

# Pt 插层对 Co/FeMn 界面的影响\*

付艳强 刘 洋 金 川 于广华†

(北京科技大学材料物理与化学系, 北京 100083)

(2009 年 2 月 22 日收到, 2009 年 3 月 25 日收到修改稿)

采用磁控溅射的方法制备了 Co/FeMn/Co 多层膜, 研究了 Cd(底部)/FeMn 和 FeMn/Cd(顶部)界面插入 Pt 层后磁矩的变化情况. 通过测量磁滞回线可知, Cd(底部)/FeMn 界面的 Pt 插层改变了体系的饱和磁化强度  $M_s$ . 随着 Co 层厚度 ( $t_{Co}$ ) 的增加  $M_s$  不断趋近于 Co 块体结构理论值 1440 kA/m. 这是因为 Cd(底部)/FeMn 界面产生了净磁矩, 而界面处的 Pt 插层可以减少这种净磁矩的产生. 但是, FeMn/Cd(顶部)界面却表现出了与 Cd(底部)/FeMn 界面不同的性质, 其界面的 Pt 插层对磁矩影响很小.

关键词: 磁性多层膜, 垂直磁各向异性, 交换耦合

PACC: 7550

## 1. 引 言

由于传统的平行膜面磁各向异性铁磁/反铁磁 (FM/AFM) 交换耦合磁性多层膜在制作成亚微米或更小元器件时, 会出现涡流磁畴结构<sup>[1]</sup>, 使磁学性能受到严重影响, 最终将降低相关器件的磁学稳定性, 成为高信息存储技术发展的严重障碍. 为解决这一问题, 具有垂直膜面的磁各向异性交换耦合的磁性多层膜的研究引起了人们的重视, 利用这种多层膜加工成元件到亚微米尺寸甚至更小尺寸时, 元件的磁畴处于单磁畴结构状态, 从而克服了平行膜面的磁各向异性交换耦合的磁性多层膜的缺陷, 为下一代高信息存储提供了材料上的保障<sup>[2]</sup>.

在 FM/AFM 交换耦合体系中, 交换偏置场的大小受到各种因素的影响, 比如, 铁磁/反铁磁界面的非磁性插层或者反铁磁层的掺杂<sup>[3]</sup>, 铁磁层和反铁磁层的厚度和种类<sup>[4-6]</sup>, 温度<sup>[4,5]</sup>等因素, 都对交换偏置场有较大的影响.  $(Pt/Co)_n/FeMn$  (或  $(Pt/Co)_n/IrMn$ ) 是具有垂直磁各向异性交换偏置的多层膜结构, 人们已经做出大量的工作对其进行研究<sup>[7-14]</sup>, 以其为基础的垂直自旋阀也已制备出来<sup>[7,8,11]</sup>. 为提高交换偏置场  $H_{ex}$ , 可以通过在铁磁层与反铁磁层间插入一定厚度的 Pt 来实现. 最上面的 Co 层在 FeMn

层的诱导下垂直各向异性变差, 文献 [15-17] 的研究表明, Pt 插层通过恢复 Co/FeMn 界面 Co 层的垂直磁各向异性, 使交换偏置场得到了提高. 但仅靠 Co/Pt 界面所提高的垂直磁各向异性, 并不足以将交换偏置场提高那么多, 所以 Pt 插层应该还具有其他的作用. 从界面磁矩的研究发现, 在 FM/AFM 交换偏置体系中, AFM 界面的磁矩没有完全补偿, 其中大部分未补偿磁矩可以随外场翻转, 这使体系的饱和磁矩增加; 另一部分未补偿磁矩被反铁磁层钉扎, 产生交换偏置<sup>[18,19]</sup>. 界面的未补偿磁矩的状态是影响界面交换耦合的重要因素, 本课题组最近的工作表明<sup>[20]</sup>, 在  $(Pt/Co)_n/FeMn$  中的 FM/AFM 界面插入超薄 Pt 层, 会导致体系的饱和磁矩有所下降. 本文进一步研究 Pt 插层对 Cd(底部)/FeMn 界面和 FeMn/Co(顶部)界面影响的差异, 讨论了 Pt 插层对界面磁矩的影响给交换耦合带来的变化.

