

铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴动力学行为*

朱金荣 香妹 胡经国†

(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2012年2月5日收到; 2012年3月17日收到修改稿)

比较了铁磁单层膜与铁磁/反铁磁双层膜结构中的磁畴演化行为, 发现由于反铁磁层膜对铁磁层膜的耦合作用使得系统的磁畴壁厚度、磁畴壁等效质量、磁畴壁移动速度等发生了改变, 系统的矫顽场增强, 并出现了交换偏置场. 文章具体研究了反铁磁层耦合作用下其磁畴壁厚度、等效质量以及磁畴壁移动速度等与反铁磁层的净磁化、磁各向异性、界面耦合强度以及温度等的关系; 并研究了其对铁磁/反铁磁双层膜中的交换偏置场、矫顽场的影响. 进而从磁畴结构的形成及其演化上揭示了铁磁/反铁磁双层膜中出现交换偏置以及矫顽场增加的物理机制.

关键词: 铁磁/反铁磁双层膜, 磁畴壁运动, 矫顽场, 交换偏置场

PACS: 75.60.Ch, 75.78.Fg, 75.70.Cn

1 引言

当铁磁/反铁磁双层膜体系在外磁场中, 经过从高于反铁磁奈尔温度 T_N 又低于铁磁层的居里温度 T_C 冷却到反铁磁奈尔温度以下, 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, 通常记作 H_E ; 同时, 伴随着矫顽场的增加^[1-3], 这一现象被称为交换偏置现象. 进一步研究发现, 这一现象在接近反铁磁层的奈尔温度点及以上时就消失了^[4-7]. 由此可见, 铁磁层与反铁磁层间的交换耦合导致了交换偏置现象. 后来的实验研究表明: 铁磁/反铁磁双层膜体系还表现出很多其他新的物理现象, 并与铁磁层和反铁磁层的材料成分、厚度、结构取向、温度、生长顺序以及工艺条件等密切相关^[8-12]. 其交换偏置现象在巨磁电阻器件中具有重要的应用价值^[13-17], 倍受人们关注. 迄今尽管其基础研究和应用研究都已经非常深入, 但其物理机制还不是很清楚.

本文研究比较了铁磁单层膜与铁磁/反铁磁双层膜结构中的磁畴演化行为, 从磁畴结构层面上理解、分析铁磁/反铁磁双层膜体系中出现交换偏

置现象的物理缘由; 研究了反铁磁层交换耦合下铁磁层中的磁畴壁厚度、磁畴壁等效质量、磁畴壁移动速度等的改变, 以及其与温度、反铁磁层的磁学参量、铁磁/反铁磁层间交换耦合强度等的依赖关系.

2 模型与解析结果

2.1 理论模型

铁磁/反铁磁双层膜体系中铁磁层的磁化强度由界面处的交换耦合以及外磁场共同决定. 其等效场作用在铁磁层中每个晶格, 假设其动力学影响足够小, 可以认为其反铁磁层处于热平衡状态, 相应的等效场可表示为

$$\tilde{h}_\alpha(i) = -\frac{\partial}{\partial S_\alpha(i)} H_0 + J_{\text{int}} m_\alpha(i), \quad (1)$$

其中, $m_\alpha(i)$ 为热平衡下界面处反铁磁层的净磁化强度, H_0 表示影响铁磁层自旋取向的其他场哈密顿能量, 包括外磁场以及磁晶各向异性场等作用下的能量. 这里 $m_\alpha(i) = J_{\text{int}} \chi_{\alpha\beta}^{(1)} S_\beta(i) + \mu_0 \chi_{\alpha\beta}^{(2)} H_\beta + m_{\text{irr}}$, $\chi_{\alpha\beta}^{(1)}$, $\chi_{\alpha\beta}^{(2)}$ 分别为反铁磁层界面处的、整个反

* 国家自然科学基金 (批准号: 10974170) 和国家自然科学基金青年基金 (批准号: 11104239, 11104240) 资助的课题.

