

文章编号: 1004-0609(2003)06-1383-04

Co/Cu/Co 纳米多层膜的铁磁耦合效应^①

马晓艳, 杨 柏, 毕晓刚, 宫声凯, 徐惠彬

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 采用洛仑兹电子显微镜研究了磁控溅射沉积制备的 Cu(20 nm)/Co/Cu/Co 纳米多层膜磁畴结构随铁磁层间耦合效应的变化。Cu 中间层厚度较薄时, 由于铁磁层之间的耦合作用, 纳米多层膜为垂直易磁化, 磁畴为磁泡结构, 磁泡的平均直径随 Cu 中间层厚度的增加而减小, 多层膜矫顽力呈减小趋势。当 Cu 中间层厚度大于 3 nm 时, 铁磁层之间的耦合作用减弱, 纳米多层膜为面内易磁化, 磁泡结构的磁畴消失, 全部为具有波纹状的接近 180°畴壁的磁畴结构。

关键词: 纳米多层膜; 磁畴; 磁泡; 铁磁耦合

中图分类号: TG 111

文献标识码: A

纳米磁性多层膜由于存在低维效应、层间耦合、巨磁电阻效应, 因而在磁电阻传感器、磁随机存储器以及高灵敏度磁头材料等方面具有重要的应用价值。自 Baibich 等^[1]在 Fe/Cr/Fe 三明治结构中发现巨磁电阻效应以来, 已有多种纳米多层膜结构见诸报道^[2-4], 其中, 利用 2 层磁性薄膜的矫顽力不同产生巨磁电阻效应的纳米磁性多层膜自旋阀结构, 因其结构简单, 不需要易腐蚀的强反铁磁性材料, 因而作为磁随机存储器材料得到了广泛的研究^[5-7]。在自旋阀结构中, 两磁性层的层间耦合直接影响巨磁电阻效应, 当磁性层材料与结构确定之后, 中间层的厚度以及中间层与磁性层的结合状态将直接影响两磁性层之间的耦合效应。因此, 研究自旋阀结构中两磁性层之间的耦合效应随中间层厚度的变化规律, 将有助于自旋阀的研制。

磁畴观察是研究纳米多层膜层间耦合的实验方法之一^[8]。由于磁畴结构反映了磁性材料内部磁化的状态, 纳米磁性多层膜的两磁性层之间产生耦合作用时, 磁畴结构也将随之发生变化。

本文作者对磁控溅射 Cu/Co/Cu/Co 系纳米多层膜采用振动样品磁强计与洛仑兹电子显微镜磁畴观察, 研究了磁畴结构随铁磁层间耦合效应的变化及 Cu 中间层对磁畴结构的影响。

1 实验

采用直流磁控溅射方法制备了 Cu/Co/Cu/Co

系纳米多层膜。靶材分别为 99.95% 的 Co 与 99.99% 的 Cu。本底真空度为 1×10^{-3} Pa, 溅射气压为 0.5 Pa, Cu, Co 的溅射功率分别为 18 W 和 46 W。Cu, Co 的沉积速率分别为 0.1 nm/s 和 0.2 nm/s。在基板上依次沉积厚度 20 nm 的 Cu 缓冲层、厚度为 8 nm 的 Co 层、厚度为 1~4 nm 的 Cu 中间层和厚度为 2 nm 的 Co 层。本研究采用的基板分别为光学玻璃与石盐。

采用原子力显微镜观察样品在不同沉积阶段的表面形态, 采用俄歇微探针成分分析确定样品的纳米多层膜结构。利用 LDJ9600 振动样品磁强计在室温下测量样品的磁滞回线。进行矫顽力测试时, 首先将外加磁场由 320 kA/m 降至低场后(本实验中为 24 kA/m, 测试精度为 0.1%), 缓慢升降外加磁场, 以保证矫顽力测试的精度, 每一个测试点均为 3 个样品的测试结果平均值。采用洛仑兹透射电镜法分别对制备态与平面磁化后的纳米多层膜磁畴结构进行观察。

2 结果与讨论

图 1 所示为在玻璃基板上沉积了名义厚度为 20 nm 的 Cu 底层基础上沉积名义厚度为 8 nm 的 Co 的表面原子显微镜图像。可以看出, 薄膜表面的最大起伏小于 2 nm, 颗粒的平均直径约为 50 nm。

① 基金项目: 国家自然科学基金科学基金资助项目(59971001)

