

# 磁信息存储技术的回顾与展望\*

韦丹<sup>†</sup>

(清华大学材料科学与工程系 教育部先进材料重点实验室 北京 100084)

**摘要** 文章介绍了磁信息存储技术的发展背景,简述了磁信息存储工业百年来的发展历史,论述了磁信息存储工业中重大的技术进步与物理学、材料学、电子工程学、机械学、计算机学等各个研究领域之间的关系,从而说明高技术工业的发展是多学科共同努力的结果,但应用磁学对于突破磁存储工业发展中的技术瓶颈起到非常核心的作用;文章还讨论了微磁学与磁信息存储技术的发展互相促进的过程,介绍了与磁信息存储技术相关的国际前沿研究进展,并探讨了磁信息存储技术未来的发展有可能对物理学及相关学科的基础研究提出的挑战。

**关键词** 磁信息存储,微磁学,多学科合作,工业技术与基础研究

## Review of magnetic information storage technology

WEI Dan<sup>†</sup>

(Department of Materials Science and Engineering, Key Lab of Advanced Materials, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The background of magnetic information storage technology is first introduced, followed by a brief summary of the 100-year-evolution of the magnetic recording industry. Significant improvements in the technology have been strongly correlated to the advances in physics, material science, electrical engineering, mechanical engineering and computer science, although applied magnetism has been crucial to overcoming the bottleneck in information storage technology. In the third part, it is shown that the development of micromagnetics and information storage technology are strongly correlated. In the last part, new frontiers and future challenges are analyzed with respect to physics and related subjects.

**Key words** magnetic information storage, micromagnetics, multi-subject cooperation, technology and basic research

### 1 磁信息存储技术的发展背景

在近现代 350 多年物理学的发展历史上,物理学不仅起到定量地揭示物质世界的基本运转规律的作用,而且一直是多种工业技术和工程研究的母体来源。物理学的几次突破性的进展,包括牛顿力学、麦克斯韦的电磁学、热力学、相对论和量子物理,都有后续重大的技术应用。铁磁学作为物质研究的一个分支,具有长久的历史,这项研究在科学上导致了电磁学的建立和完善,导致了对自旋的理解和相对论量子力学的建立,以及广泛应用于凝聚态物理理论的海森伯模型的建立;同时在技术上有各种重要的技术应用,例如永磁体对电能和机械能的转换起

关键作用。软磁体在电力运输的枢纽方面起重要作用,各类特殊设计的磁性薄膜和磁性器件使信息与磁矩取向之间可以互相转换。

现代社会的特征之一就是信息的快速流动,并为每个普通人所分享。这种信息的普及,是建立在发达的信息工业的基础上的。庞大的信息工业,可以分为信息的处理(CPU)、信息的存储、信息的传输(通信、网络)、信息的输入输出(打印机、屏幕)这四个

\* 国家自然科学基金重点基金(批准号 50131020)、国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA302103)和教育部优秀青年教师计划资助项目

2003-12-19 收到

<sup>†</sup> E-mail: weidan@mail.tsinghua.edu.cn

部分,每个部分的硬件相对独立,但是为了使一个系统运转,需要这几个部分组合起来。电子化的信息存储,使得信息的快速复制、检索、大量保存、快速处理成为可能。信息存储系统的三个主要评价指标分别是存取速度(access rate)、单位价格(price per bit)、存储容量(storage capacity),这正体现了现代人对信息的基本需求。信息存储可以有三种主要的实现方式:具有最高存取速度的半导体存储(计算机内存、Flash等),价格低廉、携带方便的光存储(光盘、DVD等),以及具有最佳综合性能的磁存储(包括声音记录、图像记录、数据记录三种)。这三种信息存储方式各有自己的适用范围,互相不可替代。

