

方兴未艾的磁头材料——巨磁电阻自旋阀材料

张博洋 高凤菊 张云鹏

提起计算机的硬盘驱动器,大家一定都非常熟悉。可是硬盘驱动器是如何进行工作的呢?现在的硬盘驱动器,体积逐渐变小,而面记录密度和读取速度却在迅速增大,这又是如何实现的呢?其中的原因与本文介绍的巨磁电阻自旋阀材料的发展有着非常密切的关系。

硬盘驱动器的工作原理其实并不复杂。硬盘驱动器由磁头、磁记录介质以及配套接口电路和辅助系统构成,在磁记录(称为写入)过程中,首先将声音、图像、数字等信息转变为电信号,电流通过磁头转变为记录磁场,然后用这个磁场磁化磁记录介质(磁盘),磁信号就保存(记录)在磁盘中了。需要读取磁盘信息时,只要使记录介质的磁信息通过磁头转化成电信号,再将电信号转变为声音(类似电话)、图像(类似电视)或数字(类似计算机),从而再现被记录的信息。因此,要想提高硬盘容量、又不增大硬盘体积,就要求增大磁盘的面记录密度。随着面记录密度的不断提高,每记录位的记录面积越来越小,所记录信息的读出信号强度也就越来越弱,于是就必然要求提高磁头的分辨率,而且也只有提高磁头的分辨率,磁盘记录密度的提高才有实际意义。

巨磁电阻(GMR)自旋阀材料的出现及发展,大大提高了磁头的分辨能力。1998年利用它制成的GMR磁头的读取功率比当时主流的MR(磁电阻)磁头高2~5倍。最初曾以为利用这种优势,能和过去一样使硬盘驱动器面记录密度的增长率维持在每年60%。然而投入使用后发现,年增长率竟达到令人吃惊的100%。到目前为止,GMR自旋阀材料仍是磁头的主流材料,这种材料为什么会有如此大的发展?它的研发过程使我们不得不感叹科学传承性和它对技术产生的深远影响。

1986年德国的格伦伯格(Grunberg)首先在Fe/Cr/Fe多层膜中观察到反铁磁层间耦合(即在常温无外加磁场的情况下,同一Fe层的磁矩沿相同方向排列,两个Fe层的磁矩排列方向相反)。这种薄膜一般处于高电阻状态,因为传导电子有两种自旋取向,每种取向的电子容易穿过磁矩排列和自身自旋方向相同的那个膜层,而在通过磁矩排列和自身自

旋方向相反的那个膜层时会受到强烈的散射作用,即没有哪种自旋状态的电子可以穿越两个磁性层,这在宏观上就产生了高电阻状态,如图1(a)所示。

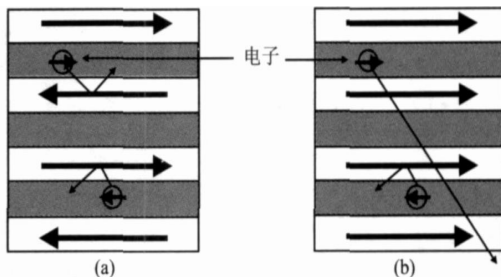


图1 巨磁电阻效应原理示意图

1988年法国巴黎大学的佛特(Fert)教授研究组在[Fe/Cr]周期性多层膜中发现了巨磁电阻效应,在国际上引起很大反响。这种薄膜在温度为4.2K、外加磁场为20000奥斯特时,可克服反铁磁层间耦合,使相邻Fe层磁矩方向平行排列。这样在传导电子中,自旋方向与磁矩取向相同的那一半电子可以很容易地穿过许多磁层而只受到微弱的散射作用,而另一半自旋方向与磁矩取向相反的电子则在每一磁层都受到强烈的散射作用,所以有一半传导电子存在一个低电阻通道,在宏观上多层膜处于低电阻状态,如图1(b)所示。经过研究组测量,这种材料的磁电阻变化率达50%。像这样在一定磁场下材料的电阻急剧减小,一般的减小幅度比通常磁性金属与合金材料的磁电阻数值约高10余倍的现象,称为巨磁电阻效应。

但是这种材料只有在低温和高磁场下才产生显著的电阻变化,如果能够找到一种材料,在室温和低磁场下就能产生巨磁电阻效应,而且可以比较方便地制备出来,再将其用作磁头材料,虽然来自磁记录介质上的信号强度很弱,却也能被它轻易探测到,从而大幅提高磁头的分辨率。这是因为,磁头都是根据磁性材料在一定磁场下电阻会发生变化这一磁电阻现象而工作的。读取信号时,电流持续流经磁头,随着记录在磁盘上的磁信号的改变,磁头电阻就会随之发生变化,这样通过检测磁头电阻的变化就可得到反映磁记录位信息的电信号,进而还原为声音、图像等各种被记录信息。