收稿日期: 2002-12-10; 修订日期: 2003-04-28

作者简介: 马晓艳(1976-), 女, 硕士研究生。

通讯联系人: 毕晓刚, 教授; 电话: 010-82315999; E-mail: bixf@buaa.edu.cn

当在双层纳米薄膜上再沉积名义厚度分别为 3 nm 与 2 nm 的 Cu 层与 Co 层后, 薄膜表面的起伏与颗粒均有所增大, 最大起伏约为 4 nm, 最大颗粒直径约为 80 nm(见图 2)。

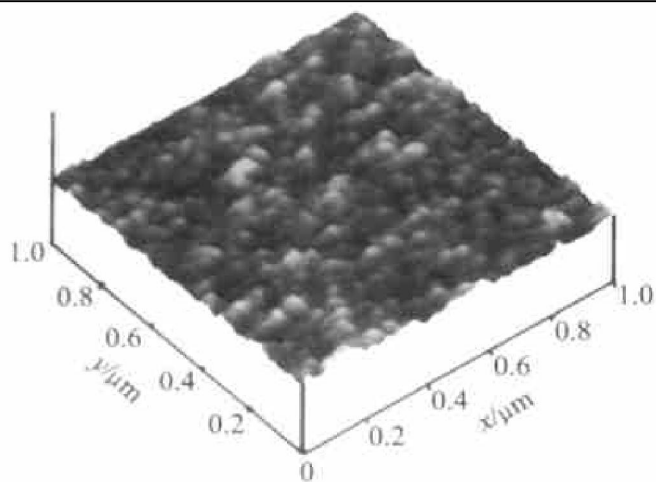


图 1 Glass/Cu(20 nm)/Co(8 nm) 双层膜的表面 AFM 形貌

Fig. 1 Surface AFM topography of glass/Cu(20 nm)/Co(8 nm) double-layer

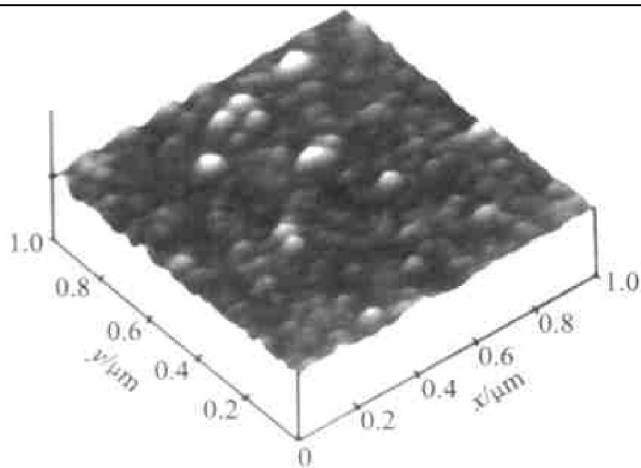


图 2 Glass/Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(3 nm)/Co(2 nm) 纳米多层膜的表面 AFM 形貌

Fig. 2 Surface AFM topography of glass/Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(3 nm)/Co(2 nm) nano-multilayer

图 3 所示为在玻璃基板上溅射沉积的名义层间距为 Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(3 nm)/Co(2 nm) 的纳米多层膜沿深度方向的扫描俄歇微探针曲线。薄膜具有明显的纳米层状结构, 按溅射时间估算, Co, Cu 和 Co 3 层的层间距之比基本上与名义成分的比例(质量分数) 8: 3: 2 相符合。

矫顽力随着中间层厚度的增加, 首先略有增加, 当中间层厚度大于 3 nm 后, 随中间层厚度的增加呈减小的趋势, 如图 4 所示。考虑到样品表面

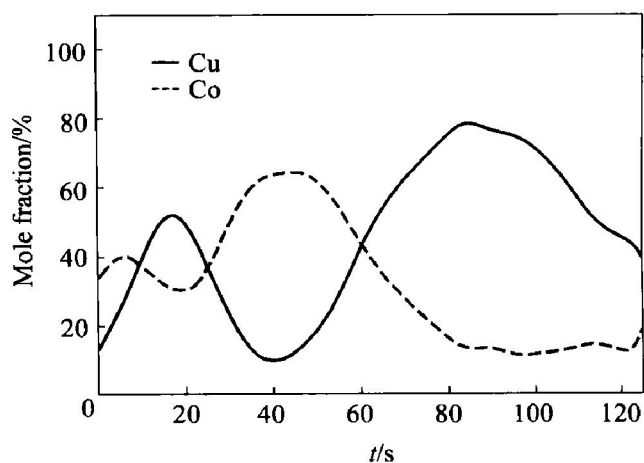


图 3 Glass/Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(3 nm)/Co(2 nm) 纳米多层膜成分沿深度变化的扫描俄歇微探针曲线