## 2. 实 验

全部样品均在 DV-502 型磁控溅射系统中制备. 系统的本底真空优于  $5 \times 10^{-5}$  Pa, 溅射气体为 99.99% 的高纯 Ar 气, 溅射气压为 0.5 Pa. Co 靶和 FeMn 靶纯度为 99.9%, 采用直流溅射. Pt 靶纯度为 99.95%, 采用射频溅射. 各靶的溅射速率: Co 为

\* 国家自然科学基金(批准号 50831002, 50871014, 50671008)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ghyu@mater.ustb.edu.cn

0.08 nm/s, FeMn 为 0.08 nm/s, Pt 为 0.13 nm/s. 所用基片均为清洗干净的玻璃盖玻片. 系列样品的基本结构如下:

( I ) A : glass/Pt ( 24 nm )/Cd (  $t$  )/FeMn ( 25 nm )/Cd (  $t$  )/Pt ( 8 nm );

B : glass/Pt ( 24 nm )/Co (  $t$  )/Pt ( 0.4 nm )/FeMn ( 25 nm )/Cd (  $t$  )/Pt ( 8 nm );

C : glass/Pt ( 24 nm )/Co (  $t$  )/FeMn ( 25 nm )/Pt ( 0.4 nm )/Cd (  $t$  )/Pt ( 8 nm );

D : glass/Pt ( 24 nm )/Co (  $t$  )/Pt ( 0.4 nm )/FeMn ( 25 nm )/Pt ( 0.4 nm )/Cd (  $t$  )/Pt ( 8 nm ).

其中  $t = 2, 4, 6, 8, 10, 12$  monolayer ( ML, 原子层 ).

( II ) glass/Pt 22 nm ( Pt 2.1 nm/Co 0.3 nm )<sub>4</sub>/Pt 20 nm ;

glass/Pt 22 nm ( Pt 2.1 nm/Co 0.3 nm )<sub>4</sub>/FeMn 25 nm/Pt 20 nm.

系列样品 ( I ) ( II ) 制备过程中在垂直膜面方向施加约为 60 kA/m 的磁场, 以在样品垂直膜面方向诱导易磁化轴. 所有系列样品的磁滞回线测量均采用 MicroMag2900 型交变梯度磁强计 ( AGM ), 测量时在系列样品 ( I ) 的垂直膜面和平行膜面方向分别施加  $\pm 1193.7$  kA/m 变化范围之间的测量场, 在系列样品 ( II ) 的垂直膜面方向施加  $\pm 1193.7$  kA/m 变化范围之间的测量场, 交换偏置场根据磁滞回线中心的偏移来得到. 测量磁矩所用样品面积均为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ .

### 3. 结果与讨论

图 1 中 ( a ), ( b ) 和 ( c ), ( d ) 分别是 Co 层厚度为 4 ML 和 8 ML 时, 系列样品 ( I ) 中 A, B, C, D 各样品的磁滞回线 ( 其中 ( a ), ( c ) 为在水平测量场下的结果, ( b ), ( d ) 为在垂直测量场下的结果 ), 对比这些磁滞回线可以看到, 样品 A 与 C, B 与 D 的磁滞回线形状分别相似. 当 Co 层较薄 ( 4 ML ) 时, 样品 A, C 具有明显的水平各向异性, 而在 Cd ( 底部 )/FeMn 界面插入 0.4 nm Pt 插层的 B, D 样品较在 Cd ( 底部 )/FeMn 界面无插层的 A, C 样品垂直各向异性得到了提高; 当 Co 层较厚 ( 8 ML ) 时, A, B, C, D 各样品均体现出明显的水平各向异性, 且插 Pt 与不插 Pt 的差异减小. 如图 1 ( a ), A, C 呈现易轴特征, 而 B 曲线呈现难轴特征. 这说明 Cd ( 底部 )/FeMn 界面插 Pt 使水平各向

异性变差, 也就是说, Cd ( 底部 )/FeMn 界面插 Pt 对垂直各向异性有利, 而 FeMn/Cd ( 顶部 ) 插 Pt 对各向异性的影响不太明显. 同样, 通过 B 与 D, C 与 D 的比较也可以得到相同的结论. 当 Co 层稍厚时 ( 8 ML ), 如图 1 ( c ), 插层对各向异性的影响不如 Co 层较薄 ( 4 ML ) 时那么强烈.