由于当时的磁头材料在磁场变化时,电阻变化

并不特别显著, 这样如果要得到合适的电阻变化, 就要求磁记录位的面积较大(提供大的磁场变化), 否则虽然磁盘上磁场变化了, 可是磁头的电阻却没有明显变化, 被记录的信息也不能再现。然而, 如果我们把巨磁电阻材料应用在磁头上, 情况就不一样了。由于这种材料的电阻随磁场变化特别显著, 微弱的磁场改变就可使电阻发生巨大变化, 我们就可考虑缩小单个磁记录位的面积, 即提高硬盘的面记录密度, 从另一个角度看, 磁头分辨率也就获得了大幅提升。那么, 这种材料能不能被研制出来呢? 后来的发展正如我们所期望的。

1989年毕那斯基(Binasch)等人在室温下的(Fe25.0nm)/(Cr1.0nm)/(Fe25.0nm)三明治结构上观察到GMR现象, 首先突破了温度对GMR现象的限制。紧接着美国IBM公司的帕金(S. P. Parkin)在1990年采用十分普遍的磁控溅射设备, 成功制备了多晶的[Fe/Cr]周期性多层膜和[Co/Ru]周期性多层膜, 并观察到GMR现象和层间耦合振荡。后来他又成功制备了[Co/Cu]多层膜, 在300K(室温)时即可产生GMR现象, 且具有很好的热稳定性。由于制备设备的普遍性, 更多的科学家开始涉足该领域, 极大促进了GMR多层膜的研究工作。

1991年, IBM公司的戴尼(B. Dieny)独辟蹊径, 提出铁磁层/隔离层/铁磁层/反铁磁层结构, 并首先在NiFe/Cu/NiFe/FeMn多层膜中发现了低饱和场GMR效应, 从而打破了磁场条件对GMR材料应用的束缚。这种结构的多层膜利用电子的自旋特性, 像阀门一样限制电子的移动, 因而被命名为自旋阀(spin valve)。相对于以前研究的GMR多层膜, 自旋阀具有很多独特优点: 工作磁场小, 磁电阻变化率 $\Delta R/R$ 对外磁场的响应呈线性关系、频率特性好, 电阻随磁场变化迅速、灵敏度高, 利用层间转动磁化过程能有效抑制巴克豪森(Barkhausen)噪声等。因此, 它率先进入实用化阶段。

1994年, IBM公司宣布成功研制出读出磁头为自旋阀结构的硬盘驱动器, 将磁盘记录密度一下子提高了17倍, 并于1998年正式投放市场, 产生巨大的经济效益。当时的面记录密度约为3Gbit/平方英寸。随后通过对自旋阀材料的进一步研究与改进, 到2006年, 据美国希捷科技宣布, 已证实硬盘面记录密度可提高到421Gbit/平方英寸, 并仍保持强

劲的增长势头。

当时由IBM首先研发成功、具有自旋阀结构的磁头就是我们所说的GMR磁头, 也是当今的主流磁头, 其核心GMR自旋阀结构如图2(a)所示。其中, 自由层和被钉扎层采用的是铁磁材料, 自由层属于软铁磁材料, 被钉扎层使用硬铁磁材料, 它们之间的隔离层采用非磁性金属材料, 只对自由层和被钉扎层进行磁隔离, 但不进行电隔离。钉扎层采用的是反铁磁材料, 铁磁和反铁磁材料在交换耦合作用下形成一个偏转场, 此偏转场会将被钉扎层的磁化方向固定。自由层的作用是响应磁盘上的磁记录信息, 其磁化矢量可随外磁场自由转动, 在没有外加磁场的情况下, 它的磁化方向与被钉扎层垂直, 这种排列使得读取信息时, 自由层磁化矢量能随磁盘上磁记录位的磁场改变做出迅速变化。如图2(b)所示, 在外加磁场作用下, 当自由层与被钉扎层磁矩方向相同时, 有一半电子由于自旋方向与磁矩方向相同而处在低电阻通道上, 另一半电子则处在高电阻通道上, 这样二者并联, 此时GMR自旋阀材料处于低电阻状态, 类似图1(b)的情况。反之, 当自由层与被钉扎层磁矩方向相反时, 无论哪种自旋的电子都很难穿过两个磁层, 这时自旋阀材料处于高电阻状态, 类似图1(a)的情况; 其他情况时, 材料的电阻位于二者之间。这样读取数据时, 电流持续流经各层, 通过检测电阻的变化就可得到反映磁记录位的磁场方向和磁通强度的函数, 进而再现被记录的信息。由于具有这种结构的GMR材料能对微弱的磁场变化迅速做出反应, 所以作为磁头材料的它, 第一次投入使用就显示出当时的主流磁头——MR磁头所无法比拟的优越性。

