

# 铁磁/反铁磁双层膜中的磁锻炼效应\*

许 勉 潘 靖 沈 影 胡经国†

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2010 年 1 月 12 日收到; 2010 年 2 月 4 日收到修改稿)

采用 Monte Carlo 方法, 研究铁磁/反铁磁双层膜中的磁锻炼效应. 结果表明, 反铁磁层中冷场诱发的界面净磁化(钉扎效应)的磁弛豫可导致系统中的交换偏置场的磁锻炼效应. 进一步研究表明, 反铁磁层中掺杂可调控交换偏置场的磁锻炼效应, 原因在于反铁磁层中掺杂能有效地改变冷场诱发的净磁化的磁弛豫过程.

**关键词:** Monte-Carlo 方法, 交换偏置场和矫顽场, 磁锻炼效应, 磁弛豫

**PACC:** 7660E, 7540M, 7590, 7570K

## 1. 引 言

铁磁(FM)/反铁磁(AFM)体系(如双层膜)在外磁场中从高于反铁磁 Néel 温度冷却到低温后, 铁磁层的磁滞回线将沿磁场方向偏离原点, 其偏离量被称为交换偏置场, 同时伴随着矫顽场的增加, 这一现象被称之为交换偏置<sup>[1,2]</sup>. 自 1956 年 Meiklejohn 和 Bean<sup>[1]</sup>在 Co/CoO 系统中发现了交换偏置现象以来, 特别在 Dieny 设计的以铁磁/反铁磁双层膜为基础的自旋阀中发现有增强的磁电阻效应以后<sup>[3]</sup>, 铁磁/反铁磁双层膜在磁传感器、磁记录读出头和随机存储器以及无接触磁控元件等方面得到了广泛的应用. 如何获得大的交换偏置且有很好的热稳定性的铁磁/反铁磁系统, 不仅在理论上具有十分重要的价值, 而且在实践上也有广泛的应用前景<sup>[1,4-9]</sup>.

交换偏置的热稳定性及磁锻炼效应严重地影响磁电阻器件的性能<sup>[1,4,5]</sup>, 所以研究交换偏置的磁锻炼效应将有助于巨磁电阻器件的设计. 所谓磁锻炼效应是指当温度低于反铁磁层 Néel 温度时, 交换偏置场  $H_{EB}$  随着连续测量次数的增加而减小, 而矫顽场  $H_c$  基本不变<sup>[10-15]</sup>. 为此, 人们已发展了多种理论对其磁锻炼效应做物理解释<sup>[14-18]</sup>. 例如: Hoffmann<sup>[16]</sup>指出 AFM 的各向异性对于人们理解磁锻炼效应具有重要作用; Suess 等<sup>[17]</sup>论述了在 AFM 层

颗粒间的畴壁所存储的单向各向异性导致了磁锻炼效应; Binek<sup>[18]</sup>则把磁锻炼效应与 AFM 层的自旋结构重新排列相联系. 然而, 目前理论上对磁锻炼效应的研究虽然已有很大的进展, 但还未能很好地认识其物理根源. 因此, 本文采用 Monte Carlo 方法研究了铁磁/反铁磁系统的磁锻炼效应, 并讨论了掺杂对磁锻炼效应的影响. 计算结果表明, 铁磁/反铁磁界面处冷场诱发的净磁化的磁弛豫可导致系统的磁锻炼效应, 即随着冷场的消失, 其界面净磁化的效果并不会骤然消失, 而是存在一个磁弛豫过程, 从而导致了系统的磁锻炼效应. 实验证实<sup>[1,4,19-24]</sup>, 交换偏置是一种界面效应, 即反铁磁层对铁磁层的钉扎作用. 由于冷场诱发的磁弛豫过程的存在, 减缓了界面钉扎的效果, 导致交换偏置的磁锻炼效应. 进一步研究发现, 反铁磁层掺入非磁性杂质能有效地改变冷场诱发的净磁化的磁弛豫过程, 即影响钉扎的效果, 从而对磁锻炼效应产生影响.

