文章编号：1000-5773(2013)05-0738-07

外应力下交换偏置双层膜角度关系曲线的中心偏移现象*

郭子政，胡旭波，罗志环

（华南农业大学理学院应用物理系，广东广州　510642）

摘要：研究了外应力与易轴夹角为任意角度 Ψ 时铁磁/反铁磁双层膜中交换偏置对外磁场取向角 θ_0 的的依赖关系，特别是矫顽力和偏置场曲线的中心偏移现象。由于斯通纳-沃尔法斯模型和能量极小原理只能给出 θ_0 部分取值下的矫顽力解析表达式，将不满足能量极小原理的 θ_0 取值部分的矫顽力用转换场近似，得到矫顽力的分段函数形式。数值计算显示，矫顽力和偏置场角度关系曲线是否发生中心偏移与 Ψ 取值有关：$\Psi=\pi/4$ 时，应力造成等效各向异性场强度的改变，并造成矫顽力和偏置场曲线中心的偏移；$\Psi=\pi/2$ 时，应力只改变等效各向异性场强度，而矫顽力和偏置场曲线不发生中心偏移。因此发生曲线中心偏移的条件是有效各向异性场对易轴的夹角 θ^* 不为零。另外，只有 $\theta^*\neq0$ 时，才能发生交换偏置场的阶跃现象，说明该阶跃现象是转换场在 θ^* 附近奇点造成的。

关键词：铁磁/反铁磁双层膜；交换偏置；应力；矫顽力

中图分类号：O484.43　　**文献标识码**：A

1　引　言

铁磁(FM)/反铁磁(AFM)系统中的交换偏置(Exchange Bias，EB)现象发现于20世纪50年代，迄今已大量应用在磁头、磁存储器和传感器中。在过去的50多年中，EB现象得到了广泛研究[1-6]。迄今发现的与交换偏置有关的现象表明，交换偏置的角度依赖关系(Angular Dependence of Exchange Bias，ADEB)是非常有趣的性质。研究发现，FM/AFM系统的交换偏置场 H_e 和矫顽力 H_c 对外磁场的取向非常敏感，这对于实际的器件应用有重大影响。对于传统媒介，易轴和外加磁场之间夹角 θ_0 的微小增加将导致转换场明显下降。这种高灵敏度造成转换场有较宽分布，从而增大转换噪声。除了应用意义，ADEB研究的理论价值也很大，比如它可以提供很多关于EB本质的信息，并且为各种现存的等效模型提供方便的检验手段。另外，ADEB可以用简单的斯通纳-沃尔法斯(Stoner-Wohlfarth，SW)模型很好地解释。虽然关于ADEB的工作已经有很多[7-23]，但仍有一些问题没有得到很好的解决，例如：实验中一般利用磁滞回线来测定交换偏置场 H_e 和矫顽力 H_c[13-18]。H_e 的定义为磁滞回线的位移，即 $H_e=(H_{cr}+H_{cl})/2$；H_c 的定义为磁滞回线的半宽度，即 $H_c=(H_{cr}-H_{cl})/2$，其中 H_{cr} 和 H_{cl} 分别为磁滞回线上升支和下降支的矫顽力。然而在计算中，经常用磁滞回线上升支和下降支的转换场 H_{sr} 和 H_{sl} 来代替定义中的 H_{cr} 和 H_{cl}，但矫顽力 H_c 和转换场 H_s 不是任何情况下都完全相等，因此这样只是近似成立。一般来说，矫顽力的计算比较困难。SW模型中，矫顽力可写成关于外磁场与易轴夹角 θ_0 的分段函数：当 $0<\theta_0\leqslant\pi/4$ 时，$H_c(\theta_0)=H_s(\theta_0)$；当 $\pi/4<\theta_0\leqslant\pi/2$ 时，$H_c(\theta_0)=[2H_s(\pi/4)-H_s(\theta_0)]$。当 $\pi/4<\theta_0$

