

直流磁控溅射 Si 和玻璃衬底 Fe/Co 多层膜的磁性能比较*

夏爱林^{1)†} 韩宝善²⁾

1) (安徽工业大学材料科学与工程学院, 马鞍山 243002)

2) (中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室, 北京 100080)

(2007 年 5 月 15 日收到, 2007 年 6 月 7 日收到修改稿)

对直流磁控溅射 Si 和玻璃衬底 Co_t/Fe_{3t} ($t = 2, 3, 4, 5$ nm) 多层膜的磁性能进行了比较. 对于 t 相同但衬底不同的样品, 实验发现饱和磁化强度相差很小, 但是矫顽力却相差很大. 对矫顽力差异的理论分析表明, 多层膜的粗糙度和畴壁类型是引起这种差异的主要原因.

关键词: Fe/Co 多层膜, 磁性能, 矫顽力

PACC: 7550B, 7550P

1. 引 言

永磁材料要求具有高矫顽力 H_{cj} , 高饱和磁化强度 M_s 和高居里温度 T_c , 但想在单一相中同时实现这些目标是十分困难的^[1,2]. 目前, 解决办法是结合“复合物”(多相组成但整体表现单相行为的系统)和“纳米结构”(由纳米颗粒组成的系统)的概念, 制备“纳米复合磁结构”. 这种方法制备的纳米永磁材料由交换耦合的软磁和硬磁两相或者多相组成, 但是对外呈现单一相的行为, 使得材料具有较高的剩磁比、矫顽力和磁能积等极佳的磁性能^[3,4]. 一种制备磁性纳米复合结构材料的方法是将永磁和软磁材料交替溅射, 制备成因相邻层间具有交换耦合作用而整体呈现单相行为的多层膜结构^[5].

Co 是唯一和 Fe 组成合金后能提高饱和磁化强度和居里温度的元素^[6]. 因此, 对 Fe/Co 多层膜的研究有助于器件的小型化. 最近, 人们对 Fe/Co 多层膜的研究有着越来越浓厚的兴趣. Asti 等^[7]研究了 Si 衬底上极高真空电子束蒸发法制备的 $5[Co_x/Fe_{3x}]$ ($x = 5, 10, 15$ nm) 多层膜, 发现如果单层厚度和 Fe/Co 块材中畴壁宽度为同一数量级, 样品均呈现单相行为. Park 等^[8]研究了 Si 和玻璃衬底上射频溅

射法制备的 Co/Fe 和 Fe/Co 双层膜矫顽力的差异. Rateo 等^[9]研究了 Si 衬底上极高真空电子束蒸发法制备的 Co/Fe 多层膜面内各向异性的温度依赖性. 然而, 据作者所知, 目前还没有关于 Si 和玻璃衬底上直流磁控溅射制备的 Fe/Co 多层膜磁性能比较的报道. 本文采用直流磁控溅射法在 Si 和玻璃衬底上分别制备了 $[Co_t/Fe_{3t}]$ ($t = 2, 3, 4, 5$ nm) 多层膜, 对其磁性能进行了比较, 并且从理论上讨论了多层膜的矫顽力机理.

2. 实验方法

采用 Lesker CMS-18 直流磁控溅射系统, 室温下分别在 Si 和 Corning 7059 玻璃上制备了 $[Co_t/Fe_{3t}]$ ($t = 2, 3, 4, 5$ nm) 多层膜. 靶材为纯 Fe 和 Co, 腔室本底真空小于 4×10^{-5} Pa. 因为 Fe 单层、Co 单层的厚度和 Fe/Co 块材中畴壁厚度在相同数量级就能发生交换耦合作用而使多层膜呈现单相行为^[7], 我们选择 Co 层的厚度 t 分别为 2, 3, 4 和 5 nm, 并在样品表面镀 5 nm 的 Co 层作为保护层. 为保证可比性, 对相同厚度的薄膜, 镀膜时尽量保证衬底位置靠近.