Fig. 3 Curves of Scan Auger Microprobe of glass/Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(3 nm)/Co(2 nm) nano-multilayer along depth

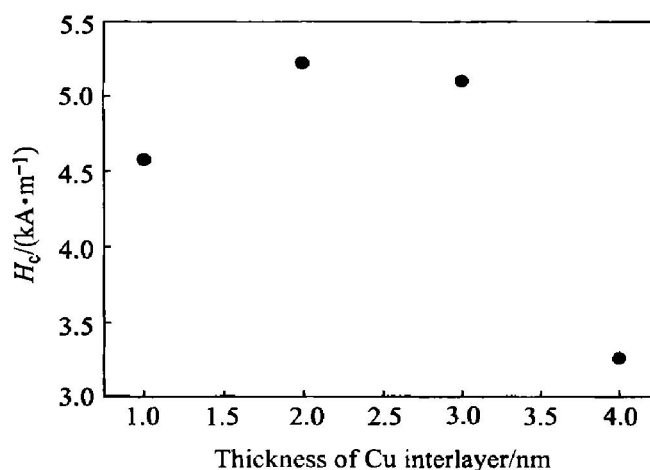


图 4 矫顽力随 Cu 中间层厚度的变化

Fig. 4 Variety of coercive force with Cu interlayer thickness

的粗糙度在 1 nm 以上, 可以认为 Cu 中间层名义厚度为 1 nm 的样品的铁磁层之间并没有完全被隔开, 若将二铁磁层考虑为一层, 则由于层厚度的增加而使得矫顽力较 Cu 中间层为 2 nm 样品的要低。

图 5 所示为采用洛仑兹电子显微镜对固定 Co 层厚度, Cu 中间层的名义厚度分别为 2, 3, 4 nm 的纳米多层膜所观察的磁畴结构。由图可见: 多层膜的磁畴结构明显随 Cu 中间层的厚度变化, Cu 中间层厚度较薄时(2 nm), 磁畴全部为磁泡结构(图 5(a)); 而当厚度为 3 nm 时, 磁泡结构占主体, 偶尔有少量的岛状磁畴(图 5(b)); 当厚度为 4 nm 时, 磁泡结构的磁畴消失, 全部为波纹状(ripple)的接近 180°畴壁的磁畴结构(图 5(c))。

