

具有垂直各向异性 $(\text{Pt}/\text{Co})_n/\text{FeMn}$ 多层膜的交换偏置*

翟中海^{1,2)} 滕 蛟¹⁾ 李宝河^{1,3)} 王立锦¹⁾ 于广华¹⁾ 朱逢吾¹⁾

1) 北京科技大学物理与化学系, 北京 100083)

2) 沈阳建筑大学理学院, 沈阳 110168)

3) 北京工商大学数理部, 北京 100037)

(2005 年 7 月 27 日收到, 2005 年 12 月 13 日收到修改稿)

采用磁控溅射方法制备了以 Pt 为缓冲层和保护层的具有垂直各向异性 $(\text{Pt}/\text{Co})_n/\text{FeMn}$ 多层膜. 研究表明, 多层膜的垂直交换偏置场 H_{ex} 和反铁磁层厚度的关系与其具有平面各向异性的交换偏置场随反铁磁层厚度变化趋势相近. 随着铁磁层调制周期数的增加, 垂直交换偏置场 H_{ex} 相应减小, 并且与铁磁层的调制周期数近似成反比关系. $(\text{Pt}/\text{Co})_n/\text{FeMn}$ 的垂直交换偏置场 H_{ex} 已经达到 22.3 kA/m. 为了进一步提高 H_{ex} , 在 Co/FeMn 的界面插入 Pt 层, 当 Pt 层厚度为 0.4 nm 时, H_{ex} 达到最大值 39.8 kA/m.

关键词: 交换偏置, 垂直各向异性, 多层膜

PACC: 7550

1. 引 言

Meiklejohn 和 Bear^[1] 发现交换偏置现象近半个世纪, 由于交换偏置在自旋阀和隧道结为基的磁传感器中的应用, 人们对其进行了大量而深入的研究工作^[2-5]. 然而直到目前, 它的物理机制仍然不太清楚. 以前有关交换偏置方面的研究都是在易磁轴平行于膜面的基础上进行的, 最近文献^[6, 7] 先后报道了具有垂直各向异性的交换偏置现象, 引起人们极大的重视. 铁磁层和反铁磁层界面附近的自旋结构是各种交换偏置理论模型的基础. 具有垂直各向异性交换偏置的研究, 对于进一步了解界面附近自旋的结构和理论模型的正确建立有着重要意义. 在实际应用方面, 具有垂直各向异性的自旋阀和隧道结对于磁随机存储器、读出头和磁传感器的研究也很重要.

具有垂直各向异性的铁磁层常采用 $(\text{Pt}/\text{Co})_n$, $(\text{Pt}/\text{CoFe})_n$ 或 $(\text{Pd}/\text{Co})_n$ 多层膜^[8-10], 在此基础上制备反铁磁层进行垂直交换偏置的探索工作, 已报道的作为反铁磁层材料的有 FeF_2 , CoO , NiO , FeMn 和

IrMn ^[6-8, 11, 12]. 要制备出具有良好的垂直各向异性的多层膜取决于诸多因素, 例如 Pt/Co 或 Pd/Co 的相对厚度、多层膜的调制周期数和缓冲层的材料及厚度等. 这些因素对于多层膜垂直各向异性的影响已被广泛研究^[13, 14], 但是这些因素对垂直交换偏置影响的研究还不全面, 并且大多数研究工作均在硅基片上开展. 我们在玻璃基片上制备具有垂直各向异性的多层膜, 系统地研究了交换偏置和反铁磁层厚度及铁磁层调制周期数的关系, 并且通过在 Co 和 FeMn 之间插入 Pt 层, 使交换偏置场的最大值增加到 39.8 kA/m, 比无 Pt 插层时提高近一倍.

