

Cu 的表面偏聚对 NiFe/FeMn 交换耦合场的影响

李明华^{①②} 于广华^① 朱逢吾^① 姜宏伟^② 赖武彦^②

(^①北京科技大学材料物理系, 北京 100083; ^②中国科学院物理研究所, 北京 100080. E-mail: li-mh@263.net)

摘要 采用磁控溅射方法制备了分别以 Ta 和 Ta/Cu 作为缓冲层的两种 NiFe/FeMn 双层膜. 实验发现, 以 Ta 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场比以 Ta/Cu 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场大. 测量了这两种双层膜的织构、表面粗糙度和表面成分. 结果表明以 Ta/Cu 为缓冲层时, Cu 在 NiFe 层的表面偏聚是造成 NiFe/FeMn 双层膜交换耦合场降低的重要原因.

关键词 NiFe/FeMn 交换耦合场 织构 表面粗糙度 表面偏聚

1956 年, Meiklejohn 和 Bean 发现了交换各向异性^[1]. 近年来, 由于铁磁/反铁磁系统在巨磁电阻磁头及传感器上的重要应用前景, 进一步激发了人们对交换耦合效应及相关材料研究的兴趣. 其中 NiFe/FeMn 系统的研究最广泛和最深入, 并最早应用于自旋阀巨磁电阻中.

交换耦合场不仅和铁磁及反铁磁材料有关, 而且和薄膜的微结构也有很大关系, 如织构、界面粗糙度、晶粒度^[2]以及近年发现的层间扩散^[3]和界面反应^[4]等、样品的制备工艺和具体的生长条件^[5]会影响薄膜微结构, 从而影响交换耦合场. 在现有的文献中, 已发现没有缓冲层的薄膜交换耦合场远小于有缓冲层的^[6]. 我们分别制备了以 Ta 和 Ta/Cu 作为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜. 结果表明, 以 Ta 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场大于以 Ta/Cu 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场. 这和 Fujiwara 等人^[7]的结果一致. 他们认为这一差异是由两者的织构不同造成的, 以 Ta 为缓冲层的样品有好的 NiFe(111)和 FeMn(111)织构. 我们分析了以 Ta 和 Ta/Cu 作为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的织构、表面粗糙度, 发现两者织构、表面粗糙度差别不大. 可见, 以 Ta/Cu 作为缓冲层导致双层膜交换耦合场的下降另有原因. 用 X 射线光电子能谱方法研究了 Ta/Cu/NiFe 薄膜的表层成分, 实验发现, Ta/Cu/NiFe 薄膜中 Cu 原子会穿过 NiFe 层, 在 NiFe 表面偏聚. 这是导致以 Ta/Cu 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场降低的重要原因.

1 实验

采用磁控溅射方法制备样品, 其中 Ta 在射频(RF)靶上溅射, Cu, NiFe 和 FeMn 在直流(DC)靶上溅

射. 在 Si(100)基片上依次沉积各层薄膜, Ta(80 Å)/NiFe(130 Å)/FeMn(120 Å)/Ta(60 Å), Ta(80 Å)/Cu(26 Å)/NiFe(130 Å)/FeMn(120 Å)/Ta(60 Å)(Cu 的厚度选择 26 Å 是因为自旋阀中隔离层的厚度一般为 26 Å). 薄膜本底真空优于 2×10^{-5} Pa. Ta 和 Cu 的溅射速率是 1.2 Å/s, NiFe 和 FeMn 的溅射速率是 1.0 Å/s. 在溅射过程中, 基片两边加有平行于膜面的 20.0 kA/m 的磁场, 以产生一个平行于外场的易磁化方向. 溅射中 Ar 气压为 0.6 Pa, 基片水冷.

用 X 射线衍射(XRD)研究薄膜的织构, 用振动样品磁强计(VSM)测量磁滞回线以确定交换耦合场和矫顽力的大小, 用原子力显微镜(AFM)研究表面粗糙度, 用 X 射线光电子能谱(XPS)研究界面偏聚.