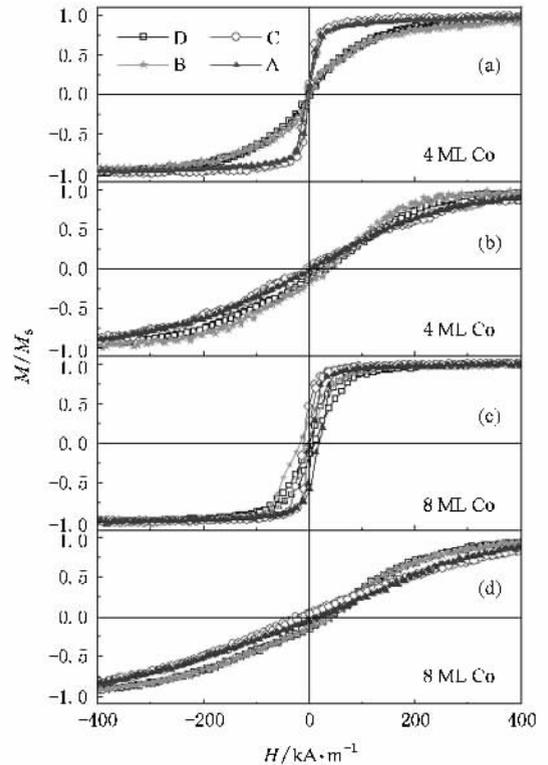


图 1 Co 层为 4 ML 和 8 ML 时, 系列样品 ( I ) 中 A, B, C, D 各样品的磁滞回线 ( a ), ( c ) 为水平测量场 ( b ), ( d ) 为垂直测量场

单原子层 Co 膜是水平各向异性的, 因此即使在溅射生长过程当中施加垂直诱导场, 样品 A 还是典型的水平各向异性. ( Pt/Co )<sub>n</sub> 多层膜之所以为垂直各向异性是由于具备了两个条件: 1) 具有重复性的 Pt/Co 界面, Pt/Co 界面 Pt 5d-Co 3d 电子杂化对周期膜获得较好的垂直各向异性贡献颇多<sup>[21]</sup>; 2) 具有较薄的 Co 层, 当 Co 层增厚至 10 Å 左右时, 晶体结构会由面心立方结构 ( fcc ) 转变为密排六方结构 ( hcp ), 这对在 ( 111 ) 方向取得垂直各向异性很不利<sup>[22]</sup>. 样品 B, D 在 Cd ( 底部 )/FeMn 界面插入 Pt 后, 提供了一个 Co/Pt 界面, 从而垂直各向异性得到了提高. 但 Co/Pt 界面的数量过少, 所以并没有形成很好的垂直各向异性. 而且当 Co 层变厚后, Co 由 fcc 开始向 hcp 转变, Pt 插层的作用也变得不明显 ( 如图 1 ( d ) ).

对于 FeMn/Cd ( 顶部 ) 界面, 虽然插入 Pt 后同样

提供了 Pt/Co 界面,但是由于上层 Co 层是在 FeMn 层上生长的,FeMn 层并不能向 Pt 缓冲层一样诱导生长 (111) 结构.图 2 中 XRD 谱表明,对于样品 glass/Pt (22 nm) [ Pt (2.1 nm) /Co (0.3 nm) ] /Pt (20 nm) 所产生的 Pt (200) 峰十分微弱,而具有 FeMn 层的样品 glass/Pt (22 nm) [ Pt (2.1 nm) /Co (0.3 nm) ] /FeMn (25 nm) /Pt (20 nm) 却出现了很强的 Pt (200) 峰.这说明 FeMn 层诱导生长了 Pt (200),而不是 Pt (111).同样,在 FeMn 的上表面生长的 Co 的织构也会受到影响,所以插入 Pt 层后也不能提高垂直各向异性,因此在 FeMn/Co $\alpha$  (顶部) 界面插入 Pt 对各向异性没有影响.