* **收稿日期**：2011-04-25；**修回日期**：2011-05-24

基金项目：广东省高等学校引进人才专项资金；华南农业大学校长科学基金

作者简介：郭子政(1963—)，男，博士，教授，主要从事磁性材料的基础理论研究. E-mail：phzzguo@126.com

$\leqslant\pi/2$时,矫顽力可利用自由能极小原理,根据稳态平衡条件求得;而 $0<\theta_0\leqslant\pi/4$ 时,自由能极小原理不适用,$H_s=H_c$ 是由于磁滞回线的几何特征偶然造成的。由于自由能极小原理只能给出部分角度下矫顽力的准确结果,因此根据 SW 模型计算出来的矫顽力只有在 $0<\theta_0\leqslant\pi/4$ 时才是正确的,这也在一定程度上解释了文献[19]中矫顽力实验值和利用 SW 模型得到的计算值在 θ_0 接近零时存在较大偏差的原因。如何表达不满足能量极小原理角度部分的矫顽力仍是一个没有彻底解决的问题,目前这个问题的解决有两个近似办法:(1) 采用曲线拟合方法,利用满足能量极小原理角度部分的矫顽力表达式拟合不满足能量极小原理角度部分的矫顽力,Ambrose 等人[20]曾经指出,铁磁/反铁磁双层膜的交换偏置场和矫顽力可分别表达为 $H_c=\sum b_{2n-1}\cos[(2n-1)\theta']$ 和 $H_e=\sum b_{2n}\cos(2n\theta')$ 的形式,其中 n 为正整数,b_n 为待定常数,θ' 为外场与各向异性轴(场冷方向)的夹角;(2) 仍然采用 SW 的方法,即将不满足能量极小原理角度部分的矫顽力用转换场近似。

关于外应力对铁磁/反铁磁双层膜中交换偏置的角度依赖关系的影响已经有很多研究[21-22,24],但是这种影响究竟反映在哪些物理效应上,仍十分模糊,特别是缺乏实验数据的验证。我们前期的工作[23]表明,当应力与易轴的夹角为 $\pi/4$ 时,应力各向异性场与磁晶各向异性场竞争的结果会造成矫顽力和偏置场角度关系曲线中心的偏移。实际上,在存在多个各向异性场的情况下,只要等效的各向异性场与易轴的夹角 θ^* 不为零,即可发生此中心偏移现象。这时与磁晶各向异性场合成等效各向异性场的另一个场也可以不是应力场,如四阶各向异性场即可。Dubourg 等人[25]研究了[001]晶向外延生长NiO-Co双层膜上的 ADEB,当考虑四阶各向异性场时确实发现了上述的中心偏移现象。Dubourg 等人的结果间接支持了文献[23]的结论。本研究采用 SW 方法,进一步分析外应力对铁磁/反铁磁双层膜中交换偏置的角度依赖关系的影响。

2　模型和理论

2.1　模型

如图 1 所示,假定薄膜在 xOz 平面上,铁磁层的易轴沿 z 轴方向,磁场在 xOz 面内。θ_0 为外场 $\boldsymbol{H}_0$ 与易轴夹角,θ 为 FM 层磁化强度 $\boldsymbol{M}_s$ 与易轴的夹角,Ψ 为磁弹各向异性场 $\boldsymbol{H}_\sigma$ 与易轴的夹角,$\boldsymbol{H}_\sigma$ 与应力方向一致。磁弹自由能密度可写为

$$f_e=-\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2(\Psi-\theta) \tag{1}$$

