

CoFeB/Pt 多层膜的垂直磁各向异性研究*

刘娜¹⁾²⁾ 王海¹⁾ 朱涛^{2)†}

1) (首都师范大学物理系, 北京 100048)

2) (中国科学院物理研究所, 磁学国家重点实验室, 北京 100190)

(2011年9月5日收到; 2012年2月6日收到修改稿)

具有垂直磁各向异性的磁性纳米结构是自旋转移力矩器件的重要研究内容, 本文采用反常霍尔效应系统地研究了磁控溅射法制备的 $[\text{CoFeB}/\text{Pt}]_n$ 多层膜的垂直磁各向异性. 当 CoFeB 的厚度小于 0.6 nm 时, 可以在 $[\text{CoFeB}/\text{Pt}]_n$ 多层膜中观察到清晰的垂直磁各向异性, 其垂直磁各向异性强烈依赖于 CoFeB 和 Pt 层厚度及多层膜周期数. 当多层膜周期数 $n \geq 5$ 时, 出现零剩磁现象. 另外, $[\text{CoFeB}/\text{Pt}]_n$ 多层膜的矫顽力均小于 $2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, 有望作为垂直自由层的重要候选材料应用于垂直磁纳米结构中.

关键词: 磁性多层膜, 垂直磁各向异性, 反常霍尔效应

PACS: 75.70.-i, 75.30.Gw, 75.47.-m

1 引言

随着自旋电子学的发展, 电流诱导的电子自旋转移力矩 (STT) 被认为将在未来自旋电子器件中扮演重要角色, 因此, 具有垂直磁各向异性 (PMA) 的磁纳米结构 (其磁性层的磁矩垂直于膜面, 以下简称为垂直磁纳米结构, 如垂直磁隧道结) 近年来开始成为国内外研究的热点之一^[1-4]. 其原因有以下几个方面: 首先, 垂直磁纳米结构一般能形成更小的记录单元, 从而能大大提高信息的存储密度; 其次, 垂直磁纳米结构对热扰动 (thermal fluctuations) 有更好的稳定性; 第三, 垂直磁纳米结构能够有效地消除磁性层面内的涡旋式转动 (magnetization curling) 对面积和形状的限制; 第四, 也是最重要的一点, 垂直磁纳米结构中电流诱导磁化翻转 (CIMS) 所需要的临界电流密度 j_c 比面内磁结构小很多, 从而能很好地降低未来 STT 器件的功耗.

具有 PMA 的材料有很多, 如 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pt, Fe/Pd 多层膜和 FePt, FePd 合金薄膜等^[5-7]. 最近, Jung 等^[8] 报道了 CoFeB/Pd 多层膜的 PMA, 其中 CoFeB 厚度可达 2 nm. 然而 Fowley 等^[9] 认

为只有当 CoFeB 厚度比较薄时, CoFeB/Pd 多层膜中才观察到 PMA 现象. 迄今为止, CoFeB/Pt 多层膜的 PMA 还未见任何报道. 本文报道了采用反常霍尔效应 (AHE) 这一研究手段对不同的 Pt 厚度、CoFeB 厚度和多层膜周期数的 $[\text{CoFeB}/\text{Pt}]_n$ 多层膜的 PMA 进行的系统研究.

2 实验方法

$[\text{CoFeB}/\text{Pt}]_n$ 磁性多层膜采用直流磁控溅射方法在 Si/SiO₂ 基片上制备而成, 溅射系统的本底真空优于 $8 \times 10^{-6} \text{ Pa}$. 溅射气体为纯度为 99.9999% 的高纯 Ar 气, 溅射气压为 0.4 Pa, CoFeB 层采用纯度为 99.9% 的进口 Co₄₀Fe₄₀B₂₀ 靶材制备, Pt 层采用纯度为 99.95% 的靶材制备. 实验中, 为了便于比较, 所有样品先沉积一层 4 nm 厚的 Pt 作为缓冲层.

磁性材料的霍尔效应包括正常霍尔效应 (OHE) 和 AHE 两部分, 霍尔电阻率 ρ_{xy} 与外加磁场 H 的关系是^[10]

$$\rho_{xy} = R_0 H + 4\pi R_s M_{\perp}, \quad (1)$$

其中, R_0 为正常霍尔系数, R_s 为反常霍尔系数, M_{\perp} 为材料的磁性在垂直方向上的分量. 一般地, AHE

* 国家自然科学基金 (批准号: 50871120, 11079052, 11174354) 资助的课题.