用 ADE DMS Model-4 HF 型振动样品磁强计 (VSM) 测量样品的磁性能; 用 Bruker D8 型高级 X 射

* 安徽省教育厅自然科学基金项目(批准号: KJ2007B217)资助的课题.

† 通讯作者, E-mail: alxia@126.com

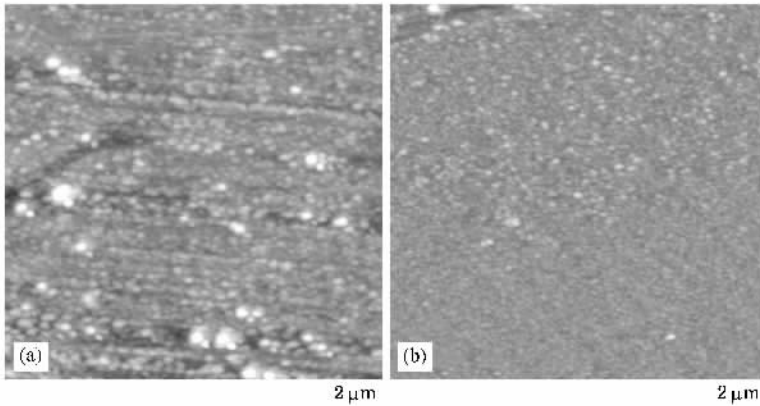


图 1 C_3F_9 (a) 和 $S-C_3F_9$ (b) 多层膜的典型形貌图(色标: 50 nm)

线衍射仪(XRD)进行X射线反射实验($Cu K\alpha$ 射线, 波长为 0.15406 nm);用 NanoScope IIIa MultiMode 型原子力显微镜(AFM)的接触模式测量多层膜的表面形貌和粗糙度.为方便讨论,玻璃(Si)衬底 $t = 2, 3, 4$ 和 5 nm 的样品分别命名为 C_2F_6 ($S-C_2F_6$), C_3F_9 ($S-C_3F_9$), C_4F_{12} ($S-C_4F_{12}$) 和 C_5F_{15} ($S-C_5F_{15}$), 并选择 C_3F_9 和 $S-C_3F_9$ 样品为典型样品.

3. 实验结果和讨论

我们知道,方均根粗糙度值(R_q)常被用来表征薄膜的表面粗糙程度.图 1 给出了典型样品 C_3F_9 和 $S-C_3F_9$ 的表面形貌图. C_3F_9 样品的 R_q 为 2.30 nm, 而 $S-C_3F_9$ 的 R_q 为 1.34 nm. 明显, C_3F_9 的表面远比 $S-C_3F_9$ 粗糙.图 2 给出了 C_3F_9 和 $S-C_3F_9$ 样品 $\theta-2\theta$ X 射线反射曲线图.从图 2(b)中可见很多图 2(a)中没有的 kissing fringe 峰,且图 2(a)中的强度比图 2(b)中下降得更快一些,这些都表明 $S-C_3F_9$ 的表面(界面)比 C_3F_9 光滑得多.实际上,粗糙度是 Si 衬底和玻璃衬底的主要区别之一.

图 3 是玻璃和 Si 衬底的典型立体形貌图,其方均根粗糙度值分别为 0.37 nm 和 0.09 nm.正如表 1 所示,对于相同的 t ,玻璃衬底上多层膜的表面要比 Si 衬底多层膜的粗糙得多.

表 1 和图 4 给出了多层膜样品的主要磁性能,其中 M_s 为饱和磁感应强度, H_{cj} 为内禀矫顽力.从表中可见,不同衬底相同 t 样品的 M_s 相差很小.所以,我们认为衬底是 Si 还是玻璃不是影响 M_s 的主要因素.然而,不同衬底相同 t 样品的 H_{cj} 却有着显