磁存储发展最早,历史最长。目前,磁信息存储系统是全世界铁磁性材料最重要的应用市场,其产值要大于传统的应用于电机等系统的永磁材料和应用于磁芯的软磁材料。随着网络的普及、信息的爆炸性增长,全世界的磁信息存储市场很大,1995年就达到约1000亿美元<sup>[1]</sup>,其中声音记录和图像记录占了约40%的市场,数据记录占了约60%的市场,随着PC的普及,数据记录的市场比例还在增加。磁存储的市场需求包括公共需求(商业、金融业、军事、科学教育、健康卫生、政府部门的信息存储)、娱乐需求(录音、录像、游戏等)、个人信息管理等方面。录音机、录像机、计算机硬盘、软驱以及1951年前使用的磁鼓外存,1977年前使用的计算机磁芯内存等,都是磁信息存储100年来发展历史上的重要技术,并在最近20多年已经反过来对相关基础研究有很大的促进作用。

## 2 磁信息存储技术的百年发展简述

### 2.1 声音记录

1878年,美国人Oberlin Smith参观了爱迪生的实验室,对其中的留声机产生了很大的兴趣。回家以后,他就画了一张设计图,发表在Electrical World杂志上。这张设计图基本体现了后来的磁记录系统的三部分基本结构:存储信息的磁媒体、读写信息的磁头、实现连续数据读写的机械传动系统<sup>[2]</sup>。不过,他本人并没有具体做出实物。1898年,丹麦电信工程师Valdemar Poulsen制造出了第一台可以记录声音的钢丝电话留言机,这是人类历史上第一次利用铁磁性来存储信息。这台机器名叫Telegraphone,样子很像滑线变阻器,也很像爱迪生的留声机的原始模型。他用的存储磁媒体就是钢琴丝,磁头就是一个简单的螺线管。不过,当时磁学才刚刚起步,还没有很

好的铁磁材料,这台机器的声音记录质量比不过留声机,并没有实现工业化生产,只是在巴黎国际博览会上得到了人们的注意。

在历史上第一个取得技术突破和市场突破的是录音机。1931年,德国德累斯顿的一位工程师Fritz Pfleumer发明了“会发声的纸”,实际上就是第一台录音机。他将粉碎的铁磁颗粒用胶水粘在纸条上,作出了第一条磁带,这在当时是一种全新的磁媒体,可以记录20分钟的声音。可惜纸易碎,脆弱的纸条式磁带无法实用化,这个系统还需要改进。1932年,在Pfleumer的专利基础上,德国电信AEG公司和德国三大化学公司之一BASF公司合作建立了磁带实验室。研发团队中的Matthias提出了一种复合材料式的双层磁带模型,底层为30 $\mu\text{m}$ 厚的醋酸纤维素薄膜,上层为20 $\mu\text{m}$ 厚的羧基铁粉末和醋酸纤维素的混合物,从而实现了真正的磁带。1933年,研发团队中一位30岁的工程师Eduard Schueller发明了环形磁头,这是磁记录工业的一个重要进展,从此以后,通过一个窄窄的磁隙,磁场可以被控制在一个很小的范围内,从而实现较高密度的信息存储。由于这个设计的重要性,后来几乎所有的电磁学教科书上都介绍了这个环形磁头的设计。复合磁带(composite tape)、环形磁头(ring head)以及磁带的初始交流消磁(ac erasure)这三项重大技术,使得AEG-BASF团队研发的Magnetophon录音机信噪比超过60dB,取得了很大的成功,也体现了材料学、物理学、化学和电子学结合的强大威力。

### 2.2 图像记录

在声音的磁记录实现以后,由于第二次世界大战结束以后的50年代电视逐渐开始普及,电视台迫切需要能进行图像记录的设备。人耳能听到的声音的信号带宽为20Hz—20kHz,而电视图像是由每秒25或30次的画面构成的,每幅画面由500道线构成,每道线包含几百格信息,因此需要的控制电子枪的信号带宽为30Hz—5MHz,其载体信号的频率自然要求更高。信号的频率是由速度和存储密度决定的,信息上的宽带,意味着磁带和磁头之间的相对速度必须增大,信号存储的密度也得增大,因此图像记录就需要不同于声音记录的设计。

