

硬盘驱动器巨磁电阻(GMR)磁头:从微米到纳米*

蒋致诚[†]

(SAE 材料科学实验室 东莞 523087)

摘要 近年来电脑硬盘存储密度的飞速增长(年增长 100%)已超出摩尔定律的预言. 这种惊人的高速增长中,最关键的因素是自旋阀纳米多层膜结构,即巨磁电阻(GMR)读传感器磁头的应用. 事实上,巨磁电阻磁头读传感器(reader sensor)已经实现由微电子器件向纳米电子器件转化,并且形成大规模产业. 这一过程包含了自旋电子学、材料科学、微电子工程学、化学、微机械力学和工程学等诸学科和相关微加工技术综合性挑战极限,进入纳米科技领域实质性进步.

关键词 硬盘, GMR, 读传感器, 纳米器件

Giant magnetic resistance head for hard disk drives : from micro to nano

JIANG Zhi-Cheng[†]

(Material Science Laboratory, SAE Magnetics (H. K.) Ltd., Dongguan Plant, Dongguan 523087, China)

Abstract Hard disc drive heads based on giant magnetic resistance and tunneling magnetic resistance integrate the latest developments of spintronics, material science, microelectronic engineering, chemistry, microair dynamics, micro-mechanics and engineering. The technology has been continuously challenging the technical limitations of deep sub-micro device manufacturing, and has achieved a breakthrough over the 100nm threshold in all the three dimensions, presenting the first successful example of the transition from micro- to nano-device in the mass production of hard disk drives.

Key words hard disc drive, giant magnetic resistance, reader sensor, nano-device

近年来信息技术的飞速发展中,电脑硬盘存储密度的增长极为引人注目:从 10 年前开始,其单位面密度即以每年 60% 的速度增长,而近四年来年的增长竟达 100%,甚至超出了摩尔定律的预言!这种惊人的高速增长是电脑硬盘磁头和存储介质制造技术进步的直接结果. 其中最关键的是磁头核心元件——读写传感器由微电子器件向深亚微米,乃至纳米器件方向发展取得进展.

目前纳米器件的研制循两条途径进行^[1,2]:其一采用原子、分子操纵技术;“自下而上”从原子、分子组装纳米器件. 目前该方向基本上还处于基础研究阶段. 另一条路线就是国际信息高科技产业近年来每天都在实践的,不断挑战微制造技术极限,“自上而下”从微电子器件发展到纳电子器件. 在这方面,电脑硬盘巨磁电阻磁头制造技术的进步是一

个最好的实例.

电脑硬盘巨磁电阻磁头制造被称为是挑战极限的高科技. 它集自旋电子学(spintronics)、材料科学、微电子工程学、化学、微空气动力学、微机械力学和工程学等多学科于一身. 实际上,近年来巨磁电阻磁头“自上而下”地向纳电子器件的转化,就是在上述各个学科领域不断挑战极限,推动上述各学科和相关的综合性微加工技术实质性地进入纳米科技领域的过程.