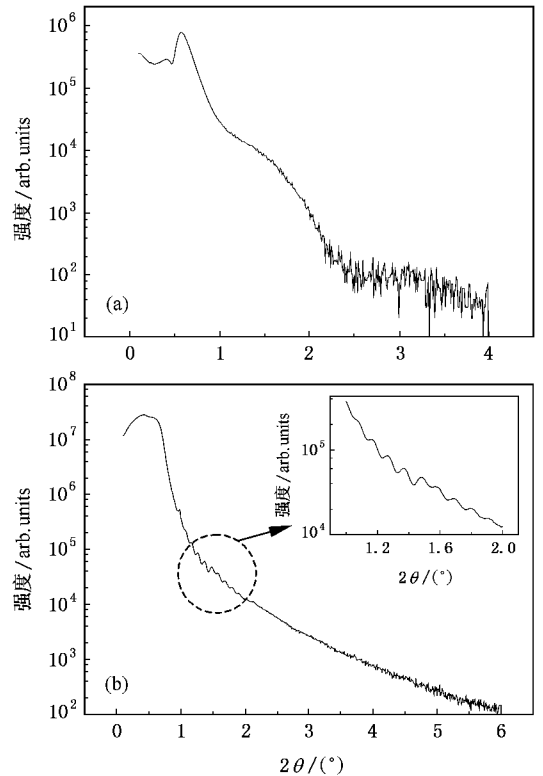


图 2 C_3F_9 (a) 和 $S-C_3F_9$ (b) 多层膜的 $\theta-2\theta$ XRD 反射曲线(b)中插图为 2θ 从 1° 到 2° 之间的放大)

著差别.究其原因,我们认为这主要和多层膜样品的表面粗糙度和畴壁类型有关.

对于 Fe/Co 多层膜,畴壁移动的矫顽力可以写为^[10]

$$H_c^{\text{mov}} = \frac{1}{2M_s} \left(\frac{\pi D^2 M_s^2}{(d+D)^2} + \frac{2\pi D d M_s}{d+D} \frac{\partial M_s}{\partial d} + \frac{A_{\text{ex}} \pi^2}{D d} + \frac{K_v D}{2d} + \frac{\pi D M_s^2}{d+D} \right) R_q, \quad (1)$$

其中, D 为畴壁厚度, d 为薄膜厚度.如果 M_s 近似

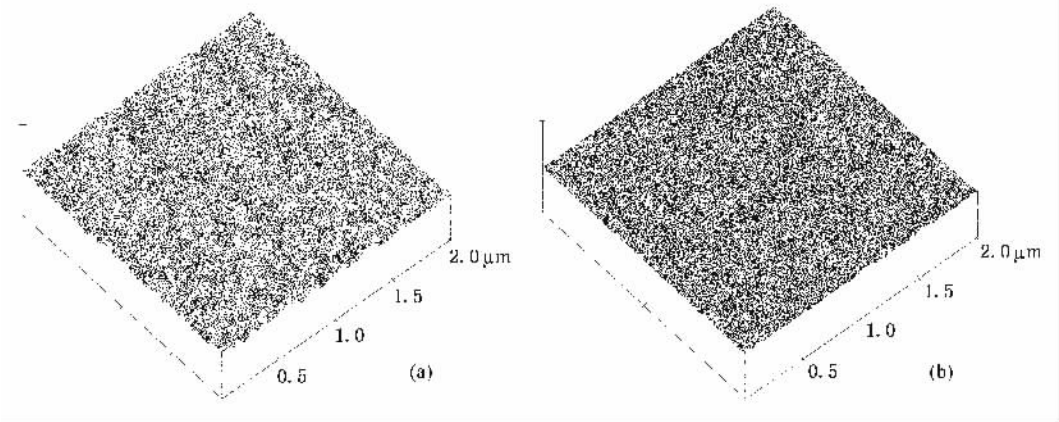


图3 玻璃(a)和Si(b)衬底典型立体形貌图(色标:10 nm)

表1 [Co_t/Fe_{3t}] (t=2,3,4,5 nm) 多层膜的主要性能

样品		M_s /(kemu/cm ³)		H_{c1} /(kA/m)		表面粗糙度/nm	
t/nm	总厚度/nm	玻璃衬底	Si 衬底	玻璃衬底	Si 衬底	玻璃衬底	Si 衬底
2	45	1.13	1.16	52.6	22.0	3.49	2.80
3	65	1.14	1.18	25.5	17.0	2.30	1.34
4	85	1.00	1.07	39.2	25.0	2.80	1.80
5	105	1.08	1.01	19.6	24.9	4.63	3.79