在第二次世界大战中,有一个来自加州的美国空军的工程师John Mullin,在英国听到了当时德国广播中播放的高保真度的音乐,这就是由AEG-BASF研发的Magnetophon录音机播放的。战后,Mullin通过美国军方把两台录音机及其设计图纸运

回了加州旧金山.加州的一家在战时生产飞机用小电机的 Ampex 公司,此时面临没有军方订单的危机.听了 Mullin 带回的录音机播放的音乐,决定复制 Magnetophon 录音机.录音机中的几乎所有机械装置、电机,都是 Ampex 公司熟悉的,只有两个核心部件:磁带和磁头,需要重新研制,以便于大规模生产. Ampex 公司的工程师使用高磁导率的镍铁合金(permalloy)替代了德国人用的环形磁头中的硅钢片,结果取得了更好的录音效果.到 1947 年,复制并改进 Magnetophon 录音机的工作取得了成功, Ampex 公司获得了美国 ABC 广播电视网的订单,此后一举打开了录音机的市场.录音技术的成熟,使得广播电台运行成本下降,广播由此成为普通人生活的一部分.

此后,在 1948 年,Jack Mullin 就考虑是否能做出录像机.在 20 世纪 50 年代初,固定磁头的录像机在美国和英国的多家公司的参与下做了出来.不过,由于图像信号需要的带宽为 MHz 的量级,录像磁带必须飞快地运行,这样磁带就需要非常长,很不方便.1955 年, Ampex 的一个工程师 Ray Dolby 想到可以使用快速转动的磁头,并在磁带上横向扫描,这样来解决磁头和磁带之间需要很大的相对速度的问题.这个发明后来被称为鼓形磁头(drum head),圆筒边上每隔 90 度嵌入一个磁头,所以也被称为四磁头(quadruplex head). Ampex 的工程师使用铝铁合金 Alfenol(16% Al, 84% Fe)作为磁头材料,比镍铁坡莫合金的抗磨损能力提高四倍.这个鼓形磁头的自转速度为 240rps,从而使录像带和磁头之间的相对速度达到 1500in/s,能实现 6MHz 图像记录所需的带宽.1956 年, Ampex 请了当时各大广播公司 CBS, ABC, BBC 的代表来参观做好的录像机,图像非常清晰漂亮,大获成功.

录像机系统的最重要的两个核心部件:录像带和磁头,后来也不断进行更新.1956 年,与 Ampex 的四磁头录像机配合的录像带,由杜邦公司和 3M 公司合作研发.杜邦公司生产的聚乙烯对苯二酸盐作为录像带的基底;3M 公司生产的  $1\mu\text{m}$  长的  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  针形颗粒,大致沿着磁带的横向排列,构成磁记录媒体,这种录像带可以播放 100 次.后来 3M 公司又不断研发出信噪比更高的录像磁带,并一直是美国颗粒磁记录媒体的主要厂家.到了 1964 年, Ampex 公司的 Fred Pfoest 使用一种新的合金 Sendust(也叫 Alfesil, 5% Al, 10% Si, 85% Fe)代替原来的铝铁合金 Alfenol 做录像机磁头,使得磁头的使用寿命

延长到几百个小时.在这种复合录像磁头中,磁头缝隙中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{SiO}_2$  薄膜是使用溅射的方法制备的,这也是薄膜溅射的方法比较早期的工业应用.录像技术的完善,使得电视录像带成了电影胶片以外第二种存储图像信号的介质.录像带的大量使用使电视台的运行成本下降,电视台逐渐普及,播放时间变长,在 60 年代已经使得电视进入寻常百姓家,并影响到美国的大选进程.

