

# 用扫描探针显微镜观察磁性材料

周增均

(北京大学物理系,北京 100871)

扫描隧道显微镜 (STM) 的发明促成了多种新的扫描探针显微镜的出现。它们都依靠反馈电路来精密控制探针尖和样品表面之间的 nm 数量级的微小距离,再加上探针尖在水平方向上的二维扫描,就能绘出样品表面的图像。本文叙述 STM 以及由它派生出来的原子力显微镜 (AFM) 和磁力显微镜 (MFM) 在磁性材料方面的应用。

采用快淬和粉末冶金两种方法制备的钕铁硼 NdFeB 永磁合金可以具有相同水平的磁性。然而,用这两种不同方法获得的材料的显微结构完全不同。粉末冶金法制备的合金晶粒大小在  $15\mu\text{m}$  的水平,而快淬合金的微小晶粒大约在 20 至 80nm 范围。相对而言,快淬合金的结晶结构研究要困难得多。B.W. Corb 等人将快淬后经热处理的 NdFeB 合金,在抛光后置于超高真空下进行离子轰击,而后用 STM 进行观察,第一次观察到了磁性材料的三维表面结晶结构<sup>[1]</sup>。

北京大学物理系的研究者,也曾观察了玻璃基片上的溅射氧化铁薄膜的表面形貌。STM 的表面像清晰地显示出晶粒结构,同时还显示

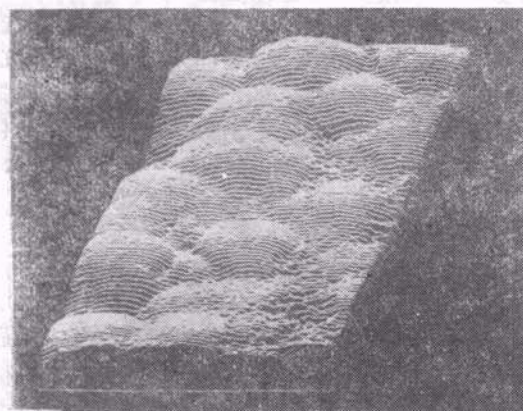


图1 溅射氧化铁薄膜表面的 STM 像

出相当平滑的表面,其最高峰与最低谷之间的差别小于 20nm,而且样品在空气中十分稳定。图 1 是溅射氧化铁薄膜的表面形貌。

STM 的局限性是它只能分析导电样品。原子力显微镜 (AFM) 的特点,是控制探针尖上的原子和样品表面的分子或原子间的作用力不变。这就使得 AFM 既适用于导体也适用于绝缘体的样品分析。如果把 AFM 的探头由金刚石等非磁性材料换成铁、镍等磁性材料,那么它就可以探测样品表面的磁力场的分布。这就是所谓的磁力显微镜 MFM。

离子键的结合能约为 10eV,而范德瓦耳斯力结合的物质结合能仅为 10meV,这相当于  $10^{-7}$  至  $10^{-11}\text{N}$  的力。材料的磁畴的磁力梯度一般也在这一水平上。目前各国应用的这类显微镜的测力范围多在  $10^{-8}$  至  $10^{-12}\text{N}$  之间。

日本电报、电话公司 (NTT) 的研究人员对硬磁盘片进行了测量。他们用光学测位移方式的 AFM 观察表面镀有碳保护膜的盘片,得到盘表粘滞力以及有润滑层和没润滑层时表面摩擦力的分布。这是两个对提高极限记录密度十分重要的微摩擦学特性。虽然仪器精度略差,仅为  $10^{-8}\text{N}$ ,但使用非常方便<sup>[2]</sup>。

高密度磁记录只能通过减小读写磁头与记录介质之间的距离。例如,为了实现 4000bit/mm 的记录密度,磁头和介质间的距离应小于  $0.07\mu\text{m}$ 。因此,纳米水平的摩擦特性就十分有必要考虑,它不但对设计磁记录设备十分重要,而且也是确定磨损根源的关键因素。

IBM 的研究人员还用 AFM 对磁粉涂布的硬磁盘片上的润滑层进行了测量。他们发现新盘片上润滑层只有 5.0 至 7.0nm 厚,然而由润滑剂的质量推算这一厚度应当大十倍。使用