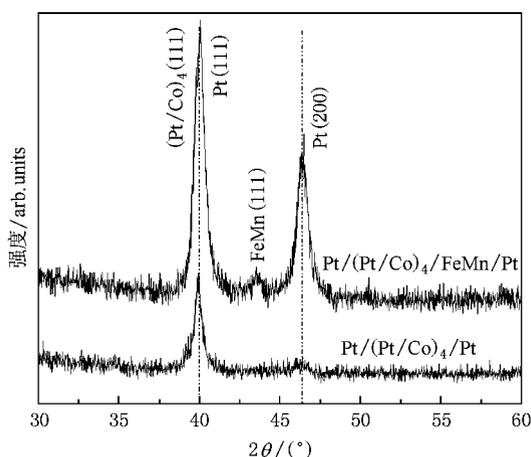


图 2 glass/Pt22 nm [ Pt2.1 nm/Co0.3 nm ] /Pt 20 nm 与 glass/Pt 22 nm [ Pt 2.1 nm/Co 0.3 nm ] /FeMn 25 nm/Pt 20 nm 的 XRD 谱

Pt 插层除对体系各向异性产生影响外,还改变了体系的饱和磁化强度  $M_s$ .图 3 显示样品 (I) 中各体系的饱和磁化强度  $M_s$  (计算  $M_s$  时所用体积为铁磁层 Co 的体积) 均比 Co $\alpha$  (hcp 结构或 fcc 结构块体) 的理论值 1440 kA/m 大,但随着 Co 层厚度的增加  $M_s$  不断趋近于理论值.而 Pt 插层改变了体系的饱和磁化强度  $M_s$ ,对应 Pt 插层位置不同的样品,虽然均具有这种变化趋势,但是变化幅度并不相同.这说明对这四种体系,有某种效应可以增加一定量的磁矩,当将其换算为饱和磁化强度时(除以 Co 层的体积),这个增量对饱和磁化强度  $M_s$  的贡献会随着 Co 层的增厚而减小,并且这个增量还会由于 Pt 插层以及 Pt 插层的位置而发生改变.

为弄清 Pt 插层分别在 Co $\alpha$  (底部) /FeMn 或 FeMn/Co $\alpha$  (顶部) 界面的作用,我们对图 3 中数据进行如下处理(其中 A, B, C, D 为样品系列编号):

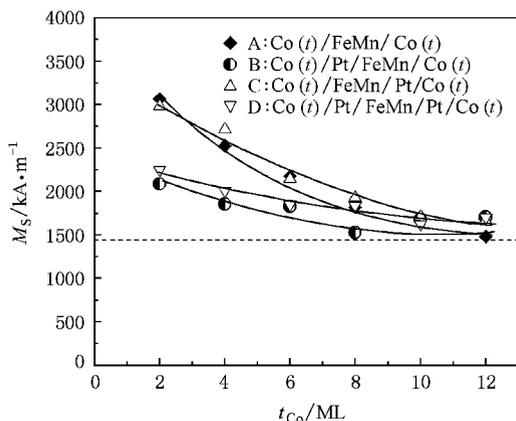


图 3 系列样品 (I) A, B, C, D 的  $M_s$  随 Co 厚度变化关系(水平虚线为 Co 的  $M_s$  理论值 1440 kA/m)

1) Pt 插层在 Co $\alpha$  (底部) /FeMn 界面对  $M_s$  的影响可以由  $M_s(B) - M_s(A)$ ,  $M_s(D) - M_s(C)$  得到,见图 4(a).

2) Pt 插层在 FeMn/Co $\alpha$  (顶部) 界面对  $M_s$  的影响可以由  $M_s(C) - M_s(A)$ ,  $M_s(D) - M_s(B)$  得到,见图 4(b).

上述数据处理方法可以达到如下目的:

1) 两体系  $M_s$  相减可以除去 Co 层各向异性转变和系统误差等因素对体系  $M_s$  的影响,得到的结果只表明 Pt 插层在 Co $\alpha$  (底部) /FeMn 或 FeMn/Co $\alpha$  (顶部) 界面处的作用效果.

2) 研究一个界面时可以同时拥有两组相互独立的数据,通过两组数据的比对可以判断所得到的规律的可信度.

由图 4(a) 可以看到,在 Co $\alpha$  (底部) /FeMn 界面处插入 0.4 nm 的 Pt 后,当 Co 层较薄时  $M_s$  较无插层时降低,随着 Co 层的加厚 Pt 插层对  $M_s$  的降低作用不断减弱至零,甚至最后  $M_s$  还有所增加.图中两组独立数据显示的结果比较吻合,说明上述规律具有较高的可信度.