† E-mail: jghu@yzu.edu.cn

铁磁层的磁化率^[18,19]. 其中, 第一项为界面交换耦合作用产生的磁化强度, 第二项为外场作用下的磁化强度, 它们是可逆的磁化部分, 可使得铁磁层的各向异性增加, 第三项为不可逆的部分, 这一部分是导致交换偏置现象的直接因素^[20,21].

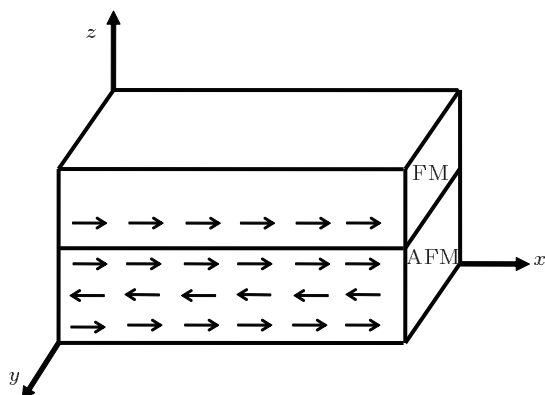


图1 铁磁/反铁磁双层膜示意图

图1为本文模型的示意图. 其中, 上层为具有单轴磁晶各向异性的铁磁层, 下层为具有很强磁晶各向异性的反铁磁层, 且假设铁磁层是单原子层. 设磁膜磁各向异性易轴沿着 x 轴, z 轴垂直于膜面, 由于反铁磁层具有很强的单轴磁晶各向异性, 可用伊辛模型来描述, 反铁磁层的哈密顿能量可表示为

$$H = -J_{\text{int}} \sum S_{\text{FM}} a_i + J_{\text{int}} \sum S_{\text{FM}} b_i + J_{\text{AF}} \sum a_i b_j - H \sum a_i + H \sum b_i, \quad (2)$$

其中, S_{FM} 表示铁磁层内的自旋, a_i, b_i 分别表示反铁磁层中第 i 个格点的与 x 轴方向相同、相反的自旋, $J_{\text{int}}, J_{\text{AF}}, H$ 分别为铁磁和反铁磁层界面交换耦合常数、反铁磁层内交换耦合常数以及外加磁场的强度. (2) 式中第一、二项表示铁磁与反铁磁层间交换耦合作用能, 第三项为反铁磁层相邻自旋间的交换耦合作用能, 最后两项为反铁磁层的塞曼能.

定义反铁磁层界面处交错磁化强度以及感应磁化强度分别为: $m_j^+ = (a_j + b_j)/2$, $m_j^- = (a_j - b_j)/2$, 其中 j 为反铁磁层原子层数. 假设交错磁化强度远远大于感应磁化强度, 并且反铁磁层为单原子层则感应磁化强度可逆部分, 可以表示为 $m = \chi_1(H + J_{\text{int}} S_{\text{FM}})^{[19]}$, 其中, $\chi_1 = \frac{\beta}{\beta J_{\text{AF}} z + \cosh^2(\beta J_{\text{AF}} z m^+)}$, 交错磁化为 $m^+ = \tanh(\beta J_{\text{AF}} z m^+)$, z 为自旋的近邻格点数, β 与温度成反比.

2.2 磁畴壁动态行为解析结果

由于退磁场的作用, 长条薄膜磁结构的磁畴运动以 Bloch Wall (180° 壁) 形式移动, 如图2所示.

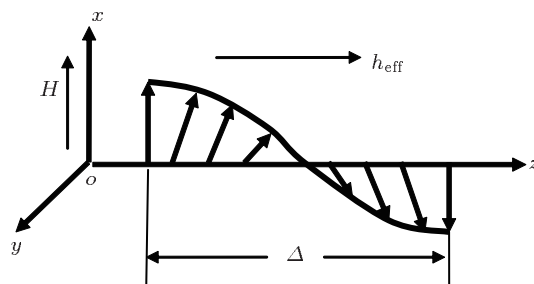


图2 Bloch Wall 运动过程示意图

在外磁场 H 作用下, 其磁矩绕 h_{eff} 进动, 导致磁畴壁移动. 磁矩绕 z 轴进动的方程为

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \gamma h_{\text{eff}}, \quad (3)$$

其中, φ 为原子磁矩偏离 x 轴角度, γ 为旋磁比, h_{eff} 为等效场.