式中:λ_s 是饱和磁致伸缩系数,σ 是应力。该模型中不区分张应力和压应力,只考虑 $\lambda_s\sigma>0$ 的情况。

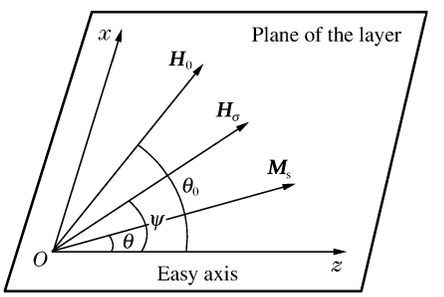


图 1　模型示意图

Fig. 1　Schematic of the model

本研究主要关注存在交换偏置的情况。为简化计算,假设反铁磁材料足够厚,则其单轴各向异性能可以忽略。采用扩展的 SW 模型,FM/AFM 双层膜的自由能密度可写为

$$f=-K_F t_F\cos^2\theta-M_F H_0 t_F\cos(\theta_0-\theta)-\frac{3}{2}t_F\lambda_s\sigma\cos^2(\Psi-\theta)-J_E\cos\theta \tag{2}$$

式中:K_F 和 t_F 分别为 FM 层的各向异性常数与厚度,J_E 为交换耦合常数,M_F 为饱和磁化强度。(2)式第一项为 FM 层的单轴各向异性能;第二项为塞曼能量;最后一项为界面交换耦合能,即反铁磁经过磁场退火热处理后感生的单轴各向异性能。(2)式可以写成约化形式

$$E=-H_K\cos^2\theta-2H_0\cos(\theta_0-\theta)-H_\sigma\cos^2(\Psi-\theta)-J\cos\theta \tag{3}$$

式中:$E=2f/M_F t_F$,$H_K=2K_F/M_F$,$H_\sigma=3\lambda_s\sigma/M_F$,$J=2J_E/(M_F t_F)$。

2.2　等效各向异性场方法

引入等效各向异性场 H^*,可将(3)式中的应力各向异性场 $-H_\sigma\cos^2(\Psi-\theta)$ 和单轴磁各向异性场

$-H_K\cos^2\theta$合并。令 $\tan(2\theta^*)=H_\sigma\sin(2\Psi)/[H_K+H_\sigma\cos(2\Psi)]$,则

$$-H_K\cos^2\theta-H_\sigma\cos^2(\Psi-\theta)=-H^*\cos^2(\theta-\theta^*)+H^*\sin^2\theta^*-H_\sigma\sin^2\Psi \tag{4}$$

式中:$H^*=\sqrt{H_K^2+H_\sigma^2+2H_KH_\sigma\cos(2\Psi)}$。总的自由能密度可写成如下约化形式

$$E=-H^*\cos^2(\theta-\theta^*)-2H_0\cos(\theta_0-\theta)+H^*\sin^2\theta^*-H_\sigma\sin^2\Psi-J\cos\theta \tag{5}$$

2.3 转换场和矫顽力公式

转换场 H_s 的定义为:能使磁化方向转为相反方向的外场。由平衡条件$\partial E/\partial\theta=0$ 和$\partial^2E/\partial\theta^2=0$ 给出决定转换场的方程

$$\left[H_s\cos(\theta_0-\theta^*)+\frac{J}{2}\cos\theta^*\right]^{\frac{2}{3}}+\left[H_s\sin(\theta_0-\theta^*)-\frac{J}{2}\sin\theta^*\right]^{\frac{2}{3}}=(H^*)^{\frac{2}{3}} \tag{6}$$

一般来说,矫顽力并不总与转换场相同[26-28],转换场给出了矫顽力的一个上限。对于外场取向角的某些范围,矫顽力可利用自由能极小原理,根据稳态平衡条件$\partial E/\partial\theta=0$ 和$\partial^2E/\partial\theta^2>0$ 求得;当外场取向角取另外范围的值时,矫顽力不能根据此稳态平衡条件求得,这时取 $H_{cr}=H_{sr}$,$H_{cl}=H_{sl}$。综合起来,即

$$H_{cr}=\begin{cases}H_{sr} & (0\leqslant\theta_0\leqslant\theta_2^*)\\ \dfrac{1}{2}H^*\sin2(\theta_0-\theta^*)-\dfrac{1}{2}J\cos\theta_0 & (\theta_2^*<\theta_0\leqslant\pi/2+\theta^*)\\ -\dfrac{1}{2}H^*\sin2(\theta_0-\theta^*)-\dfrac{1}{2}J\cos\theta_0 & (\pi/2+\theta^*<\theta_0\leqslant\theta_4^*)\\ H_{sr} & (\theta_4^*<\theta_0\leqslant\pi)\end{cases} \tag{7}$$