由图 4(b) 可以看到,在 FeMn/Co $\alpha$  (顶部) 界面处插入 0.4 nm 的 Pt,对体系的  $M_s$  改变并不明显,基本在零线附近,对于多数实验点  $M_s$  略有增加.两组独立数据显示的结果比较吻合,说明上述规律具有较高的可信度.

综合上述信息,我们可以推断体系的  $M_s$  相对于理论值的增量来主要源于 Co $\alpha$  (底部) /FeMn 界面,即由于 Co $\alpha$  (底部) /FeMn 界面出现了多于单纯 Co 层

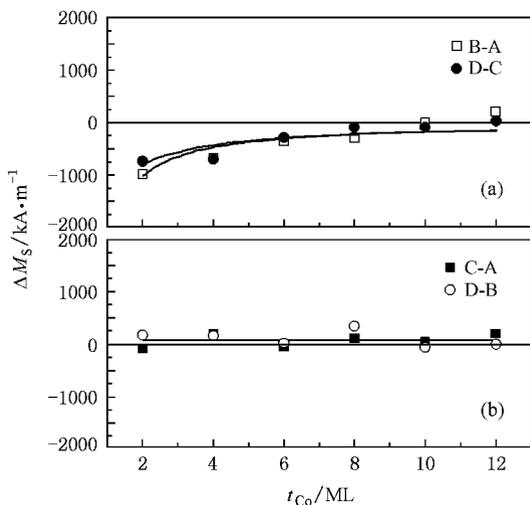


图 4 Pt 在 Cc(底部)/FeMn 界面时 (a) 及 Pt 在 FeMn/Cc(顶部) 界面时 (b) 对  $M_s$  的影响随 Co 厚度变化的关系

的磁矩, 而 Pt 插层的介入降低了这种“富余”磁矩的产生. 如果该效应仅是出现于界面处一定原子层范围内的界面效应, 那么  $\Delta M_s - t_{Co}$  的关系应为反比关系. 图 4(a) 中两条曲线为根据数据拟合的反比曲线  $y = -1/(a + bx)$ , 与  $\Delta M_s - t_{Co}$  的各实验数据点在一定范围内 (Co 层厚度小于 8 ML) 符合较好, 说明上述“富余”磁矩产生于界面处的一定原子层中, 并不随 Co 层厚度变化, 完全是一种界面效应. 而当 Co 层厚度增大至 8 ML (即 1 nm 左右) 后, 实验点与反比曲线出现较大偏差, 这是由于当 Co 厚度增大至 1 nm 时, Co 层发生了晶体结构的转变, 由 fcc 变为 hcp, Pt 插层对其  $M_s$  的影响机理也有所改变, 所以发生偏离.

文献报道<sup>[23, 24]</sup>, 在 Cu(001) 单晶上外延生长的 Co/FeMn 体系中, Co/FeMn 界面处的 Fe 原子会产生极化作用, 与 Co 原子铁磁耦合, 形成铁磁有序, 从而产生一定量的净磁矩. 在本实验中虽然 Co 的晶体取向与文献中不同, 但是由于样品采用磁控溅射制备, Co 和 FeMn 均为多晶, 界面也有相当大的粗糙度, 上述的“富余”磁矩可能就是 Fe 原子极化脱离反铁磁态产生净磁矩. Pt 插入后隔断了 Co 与 FeMn 的直接耦合, 恢复了 Fe 原子的反铁磁态, 减少了净磁矩的产生, 并且由于 Fe 原子产生的净磁矩是一种界面效应<sup>[23]</sup>, 所以会出现图 4(a) 中  $\Delta M_s - t_{Co}$  的变化规律. 当 Co 层较薄时, 与文献<sup>[23]</sup> 中 Co 层厚度 2—8 ML 的变化范围相同, 所以该范围内  $\Delta M_s - t_{Co}$  的变化规律与反比曲线符合较好. 当 Co 层超过 8 ML 后, 晶体

结构由 fcc 向 hcp 转变, 这种晶体结构的改变可能会影响到 Fe 原子净磁矩的产生, 造成插入 Pt 层后的作用效果与 Co 层较薄时不同, 故实验点与反比曲线会出现的较大偏差. 而此时体系  $M_s$  的小幅增长应该是由 Pt 与 FeMn 形成的 FeMnPt 铁磁相带来的<sup>[20]</sup>.