## 2. 模 型

本文的模型是铁磁/反铁磁双层膜系统<sup>[22,25]</sup>, 如图 1 所示. 上层为具有单轴磁晶各向异性的纯铁磁材料, 下层为掺杂的具有多畴结构的反铁磁材料, 假定双层膜的膜面为  $y-z$  平面,  $x$  轴垂直于膜面. 利用 Heisenberg 模型将系统的 Hamilton 量表

\* 国家自然科学基金(批准号: 10974170)和教育部留学回国人员科研启动基金(批准号: 2007-1108)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: jghu@yzu.edu.cn, panjing\_yz@163.com

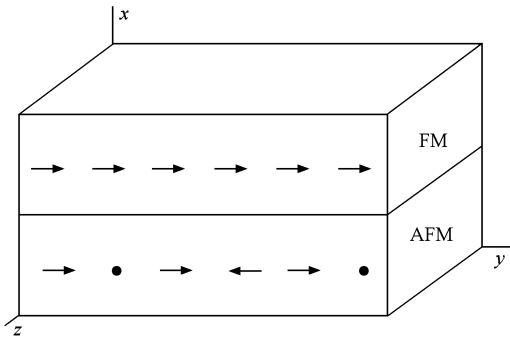


图1 铁磁/反铁磁双层膜系统示意图

示为:

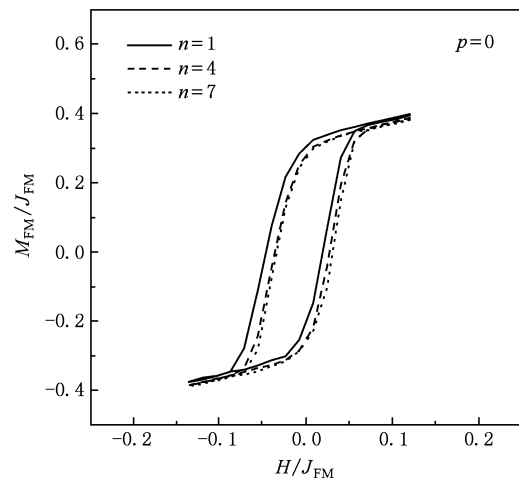
$$\begin{aligned}
 H_{\text{TOT}} = & -J_{\text{FM}} \sum_{\langle i,j \rangle \in \text{FM}} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j - \sum_{i \in \text{FM}} (d_z S_{iz}^2 + \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{H}) \\
 & -J_{\text{AFM}} \sum_{\langle i,j \rangle \in \text{AFM}} \varepsilon_i \varepsilon_j \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j \\
 & - \sum_{i \in \text{AFM}} \varepsilon_i (k_z \sigma_{iz}^2 + \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{H}) \\
 & -J_{\text{INT}} \sum_{\langle i \in \text{FM}, j \in \text{AFM} \rangle} \varepsilon_j \mathbf{S}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j
 \end{aligned}$$

其中  $\mathbf{S}_i, \boldsymbol{\sigma}_i$  分别表示铁磁层和反铁磁层第  $i$  个格点的自旋. Hamilton 量的第一、二项描述了铁磁层的能量,  $d_z$  表示铁磁层磁晶各向异性常数,  $\mathbf{H}$  为外磁场. 第三、四项为掺杂的反铁磁层的能量, 对于掺杂的格点  $\varepsilon_i = 0$ , 而其他格点  $\varepsilon_i = 1$ ,  $k_z$  为反铁磁层磁晶各向异性常数. 最后一项描述了铁磁层和反铁磁层间的交换耦合能. 为研究方便, 本文只考虑最近邻相互作用, 交换耦合常数  $J_{\text{FM}}, J_{\text{AFM}}$  和  $J_{\text{INT}}$ , 分别表示铁磁层内、反铁磁层内以及铁磁层和反铁磁层界面交换耦合常数. 在我们的模拟中, 平面格点大小为  $96 \times 96$ , 并取  $J_{\text{FM}} = -2J_{\text{AFM}} = 2J_{\text{INT}}$ .

本模拟计算中, Monte Carlo 步长取 10000 步, 考虑简单立方晶格结构, 取  $d_z = 0.01J_{\text{FM}}, k_z = J_{\text{FM}}$ . 对于这种结构 Curie 温度  $T_c = 2.9$ , Néel 温度  $T_N = 1.5$ , 单位为  $J_{\text{FM}}/k_B$ . 先模拟冷却场处理过程, 沿着  $z$  轴方向加一个大小为 0.25 的冷场  $H_{\text{co}}$ , 将温度从  $T = 2.6$  (介于铁磁层的 Curie 温度与反铁磁层的 Néel 温度之间) 降到  $T = 0.1$  (低于 Néel 温度), 这时反铁磁层便出现一个沿冷场方向的净磁化, 然后去掉冷场, 由于反铁磁层磁畴间的相互作用以及磁晶各向异性作用等, 使得反铁磁层的净磁化存在磁弛豫过程, 在  $z$  轴方向上加一外场  $\mathbf{H}$  模拟计算系统的磁滞回线, 进而分析交换偏置场及矫顽场的磁锻炼效应.

