

# 磁存储材料的未来发展<sup>1)</sup>

王荫君

(中国科学院物理研究所国家磁学重点实验室, 北京 100080)

从未来微型计算机对磁存储器应具有超高存储密度的要求出发, 讨论了磁存储材料的未来发展. 并指出, 最有希望的材料是沿用传统模式纵向记录的薄膜磁介质和新型的磁光存储薄膜. 对于如何实现此超高密度的磁和磁光存储, 文章还讨论了各自需要解决的问题及相关的信息存储和读出技术.

当人类社会进入信息技术时代时, 人们的工作、活动和生存都依赖于信息技术. 当今所有发达国家都把信息技术及信息存储材料列为重点投资或重点发展的科技项目.

信息技术离不开计算机, 计算机的心脏是存储器. 存储器有内存储器和外存储器两大类. 内存储器是一种容量小、速度快的存储器, 安装在主机内部, 与运算器和控制器直接联系, 主要用来进行运算. 另一类存储器为外存储器, 其容量较大, 用它来存储数据和程序, 需要时和内存储器交换数据并存储计算结果. 外存储器的容量愈大, 存放的原始数据, 中间结果和操作程序越多, 计算机的功能也越多. 目前常用的内存储器是半导体存储器, 外存储器是磁盘机、磁带机等. 本文所要论述的磁存储材料, 主要指这些在磁盘、磁带或磁光盘上的记录信息的材料.

## 一、未来的存储器

首先, 我们来看一下未来的计算机(以微机为例)对外存储器有什么要求. 这样, 我们才能把握住什么是将用在外存储器中的新型的磁存储材料<sup>[1]</sup>.

### 1. 未来的微机

随着信息技术日愈发展, 对信息存储提出愈来愈高的要求, 这主要是指存储器应具有超高的存储密度, 大的存储容量, 联机后具有极高的数据率和信息处理能力, 当然还应该价格低廉. 作为内存储器的半导体存储器的存储密度, 物理

近年来, 每年以成百倍的速度增长, 芯片的尺寸也每年成十倍地增长. 根据这一发展速度可以预测, 到本世纪末以个人用计算机(PC机)为例, 将会有1G字节容量和数据处理能力为每秒100M指令的半导体存储器出现.

### 2. 未来的磁盘驱动器

作为本世纪末的PC机应至少具有10G字节容量和每秒100M指令的数据处理能力的磁盘存储器. 这10G字节的容量大约相当于五千本四百页的图书. 目前在5.25in的高密软盘上, 还只能存一本四百页的书. 若我们考虑一个3.5in的磁盘驱动器, 其性能满足这样的要求的话, 它必须要采用八个3.5in的双面盘组. 记录介质的位密度和道密度需分别达到每英寸125000位和7000道, 并且能同时读所有的盘面以及在一个磁盘面上能应用多道头.

目前, 这样高水平的磁盘驱动器尚不能实现. 要实现这样的指标与目前的水平相比, 在位密度及道密度方面都需提高约5倍, 同时还要求盘片的转速有所增加以实现高的数据处理能力.

为了提高位密度, 要求记录介质减薄, 使矫顽力增加以克服相邻信息记录位的互退磁效应. 同时, 磁头也需要有更高的饱和磁化强度, 以保证能可靠的存入和读出信息. 目前在采用溅射法或真空蒸镀法制得的薄膜记录介质上已获得2kOe的矫顽力. 然而目前尚缺少对此类膜

1) 国家自然科学基金资助项目; 中国科学院重大项目.

的噪声机制的研究.此外,为了实现这样高的记录密度,还将要求工作时的磁头和盘片的距离保持在约 $0.05\mu\text{m}$ ,以有足够的读出信号幅度.最后还要求记录介质层的表面特别平整、耐磨.提高道密度至每英寸7000道的主要问题是寻道.寻道信号可以由数据本身或如磁光盘那样,利用一些记录在介质上的预格式化信息来得到.

当位密度和道密度增加时,信噪比会降低.为了解决这一问题,需进一步采用有效的纠错码和改进信息处理码.存取时间,在最近不大可能取得突破性进展.存取时间包括二部分:找道时间和等待时间.增加盘的转速,将减小磁头等待时间.减小找道距离(即盘的小型化),加大转速,可减小找道时间.因此,平均存取时间为 $10\text{ms}$ 是有可能的.总之,磁盘驱动器有可能实现 $10\text{G}$ 字节或更高的存储容量,其前提就是上述问题必须得到解决.

