方法都从光盘的反射光中获取聚焦误差信号。对于连续预刻槽光盘，反射光中含有提供道跟踪误差信号的衍射级次，因此很难将聚焦误差信号和道跟踪误差信号完全分离开，这样就产生了调焦信号与道跟踪信号间的信号串扰。T. D. Milster 等用差分方法克服了信号串扰的影响。他们用两个四象限检测器检测聚焦误差信号，两个检测器并不是刚好置于聚焦位置上，而是将其中一个稍微向焦点外移动一点距离，另一个稍微向焦点内移

动一点距离。当聚焦时,两个光斑大小相近;离焦时,两个检测器上的光斑一个增大,一个减小。由此可以得到信噪比较高的聚焦误差信号。

用差分聚焦误差信号伺服方法,可以将聚焦伺服精度提高5倍左右。这种聚焦误差伺服系统还比较简单,可以减少驱动器的制作成本。

3.4 集成化光学头

减小光学头的体积和降低光学头的质量对于提高数据传输率、数据存取时间、降低光学头的制作费用等都有着重要的意义。而且只有小型化的光学头才适合于作计算机外存贮设备。为此,提出了用薄膜光波导和全息光栅元件设计集成化光学头的新思路。

集成化光学头将聚焦光栅耦合器、光栅分束器及光电二极管接收器等集成在一块硅作衬底的薄膜光波导上。激光束由耦合器聚焦于光盘表面;而反射光由同一光栅耦合器来收集,因此仅由一个集成化的元件就可以同时完成聚焦、分束、反射光收集等功能。并且在信号处理、寻道跟踪伺服和聚焦伺服中采用了数字信号处理技术和大规模集成电路等。

4 展望

光存贮技术是一项综合性的技术,它涉及物理、数学、化学、材料、机械制造、信号处理、自动控制、电路集成技术等不同学科和领域的技术。经过20年左右的研究开发,光盘驱动器及光盘介质都得到了较大的发展。今后,一些新的技术将会应用到光学数据存贮中来。它们包括:小型化、短波长半导体激光器,精密机械制造技术,大规模集成电路技术,数字信号处理技术,集成光学头,软控制技术^[2]。而且,磁光记录可以借鉴一些已比较成熟的磁记录技术。

例如,在磁光记录中,磁头的设计就可以借鉴磁记录中磁头的设计。这些技术应用,将会使单片磁光盘的容量在今后5—10年间超过20GB,数据传输率达到20GB/s左右,数据存取时间达到10ms左右。

磁光记录是当前占主导地位的光存贮技术。目前已取得了很多技术上的重大突破,但磁光新材料记录机理的理论研究仍在不断深入研究之中。这些工作主要包括:记录畴形成的微观机制,例如,记录畴的微观结构、磁畴壁在加热和冷却过程中运动、记录畴与磁畴的区别与联系;激光束与记录膜的热磁作用机制,例如,热量在记录膜中传输过程、记录膜横向和纵向的温度梯度分布等。目前所采用的主要的研究方法是:用有限元法进行数值计算和用高分辨率的扫描或隧道显微镜观察磁畴的微观结构。可以说,在今后几年内,磁光记录的理论研究将仍是一个主题。

可以预期光盘技术产业必将发展成为一支重要的工业产业。光存贮技术将在信息存贮和信息处理等信息技术领域和声像技术领域发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] 千福熹主编,数字光盘与光存贮材料,上海科学技术出版社,(1992),6.
- [2] D. Campbell, *Optics & Photonics News*, April (1994), 26.
- [3] Joseph Lindmayer, Paul Goldsmith and Kirk Gross, *Proc. SPIE*, **1401**(1990), 103.
- [4] H. J. Mamin and D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.*, **61**(1992), 1003.
- [5] K. Balasubramanian, *Opt. Eng.*, **31**(1992),2674.
- [6] Victor B. Jipson, *Proc. SPIE*, **1499**(1991),2.
- [7] Harukazu Miyamoto, Masahiro Ojima, Tsuyoshi Toda et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**(1993), 5457.
- [8] Shoji Kobayashi, Susumu Senshu, Shoji Iwaasa et al., *Proc. SPIE*, **1663**(1992), 15.