

# Reversible and Irreversible Exchange-Spring Process of the Antiferromagnetically Exchange Coupled Bilayer System

Guang-fu Zhang, Guang-hua Guo, Xi-guang Wang

School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha, China

Email: guogh@mail.csu.edu.cn

**Abstract:** The demagnetization processes of antiferromagnetically exchange-coupled soft/hard bilayer structures have been studied based on a one-dimensional atomic chain model. It is found that, when the magnetic anisotropy of soft layer is taken into account, the change of the interfacial exchange coupling strength leads the transition of the exchange-spring process from reversible to irreversible for the thin soft layer structures. There is a critical interfacial exchange constant  $A_{sh}^c$ , above which the exchange-spring process is reversible. When  $A_{sh} < A_{sh}^c$ , the process becomes irreversible. For the bilayer structures with the soft layer thickness larger than the critical thickness  $t_c$ , only the irreversible exchange-spring process exists, not matter how strong the interfacial exchange coupling is. The phase diagram of reversible and irreversible exchange-spring processes is mapped in the plane of the interfacial exchange coupling and soft layer thickness.

**Keywords:** antiferromagnetically exchange-coupled bilayer; exchange-spring process; magnetization reversal mechanism; magnetic phase diagram

## 软磁/硬磁双层膜体系的可逆和不可逆交换弹性反磁化过程

张光富, 郭光华, 王希光

中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙, 中国, 410083

Email: guogh@mail.csu.edu.cn

**摘要:** 本文采用一维原子链模型研究了反铁磁耦合的软磁/硬磁双层膜体系的反磁化过程。研究结果表明, 当考虑了软磁层的磁晶各向异性后, 对软磁层较薄的体系, 软-硬磁界面交换耦合常数的减小将导致反磁化过程由可逆的交换弹性反磁化过程转变为不可逆的。存在一个临界界面交换耦合强度  $A_{sh}^c$ 。当界面交换耦合强度  $A_{sh}$  大于  $A_{sh}^c$  时, 软磁层的反磁化过程是可逆的交换弹性反磁化过程; 而当  $A_{sh} < A_{sh}^c$  时, 这一过程变为不可逆。同样也存在一个临界软磁层厚度  $t_c$ , 对  $t > t_c$  的体系, 无论界面交换耦合多强, 其反磁化过程均为不可逆的交换弹性反磁化过程。给出了体系的可逆与不可逆交换弹性反磁化过程随软磁层厚度和界面交换耦合强度变化的磁相图。

**关键词:** 反铁磁耦合双层膜; 交换弹性反磁化过程; 反磁化机制; 磁相图

### 1 引言

交换耦合的软磁/硬磁双层或多层膜体系, 由于理论上预言拥有高达 120MGOe 的磁能积<sup>[1, 2]</sup>, 自从被提出以来, 就受到人们广泛关注。已有的研究表明, 结构参数和磁参数(如膜的厚度和界面交换耦合强度等)对体系的反磁化过程有很大的影响<sup>[3-6]</sup>。对铁磁交换耦合的软

/硬磁双层或多层膜而言, 存在一个临界软磁层厚度  $t_s$ <sup>[1, 2, 7, 8]</sup>, 当软磁层厚度小于  $t_s$  时, 软、硬磁层之间完全耦合, 在反磁化过程中软、硬磁层同时反转。对于软磁层厚度大于  $t_s$  的体系, 反磁化过程通过两步完成。首先, 当外场大于软磁层的偏转场  $H_b$  时<sup>[9]</sup>(有的文献中称这个场为形核场或交换偏置场), 在软磁层中发生交换弹性反磁化过程(exchange-spring process), 即由于硬磁层对软磁层界面磁矩的钉扎与塞曼能之间的相互竞争导致沿软磁层厚度方向磁化强度出现连续偏转, 形成布洛