2 结果与讨论

2.1 不同缓冲层薄膜的磁滞回线

图 1(a)和(b)分别是以 Ta(80 Å)和 Ta(80 Å)/Cu(26 Å)为缓冲层的 NiFe(130 Å)/FeMn(120 Å)双层膜的磁滞回线曲线, 分别与以 Ta 和 Ta/Cu 为缓冲层的双层膜相比, 两者的矫顽力大致相同, 分别为 0.98 和 0.93 kA/m. 但以 Ta 为缓冲层的双层膜的耦合场为 8.88 kA/m, 明显高于以 Ta/Cu 为缓冲层的交换耦合场 7.99 kA/m. Fujiwara^[7]指出, Ta(120 Å)/NiFe(75 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å)和 Ta(120 Å)/Cu(100 Å)/NiFe(75 Å)/FeMn(150 Å)/Ta(50 Å)相比, 前者可获得更高的耦合场. 即在 Ta 和 NiFe 界面插入 Cu 层会导致耦合场下降. 为找出导致其下降的原因, 我们研究了影响交换耦合场的重要因素织构和界面粗糙度.

2.2 不同缓冲层薄膜的 XRD 分析

图 2(a)和(b)分别是以 Ta(80 Å)和 Ta(80 Å)/Cu(26 Å)为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的 XRD 图. 为获得

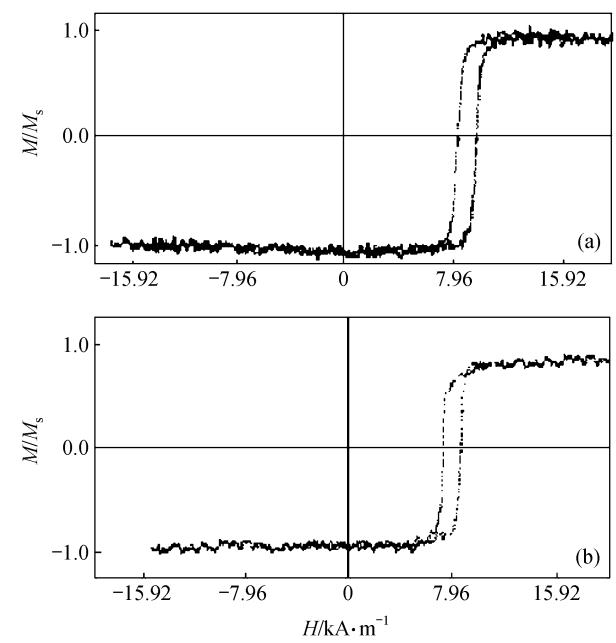


图 1 Nife/FeMn 双层膜磁滞回线曲线
(a) 以 Ta 为缓冲层, (b) 以 Ta/Cu 为缓冲层

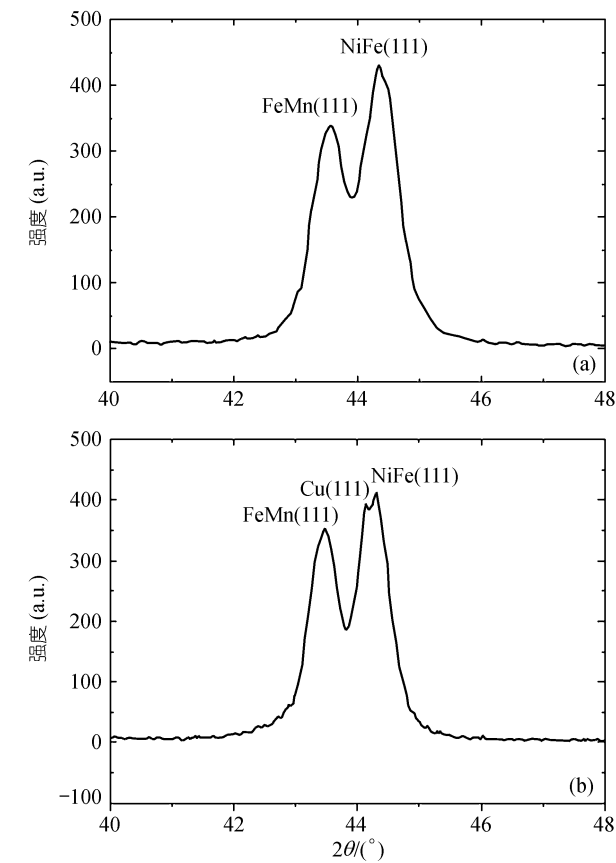


图 2 NiFe/FeMn 双层膜的 XRD 图
(a) 以 Ta 为缓冲层, (b) 以 Ta/Cu 为缓冲层

较大的交换耦合场, 要求 FeMn 有好的 γ 相(111)织构^[8]. 使用缓冲层可获得好的(111)取向 NiFe 膜. 当 FeMn 沉积在好的(111)取向的 NiFe 膜上形成具有很强的 γ 相 FeMn(111)衍射峰的 FeMn 膜. 比较图 2(a) 和(b)可以看出, 以 Ta 和 Ta/Cu 为缓冲层的双层膜都有很强的 NiFe 和 FeMn 的(111)峰. 在 Ta 上沉积 26 Å 的 Cu 并不明显影响 NiFe 和 FeMn 的(111)衍射峰. 可见, 织构并不是造成以 Ta/Cu 为缓冲层的双层膜的耦合场降低的原因.