### 3. 分析与讨论

我们首先模拟了温度  $T = 0.1$ , 反铁磁层无非磁性物质掺入时, 系统经 10 次连续测量所得到的磁滞回线. 为了清楚地表示系统经多次测量后的磁滞行为, 图 2 给出了测量次数  $n$  为 1, 4, 7 时的磁滞回线. 结果发现在连续测量过程中, 磁滞回线发生了明显的改变, 即随着测量次数的增加, 交换偏置逐渐减小, 且其减少的幅度也越来越小, 但矫顽场却近似不变, 该现象称为磁锻炼效应. 这主要是由于冷场的作用, 使得反铁磁层及界面存在净磁化, 系统处于亚稳态. 一方面, 由于反铁磁层内多畴之间相互作用以及磁晶各向异性的作用, 使得反铁磁层界面处的净磁化在冷场撤除后发生磁弛豫, 表现为其净磁化随时间呈指数形式衰减. 另一方面, 界面处的铁磁、反铁磁的磁化由于铁磁层与反铁磁层之间的交换耦合, 铁磁层的磁化在外磁场作用下发生改变将诱发反铁磁层内磁畴结构的改变, 从而影响铁磁、反铁磁界面的净磁化, 进而影响系统的交换偏置场, 使其具有磁锻炼效应.

图2 无掺杂下系统连续测量的磁滞回线 ( $n$  表示测量次数)

前面讨论了反铁磁无任何掺杂时的情况, 然而在实验过程中杂质和界面粗糙是不可避免的, 它将改变系统的自旋结构, 特别是界面处的净磁化, 进而改变系统的交换偏置场等. 图 3 描述了温度  $T = 0.1$ , 反铁磁层随机掺入非磁性杂质情况下系统的磁锻炼效应, 图 3(a) 和 3(b) 分别对应其掺杂浓度为 0.1, 0.15 及 0.25 的结果.