令 v 为磁畴壁移动速度, 由 (3) 式可得:

$$h_{\text{eff}} = \frac{v}{\gamma} \cdot \frac{d\varphi}{dz}, \quad (4)$$

等效场的能量为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1}{8\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h_{\text{eff}}^2 dz \\ &= \frac{v^2}{8\pi\gamma^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 dz, \end{aligned} \quad (5)$$

对于一维的磁畴壁, 有 $\int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 dz = \frac{1}{\Delta}^{[22]}$, 其中, 铁磁/反铁磁双层膜的等效磁畴壁厚度 Δ 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\frac{A_1 A_2}{K_1 K_2}} = \sqrt{\frac{J_{\text{FM}} s^2 \cdot J_{\text{AF}} \sigma^2}{a_1 K_1 \cdot a_2 K_2}} \\ &= \sqrt{\frac{J_{\text{FM}} J_{\text{AF}}}{K_1 K_2}}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, s, σ 分别为铁磁、反铁磁层格点自旋, a_1, a_2 分别为铁磁、反铁磁层的晶格常数, K_1, K_2 分别为铁磁、反铁磁层的磁晶各向异性常数.

由 (5) 式可得磁畴壁等效质量:

$$m = \frac{1}{4\pi\gamma^2} \frac{1}{\Delta}. \quad (7)$$

另一方面, 由方程 (3) 可得磁膜 Bloch Wall 在移动过程中所耗散的总功率为

$$P = \alpha \frac{v^2}{\gamma^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 dz = \alpha \frac{v^2}{\gamma^2} \frac{1}{\Delta}, \quad (8)$$

其中, γ 为旋磁比, Δ 为磁畴壁厚度, α 为阻尼系数.

磁畴壁移动中的磁场能的变化为

$$dW = 2\mu_0 M_s H dz. \quad (9)$$

则功率改变为

$$\frac{dW}{dt} = 2\mu_0 H M_s v, \quad (10)$$

H, M_s 分别为外磁场与饱和磁化强度. 由 (8) 和 (10) 式可得磁畴壁移动速度为

$$v = \frac{2\gamma^2}{\alpha} M_s \mu_0 H \Delta. \quad (11)$$

对铁磁/反铁磁双层膜, 由文献 [18,19] 可得其系统的等效磁导率以及等效磁晶各向异性常数分别为: $\tilde{\mu}_0 = \mu_0(1 + J_{\text{int}}\chi/t)$, $\tilde{K} = K + \frac{1}{2}J_{\text{int}}^2\chi/t$. 其中 μ_0, K 分别为铁磁层的磁导率、磁晶各向异性常数, J_{int}, χ, t 分别为铁磁/反铁磁界面交换耦合常数、反铁磁层的磁化率以及铁磁层的厚度. 因此, 对铁磁/反铁磁双层膜, 其磁畴壁位移速度相应地可化简为

$$\tilde{v} = \tilde{\mu}_0 \tilde{\Delta} \left(H + \frac{\mu_0 J_{\text{int}}}{\tilde{\mu}_0} \frac{m_{\text{irr}}}{t} \right), \quad (12)$$

其中 $\tilde{\Delta}, m_{\text{irr}}$ 分别为铁磁/反铁磁双层膜中的等效磁畴壁厚度以及铁磁/反铁磁界面不可逆磁化量, 其中,

$$\tilde{\Delta} = \sqrt{\frac{J_{\text{FM}} J_{\text{AF}}}{\tilde{K}_1 \tilde{K}_2}}.$$