1 “自旋阀”和“自旋隧道结”纳米多层膜结构

* 2003-08-18 收到初稿, 2003-12-15 修回

[†] E-mail: zcjiang@sae.com.hk

图1是“自旋阀”和“自旋隧道结”纳米多层膜结构原理图。该纳米多层膜结构原理上可以分为四层:反铁磁钉扎层(pinning layer, AFL), 铁磁被钉扎层(pinned layer, PL), 非磁性分隔层(space layer, SL)和铁磁自由层(free layer, FL)。PL磁化矢量为AFL所钉扎, 在一定的磁场范围内不随外磁场转动。而FL的磁化矢量可随外场自由转动, 因此两铁磁层中载流电子的自旋可极化成不同状态。在此纳米多层膜结构中, PL, SL和FL的厚度均只有几个纳米, 远小于电子的平均自由程, 自旋极化的载流电子在各层界面及铁磁层内的散射取代了块状材料中载流电子与原子/杂质等的碰撞散射, 而成为决定该结构电阻的主要因素, 从而出现所谓自旋阀(spin valve)巨磁电阻结构效应: 当FL的磁化矢量与PL的磁化矢量方向一致时, 两铁磁层中的电子自旋极化方向一致, 电子所受的散射最小, 因而电阻最小; 反之, 当两铁磁层的磁化矢量方向相反时, 电阻最大。“自旋隧道结”的结构和“自旋阀”非常相似, 只不过在铁磁性多层膜“三明治”结构中, 绝缘材料(如 Al_2O_3)代替了GMR的导电材料(如Cu)非磁性分隔层。当该绝缘层厚度足够小(约1nm)时发生量子隧道效应, 透过绝缘层传导的正反向自旋极化载流电子的“隧道磁电阻”变化率比“自旋阀”巨磁电阻效应更大。

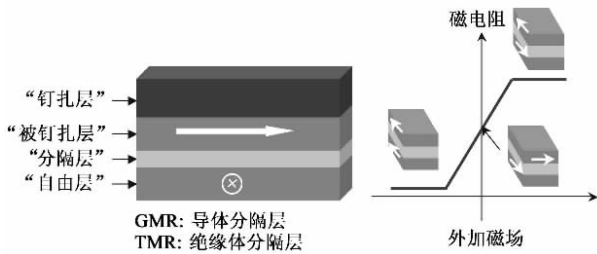


图1 GMR和TMR纳米多层膜结构原理图

由于“自旋阀”和“自旋隧道结”纳米多层膜结构的重要科学意义, 特别是其在信息存储技术中应用的重大社会和经济价值, 已经进行了凝聚态物理和材料科学, 及其制备技术的极为系统深入的研究, 形成一新的研究方向——自旋电子学。例如, 已经报道了几十种GMR和TMR纳米多层膜结构。考虑到界面效应、晶格匹配及层间耦合等因素, 实际的GMR和TMR纳米多层膜已达10层以上, 总厚度不超过20—30nm, 其材料筛选几乎遍及全部元素周期表, 并观察到若干自旋磁电子学新现象^[3]。由于GMR和TMR效应涉及自旋极化电子在亚层内及层

间输运和在界面的散射, 对自旋阀和自旋隧道结纳米结构的研究要求达到原子级分辨水平, 以期获得确定取向的“完美”纳米单晶薄膜。

2 巨磁电阻和隧道磁电阻读传感器 纳米加工技术

事实上, 在美国前总统克林顿2000年7月向国会提交的美国国家纳米技术启动计划(national nanotechnology initiative)中, 电脑硬盘磁头的巨磁电阻读传感器(GMR read sensor)已被作为纳米科技在信息存储技术中的第一个应用实例而提出^[5]。然而, 当时GMR只是在一维(纵向)实现了纳米尺度, 即磁性薄膜材料的“自旋阀”纳米多层膜结构, 其横向线宽还超过 $0.5\mu\text{m}$ 。

GMR读头由屏蔽层、GMR传感器以及引线/永磁偏置层组成。屏蔽层可屏蔽相邻位磁信号及杂散磁场的影响, 其效果与读头缝隙宽度有关。永磁偏置层提供横偏磁场, 抑制FL中磁畴结构的产生, 使FL的磁化矢量只随外场转动磁化, 而不会出现畴壁移动方式磁化, 消除读头信号的巴克豪森噪音(Barkhausen noise)。