2. 实验过程

样品均采用 DV-502 型磁控溅射仪制备, 溅射前的本底真空优于 4×10^{-5} Pa. 玻璃基片用专用电子清洗液煮沸清洗后, 再分别用去离子水和酒精超声清洗, 最后烘干. 膜的生长是在 0.5 Pa 的高纯 Ar 气下进行. Co 靶和 FeMn 靶纯度为 99.9%, Pt 靶为 99.95%. 各种靶的溅射速率约为 0.08—0.13 nm/s, 根据镀膜时间确定每层薄膜的厚度. 垂直膜面的方

* 国家自然科学基金(批准号 50471093)和北京市自然科学基金(批准号 2052014)资助的课题.

向加了 55 kA/m 左右的磁场(本文中除特别说明之外,在制备样品时均施加这样的垂直磁场),以在垂直于膜面感生一个易磁化方向.样品全部生长在玻璃基片上,首先溅射厚度为 20 nm 的 Pt 做缓冲层,最后是厚度为 2 nm 的 Pt 作为保护层.在北京大学 Micomag2900 型交变梯度磁强计上测量了样品的磁滞回线(磁场垂直于膜面),交换偏置场根据磁滞回线中心的偏移来得到.

3. 实验结果及讨论

图 1 是在制备样品时不加磁场的情况下, $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5$ 和附加反铁磁层 FeMn 的 $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5/\text{FeMn}(25\text{ nm})$ 的磁滞回线.从图 1 可以看出,曲线 *a* 的矫顽力大约为 18.3 kA/m,具有垂直各向异性,矩形比接近 1.这表明通过多层膜的方法实现了 Co 的垂直各向异性. $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5$ 多层膜 X 射线衍射谱证实它具有 fcc(111) 结构,文献表明相对其他取向 (Pt/Co) 多层膜在这个方向存在最大垂直各向异性^[15].从图 1 还可以看出,与曲线 *a* 相比,曲线 *b* 的矫顽力变小、矩形比降低,几乎没有观测到垂直交换偏置现象.把面内和垂直两个方向的磁化曲线与纵轴所包围的面积差定义为有效各向异性常数 K_{eff} ^[15],当其大于零时,垂直于膜面磁化所需要的能量低于平行膜面磁化需要的能量,薄膜具有垂直各向异性,也就是易磁轴垂直于膜面,反之则易磁轴平行于膜面.对于多层膜, K_{eff} 一般唯象地表示为^[15]

$$K_{\text{eff}} = K_v + 2K_s/t,$$

其中 t , K_v 和 K_s 分别表示磁性层的厚度、体和界面对于各向异性的贡献.体各向异性 K_v ,主要是形状各向异性和磁晶各向异性的贡献,分别来自于磁偶极相互作用和自旋-轨道相互作用.对于 Pt/Co 多层膜, $K_v < 0$,界面各向异性 K_s 来源于 Pt/Co 界面 d 电子态的杂化,并且 $K_s > 0$.对于 $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5$ 多层膜,由于 Co 层厚度较薄,满足 $K_v + 2K_s/t > 0$,因此易磁轴垂直于膜面.图 1 中的曲线 *b* 的矩形比下降、垂直各向异性减小,表明 Co/FeMn 的界面引起的各向异性符号为负,这与 Pt/Co 界面诱导符号为正的垂直各向异性相反. Pt/Co 多层膜最上一层的 Co/Pt 界面被 Co/FeMn 界面替代,使垂直各向异性降低、矩形比下降,这与 Garcia 等^[8]的实验结果一致.

图 2 是在垂直膜面方向施加约 55 kA/m 磁场的

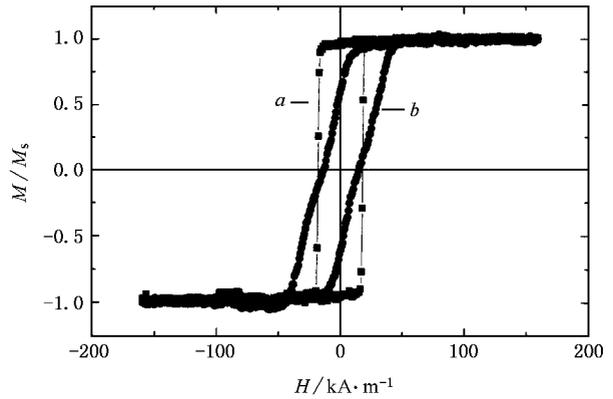


图 1 制备样品时未加磁场的情况下 $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5$ 多层膜的磁滞回线(曲线 *a*)和 $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5/\text{FeMn}(25\text{ nm})$ 多层膜的磁滞回线(曲线 *b*)