3 结果和讨论

根据 (6), (7) 和 (12) 式可给出其数值结果. 为简单起见, 在计算中其相关参量的取值为约化量. 图 3 显示了铁磁单层膜、铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴壁动力学行为. 结果表明: 磁畴壁的等效质量随着铁磁层的磁晶各向异性常数的增加呈非线性增加, 但其畴壁厚度 Δ 、移动速度随着铁磁层的磁晶各向异性常数的增加而非线性减小, 系统的矫顽场增加, 但无交换偏置场. 与反铁磁层交换耦合后, 铁磁单层膜的磁畴壁行为发生了改变, 即铁磁/反铁磁双层膜系统的磁畴壁等效厚度 $\tilde{\Delta}$ 变窄, 磁畴壁的等效质量 m 加, 磁畴壁移动速度 v 减缓. 系统的矫顽场增加, 并出现了交换偏置场, 但其交换偏置场

不随铁磁层的磁晶各向异性常数改变, 与相关实验结果一致 [1,3].

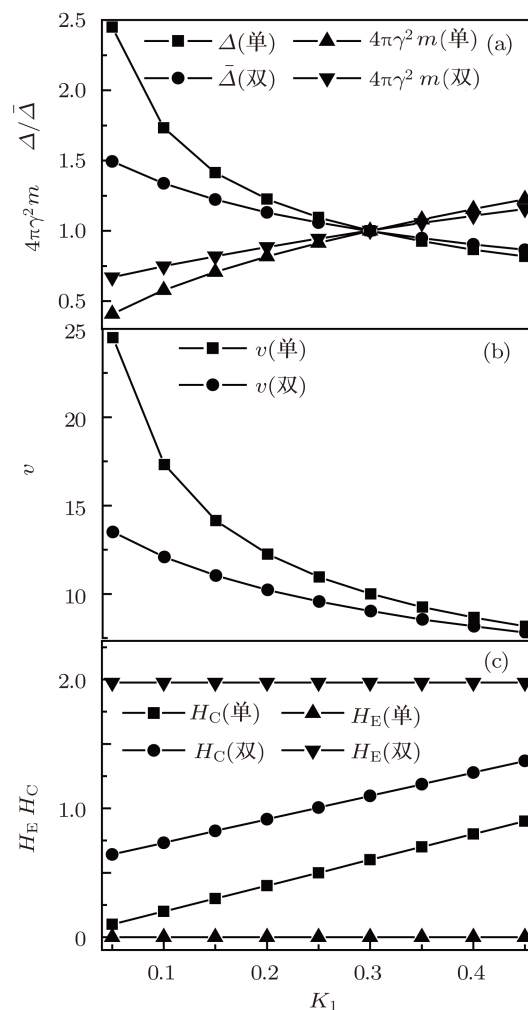


图 3 (a) 铁磁层单层膜、铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴壁厚度 (Δ/Δ)、磁畴壁质量 (m) 随铁磁层的磁晶各向异性常数 (K_1) 的变化关系; (b) 为磁畴壁移动速度 (v) 随 K_1 的变化关系; (c) 为矫顽场 (H_C)、交换偏置场 (H_E) 随 K_1 的变化关系. 其约化参量为: $\beta = 0.1, K_2 = 2, J_{\text{int}} = 3, J_{\text{AF}} = 3, J_{\text{FM}} = 0.3, H = 10$

本文进一步地讨论了铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁化特性与其磁畴壁动力学行为. 图 4 显示了铁磁/反铁磁双层膜系统中相关物理量随反铁磁层的磁晶各向异性常数 K_2 的变化关系. 图 4 表明: 磁畴壁厚度 $\tilde{\Delta}$ 随着反铁磁层的磁晶各向异性常数 K_2 的增大单调减小, 磁畴壁质量 m 随着 K_2 的增加却增大, 磁畴壁移动速度 v 减缓, 但矫顽场 H_C 、交换偏置场 H_E 保持不变, 这说明系统的矫顽场 H_C 、交换偏置场 H_E 仅与相应磁畴动力学行为的改变相关. 一般而言, 反铁磁层的磁晶各向异性 K_2 越

大, 铁磁层磁畴壁移动越困难, 可归因于反铁磁层对铁磁层的钉扎作用随 K_2 的增加变强.