显然, 硬盘纪录密度的提高要求提高线密度和道密度, 即减小线宽和道宽, 读头缝隙和读头磁性宽度也应相应地减小, 由微米尺寸进入到纳米尺寸。自1999年GMR磁头电脑硬盘进入市场以来, 适应上述要求的磁头芯片微加工, 如纳米精度薄膜沉积和纳米线宽光刻等技术突飞猛进, 不断在多个技术学科领域挑战极限。图2给出了几种具有代表性的硬盘相关参数的发展趋势。从2001年底至2002年一季度, GMR尺度即在三维方向全面突破了100nm界限。迄今其横向线宽已达50nm, 甚至30nm。与此相应, 硬盘记录密度则由 $10\text{Gbit}/\text{in}^2$ 猛增至 $80\text{Gbit}/\text{in}^2$ 。而在信息技术的另一核心领域半导体大规模集成电路芯片制造技术, 目前的最小线宽为0.13至 $0.09\mu\text{m}$ ^[6]。从而在从微电子器件向纳电子器件的推进速度方面, 硬盘巨磁电阻磁头已超过集成电路芯片, 成为信息技术领域首先实现“自上而下”向纳电子器件转化, 并且形成大规模产业(日产量以百万计, 从业人员以十万计, 年产值100亿美元)的第一个成功事例。

3 纳米飞行高度磁头气垫面(air bearing surface)设计和加工

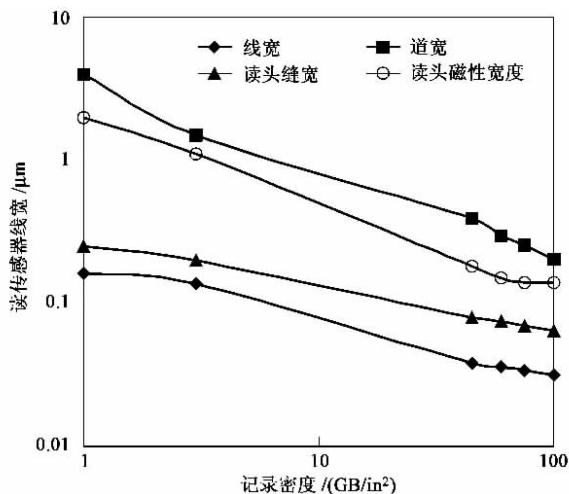


图2 硬盘驱动器记录密度与读传感器线宽发展趋势

图3是硬盘磁头及其在硬盘表面上飞行的示意图。图3(a)所示为磁头表面的一种气垫面设计,该气垫面是在磁头表面类金刚石薄膜上光刻加工形成。磁头在碟面的飞行及高度控制即由气垫面微空气动力学及磁头臂弹性力学设计来实现。随着近年来硬盘数据存储面密度的爆炸性增长,如上所述,记录的磁信号线宽已达纳米尺度,这就要求磁头飞行高度降低至10nm以下,才能实现其写入和读出。显然,这一飞行高度已远小于空气分子运动的平均自由程,其气垫面设计理论已超出传统空气动力学的范畴,引入了磁头和硬碟表面分子之间相互作用力(Van der Waals force)以及磁相互作用力(carsimir force)等考虑因素。

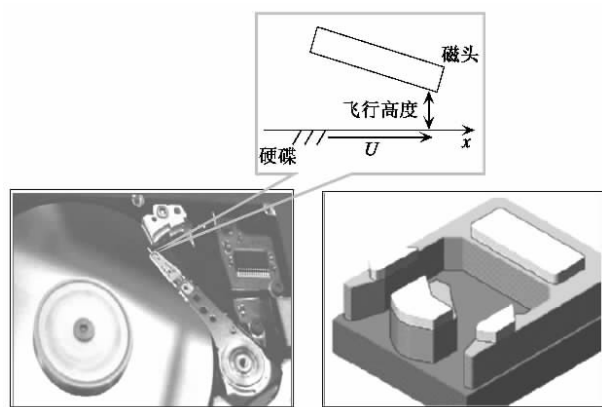


图3 磁头飞行高度和气垫面设计示意图

4 磁头和磁碟表面纳米精度抛光和其界面上的纳米摩擦学

硬盘磁头表面的类金刚石薄膜镀层有三大功用,即(1)光刻制备气垫面(2)防止读写传感器氧化和腐蚀的保护层(3)兼顾磁头和硬碟界面上粘附、润滑和抗磨损等性能的固体润滑膜。必须指出,上节提到的10nm飞行高度是指从磁头读写传感器到硬碟磁信号记录面的精确距离,其中包括读写传感器和硬碟表面两个超薄类金刚石薄膜保护层厚度及其间的距离。由于该飞行高度直接涉及写入/读出数据的信号强度和磁头/硬碟界面的摩擦学问题,不难想象这对气垫面设计和加工,超薄类金刚石薄膜制备和磁头/硬碟表面抛光等加工技术提出了何等难度的要求。