情况下 $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5/\text{FeMn}(t)$ 多层膜的垂直交换偏置场 H_{ex} 和矫顽力 H_c 随 FeMn 反铁磁层厚度 t 的变化曲线, t 的取值在 1.7—43 nm 之间.当 FeMn 层的厚度在约 4 nm 以下的时候,交换偏置场近似为零.这种反铁磁层厚度小于某临界值时, $H_{\text{ex}} = 0$ 的情况,在平行交换偏置的系统中也大量观察到.如文献[16]指出,对 $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{FeMn}$ 双层膜,当 FeMn 厚度 $t < 2\text{ nm}$ 时, $H_{\text{ex}} = 0$.造成这种现象的原因较多.理论分析表明,产生交换偏置的条件为

$$K_{\text{AFM}} t \geq J_{\text{int}},$$

式中, K_{AFM} 为反铁磁层的各向异性常数, J_{int} 为界面耦合常数.当 t 很小时,上述不等式不能成立,因而 $H_{\text{ex}} = 0$.实际上 K_{AFM} 也与 t 有关,但它们间的关系尚不清楚.另一方面,反铁磁层的截止温度(blocking temperature) T_b 随 t 减小而下降,当 t 小于某临界值

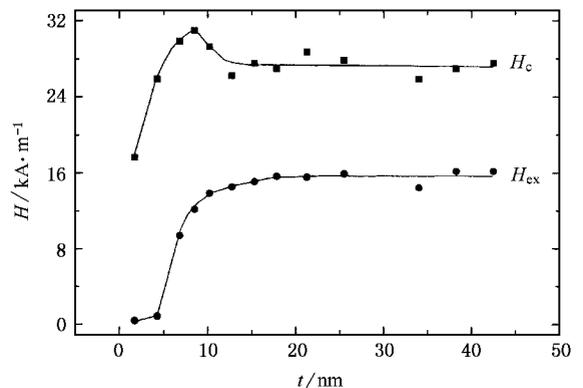


图 2 制备样品时在垂直膜面方向施加 55 kA/m 磁场的情况下, $[\text{Pt}(2\text{ nm})/\text{Co}(0.3\text{ nm})]_5/\text{FeMn}(t)$ 多层膜的 H_{ex} 和 H_c 随反铁磁层厚度 t 的变化

时 T_b 低于室温,因而在室温下观测不到 $H_{ex}^{[17]}$.厚度在 4—10 nm 之间,交换偏置场和矫顽力快速增加, $t > 10$ nm 时, H_{ex}, H_c 达到饱和值.上述结果表明,多层膜的垂直交换偏置场 H_{ex} 和反铁磁层厚度的关系与 Co/FeMn 具有平面各向异性的交换偏置场随反铁磁层厚度变化趋势相近.