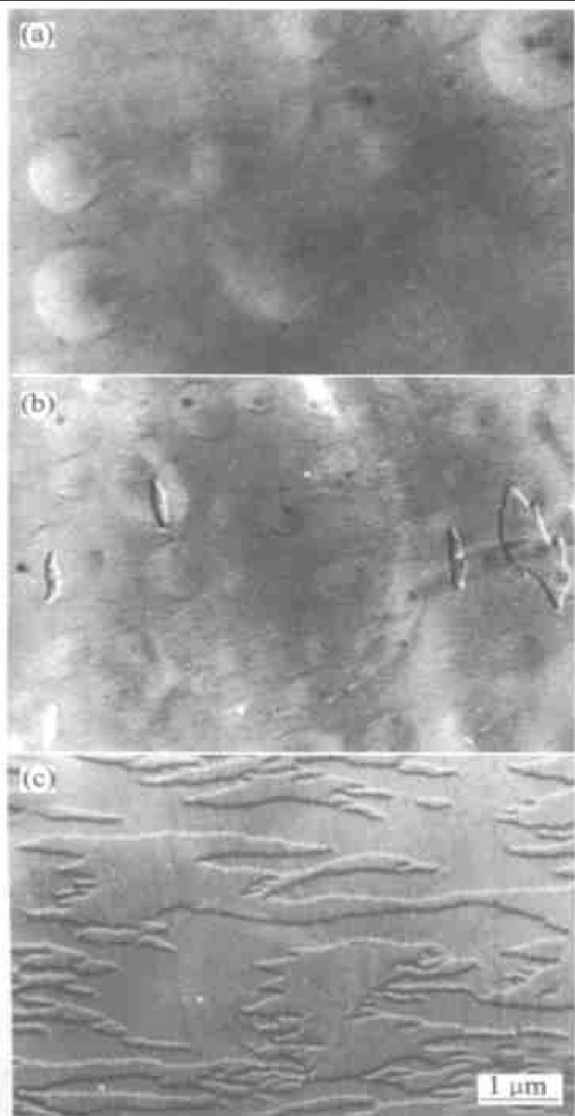


图 5 不同中间层厚度的 glass/Cu(20 nm)/Co/Cu/Co 纳米多层膜磁畴结构

Fig. 5 Magnetic domain structure of glass/Cu(20 nm)/Co/Cu/Co nanomultilayers with different thicknesses of interlayer

- (a) —Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(2 nm)/Co(2 nm);
 (b) —Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(3 nm)/Co(2 nm);
 (c) —Cu(20 nm)/Co(8 nm)/Cu(4 nm)/Co(2 nm);

众所周知, 磁泡磁畴结构产生的原因之一是易磁化方向垂直于薄膜平面, 而具有波纹状的 180° 畴壁结构则是由于薄膜面内易磁化所致。即当 Cu 中间层厚度为 2 nm 时, 纳米多层膜的易磁化方向垂直于薄膜平面, 层厚为 4 nm 时为薄膜面内易磁化。对于 Cu 中间层厚度为 3 nm 的纳米多层膜而言, 少量平面易磁化的岛状磁畴的存在表明: 纳米多层膜的易磁化方向由垂直于面内向平行于面内过渡。显然, 矫顽力随 Cu 中间层厚度的变化是由于磁畴的变化所致, 即矫顽力随着 Cu 中间层厚度的减少而增加是由于需要克服垂直各向异性场所致。

另一方面, Cu 中间层的厚度为 2 nm 时, 磁泡的平均直径约为 $1.3 \mu\text{m}$, Cu 中间层厚度为 3 nm 时, 磁泡的平均直径约为 $0.5 \mu\text{m}$, 均远大于由原子力显微镜所观察到的薄膜表面粒子的平均尺寸, 即每一个磁泡是由若干个粒子相互作用产生的。一般而言, 磁泡的直径与薄膜的厚度、饱和磁化强度、畴壁能、单轴各向异性场、外加磁场等参数相关。在本实验中, 外加磁场为电子显微镜在样品台附近的剩磁, 基本上不随样品变化, 因此, 磁泡平均直径随 Cu 中间层厚度的变化直接反映了纳米多层膜内部磁性能的变化。

众所周知, 在磁性多层膜中, 磁性层之间通过非磁性中介层可以发生间接交换作用, 其最显著的特点是呈衰减振荡的变化特性, 即铁磁层之间的耦合性质随非磁性中间层厚度的增加而表现为铁磁和反铁磁耦合的振荡变化^[9]。耦合作用的振荡变化将导致纳米多层膜的饱和磁化强度也随中间层的厚度产生振荡变化^[10], 并且极化的 Cu 层所贡献的磁化强度随 Cu 层厚度 d 呈 d^{-2} 的关系变化^[11]。根据耦合作用的特点可以推断, 纳米多层膜中磁泡磁畴的产生是由于层间耦合作用的结果。即当中间层厚度为 2 nm 与 3 nm 时, 铁磁层之间发生铁磁耦合效应, 且 Co 为六方晶体, 因而导致易磁化方向垂直于薄膜平面而产生磁泡磁畴。而当中间层厚度大于某一临界值后(本实验中为 4 nm), 铁磁耦合作用减弱, 由于退磁场的作用, 致使易磁化方向平行于薄膜平面, 磁泡磁畴消失, 矫顽力也随之减小。另一方面, 由于饱和磁化强度随中间层厚度增加、耦合作用效应的弱化而降低, 因此, 在相同外磁场作用下, 磁泡的平均直径减小^[12]。

综上所述, Cu(20 nm)/Co/Cu/Co 纳米多层膜中, 随着 Cu 中间层厚度的增加, 铁磁层之间的耦合作用减弱, 磁化方向由垂直于膜面转变为平行于膜面。根据赝自旋阀巨磁阻效应产生的机理, Cu(20 nm)/Co/Cu/Co 纳米多层膜中, 只有 Cu 中间层厚度大于 3 nm 以上时, 才可以产生赝自旋阀巨磁电阻效应。