从图 3 中可以发现随着浓度  $p$  的增加, 磁滞回

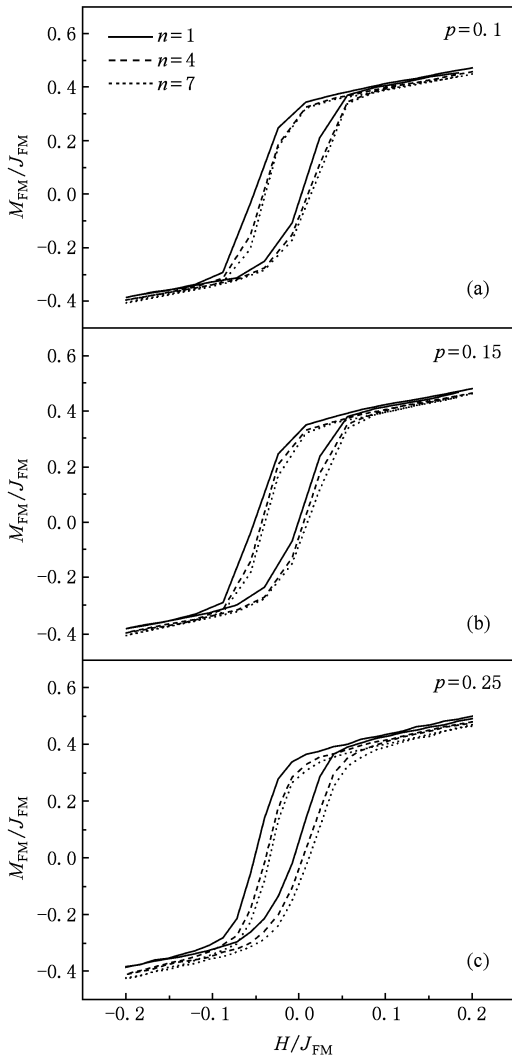


图3 不同掺杂浓度下铁磁/反铁磁双层膜的磁滞回线

线的形状发生了明显的变化,磁锻炼效应变化也更明显.比如  $p=0.1$  时磁滞回线在第4次测量后几乎重合,即第4次测量后其磁锻炼效应消失;而  $p=0.25$  时系统的交换偏置场始终随测量次数的增加而减小,即其磁锻炼效应明显.这主要是由于掺杂改变反铁磁层中的磁畴结构,进而影响了磁畴之间以及磁畴磁化与磁晶各向异性之间的作用等.而不同的掺杂浓度其作用的改变不一样,低的掺杂浓度有利于磁畴形成,各磁畴之间形成连通结构,磁畴磁化易稳定,进而磁锻炼效应得到有效控制.而过高的掺杂浓度使各磁畴之间连通性差,易形成孤立的磁畴结构,进而磁畴磁化不稳定,其磁锻炼效应明显.

为了更直观清晰地得到不同掺杂浓度对系统交换偏置场  $H_{EB}$  和矫顽场  $H_C$  的影响,利用公式  $H_{EB}$

$= (H_{C1} + H_{C2})/2, H_C = (H_{C1} - H_{C2})/2$  计算了不同测量次数中交换偏置和矫顽场的大小.图4显示了不同掺杂浓度下系统交换偏置和矫顽场随测量次数的变化关系,即  $H_{EB}, H_C$  的锻炼效应.

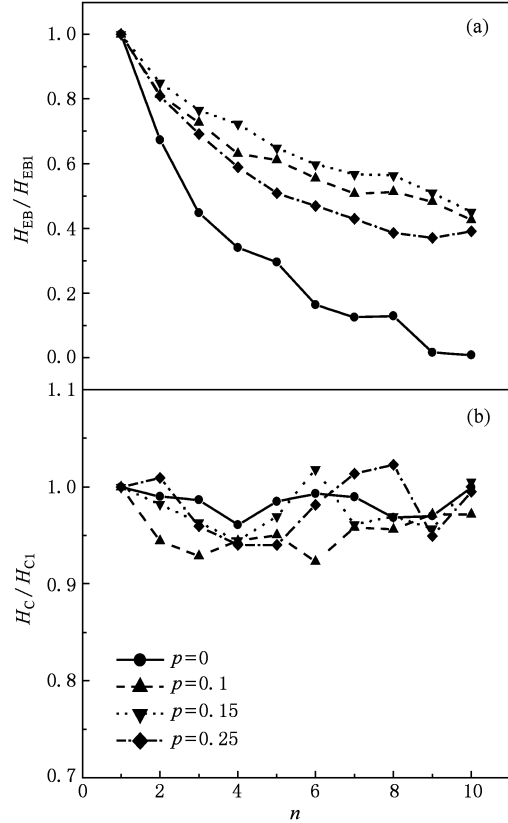


图4 不同掺杂浓度下交换偏置及矫顽场随测量次数的变化关系 ( $H_{EB1}, H_{C1}$  表示第一次测量出的交换偏置场和矫顽场)

从图4(a)可以看出,交换偏置随测量次数的增加不是线性变化而是呈指数衰减.当反铁磁无掺杂时,第二次测量得到交换偏置  $H_{EB}$  比第一次测量得到的值减小了35%左右,而掺入非磁性物质后,交换偏置场的衰减程度明显降低,第二次测量出的  $H_{EB}$  比第一次测量出的  $H_{EB}$  减小20%,并且随着测量次数的增加,其衰减程度越来越弱,也就表明了非磁性物质的掺入有效地减缓了磁弛豫过程的发生.进一步研究发现,对同一测量次数,随着掺杂浓度的增加,交换偏置场先增加后减小,这与文献[19]的结论一致.从图4(b)可见,当系统未掺入非磁性物质,即  $p=0$  时,矫顽场随测量次数的增加几乎不变,而当反铁磁层中掺入非磁性物质时,矫顽场有微小的变化,其变化范围在8%以内,这主要是由于杂质的介入改变了界面的微结构及反铁磁层磁畴结构,这与文献[22]的结论一致.