图 3 是 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_n/FeMn(25\text{ nm})$ 多层膜 ($n = 3, 4, 5$) 的磁滞回线.从图 3 可以看出,在垂直膜面方向施加磁场后,FeMn 层与 $(Pt/Co)_n$ 多层膜出现交换偏置场 H_{ex} ,且随着铁磁层调制周期数由 3 增加到 5 时,多层膜的垂直各向异性也在增加,易磁轴越来越接近垂直膜面方向.随着铁磁层调制周期数增加,Co/Pt 界面诱导的垂直各向异性增加,当调制周期数为 5 时,多层膜的易磁轴基本垂直于膜面方向.图 4(a) 是 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_n/FeMn(25\text{ nm})$ 多层膜的 H_{ex} 和矫顽力 H_c 随铁磁层调制周期数 n 的变化关系.可以看出,当 $n = 3$ 时, H_{ex}, H_c 分别为 22.3, 6.4 kA/m,随着层数增加, H_{ex} 逐渐减小且下降越来越慢.在上述研究的层数变化范围内,随着层数的增加 H_c 也增加,然后趋于饱和,这与 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_n$ 的矫顽力随 n 的变化趋势基本一致.具有平面各向异性的交换偏置研究表明,反铁磁层厚度不变的条件下,交换偏置场 H_{ex} 与铁磁层的厚度近似成反比关系,这说明交换偏置现象主要是界面相互作用产生的.文献 [9, 18] 报道了多层膜的垂直交换偏置场 H_{ex} 随调制周期数变化关系.我们的实验结果与上述报道得出的结论一致,即 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_n/FeMn(25\text{ nm})$ 多层膜的垂直交换偏置场 H_{ex} 与铁磁层调制周期数 n 存在近似的反比关系,如图 4(b) 所示.

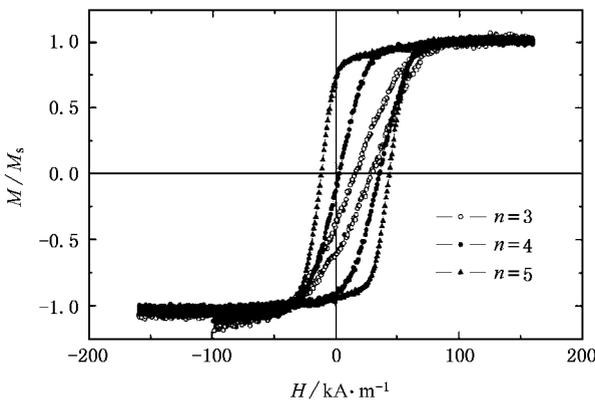


图 3 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_n/FeMn(25\text{ nm})$ 多层膜的磁滞回线 $n = 3, 4, 5$

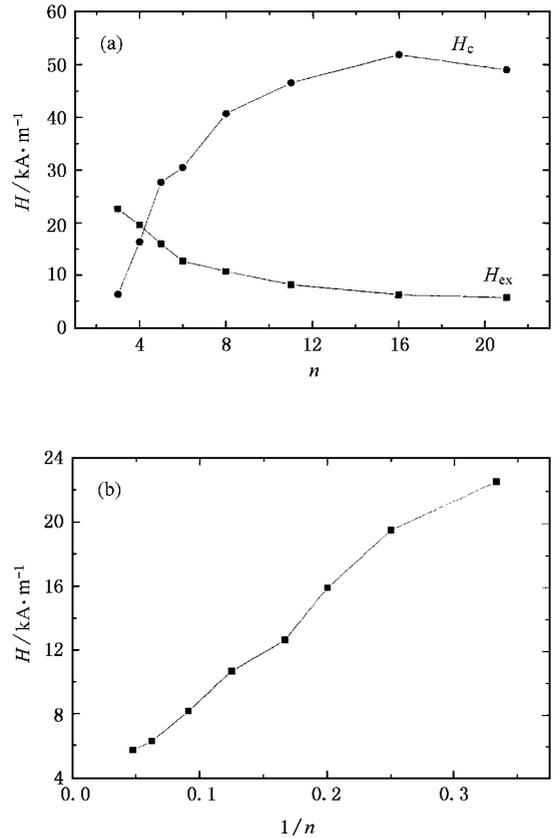


图 4 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_n/FeMn(25\text{ nm})$ 多层膜的 H_{ex} 和矫顽力 H_c 随 n 的变化(a) 和 H_{ex} 随 $1/n$ 的变化(b)

我们还研究了在 (Pt/Co) 多层膜与 FeMn 层间插入不同厚度的 Pt 层对 H_{ex} 和 H_c 的影响.图 5 是 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_3/Pt/FeMn(25\text{ nm})$ 磁滞回线.由图 5 可以看出,随着 Pt 插层厚度的增加,多层膜的垂直各向异性增加,且垂直交换偏置场 H_{ex} 发生改变.图 6 是多层膜 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_3/Pt/FeMn$