基金项目: 国家自然科学基金(60571043)和湖南省自然科学基金(07JJ3103)资助项目。

赫畴壁形式的螺旋磁结构。当外场进一步增大硬磁层的反转场时，硬磁层发生不可逆的磁反转。一般认为，软磁层中发生的交换弹性反磁化过程是一个可逆过程，且当软磁层界面磁矩被完全钉扎时，偏转场  $H_b$  与软磁层厚度的平方成反比<sup>[9, 10]</sup>。

我们对反铁磁交换耦合的软磁/硬磁双层膜体系的研究发现，当考虑软磁层的磁各向异性能时，交换弹性反磁化过程表现出新的特性<sup>[11]</sup>。存在另一个软磁层临界厚度  $t_c$ ，当软磁层厚度  $t$  小于  $t_c$  时，其反磁化过程表现出典型的可逆交换弹性反磁化过程；而对  $t > t_c$  的体系，软磁层中的交换弹性反磁化过程转变为不可逆过程。实验上这种不可逆交换弹性反磁化过程在铁磁和反铁磁交换耦合的双层膜中都被观察到<sup>[3, 12, 13]</sup>。

除了软磁层的厚度外，软/硬磁界面交换耦合强度也是影响双层膜或多层膜体系磁学性质的一个重要参数<sup>[5, 14]</sup>。在本文中我们研究了反铁磁耦合的软磁/硬磁双层膜体系中界面交换耦合强度对交换弹性反磁化过程的影响。发现，不仅软磁层的厚度，界面交换耦合强度的改变也会引起交换弹性反磁化过程由可逆向不可逆过程的转变。

## 2 理论模型

在本文中我们采用一维原子链模型来研究交换耦合的软/硬磁双层体系的反磁化过程。这一模型已被广泛地用于研究磁性多层膜体系，且取得了与实验符合很好的结果<sup>[3, 10, 15, 16]</sup>。根据这一模型，多层膜可以看作由原子层叠加而成，每一原子层内的磁化强度均匀分布。体系能量由每层的磁各向异性能、塞曼能和相邻原子层之间的交换能构成，可表示为：

$$\begin{aligned}
 E_{tot} = & - \sum_{i=1}^{N_s-1} \frac{A_s}{d^2} \vec{m}_i \cdot \vec{m}_{i+1} - \sum_{i=1}^{N_s} K_s (\vec{m}_i \cdot \vec{e}_i)^2 \\
 & - \sum_{i=1}^{N_s} M_s \vec{H} \cdot \vec{m}_i - \frac{A_{sh}}{d^2} \vec{m}_{N_s} \cdot \vec{m}_{N_s+1} \\
 & - \sum_{i=N_s+1}^{N-1} \frac{A_h}{d^2} \vec{m}_i \cdot \vec{m}_{i+1} - \sum_{i=N_s+1}^N K_h (\vec{m}_i \cdot \vec{e}_i)^2 \\
 & - \sum_{i=N_s+1}^N M_h \vec{H} \cdot \vec{m}_i
 \end{aligned}$$

其中  $M_s(M_h)$ ,  $A_s(A_h)$  和  $K_s(K_h)$  是分别是软磁层（硬磁层）的饱和磁化强度，交换常数和磁各向异性常数。 $A_{sh}$  是软/硬磁层间交换耦合常数。 $\vec{m}_i$  和  $\vec{e}_i$  分别是第  $i$  原子层的归一化磁化强度和易磁化轴方向单位矢量。在这

里我们假设软磁和硬磁层具有相同的易磁化方向。 $d$  是相邻两个原子层之间的距离。 $N_s$  和  $N$  分别是软磁层的原子层数和整个体系总的原子层数。 $\vec{H}$  是外磁场且沿易磁化方向。由能量取极小值的条件可以得到平衡态时磁矩的分布状态，从而计算出磁结构随外磁场的变化以及退磁曲线。