† E-mail: tzhu@aphy.iphy.ac.cn

来自于自旋 - 轨道相互作用, 并且远大于 OHE, 因此, 根据 (1) 式可以得到 $\rho_{xy} \propto M_{\perp}$, 即从 ρ_{xy} 随 H 的变化关系 (霍尔回线) 可以获得垂直磁结构的磁化特征 [1]. 本文就是通过测量样品的室温霍尔电阻率随外加磁场的变化关系, 系统研究了 [CoFeB/Pt]_n 磁性多层膜的 PMA.

3 分析和讨论

图 1 为 Pt(4 nm)/[CoFeB(t)/Pt(1.5 nm)]₂ 系列样品的矫顽力 H_C 随 CoFeB 厚度 t 的变化关系. 内插图分别为 CoFeB 厚度为 0.49 和 0.61 nm 时的霍尔回线, ρ_{xy}^S 为饱和霍尔电阻率. 从图 1 可以看出, 样品的霍尔回线的形状随着 CoFeB 厚度的减小而不同, 随着 CoFeB 厚度的减小, 回线的矩形度 (M_r/M_s , M_r 为剩磁, M_s 为饱和磁化强度) 开始增大, 当 CoFeB 厚度为 0.53 nm 时, 其矩形度增大到 1, 这表明此时的样品已经表现出明显的 PMA 特征. 同时, H_C 随 CoFeB 厚度的减小也逐渐增大. 当 CoFeB 厚度在 0.5 nm 左右时, 样品具有非常好的 PMA 特征. 另一方面, 垂直磁化的 [CoFeB/Pt]_n 多层膜的 H_C 均小于 $2 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, 比文献 [11] 报道的 [CoFe/Pt]_n 多层膜的 H_C 小一个量级. 因此, 垂直磁化的 [CoFeB/Pt]_n 多层膜可以作为垂直自由层的重要候选材料应用于垂直磁纳米结构中.

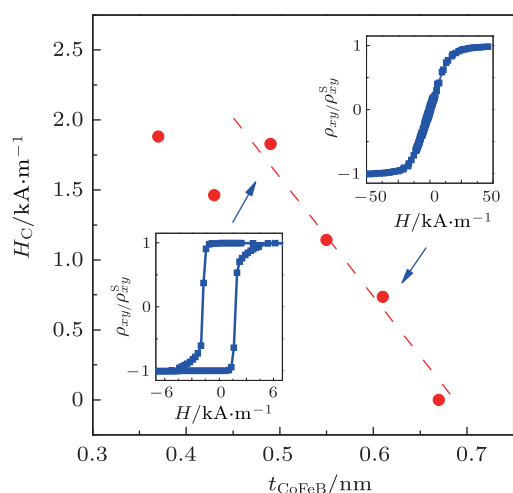


图 1 Pt(4 nm)/[CoFeB(t)/Pt(1.5 nm)]₂ 多层膜样品矫顽力 H_C 随 CoFeB 厚度 t 的变化关系, 内插图分别为 $t_{\text{CoFeB}} = 0.49$ 和 0.61 nm 时的霍尔回线

一般地, 磁性薄膜的有效磁各向异性可写为如下形式:

$$K_{\text{eff}} = K_V + 2\frac{K_S}{t}, \quad (2)$$

其中 t , K_V , K_S 分别表示磁性层的厚度以及体和界面对各向异性的贡献. 体磁各向异性 K_V 主要来自于形状各向异性, 磁弹性各向异性, 以及磁晶各向异性的贡献, 与具体材料的形状、晶相结构和材料的弹性应力等密切相关 [12,13], 一般来说, 磁性薄膜由于退磁场的原因 $K_V < 0$. 界面磁各向异性 K_S 来源于界面 3d 电子的杂化, 一般地, $K_S > 0$. K_V 和 K_S 相互竞争, 当 $K_{\text{eff}} > 0$ 时, 样品的磁化方向就能够垂直膜面, 即样品具有 PMA 特征.

对于 Pt(4 nm)/[CoFeB(t)/Pt(1.5 nm)]₂ 系列样品而言, 当 CoFeB 层厚度大于 0.3 nm 时, 此时 CoFeB/Pt 间能够形成较清晰的界面, 界面各向异性占据主导地位 [11], 使得 $K_{\text{eff}} > 0$ 成立, 从而导致样品具有明显的 PMA 特征. 在一定的 CoFeB 厚度范围内, K_{eff} 都比较大, H_C 也就较大 (如图 1 所示). 随着 CoFeB 厚度的进一步增大, 增加的 CoFeB 并没有对 K_{eff} 产生更多正向的贡献, 相反界面各向异性随着 CoFeB 厚度的增大而减小. 因此, 表现为 K_{eff} 开始减小, H_C 也随 CoFeB 厚度增加而减小, 直至 CoFeB 厚度 (对于此系列) 大于 0.61 nm 时, $K_{\text{eff}} < 0$, 此时样品的磁化方向不再垂直于膜面.