### 2.3 数据记录

磁信息存储在声音记录和图像记录方面的成功,自然促使这种技术在其他形式的信息存储方面的应用.一般其他形式的信息,都是以数据的形式出现的,统称为数据记录.早期的电子计算机,每一个新的应用程序,都需要重新设计硬件与之配合.1950 年以后, John von Neumann 提出的程序数字计算机的概念改变了计算机的基本结构,计算机包括一个简单而强大的处理器、一个程序和数据的存储区、一个控制器、一个输入输出设备共四个部分.计算机变得更容易使用了,硬件和软件变得相对独立,同时对数据存储提出了很高的要求.除了在计算机方面的应用,军事上的飞机和火箭的飞行数据(包括引擎温度、油压、电子系统电压、电流等)的记录、银行和金融业每天的业务数据的记录,都急需进行不易丢失的数据存储.这样,在录音、录像系统的基础上,开发磁数据存储系统就变得刻不容缓了.

在 20 世纪 40 年代,美国的数据都是用打孔机记录在数据纸上的.实际上在中国,这种技术到五六十年代进行“两弹一星”项目的时候还在使用.1947—1948 年,美国军方在德国的 Magnetophon 录音机技术的基础上,研发了磁鼓数据记录系统(drum recorder),进行比较快速的数据存储.在 40 年代,国际商用机器公司(IBM)一直在做打孔式纸带的计算器,并有广泛的客户.到了 40 年代后期,IBM 开始认识到磁存储的重要性,购买了由 Remington Rand 公司制造的美国第一台数据磁带机 Univac 系统.1951 年,IBM 在 Univac 基础上开发出 720 磁带机,其中使用了类似于德国 Magnetophon 的醋酸纤维素-铁氧体颗粒磁带作为数据记录媒体,另外,一个特殊设计的数据格式为不回零反转格式(non-return-to-zero inverse,缩写为 NRZI),磁头中的电流在 +1 和 -1 之间跃变,其中每次反转对应为二进制数 1,否则为 0)提高了数据存储密度.这台磁带机的数据传输速率为 7500bit/s,比打孔的纸带机快,但是仍然跟不上计算机需要的数据速率.虽然如

此,磁带数据存储还是由此成为了计算机的外存之一。

1957年,IBM推出了革命性的随机存取计算和控制方法(random access method of accounting and control, RAMAC) IBM 350 计算机硬盘。硬盘的基底是1mm多厚的铝合金圆盘,表面用 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 针形颗粒混在油漆中,用旋转涂覆(spin-coating)方法制备磁记录层。硬盘的机械结构与鼓形数据磁带机类似,新设计了一个喷气旋转轴承和磁头-磁盘之间的空气间隙(air bearing),磁头在硬盘上的飞行速度很快,实现了 $2\text{kbit}/\text{in}^2$ 的数据记录面密度。到1997年,计算机硬盘的密度达到了 $2.6\text{Gbit}/\text{in}^2$ ,40年之内,面密度大约每两年翻一番,一共增长了一千多万倍,堪称奇迹。在计算机硬盘40多年的发展历史中,有几项技术起了关键性的作用,其中包括薄膜写磁头、磁阻和巨磁阻读磁头,高矫顽力的薄膜硬盘,以及部分响应最大相似(partial response maximum likelihood, PRML)信号处理系统,其中多项技术与凝聚态物理和材料科学的发展有很大的关系。

1979年,薄膜感应磁头(thin film inductive head)开始在IBM 3370硬盘中使用。薄膜磁头的制备,使用了半导体集成电路工业中通用的光刻技术,可以将磁头的尺度,尤其是磁隙的宽度进行精密的控制。薄膜磁头的第一层是Ni-Fe软磁层,作为磁头的一个磁极,然后覆盖一层薄薄的绝缘材料,在其上制备控制电流的8匝铜导线,在铜导线上再覆盖一层绝缘材料,最后是另一个软磁磁极。一系列薄膜磁头是在一个 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ 陶瓷晶片上同时进行物理沉积的,切割以后就得到一系列硬盘中使用的磁头滑块,有很好的工业效率。薄膜磁头的发明,使得计算机硬盘的数据记录面密度达到了 $7.7\text{Mb}/\text{in}^2$ 。