2.3 不同缓冲层薄膜的 AFM 分析

我们用原子力显微镜观测样品表面形貌. Cu, NiFe 和 FeMn 均为 fcc 结构, 且它们的晶格错配低于 3%. 通过磁控溅射沉积的薄膜, 当它们在同一气压下连续沉积时, 多层膜在一定厚度内是连续、共格生长的^[4]. 这样当界面离表面不是很远时, 可以认为表面形貌近似为界面形貌, 用原子力显微镜观测以 Ta(80 Å)和 Ta(80 Å)/Cu(26 Å)为缓冲层的 NiFe(130 Å)/FeMn(120 Å)/Ta(60 Å)表面形貌, 对应的方均根粗糙度 R_{rms} 分别为 2.37 和 2.78 Å(图略). 一般认为方均根粗糙度 R_{rms} 在 2~4 Å 范围内界面是平滑的. 可见, 分别以 Ta 和 Ta/Cu 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的方均根粗糙度 R_{rms} 虽然有一定的差别, 但界面基本上是平滑的.

2.4 Ta/NiFe 和 Ta/Cu/NiFe 界面偏聚的 XPS 研究

为了进一步分析以 Ta/Cu 为缓冲层的双层膜耦合场较低的原因, 我们利用 XPS 测量表面不同深度的元素信息. 利用磁控溅射在 Si 衬底上沉积 Ta(30 Å)/NiFe(50 Å), Ta(30 Å)/Cu(16 Å)/NiFe(50 Å), 它们与 Ta(Cu)/NiFe/FeMn/Ta 在同一条件下沉积. 样品沉积后被立即送入 MICROLABMK II 型 X 射线光电能谱仪中. XPS 的探测深度 d 与光电子出射角、光电子的非弹性散射平均自由程 λ 的关系为: $d = 3\lambda \sin\alpha$ ^[9]. λ 值可由 Tanuma 等人^[10]编的 31 种物质的光电子非弹性散射平均自由程获得. 出射角从 $15^\circ \sim 90^\circ$, 对应探测深度为 6~23 Å. 将各种出射角下获得的 Ni2p 和 Cu2p 谱进行面积积分, 再用原子的灵敏度因子进行校正, 得到 Cu/Ni 原子个数比的计算结果. XPS 结果表明, 在 Ta/Cu /NiFe 膜中, 随出射角增大 Cu 2p 峰的相对信号强度逐渐减小. 图 3(a)为 15° 出射角时 Cu 2p XPS 能谱图. 图 3(b)为不同出射角对应的 Cu/Ni 原子个数比. 从图 3(b)可以看出, 随出射角增大即探

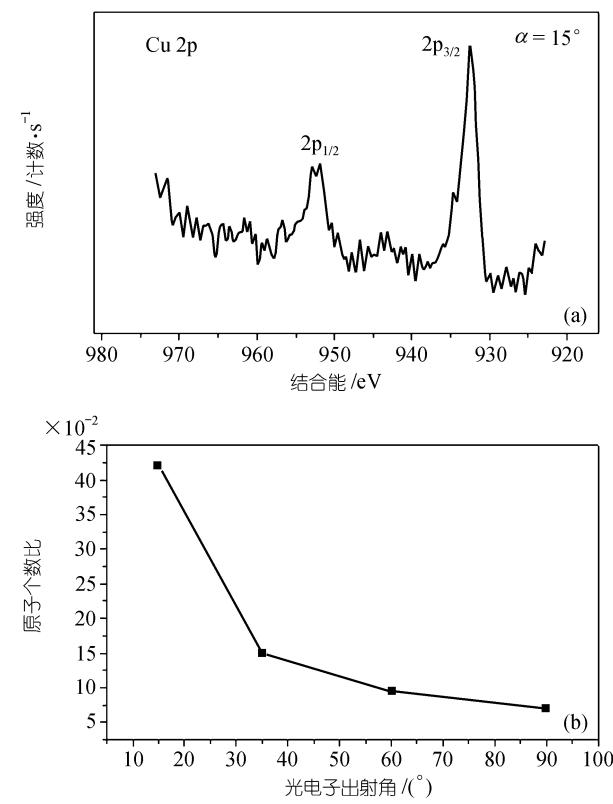


图 3 出射角为 15°时 Cu 2p XPS 能谱图(a)和 Cu/Ni 原子个数比与光电子出射角的关系(b)