数值计算时取软磁层和硬磁层的磁参数如下： $M_s=557\text{emu/cm}^3$ ,  $A_s=1.46 \times 10^6\text{erg/cm}$ ,  $K_s=1 \times 10^6\text{erg/cm}^3$ ,  $d=2.5 \times 10^{-8}\text{cm}$ ,  $M_h=1085\text{emu/cm}^3$ ,  $A_h=1.46 \times 10^6\text{erg/cm}$ ,  $K_h=1 \times 10^8\text{erg/cm}^3$ 。这些磁参数与  $\text{YFe}_2$  和  $\text{DyFe}_2$  的磁参数接近<sup>[4]</sup>。界面交换耦合常数  $A_{sh}$  与界面微结构密切相关，通过改变截面微结构可有效调制  $A_{sh}$  的大小<sup>[5]</sup>，此外，通过在软磁层和硬磁层之间塞入非磁层也可控制  $A_{sh}$  的值<sup>[14]</sup>。所以，在计算中  $A_{sh}$  的取值从零到与层内交换耦合相同的值（即  $1.46 \times 10^6\text{erg/cm}$ ）。在本文中我们主要研究软磁层的反磁化过程，所以计算时硬磁层的厚度固定为 30 个原子层。无外场时软磁层和硬磁层的磁化强度均匀分布且两者反平行排列。

## 3 结果与讨论

利用上述一维原子链模型，我们研究了反铁磁耦合的软磁/硬磁双层膜体系中界面交换耦合强度对体系反磁化过程的影响。图 1 (a) 和图 1 (b) 分别给出了软磁层厚度为  $N_s=30$ ，界面交换耦合常数为  $A_{sh}=1.46 \times 10^6\text{erg/cm}$  和  $A_{sh}=1. \times 10^7\text{erg/cm}$  时体系的退磁曲线。由图 1 (a) 可以看出，对于  $A_{sh}=1.46 \times 10^6\text{erg/cm}$  的体系反磁化过程是典型的可逆交换弹性反磁化过程。当外磁场反向增大到偏转场  $H_{b1}$  时，磁化强度均匀分布的初始磁状态开始变得不稳定，随后各原子层的磁矩开始发生偏转，由于界面反铁磁交换耦合能和塞曼能间的相互竞争，导致软磁层中界面处的磁矩偏转小，而表面原子层磁矩角度偏转越大，这样形成螺旋式分布的磁结构，或布洛赫畴壁。随着外场的增大，磁矩偏转角度也随之逐渐增大，畴壁逐渐向硬磁层方向压缩。这一交换弹性反磁化过程是一可逆过程，当外场逐渐减小返回到零时，软磁层的螺旋磁结构也逐渐回到初始的均匀分布状态。而对于  $A_{sh}=1. \times 10^7\text{erg/cm}$  的体系则表现出不同的反磁化过程（图 1 (b)）。反向外场增大到偏转场  $H_{b1}$  时，磁化强度突然减小，表明这是个一级磁相变过程。此外，这一反磁化过程是不可逆的，减小外场， $H_{b1}$  后形成的螺旋磁结构在另一较小的偏转场  $H_{b2}$  处才回到初始的均匀分布磁结构状态。这种可逆的和不可逆的交换弹性反磁化过程也可从原子层磁矩的角度随外场变化

曲线上清晰看出。图 1 (a) 和图 1 (b) 中的插图给出了软磁层的表面和界面磁矩与易磁化方向的夹角  $\theta_1$  和  $\theta_{Ns}$  随外场的变化曲线。可以看出，对于  $A_{sh}=1.46\times 10^{-6}\text{erg/cm}$  的体系，外场超过偏转场  $H_{b1}$  后，角度开始发生偏转且随外场的增大偏转角逐渐增大，表明螺旋似畴壁结构的逐渐形成和压缩过程。而对于  $A_{sh}=1.\times 10^{-7}\text{erg/cm}$  的体系，在  $H_{b1}$  处， $\theta_1$  和  $\theta_{Ns}$  突然发生大的偏转，表明  $H_{b1}$  处一个大角度的螺旋似畴壁结构突然形成，导致不可逆交换弹性反磁化过程的出现。