磁阻效应在1856年就为物理学家开尔文爵士所知。1971年,Ampex公司的Robert Hunt制造出了第一个磁阻磁头(MR Head),代替传统的环形磁头进行信号的读出,这样能解决在记录密度增高、磁头尺度减小的情况下,感应式磁头的信号不断按比例下降的难题。磁阻磁头的核心部分,是一个磁矩被调节到适当方向的Ni-Fe软磁薄膜,在存储数据的硬盘上飞过的时候,数据1对应的磁场较大,软磁薄膜中的磁矩随之转动,导致薄膜电阻和读出电压随之改变,信号就被读出了。磁阻磁头的读出灵敏度,要大大高于感应式薄膜磁头,后来,一般把磁阻磁头和薄膜磁头做在一起,成为一个读写复合磁头。Ampex公司就在斯坦福大学的北面,是个典型的硅谷中小

公司,他们在声音、图像信息存储技术中的多项创新,是很多硅谷高科技公司的成功创意的缩影。

在1985年和1991年,IBM分别在数据磁带系统和计算机硬盘系统中使用了磁阻磁头。使用了磁阻磁头以后,1991年的IBM Corsair硬盘,存储面密度达到了 $90\text{Mb}/\text{in}^2$ ,总存储容量达到了1GB。1986年,金属多层薄膜Fe/Cr/Fe的巨磁阻效应被德国物理学家Grunberg P发现,同时受到科学界和工业界的重视。到了1996年,在计算机硬盘中,巨磁阻多层膜代替了一般的磁阻薄膜,大幅度提高了感应磁场信号的灵敏度,使得巨磁阻磁头(GMR Head)成为了读磁头,数据记录面密度由此超过了 $1\text{Gb}/\text{in}^2$ 。

记录信息的硬盘磁媒体,与磁头总是协同进步的。硬盘的基底是机械性能很好的Al-Mg合金,在其上有一个 $10\mu\text{m}$ 厚的NiP层,这个很硬的NiP层可以用化学法减薄至 $5\mu\text{m}$ ,最后可以使得表面变得非常完美而平整。然后,在NiP层上溅射几十纳米厚的Cr底层,在其上再溅射10nm到几十纳米厚的Co-Cr合金磁记录层。根据金属物理的基本原理,Cr底层的表面织构决定了具有六角结构的Co-Cr合金原胞的取向(到目前为止,绝大多数硬盘中的磁薄膜的磁矩都是水平取向的),从而可以控制自发磁化的取向,以及纳米磁颗粒之间的交换相互作用,这样Co-Cr合金薄膜层的水平矫顽力可以达到 $3000\text{Oe}$ ( $1\text{Oe}=79.5775\text{A}/\text{m}$ )以上,可以实现超高密度的磁记录<sup>[3]</sup>。二进制的信号存储要求每个比特中的信息尽量独立,互不干扰。高矫顽力之所以对于高密度数据存储有利,是因为相邻比特之间的静磁相互作用正比于 $M_s/H_c$ ,所以,目前最好的硬盘薄膜,在能读出信号的前提下,尽量减小薄膜的饱和磁化强度,增大矫顽力。在钴合金的薄膜上面,一般还需要溅射10nm左右的类金刚石碳薄膜,保护磁记录媒体。为了减小磁头和硬盘之间摩擦,由化学家研究出来的2—3nm的高分子润滑层要涂覆在类金刚石层表面,最终完成硬盘的结构。

到2003年,计算机硬盘在实验室中的存储密度已经超过了 $100\text{Gb}/\text{in}^2$ ,也就是说,硬盘薄膜中每一位二进制数对应的一个比特占有的面积小于 $80\text{nm}$ 见方的尺度(实际上比特长度小而磁道宽度大,单个比特的形状为长方体)。为了实现这么小的尺度,必须在磁存储介质的制备、纳米磁头器件的制备、微磁学理论、信号处理、摩擦学等诸领域有强大的基础研究综合能力,互相配合,才能实现目前的磁信息存储技术。下面仅就微磁学理论方面做一个回顾,讨论