3 结论

1) 纳米多层膜的磁畴结构随 Cu 中间层厚度的增加由磁泡结构转变为波纹状近 180° 磁畴壁结构, 磁泡的平均直径随 Cu 中间层厚度的增加而减小。当 Cu 中间层厚度大于 3 nm 时, 磁泡结构的磁畴消失, 即多层膜的磁化方向随 Cu 中间层厚度的增加

由垂直于膜面方向转变为平行于膜面方向。磁化方向的变化表明铁磁层之间的耦合作用随 Cu 中间层厚度的增加而减弱。

2) 多层膜矫顽力随着 Cu 中间层厚度的增加在初期略有增加, 当 Cu 中间层厚度大于 3 nm 时, 呈减小趋势。这主要是由于多层膜的磁化方向随 Cu 中间层厚度的增加由垂直于膜面方向转变为平行于膜面方向所致。

REFERENCES

- [1] Baibich M N, Broto J M, Fert A, et al. Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1988, 61(21): 2472 - 2475.
- [2] Parkin S S P, Marks R F, Farrow R F C, et al. Giant magnetoresistance and enhanced antiferromagnetic coupling in highly oriented Co/Cu(111) superlattices [J]. *Phys Rev B*, 1992, 46(14): 9262 - 9265.
- [3] Parkin S S P. Origin of enhanced magnetoresistance of magnetic multilayers: spin-dependent scattering from magnetic interface states [J]. *Phys Rev B*, 1993, 71(10): 1641 - 1644.
- [4] Lhlyton T, Coffey K R, Parker M A, et al. Giant magnetoresistance at low fields in discontinuous NiFe/Ag multilayer thin films [J]. *Science*, 1993, 261(3): 1021 - 1024.
- [5] Everitt B A, Pohm A V. Pseudo spin valve magnetoresistive random access memory [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1998, 16(3): 1794 - 1797.
- [6] Schrefl T, Fidler J. Reversal modes and reversal times in submicron sized elements for MRAM applications [J]. *Computational Materials Science*, 2000, 17(2): 490 - 495.
- [7] Katti R R, Arrott A, Derewes J, et al. Pseudo-spin valve device performance for giant magnetoresistive random access memory applications [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(4): 1967 - 1969.
- [8] Eberitt B A, Pohm A V. Single-domain model for pseudo spin valve MRAM cells [J]. *IEEE Trans on Mag*, 1997, 33(5): 3289 - 3291.
- [9] 吴锦雷, 吴全德. 几种新型薄膜材料 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1999. 40 - 43.
WU Jin-lei, WU Quan-de. Some New Type Thin Film Materials [M]. Beijing: Beijing University Press, 1999. 40 - 43
- [10] Bloemen P J H, Jonge W J M. Determination of the ferromagnetic coupling across Pd by magnetoatomic engineering [J]. *J Appl Phys*, 1993, 73(9): 4522 - 4527.
- [11] Levy P M, Ounadjela K, Zhang S, et al. Theory of magnetic superlattices: interlayer exchange coupling and magnetoresistance of transition metal structures [J]. *J Appl Phys*, 1990, 67(9): 5914 - 5919.
- [12] 钟文定. 铁磁学 (中册) [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 150 - 162.
ZHONG Wen-ding. Ferromagnetics (middle-volume) [M]. Beijing: Science Press, 2000. 150 - 162

Influence of Cu interlayer thickness on ferromagnetic coupling of Co/Cu/Co nano-multilayers

MA Xiao-yan, YANG Bai, BI Xiao-fang, GONG Sheng-kai, XU Hu-bin

(Department of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Series of Cu(20nm)/Co/Cu/Co nano-multilayers were deposited by magnetron sputtering method. The relationship between magnetic domain structure and ferromagnetic interlayer coupling was investigated by means of Lorentz electron microscope. When the thickness of Cu intermediate layer is thinner, magnetic bubbles domain is revealed, indicating that the easy axis is perpendicular to the surface. This result is considered to be ascribed by coupling effect of ferromagnetic layers. As the thickness of Cu intermediate layer increases, the average diameter of magnetic bubbles decreases and the coercivity also decreases. When the thickness of Cu intermediate layer is more than 3 nm, the magnetic bubbles vanish and ripple magnetic domain structure with 180° domain wall can be observed, due to the weakening ferromagnetic coupling effect between Co layers.

Key words: nano-multilayer; magnetic domain; magnetic bubble; ferromagnetic coupling

(编辑 陈爱华)