首先,为实现10nm飞行高度,磁头和硬碟表面的超薄类金刚石薄膜厚度要求已分别从三年前的3.0nm降低至1.5nm。这是因为,在DLC镀层与磁头/硬碟衬底材料之间还分别有1.5nm的硅过渡层。即使如此,留给磁头/硬碟两个表面之间的净空间也只有4nm。考虑到磁头在硬碟表面飞行寻址时,硬碟的转速达7000—12000转/分钟,还需反复完成起飞和降落动作。这就要求DLC膜厚度必须严格控制,并具备极好的物化性能和极为严格的完整性和均匀性,以满足后两项功能需求。

还特别需要指出,上述磁头在硬碟表面高速飞行的高度“净空间”4nm之说仅为理想值,还没有考虑磁头/硬碟两个表面的粗糙度。实际上,这一飞行高度对磁头/硬碟两个表面的机械抛光精度提出了极为苛刻的要求:表面粗糙度不超过0.5nm。如果考虑到读写传感器结构中包括了极其精密分布的铁镍等软磁、钴铬等硬磁金属材料,以及作为纳米导线的非常软的金,还有超硬衬底和绝缘层材料碳化钛和氧化铝。不难想象,在这样复杂的复合材料精密器件表面上,要达到上述纳米级抛光精度具有何等的技术难度!

5 磁头在高速旋转磁碟上读写的纳米精度驱动和定位机械系统

如图2所示,硬盘记录密度(area density)的提高要求提高磁信号的线密度(BPI)和道密度(TPI),目前记录信号的线宽和道宽已趋向纳米尺度。这不仅要求写头缝隙和读头磁性宽度由微米尺寸进入到纳米尺寸,而且要求磁头在硬碟上高速飞行寻址和定位等系列动态过程能实现纳米尺度级的

精确控制,诸如精确制导和定位.这是当前磁记录技术发展的另一重大成就.

早期的温彻斯特硬盘(IBM公司1968年首创Winchester技术)是靠音圈马达VCM(voice coil motor)调控磁头位置的.由于VCM的制造精度受限,加之其本身的材料、结构等诸多因素影响,导致VCM的机械调整过程存在固有容差(动态串动与机械共振)并且其位置离磁头较远,调整范围与精度十分有限.在当前高密度硬盘中,VCM仅作为磁头的行程调整,而纳米尺度精确位置的制导、定位以及VCM容差补偿,包括磁头臂制动引起的机械共振的补偿均由二次微驱动器(secondary micro-actuator)来实现.实践证明,二次微驱动器的应用能使磁记录的位置出错率降低达50%,磁记录轨道密度(TPI)增大一倍.对于10,000RPM转速的硬盘,磁头平均寻道定位(seeking and settling)时间减少25%以上.这就意味着采用相同的记录媒体时,二次微驱动器的应用能实现记录密度翻倍.其中一种非常引人注目的一种新型薄膜压电材料制作的微驱动器,仅在10V的工作电压下,就可以实现 $1.0\mu\text{m}$ 的调整范围和50至100nm的调整精度,其共振频率达15kHz以上.另一方面,采用MEMS(micro electro mechanical system)技术制作的二次微驱动器件也已问世.这些新型微驱动器件的诞生及应用,成为GMR磁头自上而下向纳米科技发展的又一重要方面.