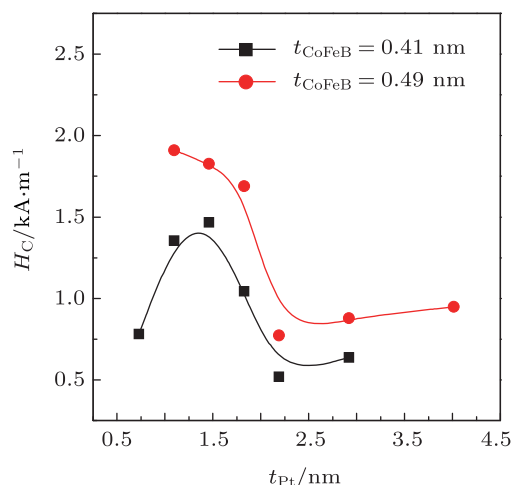


图 2 Pt(4 nm)/[CoFeB(0.41 nm, 0.49 nm)/Pt(t)]₂ 系列样品 H_C 随 Pt 厚度的变化

[CoFeB/Pt]_n 多层膜的 PMA 特征与 Pt 层的厚度同样具有密切的关系. 图 2 为 Pt(4 nm)/[CoFeB/Pt(t)]₂ 系列样品 H_C 随 Pt 厚度的变化关系. 这个样品的 CoFeB 厚度有两种, 分别为 0.41 和 0.49 nm, 由前面 PMA 特性随 CoFeB 厚度的关系可知, 此时的多层膜样品都应具有很好的 PMA 特征. 实际上, 本系列所有样品的剩磁比 M_r/M_s 均为 1. 当 Pt 厚度大于 1 nm 时, CoFeB/Pt 间能够形成较清晰的界面, 使得 $K_{\text{eff}} > 0$ 成立, 从而导致样品

具有明显的 PMA 特征, 这一点与图 1 可以互相印证. 但是, 当 Pt 厚度大于 1.5 nm 时, H_C 下降迅速, 这可能与 Pt 层增厚后削弱了 CoFeB 层之间的相互耦合有关.

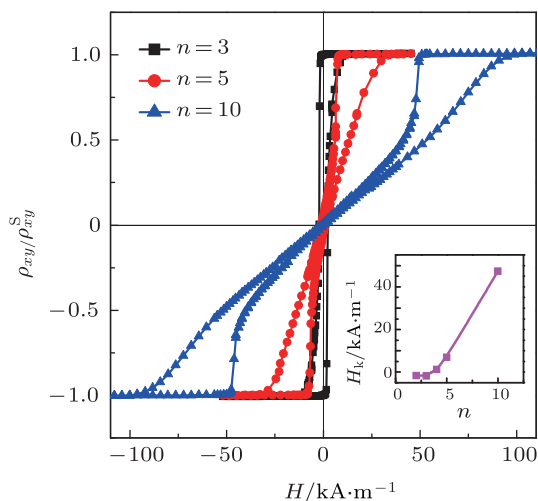


图 3 Pt(4 nm)/[CoFeB(0.49 nm)/Pt(1.5 nm)] $_n$ 系列样品的霍尔电阻率随垂直外加磁场的变化, 内插图为翻转场随多层膜周期数的变化

[CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜的 PMA 特征不仅与 CoFeB 和 Pt 的厚度有关, 而且与多层膜周期数也有关. 图 3 为 Pt(4 nm)/[CoFeB(0.49 nm)/Pt(1.5 nm)] $_n$ 系列样品的霍尔回线. 从图 3 可以看出, $n = 3$ 与 $n = 2$ 样品的矩形度均为 1. 随着多层膜周期数的增加, 回线开始倾斜, 仅仅再增加一个周期, 即 $n = 4$ 时, 回线的矩形度迅速变差, 并形成蜂腰状形状. $n \geq 5$ 时, 蜂腰状回线的倾斜度继续增大, 剩磁比接近于零. 图 3 的内插图 of 翻转场 H_k 随

多层膜周期数的变化. 可以看到, 当 $n \leq 3$ 时, H_k 为负, 此时的 [CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜的磁化过程与一般的铁磁材料一样, 表现为不可逆的一致磁化翻转. 当 $n \geq 4$ 时, 样品仍然具有 PMA 特征, 原因是 n 较小的磁性多层膜一般表现为单畴态, 其磁化过程为不可逆的一致磁化翻转, 但是, 随着 n 的增大, 界面粗糙度升高, 此时的磁性多层膜就会产生分畴, 形成多畴态, 其磁化曲线多表现为蜂腰状, 在剩磁状态下, 小磁畴互相抵消, 因此剩磁比就趋向为零, 类似的磁化过程在 [(Co/Pt) $_n$ Co/CoO] 多层膜中亦有报道^[14]. 但是以往报道的 Co/Fe, CoFe/Pt 等材料体系, 一般当 $n > 10$ 才出现这种剩磁为零的现象, 因此, 当 [CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜在应用于垂直磁结构时, 应选择多层膜周期数 $n < 3$, 此时样品表现为单畴态, 有利于其在 STT 中的应用.