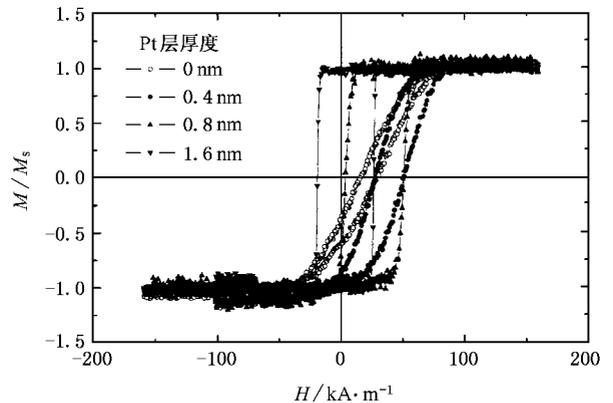


图 5 $[Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})]_3/Pt/FeMn(25\text{ nm})$ 磁滞回线 Pt 层厚度分别为 0, 0.4, 0.8, 1.6 nm

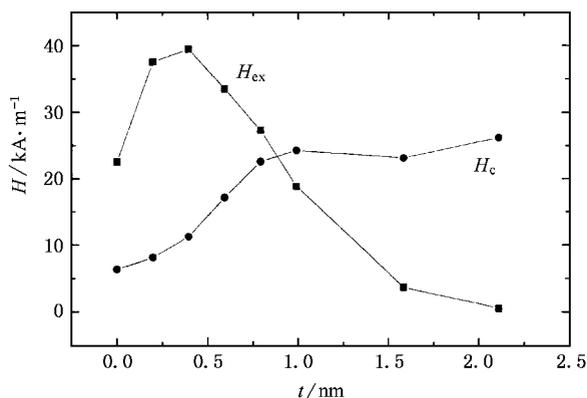


图6 多层膜 $Pt(2\text{ nm})/Co(0.3\text{ nm})_n/Pt/FeMn(25\text{ nm})$ 的垂直交换偏置场 H_{ex} 和矫顽力 H_c 与 Pt 插层厚度 t 的关系

(25 nm) 的垂直交换偏置场 H_{ex} 和矫顽力 H_c 与 Pt 插层厚度的 t 关系. 由图 6 可以看出, 插入 0.2 nm 的 Pt 层即明显提高多层膜系统的 H_{ex} . 当 Pt 插层的厚度为 0.4 nm 时, 垂直交换偏置场 H_{ex} 达到最大, 由无 Pt 层时的 22.3 kA/m 增加到 39.8 kA/m, 然后随 Pt 层厚度的增加而快速下降, 在 Pt 插层的厚度为 2 nm 时, 垂直交换偏置场 H_{ex} 变为零. 随着 Pt 插层厚度的增加, 矫顽力 H_c 随之变大. 研究表明, 交换偏置场的大小近似与铁磁层和反铁磁层的自旋在界面分量成正比, 对于垂直交换偏置即垂直于界面的分量,

(Pt/Co)_n 多层膜具有垂直各向异性, 但最上层的 Co/FeMn 界面诱导的是平面各向异性, 这使得 Co 的自旋在垂直界面方向的分量减小. Pt 层的插入, 增加了垂直各向异性, 因此 Co 的自旋在垂直界面方向的分量增加. 另一方面, 在铁磁层和反铁磁层界面插入非磁隔离层会使交换偏置场随隔离层的厚度呈指数下降^[19]. 上述 Pt 插层的两种作用, 使垂直交换偏置场在 Pt 的一个合适厚度 (0.4 nm) 时达到最大.