6 磁头和磁碟表面/界面的纳米级清洗工程

众所周知,在集成电路线宽达到 $0.5\mu\text{m}$ 以下,各种物理和化学清洗工程就成为质量控制的关键因素之一,在磁头制造中也是这样,更何况GMR磁头线宽已达纳米尺度!从而不难理解,磁头清洗工程要求纳米尺度的污染控制,这已成为GMR磁头生产中极其重要又极为困难的关键环节之一.其中包括 $0.1\mu\text{m}$ 外来微粒控制,小于 $5\text{ng}/\text{cm}^2$ 腐蚀性离子控制,单分子层有机污染控制等.已使用的物理/化学清洗方法包括等离子体、超临界态干冰、紫外线、兆频超声波等.仅举两例:由于GMR读传感器已小于100nm,因此,在整个磁头组合件全部生产过程中,其表面上甚至不允许一粒亚微米尺度外来硬磁材料微粒存在.为此,人们甚至规定在GMR磁头制造厂周围30km范围内不允许有硬磁材料生产线存

在.又如在磁头生产过程中,已经采用超高(ppm)灵敏的表面分析仪器(如飞行时间二次离子质谱仪)来检测表面吸附/扩散的单分子层硅油污染,并采用紫外线表面光化学分解反应予以清除.

7 纳米分析表征技术

在GMR磁头研发和制造中,还有一个极为重要的因素,那就是先进表面分析表征技术的应用.表面分析技术是纳米科技的实验基础和必要条件.这不仅在GMR和TMR纳米结构研究中得到充分体现,而且在GMR磁头的大规模生产中,综合性的先进表面分析表征技术也已成为其技术进步和产品质量控制不可或缺的关键因素.同时,GMR磁头制造技术的进步也反过来对表面分析表征技术提出了挑战性课题,即深亚微米/纳米尺度的综合性表面表征.内容包括:

(1)亚微米/纳米器件尺度和超薄($<5\text{nm}$)薄膜厚度的精确测量——纳米测量学.

(2)纳米表面形貌学.

(3)亚微米/纳米器件表面化学成分和结构表征.

(4)亚微米/纳米尺度表面杂质、污染、缺陷和微腐蚀、以及包括微静电放电、电迁移等造成的微损伤检测.

(5)磁头/碟片界面上的亚微米/纳米摩擦学.

(6)亚微米/纳米表面磁场和热场分布测量学.

(7)聚集离子束表面微加工和表征.

综上所述可以看到,作为第一个在科学、技术和市场上都成功的信息存储纳米器件,GMR磁头包含着科学和技术多学科领域的巨大投入和综合性进步,以及大规模生产管理 and 市场预测导向的诸多努力,很值得在纳米科技研究发展中借鉴.

在市场竞争和科学进步的共同推动下,信息存储器件制造技术在纳米科技领域挑战极限的进程方兴未艾.“自旋阀”纳米多层膜结构应用于GMR读取传感器,并形成批量生产仅仅三四年,目前就已经达到其物理极限(GMR线宽若进一步缩小至30nm以下,将由于热稳定问题发生自旋自动反转,“自旋阀”效应失效).而与此同时,下一代基于“自旋隧道结”纳米多层膜结构的隧道磁电阻(TMR)磁头已经出现在国际信息存储技术领先厂商的生产线上.预期在1至2年内,TMR磁头和垂直磁记录介质将使硬盘存储密度达到 $200\text{Gbit}/\text{in}^2$ 以上.更令人

注目的是,将“自旋隧道结”和半导体 CMOS 相结合的磁随机存储器(MRAM)兼有静态内存(SRAM)的高速、动态内存(DRAM)的高密存储、断电非挥发和抗辐射等无与伦比的潜在优越特性。目前这种磁内存已有 1Mbit 的芯片样本问世。可以预期,信息存储的大变革可能在近期出现,半导体 SRAM 和 DRAM,以及非挥发闪存(non-volatile flash memory)都有可能被 MRAM 取代^[7-9]。