由于系统的交换偏置场源于铁磁反铁磁层界面净磁化<sup>[1,4,19]</sup>,为此我们研究了界面反铁磁层在冷场作用下的磁畴结构.结果显示:各磁畴的净磁化均基本沿着冷场方向.冷场撤除后,在磁滞回线测量过程中,由于反铁磁层内各畴间的相互作用以及反铁磁层磁晶各向异性的作用,使得各畴的净磁化方向发生改变并逐渐偏离初始方向,从而导致在连续不断的测量过程中反铁磁层界面整体表现出的净磁化越来越小,呈现出逐步衰减的趋势,即磁弛豫过程.为了清晰地了解磁弛豫过程,图5显示了铁磁层的微观畴构型.

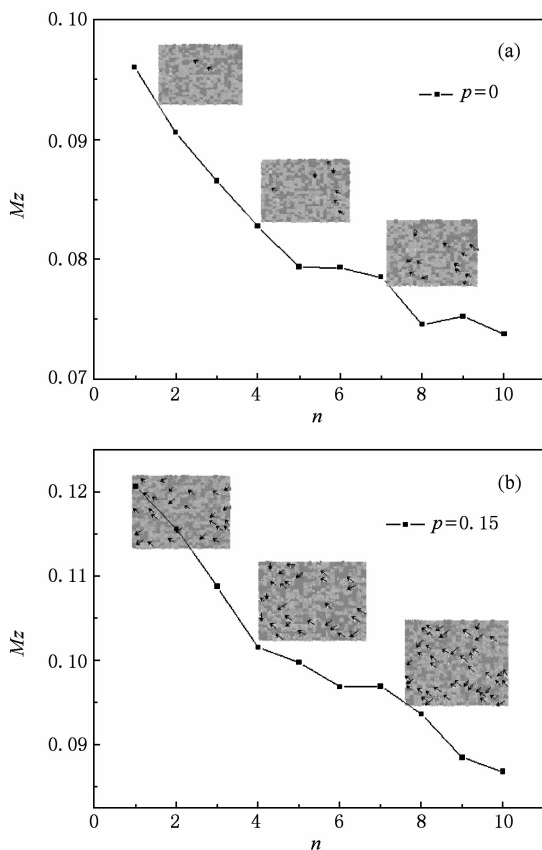


图5 反铁磁净磁化随测量次数的变化曲线 (a)未掺杂时, (b)掺杂浓度  $p=0.15$  时.其中插图显示铁磁层分别在第1,4,7次测量时的磁畴结构

图5(a)从铁磁层磁畴结构的演化行为上揭示反铁磁层畴间相互作用后其净磁化的改变行为对铁磁层磁化所产生的影响,进而直观地解释磁锻炼效应产生的机理.图5中未用箭头标明的区域磁矩沿水平正向.从图5中可以清楚地观察到,随着测量次数的增加,越来越多的畴磁矩翻转到负的方向去,即反铁磁畴的净磁化改变,直接影响了界面处铁磁畴的翻转,导致了系统交换偏置场的减小.这表明反铁磁净磁化的磁弛豫是产生锻炼效应的重要因素.图5(b)中的插图是反铁磁中掺入浓度为0.15时铁磁层的微观畴结构的演化图.掺杂促使反铁磁形成多畴结构,界面净磁化增加,使系统的交换偏置场增大.同时杂质也改变了磁畴结构,低的掺杂浓度下,各磁畴之间形成连通结构,磁畴磁化易稳定,磁锻炼效应得到减缓.而过高的掺杂浓度使各磁畴之间连通性差,易形成孤立的磁畴结构,进而磁畴磁化不稳定,其磁锻炼效应明显.

#### 4. 结 论

采用 Monte Carlo 模拟方法研究了铁磁反铁磁双层膜中的磁锻炼效应.结果表明:反铁磁层中冷却磁场诱发的界面净磁化导致了系统的交换偏置现象,而其界面净磁化的磁弛豫亦导致了系统的磁锻炼效应.进一步的研究表明:反铁磁层中的掺杂可有效地调控系统中交换偏置场的磁锻炼效应,原因在于掺杂改变了反铁磁层中的磁畴结构,进而改变了冷却场诱发的净磁化的磁弛豫过程.较低的掺杂情况下,各磁畴之间形成连通结构,磁畴磁化易稳定,磁锻炼效应得到减缓;而过高的掺杂使各磁畴之间连通性差,易形成孤立的磁畴结构,进而磁畴磁化不稳定,磁锻炼效应明显.因此,磁锻炼效应随掺杂浓度的增加是非单调性改变的,即在合适的掺杂浓度下能有效地抑制系统中的磁锻炼效应,这对提高实际应用效率有着极为重要的意义.