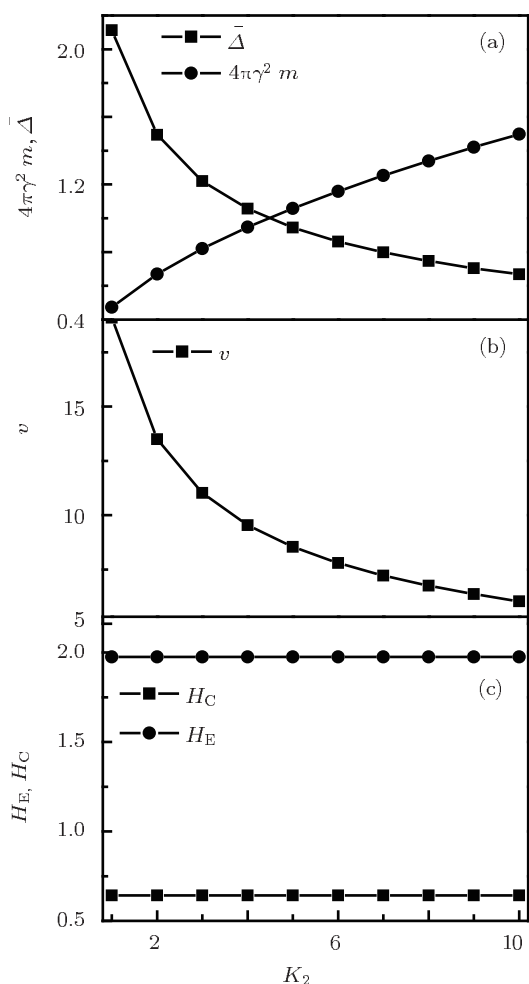


图 4 (a) 铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴壁厚度 ($\bar{\Delta}$)、磁畴壁质量 (m) 随反铁磁层的磁晶各向异性常数 (K_2) 的变化关系; (b) 为磁畴壁移动速度 (v) 随 K_2 的变化关系; (c) 为矫顽场 (H_C)、交换偏置场 (H_E) 随 K_2 的变化关系. 其约化参量为: $J_{FM} = 0.3, \beta = 0.1, J_{int} = 3, J_{AF} = 3, K_1 = 0.05, H = 10$

图 5 显示了铁磁/反铁磁双层膜系统中相关物理量随反铁磁层内的交换作用系数 J_{AF} 的变化关系. 结果表明: 随着 J_{AF} 的增加, 磁畴壁厚度 $\bar{\Delta}$ 变宽, 磁畴壁等效质量 m 减小, 磁畴壁移动速度 v 增大, 矫顽场 H_C 非线性缓慢减小, 而交换偏置场 H_E 非线性地快速增加并趋于饱和.

图 6 显示了铁磁/反铁磁双层膜系统中相关物理量随铁磁层/反铁磁层之间的交换耦合系数 J_{int} 的变化关系. 结果表明: 磁畴壁厚度 $\bar{\Delta}$ 随着 J_{int} 的增加单调减小, 磁畴壁等效质量 m 单调增大, 磁畴壁移动速度减小. 并且随着 J_{int} 的增加, 磁畴壁厚

度 $\bar{\Delta}$ 、磁畴壁质量 m 磁畴壁移动速度 v 改变越显著. 铁磁层/反铁磁层之间的交换耦合越大, 反铁磁层对铁磁层的钉扎作用越强, 畴壁移动越困难, 矫顽场增加, 交换偏置场也增加.