4 结论

本文对不同的 CoFeB 厚度、Pt 厚度和多层膜周期数对 [CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜的垂直各向异性的影响进行了系统研究. 当 CoFeB 层的厚度小于 0.7 nm, Pt 的层的厚度小于 1.5 nm 时, [CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜中可以观察到清晰的 PMA 特征. 随着多层膜周期数 n 的增加, 磁性多层膜开始产生分畴. 当 $n \geq 5$ 时, [CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜由于分畴出现零剩磁现象. 另外, [CoFeB/Pt] $_n$ 多层膜的矫顽力 H_c 均小于 $2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$, 有望作为垂直自由层的重要候选材料应用于垂直磁纳米结构中.

- [1] Carvello B, Ducruet C, Rodmacq B, Auffret S, Gautier E, Gaudin G, Dieny B 2009 *Appl. Phys. Lett.* **92** 102508
- [2] Yoo I, Kim D K, Kim Y K 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10C919
- [3] Nakayama M, Kai T, Shimomura N, Amano M, Kitagawa E, Nagase T, Yoshikawa M, Kishi T, Ikegawa S, Yoda H 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07A710
- [4] Liu L, Moriyama T, Ralph D C, Buhrman R A 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 122508
- [5] Wei D H, Chou S C, Chin T S, Yu C C, Liou Y, Yao Y D 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10N120
- [6] Wang H, Zhou Y S, Wang A L, Zheng W, Chen J C 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** S151 (in Chinese) [王海, 周云松, 王艾玲, 郑鹤, 陈金昌 1999 物理学报 **48** S151]
- [7] Feng C, Zhan Q, Li B H, Teng J, Li M H, Jiang Y, Yu G H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3503 (in Chinese) [冯春, 詹倩, 李宝河, 滕蛟, 李明华, 姜勇, 于广华 2009 物理学报 **58** 3503]
- [8] Jung J H, Lim S H, Lee S R 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 042503
- [9] Fowley C, Decorde N, Oguz K, Rode K, Kurt H, Coey J M D 2010 *IEEE Magn.* **46** 2116
- [10] Chien C L, Westgate C R 1980 *The Hall Effect and Its Application* (1st Ed.) (New York: Plenum) p55
- [11] Ding Y, Judy J H, Wang J P 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 10J117
- [12] Zhai Z H, Teng J, Li B H, Wang L J, Yu G H, Zhu F W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2064 (in Chinese) [翟中海, 滕蛟, 李宝河, 王立锦, 于广华, 朱逢吾 2006 物理学报 **55** 2064]
- [13] Fu Y Q, Liu Y, Jin C, Yu G H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7977 (in Chinese) [付艳强, 刘洋, 金川, 于广华 2009 物理学报 **58** 7977]
- [14] Sang H, Chien C L, Yang F Y 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 013906

Perpendicular magnetic anisotropy in the CoFeB/Pt multilayers by anomalous Hall effect*

Liu Na¹⁾²⁾ Wang Hai¹⁾ Zhu Tao^{2)†}

1) (*Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

2) (*State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 5 September 2011; revised manuscript received 6 February 2012)

Abstract

The perpendicular magnetic anisotropy (PMA) in as-deposited [CoFeB/Pt]_n multilayer is studied by using anomalous Hall effect. A clear PMA is observed in the ultrathin (~0.5 nm) amorphous CoFeB layer sandwiched by Pt. The PMA in as-deposited [CoFeB/Pt]_n multilayers is strongly dependent on the thicknesses of CoFeB, Pt, and the number of CoFeB/Pt bilayers. With the increase of the number of CoFeB/Pt bilayers ($n \geq 5$), the hysteresis loop changes from rectangular to bow-tie shaped, and then the net moment approaches to zero in the remnant state. Moreover, the coercivity of [CoFeB/Pt]_n multilayers is much low, which meets the requirement for free perpendicular electrode in the future spintronic device.

Keywords: magnetic multilayer, perpendicular magnetic anisotropy, anomalous Hall effect

PACS: 75.70.-i, 75.30.Gw, 75.47.-m

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50871120, 11079052, 11174354).

† E-mail: tzhu@aphy.iphy.ac.cn