实现超高密度磁记录的另一方案是改变磁记录模式,即由传统的纵向记录变至垂直记录.此时记录介质内的磁化矢量由纵向记录时躺在介质面内变为垂直于介质表面.这一点将在后面加以详细讨论.

### 3. 未来的磁光盘驱动器

在叙述磁光盘驱动器前先介绍一下磁光盘的工作原理.

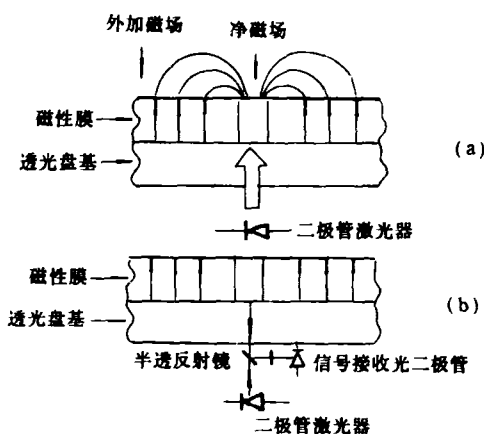


图1 可擦重写磁光存储介质的信息存入, 读出原理图

图1是磁光信息存储的原理示意图.其中(a)表

示信息如何写入,(b)是存入信息后怎样读出.在图1(a)中,当二极管激光器产生一束一定功率的激光,通过透明的盘基聚焦到记录介质上时(通常被激光束辐照的区域的直径在 $1\mu\text{m}$ 以下),被辐照区域的温度可升至记录介质的磁抵消点或居里点.若图1(a)中箭头朝上表示存入“1”信号.为了存入“0”信号,只要在记录介质上向下施加一个强度大于记录介质受热时矫顽力的合适外磁场,当激光脉冲过后,该小区域的磁矩就朝下取向,存入了“0”信号.实际操作时,由存入信息调制的激光脉冲聚焦在光盘的循环数据道上,并借助于外磁场,实现信息的热磁写入.读出信息时,平面偏振光的激光束[如图1(b)中所示]被聚焦到需要读出的微小区域上.由于相反取向的磁化矢量使反射平面偏振光的偏振面有不同的转向,所以经过半透射镜的反射光经检偏振棱镜后,在光二极管检测器上识别出被存入信号是“1”还“0”.上述过程可以简单地概括为:利用热磁效应并借助于外磁场实现信息的写入,利用克尔磁光效应读出信息.

信息可擦重写的磁光盘存储材料是由美国国际商用计算机公司(IBM)的几位科学家首先发现的<sup>[2]</sup>.经过了长期的开发研究,终于在1990年底有了磁光盘驱动器和 $5.25\text{in}$ 磁光盘的销售(目前已有 $3.5\text{in}$ 盘出售).在一张 $5.25\text{in}$ 的磁光盘上目前能提供的信息容量为 $1\text{G}$ 字节,约相当于目前的1000张软盘.新近,索尼公司又推出了用于高质量(数字式)录放音乐的Mini Disc. $6\text{cm}$ 直径盘可录放74分钟节目并可反复录制.

磁光盘驱动器预计在本世纪末时可提供 $10\text{G}$  bit的存储容量.为了实现这一目标需采取短波长激光器,采用区域位记录,以及使道间距窄化,信号处理模式等方面也必须加以改进.数据率的提高将是一个十分重要的问题,尤其是如何实现减轻光头阵列的重量更为关键.在一张 $3.5\text{in}$ 盘上达到 $10\text{G}$ 字节的磁光盘驱动器要求使用八个光头的阵列,光盘旋转每分钟五千次.存储介质的位记录密度为 $115500\text{bit}/\text{in}$ , $0.33\mu\text{m}$ 道宽,道间隔为 $0.07\mu\text{m}$ .

这样,10G字节的存储容量有可能在一张具有两面的3.5in磁光盘上实现.这一容量大概为今天磁光盘容量的20多倍(见图2).