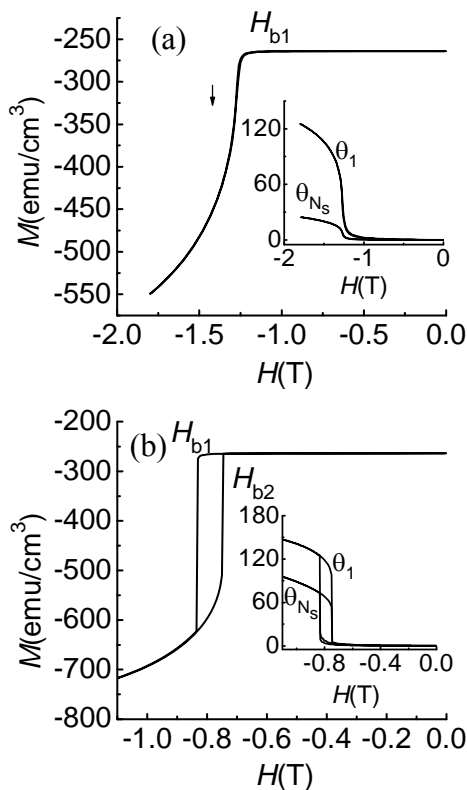


图 1 反铁磁交换耦合软磁/硬磁双层膜体系的退磁曲线，图 (a) 和 (b) 分别对应  $A_{sh}=1.46\times 10^{-6}\text{erg/cm}$  和  $A_{sh}=1.\times 10^{-7}\text{erg/cm}$ 。插图是角度  $\theta_1$  和  $\theta_{Ns}$  随外场的变化曲线

Figure 1. The demagnetization curves of antiferromagnetically exchange-coupled bilayers for interfacial exchange coupling  $A_{sh}=1.46\times 10^{-6}\text{erg/cm}$  (a) and for  $A_{sh}=1.\times 10^{-7}\text{erg/cm}$  (b). The insets show the field dependence of the angles  $\theta_1$  and  $\theta_{Ns}$  of the soft layer.

从原理上分析，交换弹性反磁化过程是可逆还是不可逆过程取决于在偏转场  $H_{b1}$  前后软磁层的交换能、磁晶各向异性性能和界面交换耦合能的变化  $\Delta E_{ex}+\Delta E_{an}+\Delta E_{sh}$  与塞曼能的变化  $\Delta E_{Ze}$  的相对大小。如果塞曼能的减小能

弥补在  $H_{b1}$  处所形成的大角度畴壁所导致的交换能和磁晶各向异性性能的增加（也即畴壁能），则这种畴壁可以在  $H_{b1}$  处突然形成，交换弹性反磁化过程就是不可逆的。反之，反磁化过程就是可逆的。一般情况下只有通过数值计算才能确定出现可逆和不可逆交换弹性反磁化过程的条件，然而当软磁层厚度接近或超过  $180^\circ$  畴壁厚度时，在软磁层中形成的  $180^\circ$  畴壁一定是个不可逆的，因为靠近软磁层中间的磁矩更接近与初始态反方向的易磁化方向，软磁层的磁晶各向异性将对这些磁矩形成钉扎作用，从而形成磁滞现象。

图 2 给出了当  $H=H_{b1}$  时，软磁层表面和界面磁矩的偏转角  $\theta_1$  和  $\theta_{Ns}$  随界面交换耦合常数  $A_{sh}$  的变化关系。可以看出，存在一个临界交换耦合强度  $A_{sh}^c$ （图中箭头所指），当  $A_{sh}>A_{sh}^c$ ， $\theta_1(H_{b1})$  和  $\theta_{Ns}(H_{b1})$  都为零，表明交换弹性反磁化过程是可逆过程；当  $A_{sh}<A_{sh}^c$  时， $\theta_1(H_{b1})$  和  $\theta_{Ns}(H_{b1})$  突然增大，表明不可逆交换弹性反磁化过程的出现，这一不可逆过程伴随着一个大角度畴壁得突然形成。随着  $A_{sh}$  的进一步减小， $\theta_1(H_{b1})$  和  $\theta_{Ns}(H_{b1})$  逐渐增大，但  $\theta_{Ns}-\theta_1$  逐渐减小。此外，还存在另一临界界面交换耦合常数  $A_{sh}^u$ ，当  $A_{sh}<A_{sh}^u$ ，界面交换耦合强度远小于层内交换耦合强度  $A_s$ ，此时软磁层界面磁矩已不能被硬磁层所钉扎，软磁层的反磁化过程转变为一致反转，对应着  $\theta_{Ns}=\theta_1=180^\circ$ 。