尽管这样迅猛的发展势头已够使人瞠目,然而科学与技术的发展是无穷尽的,纳米科技也是这样。就其在信息存储技术中的应用而言,表现出超高灵敏信息感应现象的新纳米结构(如 BMR 等)和量子点存储介质材料的基础研究新发现当前不断涌现,而纳米加工技术追求精微亦无极限。相信我们将很快会看到,纳米科技对社会经济、人类生活,乃至对国家实力的重大影响,将首先在信息存储技术领域得到最令人印象深刻的表现。

致谢 严格博士,姚明高,申加兵,张青文为本文提供部分资料。张毓捷博士,赵见高研究员阅读全文并提宝贵意见。作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 白春礼. 微纳电子技术,2003,1:1 [Bai C L. Micronano-electronic Technology,2003,1:1 (in Chinese)]
- [2] 国家纳米科学中心可行性报告,2003.3
- [3] Shen F, Xu Q Y, Yu G H *et al.* Appl. Phys. Lett., 2002, 80:23
- [4] Petford-Long A K. J. Magnetism. Magnet. Mater. 2002, 242:53
- [5] Clinton B. National Nanotechnology Initiative, July 1999
- [6] Mark E. R. IDEMA Traveling Symposium 2001, Dec. 2001, Shenzhen
- [7] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A *et al.* Science, 2001, 294:1488
- [8] Parkin S P. IEEE 2003, 91:661
- [9] 黄昆,郑厚植,甘子钊等. 微纳电子技术,2003,1:4 [Huang K, Zheng H Z, Gan Z Z *et al.* Micronano-electronic Technology, 2003, 1:4 (in Chinese)]

作者简介 蒋致诚,男,1943 年出生。原中国科学院兰州化学物理研究所研究员、博士生导师。现为数据存储跨国集团公司 SAE Magnetics(H. K.)Ltd 材料科学实验室首席科学家,并受聘担任国家纳米科学中心筹备组专家委员会成员。

· 物理新闻和动态 ·

形形色色的氧化锌纳米结构

最近,笔者有机会目睹了一张 ZnO 纳米飞机的照片:每一架飞机都是一个独立生长的准单晶体,尺寸数 μm ,具有相同的外形,就像是折纸工艺品,数十架飞机组成一个机群,各朝着不同的方向。这张照片是中国科学院物理研究所高鸿钧小组拍摄的,为纳米结构百花园增添了奇葩。形形色色的纳米结构可以通过类似的工艺形成,粉末状的原始材料在水平管式炉中加热,管内充以适当的气体,固体蒸发以及随后的再结晶,可能形成新的纳米结构。纳米科学家已经制备成功的新颖结构有纳米带、纳米螺旋和纳米锯等等。

美国佐治亚理工学院的王中林和他的同事曾在相关领域夺得过多项第一。最近他们又制备了具有广泛应用前景的压电 ZnO 单晶无缝纳米环——环的直径约 1—4 μm ,环的厚度是 10—30nm。这种纳米环被计划用于构建某些独特的器件,它们将可以测试材料中的“电机”耦合或者特定的生物功能”。兼有压电性能和半导体特性的 ZnO 纳米环还可以作为微型传感器、信号变换器以及谐振器等。此外, Mn 掺杂的 ZnO 纳米带将可能在自旋电子学器件中发挥作用。

ZnO 晶体具有纤锌矿结构, O^{2-} 离子以六方密堆方式排列,尺寸较小的 Zn^{2+} 离子分层填充在由 O^{2-} 构成的半数四面体间隙内。ZnO 纳米带在其厚度方向是上百层单胞的堆垛。纳米带的一个表面是带正电的(0001)-Zn,另一面是带负电的(000 $\bar{1}$)-O。由于纳米带的一侧存在平面缺陷,导致了封闭纳米环的自发形成。环的结构使得静电能和弹性能的总和最小,并且保持两侧面的电荷中和。

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Kong *et al.* Science 2004, 303:1348)