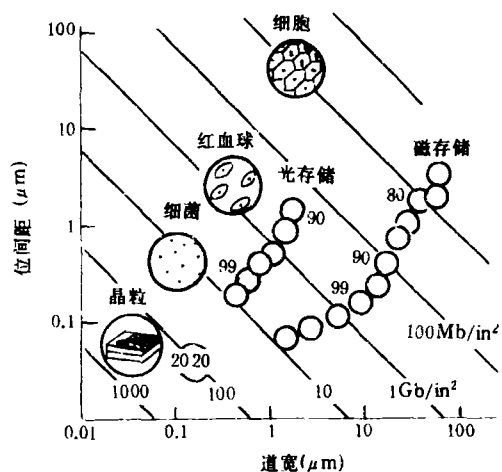


图2 存储密度提高的发展趋势

激光束斑(记录信息位)的尺寸近似地表达为,  $d \sim 0.5\lambda/NA$ . 其中  $\lambda$  是激光的波长,  $NA$  是物镜的数值孔径. 所以, 采用短波长的激光器以使每一信息位所占尺寸从目前的  $0.8\mu\text{m}$  减至  $0.4\mu\text{m}$ ; 增大数值孔径从目前的  $0.5$  增加到  $0.65$  将使记录密度增加数倍. 此外, 增加道密度还可以增加近一倍的存储密度. 这是基于这样的考虑: 目前磁光盘盘基都带有预先刻录好沟槽的表面, 它提供了道伺服的信号, 信息通常被记录在沟槽间的埂上. 但是将来在沟和埂上都可以存上信息.

为了使磁光盘驱动器的存取时间能与磁盘存储器相比, 光头必须减轻其重量. 集成光头是一可能的途径. 此外, 减小光头的几何尺寸还能增加存储密度.

目前, 因为光头的几何尺寸较大, 还只能在驱动器上放一个盘. 因此, 虽然磁光盘的存储密度比磁盘的存储密度要大一个量级, 但总的存储容量是不相上下的, 除非用于磁光盘上的光头的几何尺寸减小.

如果磁光盘驱动器在数据率和存取时间方面能与磁盘驱动器相比, 它必须具有小质量的多光式激光头. 若磁光头不能小型化, 磁光盘只能在存储容量上有竞争的能力, 而它的优越性

物理

表现在如软磁盘那样可拆的高密度存储材料盘的应用上. 即使这样, 它也将有广阔的市场. 图2给出了磁盘和磁光盘存储密度的发展. 最后还应说明一下, 磁光存储还有一种新模式. 据美国贝尔实验室等最近报道, 若不采用透镜组成的光头, 而是用传统磁记录和磁光存储混合技术来记录和读出信息, 在磁光记录介质上已实现约  $45\text{G bit/in}^2$  的存储密度, 记录畴的尺寸约为  $600\text{ \AA}$ .

## 二、磁存储材料

### 1. 纵向磁记录

如上所述, 数字磁记录理论和实验表明, 纵向记录模式提高记录密度的主要障碍是退磁场. 即当记录密度提高时, 信息位的尺度愈来愈小. 这样就引起了相邻记录位间的静磁相互作用. 为了减小退磁场的影响, 磁层厚度要减小, 增加矫顽力以抵抗退磁效应. 为了保证有足够的信号幅度读出, 介质和磁头间的距离即飞行高度要减小. 目前涂布盘的介质层厚度已减至  $0.5\mu\text{m}$ , 采用金属连续膜介质可以进一步减小磁层厚度至  $0.05\mu\text{m}$ . 但进一步减薄磁层就会使磁层均匀性下降, 噪声增加, 误码率加大. 据估计, 纵向记录的极限位密度为  $100\text{kbit/in}$ . 目前, 认为最有希望的纵向高密度记录介质是溅射  $\text{CoCrPt/Cr}$  膜, 其中  $\text{Cr}$  是衬底层, 它的矫顽力可高达  $2\text{kOe}$ . 图3给出了环形磁头纵向记录的示意图.

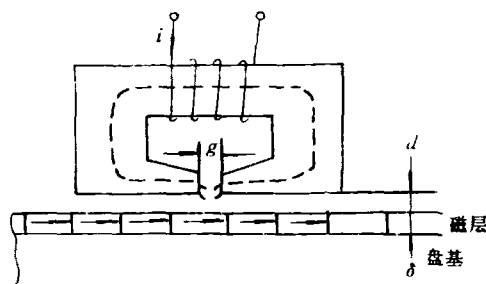


图3 环形磁头纵向磁记录示意

### 2. 垂直磁记录

由于磁层厚度, 磁头浮动高度和磁头缝长

都不能无限减小,所以人们曾认为进一步提高记录密度需要另找途径.70年代中期,日本东北大学岩崎俊一<sup>[3]</sup>提出了垂直磁记录.采用垂直磁记录方式进行记录时,由于退磁场很小,有可能在不减薄磁层的条件下达到高密度记录.理论上预期,垂直记录存储密度将不低于磁光存储的存储密度.