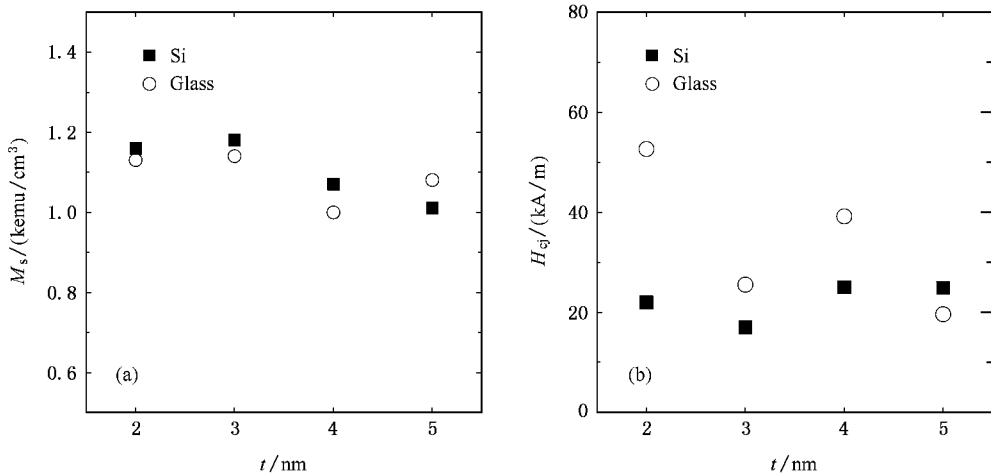


图4 [Co_t/Fe_{3t}] 多层膜的主要磁性能比较

为定值,则(1)式可写为

$$H_c^{mov} = \frac{1}{2M_s} \left(\frac{Dd + 2D^2}{(d + D)^2} \pi M_s^2 + \frac{A_{ex} \pi^2}{Dd} + \frac{K_v D}{2d} \right) R_q \quad (2)$$

所以,对于相同厚度 d 的薄膜,若 M_s 相差很小,那么表面越粗糙矫顽力越大^[11]。前面我们说过,玻璃衬底多层膜的方均根粗糙度要远高于 Si 衬底多层膜,且两者的 M_s 相差不大,所以其矫顽力比 Si 衬底

多层膜的矫顽力大。当 $t \leq 4$ nm 时,薄膜的厚度小于 100 nm,这个规律符合得很好。

但是,实验发现,当 $t = 5$ nm 时, C_5F_{15} 样品的矫顽力(19.6 kA/m)却比 $S-C_5F_{15}$ 样品的矫顽力(24.9 kA/m)小。有理论分析认为,在 Fe/Co 多层膜中“磁矩转动”矫顽力 H_c^{rot} 可以写为^[10]

$$H_c^{rot} = \frac{K_1}{M} + (N_e - N_h)M, \quad (3)$$

其中, N_e 和 N_h 分别为易轴和难轴方向的退磁因子. 对于 Néel 壁, $N_e = N_h$, 所以 H_c^{rot} 和表面粗糙度无关. 但对 Bloch 畴壁, $N_e = N_z = 1 - 2N_{xx}$, $N_h = N_{xx}$, 所以

$$H_c^{\text{rot}} = \frac{K_1}{M} + (1 - 3N_{xx})M. \quad (4)$$

可见, 对 Bloch 壁, 随着粗糙度的增加, “磁矩转动” 矫顽力 H_c^{rot} 减小^[12]. 我们知道, 一般当膜厚超过 100 nm 时, 样品中更容易形成 Bloch 畴壁^[13], 因此厚度为 105 nm、表面粗糙度小的 $\text{S-C}_5\text{F}_{15}$ 样品的矫顽力比同厚度但表面粗糙度大的 C_5F_{15} 样品高也就很正常了.