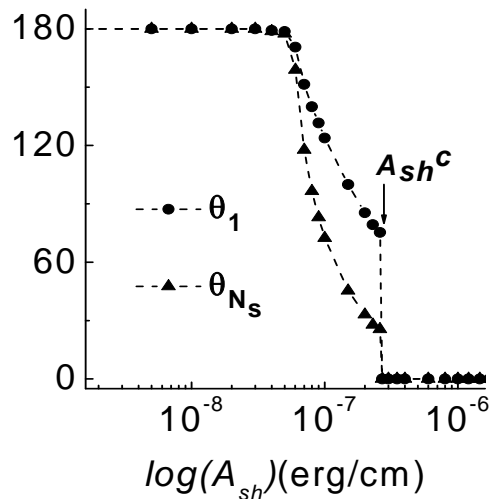


图 2. 偏转场  $H_{b1}$  处的磁矩角度  $\theta_1$  和  $\theta_{Ns}$  随界面交换耦合强度  $A_{sh}$  的对数变化曲线。

Figure 2. The angles  $\theta_1$  and  $\theta_{Ns}$  of the soft layer, at the bending field  $H_{b1}$ , as a function of the interfacial exchange coupling  $A_{sh}$ , expressed in logarithmic form.

由此可见，对于反铁磁交换耦合的双层膜体系，当考虑了软磁层的磁各向异性性能时，与软磁层厚度的变化所导致的可逆与不可逆交换弹性反磁化过程的转变类似<sup>[11]</sup>，随着界面交换耦合强度的减弱，交换弹性反磁化过程也由可逆过程转变为不可逆过程。详细的计算可以得到软磁/硬磁双层膜体系的可逆和不可逆交换弹性反磁化过程随  $N_s$  和  $A_{sh}$  变化的磁相图，如图 3 所示。可以看出，临界界面交换耦合常数  $A_{sh}^c$  随着软磁层厚度  $t$  的增加而增大，当软磁层厚度接近临界厚度  $t_c$  时， $A_{sh}^c$  迅速增大且趋近于无穷大。对于  $t > t_c$  的体系，无论  $A_{sh}$  多大，只有不可逆的反磁化过程存在。需要指出的是， $t_c$  与软磁层各向异性常数  $K_s$  有关，随  $K_s$  的减小而增大，当  $K_s \rightarrow 0$  时， $t_c \rightarrow \infty$ ，表明此时不可逆交换弹性反磁化过程不存在。从图 3 还可看出，标志体系由不可逆交换弹性反磁化过程向一致反过程转变的临界界面交换耦合常数  $A_{sh}^u$  几乎与软磁层的厚度无关。

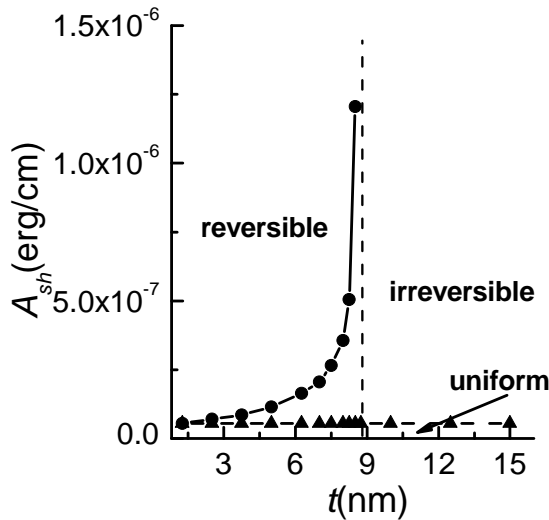


图 3. 软磁/硬磁双层膜体系的可逆和不可逆交换弹性反磁化过程的  $t$ - $A_{sh}$  磁相图。

Figure 3. The phase diagram of the reversible and irreversible exchange-spring processes in the plane of soft layer thickness  $t$  and the interfacial exchange coupling  $A_{sh}$ .