一下基础研究与工业技术发展的关系。

### 3 磁信息存储理论——由磁学到微磁学

铁磁性材料的研究历史悠久,不过一般认为,磁学是在19世纪末居里和朗之万的对磁性的研究工作以后才正式建立。1907年,外斯提出的铁磁体的分子场理论,也能解释铁磁体磁化率的居里-外斯定律。20世纪初,物理学产生了以相对论、量子物理为代表的巨大进步,对物理学的各个方面都有深远的影响。1927年,泡利等人从电子在电磁场中的相对论性的总能量表达式出发,解释了朗之万提出的“永久磁子”的根源,指出永久磁子从微观的角度说就是原子、离子的磁矩。1929年,海森伯在建立了量子力学的矩阵表象以后,转而研究外斯分子场的微观来源,他认为两个原子之间的电子波函数的成键态和反键态的能量差,提供了原子磁矩之间的铁磁或反铁磁交换相互作用。这个理论从定性上可以解释自发磁化,但是定量上还只能解释强大的外斯分子场的一个小部分。所以,铁磁性的定量解释,到现在还是物理学没有完全解决的问题之一。

由于铁磁性材料在工业应用中的重要性(最重要的传统材料钢材也具有铁磁性),虽然铁磁性的定量解释没有完全解决,但对铁磁性的理论需求却越来越强。1935年,苏联物理学家朗道和栗夫希茨提出了一个重要的非线性运动方程,即Landau-Lifshitz方程,以解释磁矩在外加磁场中的运动<sup>[4]</sup>。1938年,还在美国哥伦比亚大学读博士、研究钢铁的力学问题的布朗(William Fuller Brown Jr.)看到了朗道和栗夫希茨提出的铁磁性研究方法,大感兴趣,他意识到这是现代磁畴理论的基础,也是后来微磁学理论的基础之一。1948年,英国的Stoner和Wohlfarth两位解出了单磁畴颗粒在均匀反转的情况下的磁滞回线,后来被称为Stoner-Wohlfarth模型<sup>[5]</sup>,这是微磁学理论的另一基础。

从30年代到40年代,布朗在美国多个机构工作,包括普林斯顿大学、美国海军实验室(U. S. Naval Ordnance Lab,简称NOL)、石油公司的研发部等。在此期间,布朗试图用近似的方法来求解Landau-Lifshitz这个三维非线性方程,在没有计算机协助的情况下,他在解释接近饱和的磁滞回线方面取得了很好的结果。在NOL期间,他在铁磁性的解释和测量方面训练了大量的人才,并对当时美国军方的磁鼓数据记录系统的研发起了推动作用。1955

年,他开始在明尼苏达州的3M公司工作,3M公司参与录音和录像磁带的研发,磁记录需要单磁畴颗粒,所以在此期间他的主要兴趣是研究单磁畴颗粒出现的条件,以及磁畴的钉扎对铁磁性的影响。1958年,布朗在美国一个国内会议上,做了一个题为“Micromagnetics: Successor to Domain Theory?”的报告,第一次提出了微磁学的名词和概念,也就是说,避开铁磁性自发磁化的难题,将铁磁体内部划分为微小的单磁畴单元,分别研究每个单元的磁矩的运动规律,以更好地理解铁磁体的基本性质<sup>[6]</sup>。

在20世纪60—70年代以后,随着电子计算机对非线性方程求解能力的提高,布朗提出的微磁学方法被硅谷的研发工程师接受,逐渐用到了磁信息存储工业中,并对尺度越来越小的各种磁记录介质和磁头的研究,起到了非常重要的作用,微磁学融入了磁信息存储工业设计的基本理论,形成了自己的体系<sup>[7]</sup>。对于磁带等比较厚的磁存储介质,在磁带的纵截面中,可以建立一个二维的微磁学模型,在模拟环形磁头场的写入过程时,可以将深入磁带纵深处各个微元的磁矩分布及其随时间的演变计算出来,从而计算出读出信号的大小、信号反复写入的噪音特性等问题<sup>[8]</sup>。计算机硬盘的薄膜磁介质中的存储数据比特中的磁矩分布问题,也在80年代末用微磁学的方法得到了解决<sup>[9]</sup>,从而促进了计算机硬盘循着类似集成电路发展中Moore定律的规则不断进步。