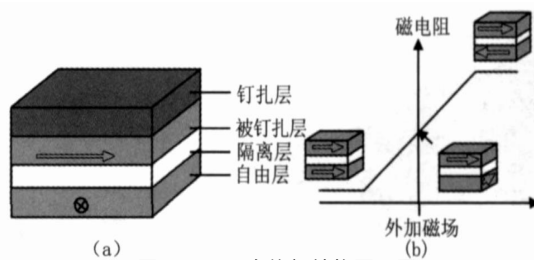


图2 GMR自旋阀结构原理图

纵观磁头技术的发展史, 每一次磁头技术的飞跃都来自新的物理效应的发现和应用, 从1988年巨磁电阻效应的发现到1994年巨磁电阻自旋阀在硬盘中的应用, 短短不到10年的时间里, 这门技术就完成了实验室到市场的高速转变, 大大提高了硬盘

她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿, 欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会, 由中国科学院高能物理研究所主办, 是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。其前身是创刊于 1976 年的《高能物理》杂志。该刊以生动活泼的语言介绍现代物理知识、传递科技前沿动态, 以深入浅出的形式做到科学性和趣味性并重。适合广大的科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生以及其他物理学爱好者阅读。

为进一步提高《现代物理知识》刊物的学术水平, 欢迎物理学界的各位专家、学者、教授以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail. ihep. ac. cn。稿件正文用五号宋体字、单倍行距、不分栏, 文内小标题最多一级, 纸张类型 A4, 页边距上下 2.5cm、左右 3cm; 文中公式请用公式编辑器输入; 文稿务必附上英文题目; 插图须在文稿中的相应位置标上编号, 插图及图表中的外文务必译成中文; 外国人名和地名请尽可能译成中文, 有必要保留外文名称时, 则在文中首次出现处, 将外文用括号标注在中译名后面; 请注意语言规范, 例如“其它”一律改为“其他”、“公里”改为“千米”、“公斤”改为“千克”、

句号用圈“。”, 数字和百分数尽量采用阿拉伯数字, 书刊和一般文章的题目用书名号; 投稿请将联系人姓名、详细地址、邮政编码, 以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。2007 年《现代物理知识》, 每期定价 8 元, 全年 6 期 48 元, 欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号: 2-824。

汇款到编辑部 地址: 北京 918 信箱《现代物理知识》编辑部; 邮编: 100049。

需要过去杂志的读者, 请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本, 18 元; 1993 年合订本, 18 元; 1994 年合订本, 22 元; 1994 年增刊, 8 元; 1994 年附加增刊合订本, 36 元; 1995 年合订本, 22 元; 1996 年合订本, 26 元; 1996 年增刊, 15 元; 1997 年合订本, 30 元; 2000 年附加增刊合订本, 38 元; 2000 年增刊, 10 元; 2001 年合订本, 48 元; 2002 年合订本, 48 元; 2003 年合订本, 48 元; 2004 年合订本, 48 元; 2005 年合订本, 50 元; 2006 年每期 7 元, 仅剩 4、5、6 期。以上所列, 均含邮资或免邮资。

的记录密度, 并导致新的学科分支——磁电子学概念的产生。同时, 这些现象出现在纳米多层膜中, 给材料科学也带来了新的挑战。而且作为后 GMR 技术, 目前正在开发 TMR(隧道磁电阻)磁头。这种磁头同 GMR 自旋阀结构非常相似, 只不过在隔离层中用绝缘材料替换了导电材料。通过减小绝缘层的厚度, 使电流贯通这些绝缘膜进行传导, 称为隧道效应。采用这种结构, 其磁电阻变化率比 GMR 自旋阀更大。所以说, 在可以预见的未来, 硬盘的存储密度仍然会保持飞速增长, 其应用的物理效应也会越来越微观、越来越复杂。

(张博洋、张云鹏, 河北省廊坊市北华航天工业学院 065000; 高凤菊, 北京师范大学 100875)

科苑快讯

塑料管道会污染水质

根据普林斯顿大学的一项研究, 给水系统、下水道和雨水

排放管所用的高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE) 管道中的挥发性有机化合物 (volatile organic compound, VOC) 能够渗透到水中。机械工程教授沃勒·索博耶佐 (Wole Soboyejo) 发现, VOC 造成的污染会随温度上升和时间推移而加重, 最终将足以影响公众健康和环境安全。索博耶佐将测试的 HDPE 管样品分别置于 4℃、40℃和 65℃的蒸馏水中达两个多月。其中, 放入 HDPE 管的 65℃蒸馏水在 60 天后的 VOC 含量达 2.8ppm (1ppm = 1/10⁶)。 (高凌云编译)