## 4 结论

采用一维的原子链模型研究了反铁磁耦合的软磁/硬磁双层膜体系的反磁化过程以及界面交换耦合强度对反磁化过程的影响。计算结果表明，当考虑了软磁层的磁晶各向异性性能后，界面交换耦合强度的变化可能导致软磁层的交换弹性反磁化过程由可逆过程转变为不可逆过程。存在一个临界界面交换耦合常数  $A_{sh}^c$ ，对于  $t < t_c$  的体系，当  $A_{sh} > A_{sh}^c$  时，交换弹性反磁化过程是可逆的；而当  $A_{sh} < A_{sh}^c$  时，这一过程变为不可逆过程。对  $t > t_c$  的体系，无论  $A_{sh}$  多大，只有不可逆的反磁化过程存在。在  $N_s$ - $A_{sh}$  平面上给出了体系的可逆与不可逆交换弹性反磁化过程的磁相图。

## References (参考文献)

- [1] Kneller E F and Hawig R. [J]. IEEE Trans. Magn., 1991, 27: 3588.
- [2] Skomski R and Coey J M D. [J]. Phys. Rev. B, 1993, 48: 15812.
- [3] Fullerton E F, Jiang J S, Grimsditch M, Sowers C H, and Bader S D. [J]. Phys. Rev. B, 1998, 58: 12193.
- [4] Sawicki M, Bowden G J, de Groot P A J, Rainford B D, and Beaujour J-M L. [J]. Phys. Rev. B, 2000, 62: 5817.
- [5] Choi Y, Jiang J S, Ding Y, Rosenberg R A, Pearson J E, Bader S D, Zambano A, Murakami M. [J]. Phys. Rev. B, 2007, 75: 104432.
- [6] McCord J, Henry Y, Hauet T, Montaigne F, Fullerton E E, and Mangin S. [J]. Phys. Rev. B, 2008, 78: 094417.
- [7] Leineweber T and Kronmüller H. [J]. Phys. Stat. Sol. (b), 1997, 201: 291.
- [8] Asti G, Solzi M, Ghidini M, and Neri F M. [J]. Phys. Rev. B, 2004, 69: 174401.
- [9] Goto E, Hayashi N, Miyashita T and Nakagawa K. [J]. J. Appl. Phys., 1965, 36: 2951.
- [10] Bowden G J, Beaujour J M L, Gordeev S, de Groot P A J, Rainford B D and Sawicki M. [J]. J. Phys.: Condens. Matter, 2000, 12: 9335.
- [11] Guo G H, Zhang G F, Song S Y, Wang D W, Bowden G J, and de Groot P A J. [J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 93: 102505.
- [12] Mangin S, Bellouard C, Andrieu S, Montaigne F, Ohresser P, Brookes N B, and Barbara B. [J]. Phys. Rev. B, 2004, 70: 014401.
- [13] Mangin S, Thomas L, Montaigne F, Lin W, Hauet T, and Henry Y. [J]. Phys. Rev. B, 2009, 80: 224424.
- [14] Yan S S, Elkawni M, Li D S, Garmestani H, Liu J P, Weston J L, and Zangari G. [J]. J. Appl. Phys., 2003, 94: 4535.
- [15] Fitzsimmons M R, Park S, Dumesnil K, Dufour C, Pynn R, Borchers J A, Rhyne J J, and Mangin Ph. [J]. Phys. Rev. B, 2006, 73: 134413.
- [16] Guslienko K Yu, Chubykalo-Fesenko O, Mryasov O, Chantrell R, and Weller D. [J]. Phys. Rev. B, 2004, 70: 10440