由于微磁学对于应用磁学研究的重要性,到80年代,美国大学里的磁学研究开始普遍接受微磁学为磁学理论的主流这一观点。到了2000年以后,微磁学已经被工业界以及凝聚态物理-材料科学界的人士广泛接受,成为具有指导铁磁性相关的工业器件设计及铁磁性研究的基础理论。微磁学后期的发展历程,有点类似于19世纪热力学理论的发展,都是工业中有重要应用的问题的研究,反过来推动了科学的进步。

### 4 磁信息存储技术的未来发展与基础研究

目前,磁信息存储系统的演进又到了一个新的关口。首先,由于计算机网络的迅速普及,数据记录已经变成最重要的磁信息存储的方式,实际上美国在20世纪90年代几乎放弃了传统的录音和录像媒体的生产,试图完全用数字化的硬盘来实现所有的磁信息存储。多数数据记录是用计算机硬盘来进行

的。自1957年IBM发明计算机硬盘以来,计算机硬盘一直循着内部磁存储比特的尺度及磁头的尺度逐渐按比例缩小的方式( scaling law )不断演进,当然中间为了克服比特很小带来的读取信息的问题,加入了MR和GMR磁头。可是,目前计算机硬盘的数据存储面密度已经到了 $100\text{ Gb/in}^2$ ,原来的按比例缩小的渐进硬盘设计方式,遇到了最后的物理极限,也就是单磁畴的铁磁晶粒的磁矩热稳定性问题<sup>[10]</sup>。当颗粒体积太小的时候,铁磁晶粒的自发磁化能量与热扰动能 $k_B T$ 的比值小于100以后,单磁畴晶粒的磁矩有可能随时间发生自发反转,这就叫做铁磁体的超顺磁性。在这个区域内,存在硬盘比特中的信息就不可靠了,时间长了会丢失。

由于遇到了上述这个物理瓶颈,40多年来在磁信息存储技术领域一直领先的IBM公司在2002年遭遇到危机,已将其硬盘部门卖给了日本的Hitachi(日立)公司。为了继续提高数据存储密度,磁存储的方式要有大的转变,需要投入巨额的资金在硬盘系统的各个方面重新进行研发,存储信息的磁介质和磁头,都需要做非常剧烈的改变<sup>[11]</sup>。目前,美国和日本的各个公司,包括Seagate和Hitachi,在投入巨资直接研究 $100\text{ Gb/in}^2$ — $1\text{ Tb/in}^2$ 的磁信息存储系统,也就是每个比特必须达到 $80\text{ nm} \times 80\text{ nm}$ — $25\text{ nm} \times 25\text{ nm}$ 这样小尺度。水平记录CoCr合金薄膜的铁磁颗粒,为了保持热稳定性,直径不能小于 $8\text{ nm}$ ,每个比特必须有100—200个左右的晶粒以实现30bB左右的信噪比。未来的磁存储薄膜介质可以朝几个方向发展(1)每个比特只能有一个单磁畴的磁颗粒,互相间隔一定的距离,这就是新的“图形媒体”( patterned magnetic media )的设想<sup>[12—14]</sup>。(2)在极高的记录密度下,纳米晶粒的直径要小于其高度。此时磁矩垂直于薄膜表面的垂直磁记录方式,要比传统的水平磁启示方式中晶粒之间的静磁相互作用小,因此噪音就低。如果加大单个纳米晶粒的磁晶各向异性场以克服超顺磁性,并且将之严格控制在垂直方向, $8\text{ nm}$ 以下晶粒尺度的垂直记录薄膜介质也许是未来计算机硬盘磁存储介质的一个解决方案。上述两个方案都还有很多很多的问题,要达到磁信息存储系统要求的高数据传输率、低单位价格、高存储容量这三个基本要求,还有很长的路要走。不过,这正是需要做很多基础研究的时候,以面对这样的挑战。