对于 FeMn/Cc(顶部) 界面, 本实验中并没像文献<sup>[24]</sup> 中外延生长体系一样具有与 Cc(底部)/FeMn 界面相同的性质. 这是因为在外延生长的体系中 FeMn/Cc(顶部) 与 Cc(底部)/FeMn 界面的情况基本相同. 而本实验采用磁控溅射的方法制备样品, 由于 FeMn 层较厚, 不能保证在其整个厚度范围内均为 fcc(111) 反铁磁相, 从 XRD 的分析结果 (图 2) 来看, 其上表面晶体结构与下表面会产生很大的偏差, 在其上继续生长的 Co 层的晶体结构也得不到保证, 所以 FeMn/Cc(顶部) 界面没有出现与 Cc(底部)/FeMn 界面相同的规律. 因此, 可以认为在 Cc(底部)/FeMn 界面 FeMn 中 Fe 原子净磁矩的产生与 Co 和 FeMn 的晶体结构有关, Pt 的插入可以使 Fe 原子恢复到反铁磁态, 从而减少这种净磁矩的产生.

对于系列样品 (I), 磁滞回线交换偏置来自 Co(底部)/FeMn 和 FeMn/Cc(顶部) 两个界面 FM 层的贡献, 但在垂直场测量时, 磁滞回线呈现难轴特征 (如图 1(b)(d)), 不能精确区分两个界面各自的贡献的交换偏置, 尤其是在 Cc(底部)/FeMn 界面没有插 Pt 的样品的垂直各向异性更差的情况下, 所以我们只能给出交换偏置的近似值. 不过尽管如此, 还是可以在 Cc(底部)/FeMn 界面插 Pt 的样品中观察到明显的偏置, 如图 5 所示, Cc(底部)/FeMn 界面插 Pt

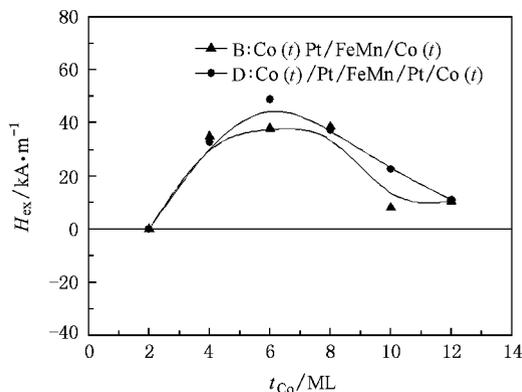


图 5 交换偏置场随 Co 层厚度的变化关系

的 B、D 样品在  $t_{\text{Co}}$  达到 6 个 ML 时达到最大值 48.9 kA/m, 而 C(底部)FeMn 界面没有插 Pt 的样品, 其交换偏置场小很多. 通常对于 FM 层足够厚的情况, 交换耦合能可以表达为  $J_{\text{ex}} = H_{\text{ex}} t_{\text{Co}} M_s = H_{\text{ex}} \sigma_s / S$  ( $\sigma_s$  为饱和磁矩;  $S$  为样品表面积), 这样  $H_{\text{ex}}$  与  $\sigma_s$  近似为反比关系, 而在我们的 Co/FeMn/Co 体系中, 由于 Co 层很薄, 出现了明显的尺寸效应, 可以看到  $J_{\text{ex}}$  在  $t_{\text{Co}} = 2$  ML 和 4 ML 时明显偏小, 意味着此时钉扎态未补偿磁矩的比例很小.

## 4. 结 论

采用磁控溅射制备了 Co/FeMn/Co 多层膜结构, C(底部)FeMn 界面产生了净磁矩, 这种净磁矩的产生与 Co 和 FeMn 的晶体结构具有一定的关系, 而界面的 Pt 插层可以减少这种净磁矩的产生. 对于 FeMn/C(顶部)界面, 由于 Co 和 FeMn 的晶体结构发生变化, 表现出与 C(底部)FeMn 界面很大的差异性, 在其界面的 Pt 插层对磁矩的影响不明显.