### (1)垂直磁记录原理

简单来说,垂直磁记录是利用磁头磁场的垂直分量,在具有垂直各向异性的记录介质上写入信息,从而在介质上形成垂直于膜面的小磁化区(见图4).在读出信息时,是利用介质记录区表面磁场的垂直分量去感应磁头线圈.垂直记录的磁头不同于纵向记录头,它应有大的垂直磁场,才能对垂直磁化的介质进行磁化.目前用于垂直记录用的磁头已发展成了多种型式,主要的类型有辅助磁极励磁型磁头和主磁极励磁型以及环型头几种.

### (2)垂直磁记录介质

从上面讨论中可以看到,要进行垂直磁记录,磁记录介质必须具有垂直磁各向异性.垂直记录介质主要有钴铬膜(以高磁导率铁镍膜为底层的铁镍-钴铬双层膜)和钕铁氧体膜.制备方法常采用溅射法、真空蒸发或涂布法.

垂直磁记录介质不仅可用于制作硬盘和软盘,也可以用于制作垂直磁记录的磁带.利用钕铁氧体制造的垂直记录磁带其高频特性比传统的颗粒介质涂布磁带优越.用这种磁带进行录象,由于记录密度高,同样一盘磁带,录放时间可以加大一倍.

## 3. 磁光存储

磁光存储从存储原理上与垂直磁记录类似,即以磁化矢量沿法线方向不同的取向的两个磁状态来表示二进位制中的“0”和“1”状态.它们的差别如上所述:磁光存储不用磁头而是用光学头,依靠激光束加外部辅助磁场方法来写入信息,称之为磁性介质的居里点或补偿温度写入法.读出信息则是利用磁光效应.

对磁光存储材料性能的要求大致可归纳如下:(1)具有垂直磁各向异性,即磁化矢量沿着

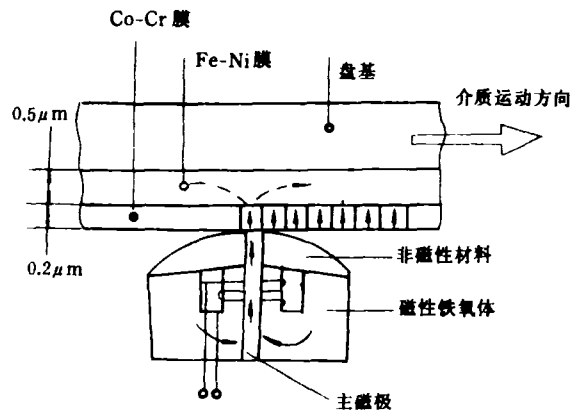


图4 主磁极励磁型垂直磁记录模式

膜面法线方向取向;(2)因为读出信噪比正比于克尔磁光效应的转角和入射光的反射率平方根的乘积(通常定义它为磁光优值),所以材料应具有尽可能大的克尔角;(3)低的居里温度,以便使写入激光功率不致过大并增加写入灵敏度;(4)高的矫顽力有利于得到稳定的写入磁化区域;(5)工艺简便,价格低廉.

目前第一代磁光盘存储材料是非晶稀土-过渡金属合金膜.其中以铽铁钴和钕铽铁三元非晶合金薄膜的性能为最佳.该类非晶合金薄膜,在晶体结构上呈现长程无序的特征,在磁结构上它们是亚铁磁性,即稀土原子钕铽的磁矩和过渡金属铁钴原子的磁矩相反排列取向.磁结构上的这种特征有利于调制成分来得到合适的室温净饱和磁化强度和居里温度,以获得最佳的写入特性参数.该类薄膜的制备通常采用溅射法.