$$H_{cl}=\begin{cases}H_{sl} & (0\leqslant\theta_0\leqslant\theta_1^*)\\ -\dfrac{1}{2}H^*\sin2(\theta_0-\theta^*)-\dfrac{1}{2}J\cos\theta_0 & (\theta_1^*<\theta_0<\pi/2+\theta^*)\\ \dfrac{1}{2}H^*\sin2(\theta_0-\theta^*)-\dfrac{1}{2}J\cos\theta_0 & (\pi/2+\theta^*<\theta_0\leqslant\theta_3^*)\\ H_{sl} & (\theta_3^*<\theta_0\leqslant\pi)\end{cases} \tag{8}$$

式中:θ_1^* 和 θ_4^* 为关于 θ^* 的方程$-2H^*\cos2(\theta_0-\theta^*)-J\sin\theta_0=0$ 的两个根,θ_2^*、θ_3^* 是关于 θ^* 的方程$-2H^*\cos2(\theta_0-\theta^*)+J\sin\theta_0=0$的两个根。

3 数值结果

本研究中,考虑 $\Psi=\pi/4$ 和 $\Psi=\pi/2$ 的两种情况。$\Psi=\pi/4$ 常见于界面晶格失配引起应变的情形,此时 $H^*=H_K\sqrt{1+r^2}$,$\theta^*=(\arctan r)/2$,其中,$r=H_\sigma/H_K$;$\Psi=\pi/2$ 常见于将薄膜垂直于易轴方向弯曲的情形(见图 2),此时 $\theta^*=0$,$H^*=H_K|1-r|$。图 2 中,假定应力各向异性场的方向与应力方向平行,该条件限制了 λ_s 的符号[29]。上述各式表明,$\Psi=\pi/4$ 和 $\Psi=\pi/2$ 时应力对等效场的影响是不同的,$\Psi=\pi/4$ 时,等效场随着应力的增加而增大;$\Psi=\pi/2$ 时,等效场随应力的增加而减小。反映到转换场和矫顽力上,即 $\Psi=\pi/4$ 时,转换场和矫顽力随应力的增加而增大;$\Psi=\pi/2$ 时,转换场和矫顽力随应力的增加而减小,如图 3 和图 4 所示。

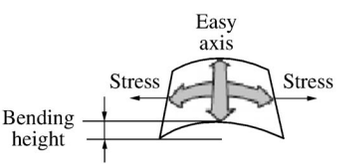
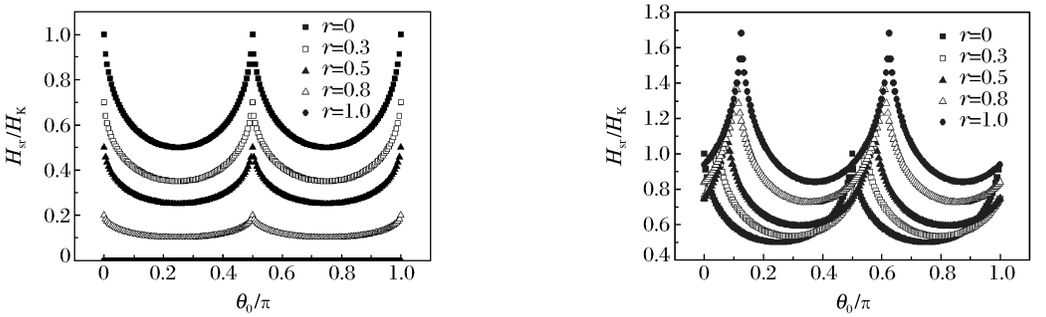