测深度增加, Cu 的含量越来越少. 这说明在 Ta/Cu/NiFe 膜中 NiFe 表面有一定量的 Cu 偏聚. 用同样的方法分析 Ta/NiFe, 未发现 Ta 在 NiFe 表面偏聚. 对于以 Ta/Cu 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜, 由于 Cu 在 NiFe 表面有偏聚, 减少了 NiFe 和 FeMn 的有效接触面积, 对交换耦合场产生影响. Gokemejier 等人^[11]曾报道, 在 NiFe/CoO 界面插入 Cu, Au 和 Ag 等贵金属作为隔离层, 随隔离层厚度增加, 交换耦合场很快下降. 这说明, 铁磁层和反铁磁层界面处的杂质原子会导致耦合场下降. 对于 Ta/NiFe/FeMn/Ta 而言, 在 NiFe 和 FeMn 界面未出现 Ta, 界面相对较干净, 所以它的耦合场相对较大. 可见, Ta/Cu/NiFe/FeMn/Ta 中 Cu 的表面偏聚是导致其交换耦合场较低的一个重要因素.

3 结论

有无缓冲层及不同的缓冲层对交换耦合场有很大的影响. 除已发现的织构、界面粗糙度、层间扩散及界面反应外, 某些缓冲层(例如 Cu)引起的

界面偏聚对交换耦合场也有很大影响. 以 Ta 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场大于以 Ta/Cu 为缓冲层的 NiFe/FeMn 双层膜的交换耦合场. XPS 分析结果表明, 以 Ta/Cu 为缓冲层的双层膜中, Cu 在 NiFe 层的表面偏聚是导致交换耦合场下降的主要原因.

致谢 本工作为国家自然科学基金重大资助项目(批准号: 19890310).

参 考 文 献

- 1 Meiklejohn W H, Bean C P. New magnetic anisotropy. *Phys Rev B*, 1956, 102: 1423~1428
- 2 Hou C H, Fujiwara H, Metager R D. Grain size effect ferro-antiferromagnetic coupling of NiFe/FeMn systems. *J Appl Phys*, 1996, 80: 4528~4533
- 3 Qian Z H, Sicertsen J M, Judy J H. Magnetic behavior of NiFe/NiO bilayers. *J Appl Phys*, 1996, 83: 6825~6827
- 4 Yu G H, Chai C L, Zhu F W, et al. Interface reaction of NiO/NiFe and its influence on magnetic properties. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 1706~1708
- 5 Mao M, Cerjan C, Law B, et al. Influence of base pressure on FeMn exchange biased spin-valve films. *J Appl Phys*, 2000, 87: 4933~4935
- 6 Choe G, Gupta S. High exchange anisotropy and high blocking temperature in strongly textured NiFe(111)/FeMn(111) films. *Appl Phys Lett*, 1997, 70: 1766~1768
- 7 Fujiwara H, Nishioka K, Hou C, et al. Temperature dependence of the pinning field and coercivity of NiFe layers coupled with an antiferromagnetic FeMn layer. *J Appl Phys*, 1996, 79: 6286~6288
- 8 Alexandre M C. Effect of interface on exchange coupling in NiFe/FeMn system. *IEEE Trans Magn*, 1997, 33: 3676~3678
- 9 Atanassova E, Dimitrova T, Koprinarova J. AES and XPS study of thin RF-sputtered Ta₂O₅ layers. *J Appl Surf Sci*, 1995, 84: 193~202
- 10 Tanuma S, Powell C J, Penn D R. Calculations of electron inelastic mean free paths for 31 materials. *Surf Anal*, 1998, 11: 577~589
- 11 Gokemejier N J, Ambrose T, Chien C L, et al. Long-range exchange coupling between a ferromagnet and an antiferromagnet across a nonmagnetic spacer layer. *J Appl Phys*, 1997, 81: 4999~5001

(2001-03-26 收稿, 2001-06-02 收修改稿)