另外, 从表 1 可见, 由于样品制备时衬底位置等原因, 相同衬底不同厚度样品的方均根粗糙度发生一定的振荡, 而且无论是 Si 衬底还是玻璃衬底系列多层膜样品, 其矫顽力大小随着 t 的改变也发生振荡. 由 (1) 式, 可见这是由于矫顽力的大小与 M_s , d 和 R_q 均有关的缘故. 从表 1 还可见 $t \leq 4$ nm 时, 两

系列样品矫顽力的总体振荡规律和方均根粗糙度的振荡规律基本是一致的, 这正好说明粗糙度对矫顽力有着重要的影响.

4. 结 论

对 Si 和玻璃衬底上直流磁控溅射的 $[\text{Co}_t/\text{Fe}_{3t}]$ ($t = 2, 3, 4, 5$ nm) 多层膜的磁性能进行了比较, 实验发现:

1. t 相同的玻璃和 Si 两种衬底多层膜的饱和磁化强度 M_s 相差不大;
2. t 相同的玻璃和 Si 两种衬底多层膜的矫顽力 H_c 有较大差别, 理论分析认为这主要和样品的界面(表面)粗糙度以及样品中的畴壁类型相关.

兰州大学磁性材料研究所曹江伟同学制备了实验样品, 在此表示感谢.

- [1] Agazzi L, Bennett S, Berry F J, Carbuicchio M, Rateo M, Ruggiero G, Turilli G 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 3231
- [2] Skomski R, Coey J M D 1993 *Phys. Rev. B* **48** 15812
- [3] Xia A L, Ge H L, Chang C W, Chang W C, Han B S 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **305** 336
- [4] Chang C W, Chang H W, Chiu C H, Chang W C 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10N117
- [5] Ni J, Cai J W, Zhao J G, Yan S S, Mei L M, Zhu S F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3920 (In Chinese) [倪 经、蔡建旺、赵见高、颜世申、梅良模、朱世富 2004 物理学报 **53** 3920]
- [6] Jiles D 1998 *Introduction to magnetism and magnetic materials* (Second edition) (London: Chapman and Hall Press) p354
- [7] Asti G, Carbuicchio M, Ghidini M, Rateo M, Ruggiero G, Solzi

- M, D'Orazio F, Lucari F 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 6689
- [8] Park M H, Hong Y K, Gee S H, Mottern M L, Jang T W, Burkett S 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 7218
- [9] Rateo M, Carbuicchio M, Ghidini M, Solzi M 2004 *J. Magn. Magn. Mater.* **272-276** 1240
- [10] Zhao Y P, Gamache R M, Wang G C, Lu T M, Palasantzas G, De Hosson J Th M 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1325
- [11] Li M, Wang G C, Min H G 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 5313
- [12] Vilain S, Ebothe J, Troyon M 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **157-158** 274
- [13] Zhong W D 2000 *Ferromagnetism (II)*, (Beijing: Science Press) p113 (in Chinese) [钟文定 2000 铁磁学(中册)(北京: 科学出版社) 第 113 页]

Comparison of magnetic properties of Fe/Co multilayers prepared by DC magnetron sputtering on glass and Si substrates^{*}

Xia Ai-Lin^{1)†} Han Bao-Shan²⁾

¹⁾ School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

²⁾ State Key Laboratory of Magnetism, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Received 15 May 2007 ; revised manuscript received 7 June 2007)

Abstract

We presented a comparison of magnetic properties of $[Co_t/Fe_{3t}]_5$ ($t = 2, 3, 4, 5$ nm) multilayers prepared by DC magnetron sputtering on glass and Si substrates. For the multilayers with the same t but prepared on different substrates, it was found that the saturated magnetization differed little, but the coercivity differed greatly. Moreover, the difference in coercivity mechanism was analyzed theoretically to explain this difference.

Keywords : Fe/Co multilayers, magnetic properties, coercivity

PACC : 7550B, 7550P

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Education Commission of Anhui Province, China (Grant No. KJ2007B217).

[†] Corresponding author. E-mail : xialia@126.com