4. 结 论

我们采用磁控溅射的方法在玻璃基片上制备了以 Pt 为缓冲层和保护层的 (Pt/Co)_n/FeMn 多层膜. 研究表明, 多层膜的垂直交换偏置场 H_{ex} 和反铁磁层厚度的关系与其具有平面各向异性的交换偏置场随反铁磁层厚度变化趋势相近. (Pt/Co)_n/FeMn 多层膜中的 Co/FeMn 界面诱导的是平面各向异性, 与 Pt/Co 的界面诱导的垂直各向异性相反, 使易磁轴趋于膜面内. 在 Co/FeMn 界面插入非磁性 Pt 层, 当 Pt 插层的厚度为 0.4 nm 时垂直交换偏置场和矫顽力增加, 其中垂直交换偏置场比无 Pt 插层时提高了近一倍. 这可能是因为 Pt 层的插入使 (Pt/Co)_n/FeMn 多层膜最上层的 Co 自旋在垂直界面方向分量增加造成的.

[1] Meiklejohn W H, Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413
 [2] Nogues J, Schuller K 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **192** 203
 [3] Berkowitz A E, Takano K 1999 *J. Magn. Magn. Mater.* **200** 552
 [4] Teng J, Cai J W, Xiong X T et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2849
 (in Chinese) [滕蛟、蔡建旺、熊小涛等 2002 物理学报 **51** 2849]
 [5] Teng J, Cai J W, Xiong X T et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 272
 (in Chinese) [滕蛟、蔡建旺、熊小涛等 2004 物理学报 **53** 272]
 [6] Kagerer B, Binek C, Kleemann W 2000 *J. Magn. Magn. Mater.* **217** 139
 [7] Maat S, Takano K, Parkin S S P et al 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 087202
 [8] Garcia F, Moritz J, Ernult F et al 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 2730
 [9] Garcia F, Casali G, Auffret S et al 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 6905
 [10] Marrows C H 2003 *Phys. Rev. B* **68** 012405

[11] Liu Z Y, Adenwalla S 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 1105
 [12] Sort J, Baltz V, Garcia F et al 2005 *Phys. Rev. B* **71** 054411
 [13] Zeper W B, van Kesteren H W, Jacobs B A J et al 1991 *J. Appl. Phys.* **70** 2264
 [14] Kisielewski M, Maziewski A, Tekielak M et al 2003 *J. Magn. Magn. Mater.* **260** 231
 [15] Johnson M T, Bloemen P J H, den Broeder F J A et al 1996 *Rep. Prog. Phys.* **59** 1409
 [16] Jungblut R, Cochoom R, Johnson M T et al 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 6659
 [17] van der Zaag P J, Ijiri Y, Borchers J A et al 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 6102
 [18] van Dijken S, Moritz J, Coey J M D 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 063907
 [19] Gokemeijer N J, Ambrose T, Chien C L 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4270



Exchange bias with perpendicular anisotropy in (Pt/Co)_n/FeMn multilayers^{*}

Zhai Zhong-Hai^{1,2)} Teng Jiao¹⁾ Li Bao-He^{1,3)} Wang Li-Jin¹⁾ Yu Guang-Hua¹⁾ Zhu Feng-Wu¹⁾

¹ *Department of Material Physics and Chemistry, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*

² *College of Science, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China*

³ *Department of Mathematics and Physics, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China*

(Received 27 July 2005 ; revised manuscript received 13 December 2005)

Abstract

In this paper, we report the observation of exchange bias in (Pt/Co)_n/FeMn multilayer with perpendicular magnetic anisotropy. The samples were deposited on glass substrates by magnetron sputtering and capped with 2 nm thick Pt layer. Our results show that the relation between perpendicular exchange bias H_{ex} of (Pt/Co)_n/FeMn multilayers and the thickness of antiferromagnetic layer is similar to that in the case of in-plane exchange bias. H_{ex} is inversely proportional to the number of bilayer repeats. In the case of (Pt/Co)₃/FeMn multilayers, perpendicular exchange bias H_{ex} reaches 22.3 kA/m. With insertion of 0.4 nm Pt layer between Co layer and FeMn layer, H_{ex} can reach 39.8 kA/m.

Keywords : exchange bias, perpendicular magnetic anisotropy, multilayer

PACC : 7550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50471093) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 2052014).