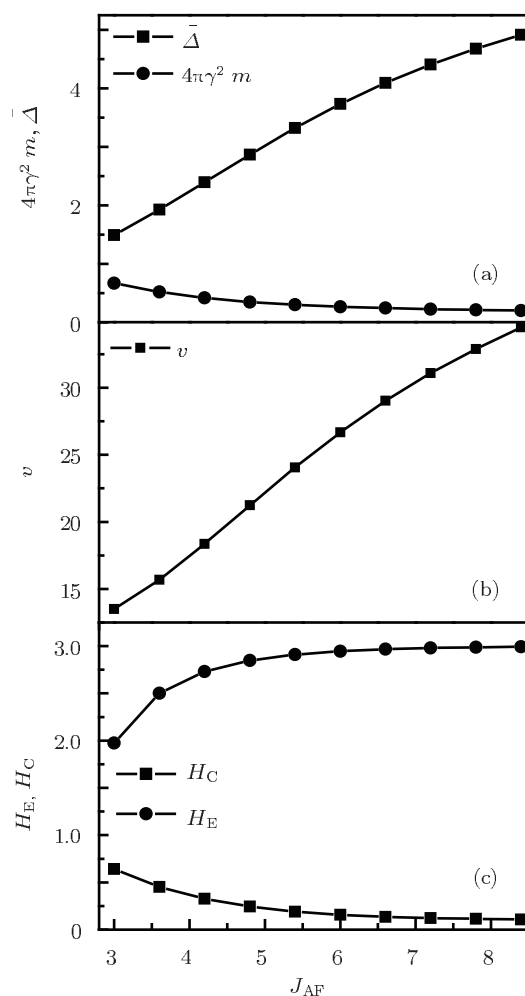


图 5 (a) 铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴壁厚度 ($\bar{\Delta}$)、磁畴壁质量 (m) 随反铁磁层内交换耦合常数 (J_{AF}) 的变化关系; (b) 为磁畴壁移动速度 (v) 随 J_{AF} 的变化关系; (c) 为矫顽场 (H_C)、交换偏置场 (H_E) 随 J_{AF} 的变化关系. 其约化参量为: $J_{FM} = 0.3, \beta = 0.1, J_{int} = 3, K_2 = 2, K_1 = 0.05, H = 10$

图 7 显示了铁磁/反铁磁双层膜系统中相关物理量随温度的变化关系. 图 7 表明: 随着温度的增大, 磁畴壁厚度 $\bar{\Delta}$, 磁畴壁质量 m 以及磁畴壁移动速度 v 的改变是非单调性的, 并在奈尔温度 T_N 处达到极值. 低温区域, 随温度的升高, 磁畴壁厚度 $\bar{\Delta}$ 减小, 磁畴壁质量 m 增加, 磁畴壁移动速度 v 减小, 矫顽场增加, 交换偏置场减小. 在温度大于临界温度的高温区域, 其随温度的增加则呈现相反的变化, 但交换偏置场为零.

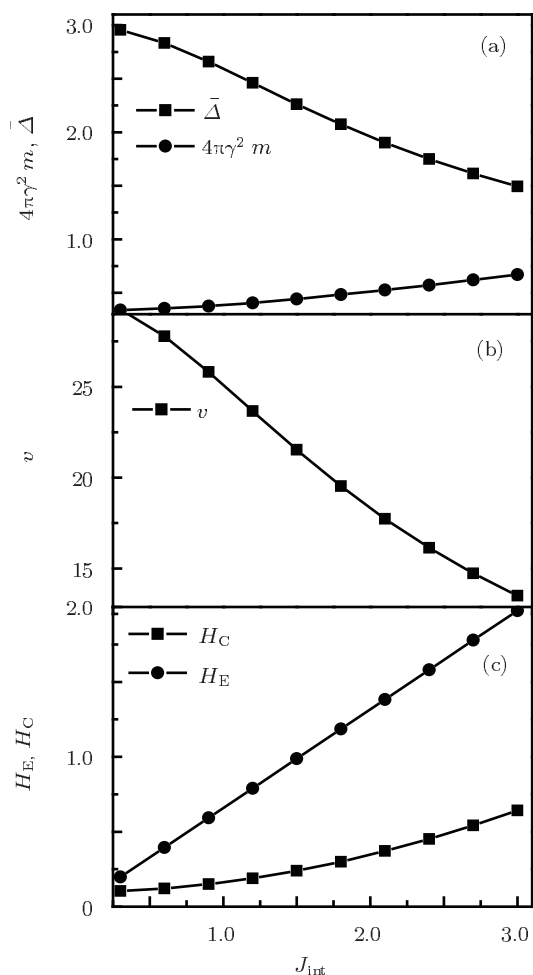


图 6 (a) 铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴壁厚度 ($\bar{\Delta}$)、磁畴壁质量 (m) 随界面交换耦合常数 (J_{int}) 的变化关系; (b) 为磁畴壁移动速度 (v) 随 J_{int} 的变化关系; (c) 为矫顽场 (H_C)、交换偏置场 (H_E) 随 J_{int} 的变化关系. 其约化参量为: $\beta = 0.1, K_2 = 2, J_{\text{AF}} = 3, K_1 = 0.05, J_{\text{FM}} = 0.3, H = 10$