- [ 1 ] Shi J, Tehrani S, Scheinfein M R 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2588
- [ 2 ] Nishimura Naoki, Hirai Tadahiko, Koganei Akio, et al 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 5246
- [ 3 ] Ma M, Cai L, Wang X F, et al 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 0529 (in Chinese)[ 马 梅、蔡 蕾、王兴福等 2007 物理学报 **56** 0529 ]
- [ 4 ] Xiong Z J, Wang H Y, Ding Z J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2123
- [ 5 ] Li Y, Chen Q Y, Jiang H W et al 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6647 (in Chinese)[ 李 岩、陈庆永、姜宏伟等 2006 物理学报 **55** 6647 ]
- [ 6 ] Dai B, Cai J W, Lai W Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 0478 (in Chinese)[ 代 波、蔡建旺、赖武彦 2003 物理学报 **52** 0478 ]
- [ 7 ] Garcia F, Fettaf F, Auffret S et al 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 8397
- [ 8 ] Sort J, Rodmacq B, Auffret S et al 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1800
- [ 9 ] Sort J, Dieny B, Fraune M et al 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3696
- [ 10 ] Sort J, Rodmacq B, Garcia F et al 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 7163
- [ 11 ] Ji X, Ju H, McCready D E, et al 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 116101
- [ 12 ] Romanens F, Pizzini S, Sort J et al 2005 *Eur. Phys. J. B* **45** 185
- [ 13 ] Ji X, Krishnan K M 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 08C105
- [ 14 ] Zhai Z H, Teng J, Li B H et al 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2064 (in Chinese)[ 翟中海、滕 蛟、李宝河等 2006 物理学报 **55** 2064 ]
- [ 15 ] Garcia F, Sort J, Rodmacq B et al 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3537
- [ 16 ] Sort J, Garcia F, Rodmacq B et al 2004 *J. Magn. Magn. Mater.* **272-276** 355
- [ 17 ] Sort J, Baltz V, Garcia F et al 2005 *Phys. Rev. B* **71** 054411
- [ 18 ] Takano K, Kodama R H, Berkowitz A E et al 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1130
- [ 19 ] Ohldag H, Regan T J, Stöhr J et al 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 247201
- [ 20 ] Liu Y, Jin C, Fu Y Q et al 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 205006
- [ 21 ] Nakajima N, Koide T, Shidara T et al 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5229
- [ 22 ] Maat S, Takano K, Parkin S S P et al 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 087202
- [ 23 ] Matthes F, Rzhetskii A, Tong L N et al 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 6504
- [ 24 ] Offi F, Kueh W, Chelaru L I et al 2003 *Phys. Rev. B* **67** 094419

# Effect of Pt spacers on the interface of Co/FeMn<sup>\*</sup>

Fu Yan-Qiang Liu Yang Jin Chuan Yu Guang-Hua<sup>†</sup>

(*Department of Materials Physics and Chemistry, University of Science and  
Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

(Received 22 February 2009; revised manuscript received 25 March 2009)

## Abstract

Co/FeMn/Co multilayers were prepared by magnetron sputtering. The change of magnetic moments by insertion of Pt spacer at the Co (bottom)/FeMn interface and FeMn/Co (top) interface has been investigated. According to the hysteresis loops measured by alternating gradient magnetometer (AGM), the saturation magnetization ( $M_s$ ) of multilayers is changed by the Pt spacer at the Co (bottom)/FeMn interface, and there is an asymptotic approach of  $M_s$  to the theoretical value of  $M_s$  of the cobalt bulk of 1440 kA/m as the thickness of Co layer ( $t_{Co}$ ) is increased. This behavior is due to the production of net magnetic moments at the Co (bottom)/FeMn interface, which are decreased by Pt spacer at the Co (bottom)/FeMn interface. However, a significant difference between the Co (bottom)/FeMn interface and the FeMn/Co (top) interface is observed, as little influence of the Pt spacer on magnetic moments is shown when inserted at the FeMn/Co (top) interface.

**Keywords** : magnetic multilayer, perpendicular anisotropy, exchange coupling

**PACC** : 7550

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50831002, 50871014, 50671008).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : ghyu@mater.ustb.edu.cn