- [1] Meiklejohn W H, Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413  
 [2] Stamps R L, 2002 *J. Magn. Magn. Mater.* **242** 139  
 [3] Dieny B 1994 *J. Magn. Magn. Mater.* **136** 335  
 [4] Ki Wi M 2001 *J. Magn. Magn. Mater.* **234** 584  
 [5] Ohshima N, Nakada M, Tskamoto Y 1998 *IEEE Trans. Magn.* **34** 1429

- [6] Li Y, Chen Q Y, Jiang H W, Wang A L, Zheng W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6647 (in Chinese) [李岩, 陈庆永, 姜宏伟, 王艾玲, 郑 鹤 2006 物理学报 **55** 6647]  
 [7] Hu J G, Jin G J, Hu A, Ma Y Q 2004 *Eur. Phys. J. B* **40** 265  
 [8] Teng J, Cai J W, Xiong X T, Lai W Y, Zhu F W 2004 *Acta*

- Phys. Sin.* **53** 272 (in Chinese) [滕 蛟、蔡建旺、熊小涛、赖武彦、朱逢吾 2004 物理学报 **53** 272]
- [9] Xu X Y, Tian H Y, Hu J G 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 93910
- [10] Fecioru-Morariu M, Wrona J 2008 *Phys. Rev. B* **77** 054441
- [11] Jimenez E, Camarero J, Sort J 2009 *Phys. Rev. B* **80** 01441
- [12] Qiu X P, Yang D Z, Zhou S M, Chantrell R W, O'Grady K, Nowak U, Du J, Bai X J, Sun L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 147207
- [13] Ventura J, Araujo J P, Sousa J B 2008 *Phys. Rev. B* **77** 184404
- [14] Brems S, Temst K, Haesendonck C V 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 067201
- [15] Biternas A G, Nowak U, Chantrell R W 2009 *Phys. Rev. B* **80** 134419
- [16] Hoffmann A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 097203
- [17] Suess D, Kirschner M, Schrefl T, Fidler J, Stamps R L, Kim J V 2003 *Phys. Rev. B* **67** 054419
- [18] Binek C 2004 *Phys. Rev. B* **70** 014421
- [19] Hong J I, Leo T, Smith D J, Berkowitz A E 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 117204
- [20] Teng J, Cai J W, Xiong X T, Lai W Y, Zhu F W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2849 (in Chinese) [滕 蛟、蔡建旺、熊小涛、赖武彦、朱逢吾 2002 物理学报 **51** 2849]
- [21] Xu X Y, Wang M H, Hu J G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1443
- [22] Ma M, Cai L, Wang X F, Hu J G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 529 (in Chinese) [马 梅、蔡 蕾、王兴福、胡经国 2007 物理学报 **56** 529]
- [23] Dai B, Cai J W, Lai W Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 478 (in Chinese) [代 波、蔡建旺、赖武彦 2003 物理学报 **52** 478]
- [24] Hu J G, Stamps R L 2006 *Chin. Phys.* **15** 1595
- [25] Hu J G, Jin G J, Stamps R L 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **301** 238

## Training effect in the ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers<sup>\*</sup>

Xu Mian Pan Jing Shen Ying Hu Jing-Guo<sup>†</sup>

(Department of Physics, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 12 January 2010; revised manuscript received 4 February 2010)

### Abstract

Using Monte Carlo method to study the magnetic training effect in the ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers, it was shown that the magnetic relaxation of the net magnetization induced by cold magnetic field which exists in the interface between ferromagnetic and antiferromagnetic bilayer can result in the training effect in the exchange bias and coercivity of the system. Further studies have shown that the doping in antiferromagnetic layer can modulate the training effect in the exchange bias, because the doping in antiferromagnetic layer can effectively change the magnetic relaxation process of the net magnetization induced by the cold field.

**Keywords:** Monte Carlo method, exchange bias and coercivity, training effect, magnetic relaxation

**PACC:** 7660E, 7540M, 7590, 7570K

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974170) and the Scientific Research Launching Foundation of Ministry of Education for Returned Overseas Students, China (Grant No. 2007-1108).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: jghu@yzu.edu.cn