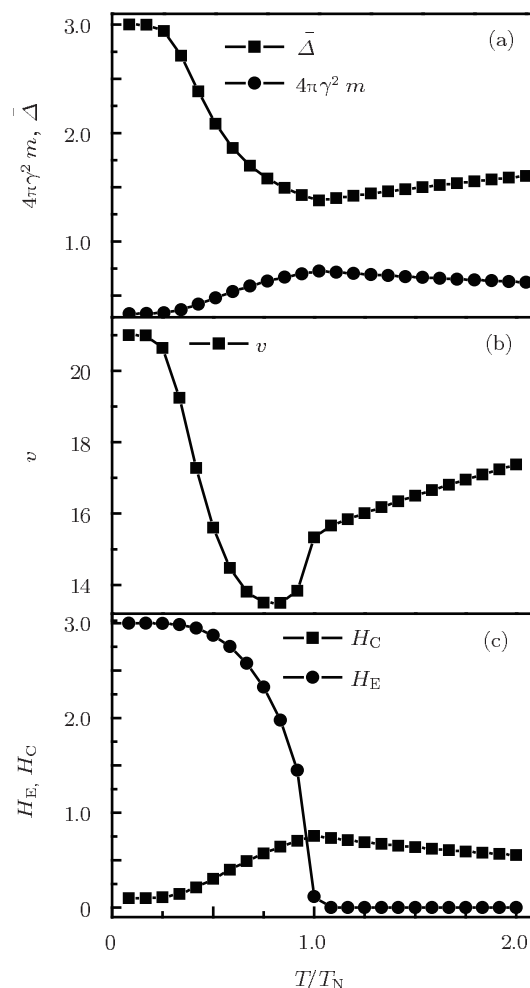


图 7 (a) 铁磁/反铁磁双层膜系统中的磁畴壁厚度 ($\bar{\Delta}$)、磁畴壁质量 (m) 随温度 (T/T_N) 的变化关系; (b) 为磁畴壁移动速度 (v) 随 T/T_N 的变化关系; (c) 为矫顽场 (H_C)、交换偏置场 (H_E) 随 T/T_N 的变化关系. 其约化参量为: $J_{\text{FM}} = 0.3, J_{\text{int}} = 3, K_2 = 2, J_{\text{AF}} = 3, K_1 = 0.05, H = 10$

4 结论

本文通过比较铁磁单层膜与铁磁/反铁磁双层膜结构中磁畴演化的行为发现: 由于反铁磁层膜对铁磁层膜的交换耦合作用, 系统的磁畴壁厚度变窄, 等效质量增加, 磁畴壁移动速度减缓, 系统的矫顽场增强, 并且出现了交换偏置场. 本文进一步研究了反铁磁层交换耦合作用下其磁畴壁等效厚度、等效质量以及磁畴壁移动速度等与反铁磁的净磁化、磁各向异性、界面耦合强度、温度等的

关系, 进而从磁畴结构的形成及其演化上揭示铁磁/反铁磁双层膜中出现交换偏置以及矫顽场增加的物理机制. 结果显示: 反铁磁层的磁晶各向异性越大越不利于铁磁层磁畴壁的移动, 而反铁磁层的交换耦合作用越强, 畴壁移动越容易实现; 另一方面, 铁磁/反铁磁层间的耦合作用越强, 反铁磁层对铁磁层的钉扎作用越强, 畴壁移动越困难, 矫顽场增加. 系统的矫顽场 H_C 的增加以及交换偏置场 H_E 的出现与相应磁畴动力学行为的改变密切相关.