第一代磁光盘存储材料采用非晶态稀土-过渡族合金膜这一点是毫无疑问的.然而,该类材料长期热稳定性差以及磁光优值小,尤其在短波长,由于克尔转角有很大的下降而不够理想.所以,近年来人们纷纷把注意力放在开发第二代具有更优异特性的磁光存储介质上.被研究的材料有石榴石膜,如成分为 $(\text{Dy}, \text{Bi})_3(\text{Fe}, \text{Ga})_5\text{O}_{12}$ 溅射膜,经过高温退火后的晶粒尺寸有可能小于 $0.05\mu\text{m}$ .此外,它们的基本磁性如饱和磁化强度、居里温度、补偿温度都可以通过石榴石结构的三个晶位上的磁性和非磁性离子的相对分布来进行调整.近年来,人们还把极大的

兴趣放在磁性多层膜的磁性和磁光特性的研究上。继 Carcia<sup>[4]</sup>首先在1985年在钯-钴多层膜上测得了很强的垂直膜面磁各向异性后,钯-钴多层膜的研究工作进展很快。结果表明当钴层的厚度为1—2原子层厚,钯的厚度在1—2nm时,钯(钯)-钴多层膜具有很强的垂直膜面各向异性,在800nm波长时,它具有比非晶磁光存储膜稍高的克尔角,同时它的反射率比非晶的高,因而磁光优值比非晶的好。它虽是多晶材料,但晶粒尺寸很细,小于0.01 $\mu\text{m}$ 。尤其是在短波长时,钯-钴多层膜的克尔角明显地比非晶的大,此外,该材料具有优良的抗腐蚀性,然而它的制作成本高,多层膜界面受热而引起原子互扩散所带来的热稳定性差是钯-钴多层膜的问题。然而钯-钴多层膜仍将是与非晶磁光盘存储材料相竞争的一个材料系统。近年来我国科学工作者在掺杂的锰铋合金膜上获得了很大的磁光优值,是一个具有潜在应用价值的材料系统<sup>[5]</sup>。

最后,还应该简单地叙述一下磁泡存储材料及其器件的研究。早在60年代中,美国贝尔实验室 Bobeck 等人首先提出用磁泡实现固体化存储器的设想。磁泡实际上是在磁性单晶膜如外延石榴石薄膜中形成的一种圆柱状的磁畴。在某一位置上有磁泡和没有磁泡是两个稳定的物理状态,可以用来存储二进制位的数字信息。控制磁泡的发生、缩灭、传输就可实现信息的写入、清除和读出。80年代初,日本学者又提出了利用石榴石单晶膜的条状磁畴壁中的垂直布洛赫线来作为信息的载体。这样存储密度会更高。有人估计布洛赫线存储器的理论存储密度极限

也可与磁光存储器的存储密度相比。但此类存储介质需要单晶基片,生长工艺较复杂,成本高,直至目前似乎很少有人把它作为未来的计算机外存储器来讨论过。但是,它具有工作可靠,能耐恶劣环境的优点,估计在通讯、航天等一些特定的领域能找到它的应用。

在本文结束时还应说明一下,信息存储材料不限于磁性介质。从存储原理来说,任何材料只要能提供二个不同的以物理量表征的状态,而且能转换和检出,都能作为信息记录介质。例如有希望进入商品市场的相变材料光盘,是利用其晶体结构的两种状态:非晶态到晶态或者是由一种结构的非晶态到另一种结构的非晶态的转变来实现信息存储。原理是两种状态对光的反射率不相同。此外,电子俘获材料,利用在低能级上的电子被激发到能量高的能级上,然后跃迁到两个不同低能态能级上所发射出能量的差别来区别两个物理状态,也可进行信息存储。据估算,这一技术若能实现,能得到更高的存储密度。

- [1] M. H. Kryder, *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-25** (1989), 4358.
- [2] P. Chaudhari et al., *IBM J. Res. Dev.*, **11**(1973), 66.
- [3] S. Iwasaki and Y. Nakamura, *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-14**(1987), 438.
- [4] P. F. Carcia et al., *Appl. Phys. Lett.*, **47**(1985), 178.
- [5] Y. J. Wang, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **84**(1990), 39; R. Y. Fang et al., *Journal of the Magnetic Society of Japan*, **15**, Supplement, No. S1(1991), 177.

## 非晶态合金的晶化与纳米晶软磁材料

何开元 周 飞

(东北工学院材料科学与工程系,沈阳 110006)

从非晶态合金的晶化出发,介绍了最近发展起来的新型优质软磁材料——纳米晶软磁合金。其中包含:(1)非晶态合金的晶化概念以及微晶析出对非晶态合金磁性的影响;(2)纳米晶软磁材料的发现及其具有的优良的综合磁性能;(3)分析了该合金优良磁性能的来源,介绍了目前理论上的解释。最后展望了该合金的发展趋势。