从磁头的角度来说,从1933年德国AEG—BASF公司的Eduard Schueller发明了环形磁头,到

现在已经有70年的历史了。后来在计算机硬盘中使用的薄膜写磁头一直是这个环形磁头的缩小版和拓扑变形体,物理原理没有改变。如今,如果为了配合新的 $100\text{ Gb/in}^2$ — $1\text{ Tb/in}^2$ 的垂直记录方式,需要全新的磁头设计,这个磁头的磁极尖部分也得达到纳米这样的尺度。目前半导体光刻的方法,线宽只能达到 $90\text{ nm}$ (工业化生产的最先进的水平),那么强烈地依赖于半导体工艺的磁头生产,就会产生严重的问题。这也是另一个对于物理学家、材料学家以及工业界人士的挑战。还有,驱动磁头和磁介质之间做快速相对运动的机械转动系统,是实现硬盘比较快速的数据传输率的关键。如何保持这个机械系统的优点,又能运用到新的 $100\text{ Gbit/in}^2$ — $1\text{ Tbit/in}^2$ 的系统中去,这是对机械、电子和自动控制研究领域的一个挑战。<sup>[15]</sup>

由本文前面对磁信息存储工业和基础研究的回顾可以看到,磁信息存储技术是一项集中了多学科的基础科学研究进展的不断发展的技术。我国如果要在这一领域取得一席之地,必须集中物理学、电子学、材料学、化学、电磁器件设计、微电子工艺、机械、自动化等各个领域的专家,一起进行基础研究和技术研发,才有希望。单独的一个学科独自取得突破是不可能的。没有成熟的磁信息存储的基础研究,我国的磁信息存储核心技术就不可能发展起来。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Simonds J L. *Physics Today*, 1995( 4 ) : 26
- [ 2 ] Daniel E D, Mee C D, Clark M H eds. *Magnetic Recording—The First 100 Years*. New York : IEEE Press, 1999
- [ 3 ] Gerber R, Wright C D, Asti G eds. *Applied Magnetism*. Kluwer : Kluwer Academic Publishers, 1992
- [ 4 ] Landau L D, Lifshitz E. *Phys. Z. Sowjetunion*, 1935( 8 ) : 153 ; Landau L D. *Collected Works*. London : Pergamon Press, 1965, No. 18
- [ 5 ] Stoner E C, Wohlfarth E P. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1948, A240 : 599
- [ 6 ] Brown Jr. W F. *J. Appl. Phys.*, 1978, 49 : 1937
- [ 7 ] Bertram H N. *Theory of Magnetic Recording*. Cambridge : Cambridge University Press, 1994
- [ 8 ] Beardsley I A. *IEEE Trans. Magn.*, 1986, Mag-22( 5 ) : 454
- [ 9 ] Zhu J G, Bertram H N. *J. Appl. Phys.*, 1988, 63 : 3248
- [ 10 ] Qin J, Wei D. *IEICE Trans. on Electronics*, 2003, E86-C( 9 ) : 1825
- [ 11 ] Wood R. *IEEE Trans. Magn.*, 2000, 36( 1 ) : 36
- [ 12 ] White R L, New R M H, Pease R F W. *IEEE Trans. Magn.*, 1997, 33 : 990
- [ 13 ] Ouchi K, Honda N. *IEEE Trans. Magn.*, 2000, 36( 1 ) : 16
- [ 14 ] Wei D. *IEICE Trans. on Electronics*, 2002, E85-C( 10 ) : 1756
- [ 15 ] Thompson D A, Best J S. *IBM J. Res. Develop.*, 2000, Vol. 44, No3