- [1] Noges J, Schuller I K 1999 *Magn. Magn. Mater.* **192** 203
 [2] Meiklejohn W H, Bean C P 1956 *Phys. Rev.* **102** 1413
 [3] Meiklejohn W H, Bean C P 1957 *Phys. Rev.* **105** 904
 [4] Stamps R L 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 247
 [5] Nowak U, Usadel K D, Keller J, Miltenyi P, Beschoten B, Guntherodt G 2002 *Phys. Rev. B* **66** 014430
 [6] Wu X W, Chien C L 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2795
 [7] Eftaxias E, Trohidou K N 2005 *Phys. Rev. B* **71** 134406
 [8] Miltenyi P, Gierlings M, Keller J, Beschoten B, Guntherodt G, Norwak U, Usadel K D 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4224
 [9] Bae S, Judy J H, Egelhoff W F 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 6650
 [10] Jungblut R, Coehoorn R, Johnson M T, Sauer C, van der Zaag P J, Ball A R 1995 *Magn. Magn. Mater.* **148** 300
 [11] Nakatani R, Hoshino K, Noguchi S, Sugita Y 1994 *Appl. Phys.* **33** 133
 [12] Bae S, Judy J H, Egelhoff W F, Chen P J 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 6650
 [13] Tian H Y, Xu X Y, Hu J G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2757 (in Chinese) [田宏玉, 许小勇, 胡经国 2009 物理学报 **58** 2757]
 [14] Tsang C, Fontana R E, Lin F 1994 *IEEE Trans. Magn.* **30** 3801
 [15] Diény B, Speriosu V, Parkin P 1991 *Phys. Rev. B* **43** 1297
 [16] Heim D E, Fontana Jr R E, Tsang C 1994 *IEEE Trans. Magn.* **30** 316
 [17] Daughton J M, Chen Y J 1993 *IEEE Trans. Magn.* **29** 2705
 [18] Diény B J 1994 *Magn. Magn. Mater.* **136** 335
 [19] Stamps R L, Usadel K D 2006 *Eur. Phys. Lett.* **74** 512
 [20] Xu Y, Hu J G, Stamps R L 2008 *Commun. Theor. Phys.* **50** 253
 [21] Scholten G, Usadel K D, Nowak U 2005 *Phys. Rev. B* **71** 064413
 [22] Zhong W D 1998 *Ferromagnetics* (2) (Beijing: Science Press) p95 (in Chinese) [钟文定 1998 铁磁学 (中册) (北京: 科学出版社) p95]

Dynamic behaviors of domain wall in FM/AFM bilayers*

Zhu Jin-Rong Xiang Mei Hu Jing-Guo[†]

(College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

(Received 5 February 2012; revised manuscript received 17 March 2012)

Abstract

The magnetic domain evolution behaviors of ferromagnetic (FM) monolayer and ferromagnetic (FM)/antiferromagnetic (AFM) bilayer are compared and analyzed. The results indicate that the equivalent width, mass and velocity of magnetic domain wall are changed, then the coercivity is enhanced and the exchange bias is present due to the exchange coupling between anti-ferromagnetic and ferromagnetic layer. The results also show that the equivalent width, mass and velocity of magnetic domain wall for FM /AFM bilayers system could be varied with the change of the net magnetization of antiferromagnetic layer, the magnetic anisotropy constants of FM and AFM layer, the exchange coupling constant of antiferromagnetic layer, interface exchange coupling constant and the temperature, and the relevant influences on the coercivity and exchange bias are discussed. So, the physical mechanisms of the emergence of exchange bias and enhancement of coercivity are discovered by the formation and evolution of the domain wall.

Keywords: FM/AFM bilayers, magnetic domain-wall motion, coercivity, exchange bias field

PACS: 75.60.Ch, 75.78.Fg, 75.70.Cn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974170) and the National Natural Science Foundation of China for Youths (Grant Nos. 11104239, 11104240).

[†] E-mail: jghu@yzu.edu.cn