图 2 弯曲薄膜引起的垂直易轴的应力

Fig. 2 Stress caused by bending the film perpendicular to the easy axis

根据文献[23],应力或应变会造成矫顽力和偏置场角度关系曲线中心的偏移。本研究进一步分析发现,曲线是否偏移还与 Ψ 取值有关。图 3 和图 4 给出了不同情况下转换场和矫顽力随外场取向角的变化关系。为清楚地说明外应力不同取向的效果,图 3 和图 4 的条件是 $J=0$,即不考虑铁磁/反铁磁之间的交换偏置,体系相当于一个沉积在未做磁场退火处理的反铁磁基底上的铁磁薄膜。可以看出,

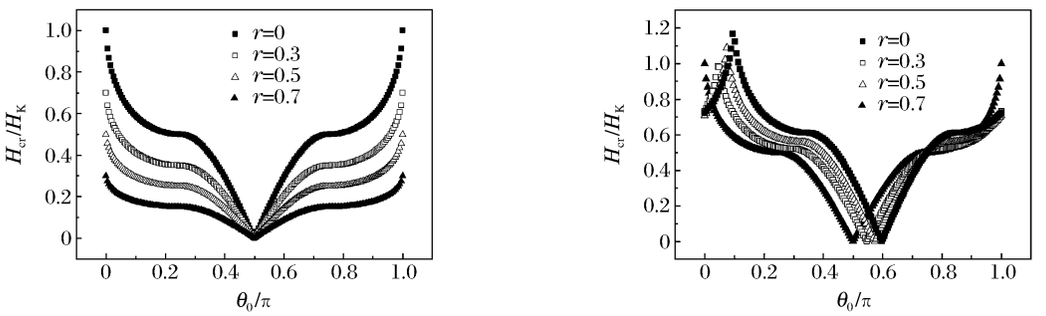
$\Psi=\pi/2$ 时应力场没有引起曲线中心的偏移,只改变了等效场的强度,此时 $\theta^*=0$;$\Psi=\pi/4$ 时应力不但改变等效场强度,还会造成曲线中心的偏移,此时 $\theta^*\neq0$,说明要发生偏移,等效场不能与易轴平行。



(a) $\Psi=\pi/2$　　(b) $\Psi=\pi/4$

图 3　不同条件下转换场随外场取向角的变化($J=0$)

Fig. 3　Angular dependence of the switching field($J=0$)



(a) $\Psi=\pi/2$　　(b) $\Psi=\pi/4$

图 4　不同条件下矫顽力随外场取向角的变化($J=0$)

Fig. 4　Angular dependence of the coercivity($J=0$)

图 5 给出了 $r=0.3$、$J=0.3$ 时,$\Psi=\pi/4$ 和 $\Psi=\pi/2$ 两种情况下矫顽力和交换偏置场的角度依赖关系。$\Psi=\pi/4$ 时交换偏置场出现明显的阶跃现象,此时角度关系曲线发生偏移,$\theta^*\neq0$,转换场在 θ^* 附近的奇点导致交换偏置场出现阶跃。交换偏置场向下的阶跃点对应的外场取向角 θ_1 满足

$$\begin{cases} |H_s|\sin(\theta^*-\theta_1)-\dfrac{J}{2}\sin\theta^*=0 \\ |H_s|\cos(\theta^*-\theta_1)=H^*+\dfrac{J}{2}\cos\theta^* \end{cases} \quad (H_s<0,\theta_1<0) \tag{9}$$