几年后, 润滑层厚度减薄到 3.5 至 5.5nm 并且分布均匀。由此他们得出结论: 大多数润滑剂存在于盘片中孔隙之内<sup>[3]</sup>。

在用 STM 观察了 NdFeB 的结晶结构后, 研究者用保持样品和探针尖之间的作用力恒定的磁力显微镜 (MFM) 对它再进行观测, 这时看到两列对称的丘状突起。用探针尖和样品的磁畴磁化的相对取向为函数, 对磁力分布进行计算。把计算的结果与测量相比较后, 得知表面这两列丘状突起的磁力似乎是双布洛赫线的像。双布洛赫线在 NdFeB 中是很普通的, 它们的图像分辨率高达 10nm<sup>[4]</sup>。

事实上 MFM 的主要研究对象是磁记录介质、薄膜磁头以及磁光材料。它可以获得磁头和介质上的磁畴形态, 也获得介质上记录的毕特图形等信息。

IBM 3380 薄膜磁头上的磁畴随磁化信号的变化而变化<sup>[5]</sup>。

对 AFM 测力弹簧悬臂位移的检测, 可以不采用 STM 探头, 而用激光测微方式, 因而也称它为激光力显微镜 (LFM)。它可以观察  $0.8 \times 10^{-4}$  至  $6 \times 10^{-4}$ N/m 的磁力梯度或  $10^{-12}$  至  $10^{-11}$ N 的力。用 LFM 观察到 50nm 厚的 Tb<sub>19</sub>Fe<sub>81</sub> 磁光薄膜上由激光写入而生成的圆斑图形。在低偏场下还看到一个写入斑是由几个磁畴组成的<sup>[6]</sup>。

用探测电容量的变化来测 AFM 悬杆的位移, 测量精度达  $1 \times 10^{-10}$ N, 因而很好地观察了在 3.5 英寸软磁盘的记录磁道上的毕特

图, 同时也得到盘片表面形貌和粗糙度的信息<sup>[7]</sup>。

从 MFM 问世以来, 以 IBM 公司为首的研究人员就率先对钴基磁盘片的磁化图形进行了测量<sup>[8,9]</sup>, 又将记录的图形描出了直观的图像并与计算进行了对比。

对磁性材料而言, 不论从技术角度还是从基础研究出发, 形貌和磁性信息之间的相互关系是很重要的。用 AFM 或 MFM 可以同时测出形貌、磁以及化学信息。

随着研究工作的不断进展, 磁力显微镜 MFM 将可以在新一代的高密度磁记录介质如布洛赫线存贮材料的研究中, 对磁记录过程进行有效的研究。

(上接第 196 页)

- [12] D. S. Bethune et al., *Chem. Phys. Lett.*, **174** (1990), 219.
- [13] R. C. Haddon et al., *Nature*, **350** (1991), 320.
- [14] R. D. Johnson et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **112** (1990), 8983.
- [15] C. S. Yannoni et al., *J. Phys. Chem.*, **95**(1991), 9.
- [16] R. S. Ruoff et al., *Nature*, **350**(1991), 663.
- [17] C. I. Frum et al., *Chem Phys. Lett.*, **176** (1991), 504.
- [18] J. W. Arbogast et al., *J. Phys. Chem.*, **95** (1991), 11.
- [19] J. H. Weaver et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 1741.

- [1] B.W. Corb et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50**(1987), 353.
- [2] R. Kaneko et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **6** (1988), 291.
- [3] C.M. Mate et al., *IEEE Trans. Mag.*, **Mag-26** (1990), 1225.
- [4] P. Grütter et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **6**(1988), 279.
- [5] Y. Martin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987), 1455.
- [6] Y. Martin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988), 244.
- [7] T. Göddenhenrich et al., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**(1990), 383.
- [8] H.J. Mamin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **53**(1988), 1564.
- [9] David W. Abraham et al., *Appl. Phys. Lett.*, **53** (1988), 1446.

- [20] D. L. Lichtenberger, et al., *Chem. Phys. Lett.*, **176**(1991), 203.
- [21] M. R. Wasieleski, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **113**(1991), 2774.
- [22] P. M. Allemand et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **113** (1991), 2780.
- [23] V. Elser et al., *Nature*, **325**(1987), 792.
- [24] P. W. Fowler, et al., *Chem. Phys. Lett.*, **165** (1990), 79.
- [25] T. G. Schmalz *Chem. Phys. Lett.*, **175** (1990,) 3.
- [26] J. R. Heath et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **107** (1985), 7790.
- [27] G. E. Scuseria, *Chem. Phys. Lett.*, **176** (1991), 423.