交换偏置场向上的阶跃点对应的外场取向角 θ_2 满足

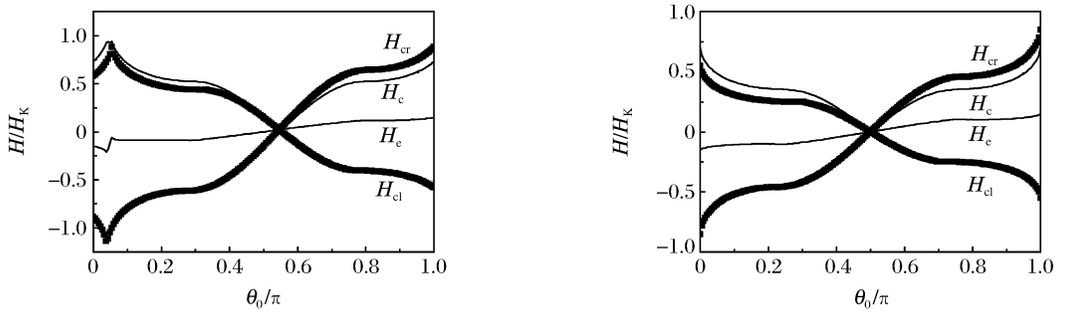
$$\begin{cases} H_s\sin(\theta^*-\theta_2)-\dfrac{J}{2}\sin\theta^*=0 \\ H_s\cos(\theta^*-\theta_2)+\dfrac{J}{2}\cos\theta^*=H^* \end{cases} \quad (H_s>0,\theta_2>0) \tag{10}$$

计算可得

$$\begin{cases} \theta_1=\theta^*-\arctan\dfrac{J\sin\theta^*}{2H^*+J\cos\theta^*} \\ \theta_2=\theta^*+\arctan\dfrac{J\sin\theta^*}{2H^*-J\cos\theta^*} \end{cases} \tag{11}$$

图 6 给出了 $J=0.3$ 时 $\Psi=\pi/2$ 和 $\Psi=\pi/4$ 两种情况下交换偏置场的角度依赖关系曲线。$\Psi=\pi/2$ 时,交换偏置场几乎不随外应力的改变而改变。但当 $\Psi=\pi/4$ 时,交换偏置场则随外应力的改变而改

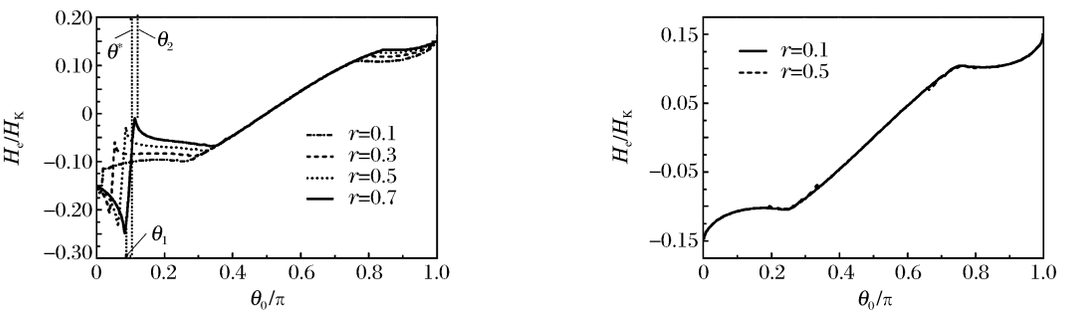
变,且在阶跃处比较敏感。应当指出,在不满足能量最小原理的条件时,如何计算矫顽力是一个十分重要的问题。本研究将矫顽力取为相应的转换场。这种做法的准确性和合理性还有待进一步研究。



(a) $\Psi=\pi/4$ (b) $\Psi=\pi/2$

图 5 矫顽力和交换偏置场随取向角的变化关系($J=0.3$,$r=0.3$)

Fig. 5 Angular dependence of the coercivity and the exchange bias field($J=0.3$,$r=0.3$)



(a) $\Psi=\pi/4$ (b) $\Psi=\pi/2$

图 6 不同应力条件下交换偏置场随外场取向角的变化关系($J=0.3$)

Fig. 6 Angular dependence of the switching field under different stress ($J=0.3$)

4 结 论

(1) 指出根据 SW 模型计算矫顽力的困难,即能量极小原理不能给出所有外场取向角下的矫顽力。解决办法之一是,将不满足能量极小原理角度部分的矫顽力用转换场近似。

(2) 研究了两种应力取向下,铁磁/反铁磁双层膜中交换偏置的角度依赖关系。结果表明,$\Psi=\pi/4$ 时,应力各向异性场与磁晶各向异性场竞争的结果造成矫顽力和偏置场角度关系曲线中心的偏移。$\Psi=\pi/2$ 时,矫顽力和偏置场角度关系曲线不发生中心偏移。

(3) 只有发生曲线中心偏移,即偏移角不等于零时,才能发生交换偏置场的阶跃现象,说明此种阶跃现象是转换场在 θ^* 附近的奇点造成的。

致谢:感谢云国宏教授、白浩宇博士和那日苏博士的有益讨论。

References:

[1] Meiklejohn W H, Bean C P. New magnetic anisotropy [J]. Phys Rev, 1956, 102(5): 1413-1414.

[2] Meiklejohn W H, Bean C P. New magnetic anisotropy [J]. Phys Rev, 1957, 105(3): 904-913.

[3] Berkowitz A E, Takano K. Exchange anisotropy—A review [J]. J Magn Magn Mater, 1999, 200(1/2/3): 552-570.

[4] Kiwi M. Exchange bias theory [J]. J Magn Magn Mater, 2001, 234: 584-595.

[5] Nogués J, Schuller I K. Exchange bias [J]. J Magn Magn Mater, 1999, 192: 203-232.

[6] Stamps R L. Mechanisms for exchange bias [J]. J Phys D: Appl Phys, 2000, 33(23): R247.

[7] Camarero J, Sort J, Hoffmann A, et al. Origin of the asymmetric magnetization reversal behavior in exchange-biased systems: Competing anisotropies [J]. Phys Rev Lett, 2005, 95: 057204.

[8] Spenato D, Castel V, Pogossian S P, et al. Asymmetric magnetization reversal behavior in exchange-biased NiFe/MnPt bilayers in two different anisotropy regimes: Close and far from critical thickness [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(6): 062515.

[9] Bai Y H, Yun G H, Bai N. The jump phenomenon in the angular dependence of exchange bias for ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers [J]. J Appl Phys, 2009, 106(6): 063919.

[10] Bai Y H, Yun G H. Exchange bias for ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers with the uniaxial anisotropy being misaligned with the exchange anisotropy [J]. Sci China: Phys Mech Astron, 2009, 52(12): 1885-1892.

[11] Coffey K R, Thomson T, Thiele J U. Angular dependence of the switching field of thin-film longitudinal and perpendicular magnetic recording media [J]. J Appl Phys, 2002, 92(8): 4553-4557.

[12] Lai C H, Wang Y H, Chang C R, et al. Exchange-bias-induced double-shifted magnetization curves in Co biaxial films [J]. Phys Rev B, 2001, 64(9): 094420.

[13] Gao T R, Yang D Z, Zhou S M, et al. Hysteretic behavior of angular dependence of exchange bias in FeNi/FeMn bilayers [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(5): 057201.

[14] Kim D Y, Kim C G, Kim C-O, et al. Angular Dependence of Exchange Bias and Coercive Field in CoFe/MnIr Epitaxial Bilayers [J]. IEEE Trans Magn, 2005, 41(10): 2712.

[15] Xi H, Kryder M H, White R M. Study of the angular-dependent exchange coupling between a ferromagnetic and an antiferromagnetic layer [J]. Appl Phys Lett, 1999, 74(18): 2687.

[16] Xi H, White R M. Angular dependence of exchange anisotropy in $Ni_{81}Fe_{19}$/$CrMnPt_x$ bilayers [J]. J Appl Phys, 1999, 86(6): 5169.

[17] Nicolodi S, Pereira L G, Schmidt J E, et al. Angular dependence of the exchange bias and coercivity of IrMn/Co bilayers [J]. Physica B: Condens Matter, 2006, 384(1-2): 141.

[18] Pandey K K M, Chen J S, Hu J F, et al. Microstructural evolution and magnetization reversal mechanism of CoPt films with perpendicular magnetic anisotropy [J]. J Phys D: Appl Phys, 2009, 42(1): 015009.

[19] Kim D Y, Kim C G, Kim C O, et al. Angular dependence of exchange bias and coercivity in polycrystalline CoFe/MnIr bilayers [J]. J Magn Magn Mater, 2006, 304(1): e56-e58.

[20] Ambrose T, Sommer R L, Chien C L. Angular dependence of exchange coupling in ferromagnet /antiferromagnet bilayers [J]. Phys Rev B, 1997, 56(1): 83-86.

[21] Bai Y H, Yun G H, Narisu. Effect of applied stress on exchange bias in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers and the phenomenon of jump [J]. Acta Phys Sin, 2009, 58(7): 4962. (in Chinese)
白宇浩,云国宏,那日苏. 外应力对铁磁/反铁磁体系交换偏置的影响及阶跃现象 [J]. 物理学报, 2009(7), 58: 4962.

[22] Bai Y H, Yun G H, Narisu. Effect of tensile stress on exchange bias in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(4): 252-260. (in Chinese)
白宇浩,云国宏,那日苏. 张应力对铁磁/反铁磁体系交换偏置的影响 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 252-260.

[23] Guo Z Z. Angular dependence of the switching field and coercivity for magnetic multilayer films with strain caused by lattice mismatch [J]. Solid State Commun, 2011, 151: 116-119.

[24] Pan J, Tao Y C, Hu J G. The exchange bias in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers under the stress field [J]. Acta Phys Sin, 2006, 55(6): 3032. (in Chinese)
潘　靖,陶永春,胡经国. 外应力场下铁磁/反铁磁双层膜系统中的交换偏置 [J]. 物理学报, 2006, 55(6): 3032.

[25] Dubourg S, Bobo J F, Warot B, et al. Complex angular dependence of exchange bias on (001) epitaxial NiO-Co bilayers [J]. Eur Phys J B, 2005, 45(2): 175-179.

[26] Tannous C, Gieraltowski J. A Stoner-Wohlfarth model Redux: Static properties [J]. Physica B: Condens Matter, 2008, 403(19-20): 3563-3570.

[27] Kahler G R, Bennett L H, Della Torre E. Coercivity and the critical switching field [J]. Physica B: Condens Matter, 2006, 372(2): 1-4.

[28] Stoner E C, Wohlfarth E P. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys [J]. Philos Trans R Soc London, 1948, 240(826): 74-77.

[29] Zhong W D. Technical Magnetics [M]. Beijing: Sience Press, 2009: 49. (in Chinese)
钟文定. 技术磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 49.

Center Shift Phenomenon of the Characteristic Curves for Exchange-Bias Bilayers under External Stress

GUO Zi-Zheng, HU Xu-Bo, LUO Zhi-Huan

(*Department of Applied Physics, College of Science, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Focusing on the center shift phenomenon of the coercivity curves and the exchange bias field curves, the dependences of the exchange bias on θ_0, the angle of external field orientation, in ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers are studied in the cases that Ψ, the angle between the stress field and the easy axis, is taken as $\pi/4$ or $\pi/2$. It is shown that the analytical expression of the coercivity cannot be derived by using the Stoner-Wohlfarth model and the principle of energy minimum for the whole range of the angle θ_0. We approximate the coercivity with the switching field for the θ_0 interval at which the principle of energy minimum is not satisfied, and in this way, we got the coercivity expression in the form of piecewise function. Numerical calculations indicate that whether the center shift phenomenon of the coercivity curves and the exchange bias field curves occurs depends on the value of Ψ. While $\Psi=\pi/4$, stress results in not only the change of the strength of the effective anisotropic field but the center shift of coercivity curves and the exchange bias field curves; while $\Psi=\pi/2$, only the strength of the effective anisotropic field is influenced and no such center shift occurs. The condition in which the center shift of the coercivity curves and the exchange-bias field curves occurs is that θ^*, the angle of the effective anisotropy field to the easy axis, is not equal to zero. In addition, the results also show that the jump phenomenon can only be observed while $\theta^* \neq 0$, implying that the jump phenomenon is caused by the singularity of the switching field near θ^*.

Key words: ferromagnetic/antiferromagnetic bilayers; exchange bias; stress; coercivity