

文章编号: 1005-0523(2006)05-0149-04

硬/软磁双层膜体系反磁化机制的微磁学研究

刘正方, 伍清萍

(华东交通大学 基础科学学院, 南昌 330013)

摘要:以微磁学理论为基础采用三维动力学模型研究了交换耦合硬/软磁双层膜体系的反磁化机制; 研究表明: 在三维模型下, 随着软磁层厚度的改变, 体系的反磁化过程表现出了非常丰富的形式; 硬磁层主要是通过形核的畴壁移动来实现其反磁化过程的. 且硬磁层的磁化反转形式不仅与软磁层的尺寸密切相关而且与硬磁层的厚度也有一定的关系.

关键词:反磁化机制; 微磁学; 交换耦合

中图分类号: O488

文献标识码: A

1 引言

自从 Coehoorn 等人[1]于上个世纪 80 年代末首次报道了用快淬方法制备的低稀土富硼铁基磁体(其中包含具有纳米晶粒尺寸的软磁相(Fe)和硬磁相($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$))具有剩磁增强效应以及其后 Kneller 和 Hawig[2]对这一现象进行了初步理论解释, 并提出“交换弹性磁体”的概念后, 交换耦合双相体系就成为了磁性材料与磁性材料领域的前沿课题之一. 尽管, 现在对纳米双相磁体的研究仍以随机分布的纳米混合物为主, 但由于交换耦合多层膜体系的尺度易于在沉积过程控制以及其磁特性的可裁剪性, 而越来越成为人们研究纳米交换弹性磁体的便利模型^[3-8]. 现在对交换耦合硬/软磁超晶格体系研究的方向之一就是对其独特的反磁化机制的研究(主要研究软磁相的反磁化过程)^[3, 7-10], 人们一般认为软磁层磁化强度矢量的方向随着其与软/硬层界面的远近而依次排列, 且其过程是可逆的. 其磁化反转过程如下: 当加一反转场后, 软磁层的磁矩开始可逆的反转(大约在软硬磁层的交换耦合场(H_{ex})附近), 其反转角与其距离界面的远近有关, 距离越近角度越大; 当反转场继续增加时, 体系的磁化强度很快减小, 且不可逆的反转过程对应硬磁层

的反转. 而且人们发现软磁层厚度的改变严重影响了层间交换耦合, 当软磁层达到一定厚度(软磁层的临界尺寸)时, 磁滞回线是矩形, 这意味着整个软磁相强烈地耦合于硬磁相, 这时两相就好像一个单独的硬磁相(但其矫顽力略低于硬磁相的矫顽力). 当软磁层厚度达到一定厚度时, 磁滞回线则发生很大变化, 软磁层与硬磁层反转出现分离, 这是由于硬磁层与软磁层层间交换耦合减弱的原因. 尽管, 人们已对软磁相的反磁化机制进行了大量的研究, 但对于硬磁相的反转过程却研究的比较少, K. Mibu 等采用一维准静态模型对交换耦合硬/软磁双层膜体系(FCB)进行了模拟, 认为硬磁层的磁矩也要发生反转(特别是在界面处), 其与软磁层中磁矩的反转在同一反转场下, 其磁化反转也是每个磁层中磁矩的旋转; 但实验结果却发现: 硬磁层中的磁化反转应归于形核的畴壁移动, 从而在硬磁层中形成一多畴结构. 这是由于采用一维模型模拟交换耦合体系时, 由于忽略了体系的边缘效应, 进而不能与实验很好的吻合.

2 模型和方法

如图 1 是 FCB 的结构示意图, n_s 与 n_h 分别是软、硬磁层厚度, L 、 W 分别表示体系的长与宽.

收稿日期: 2006-01-24

作者简介: 刘正方(1974-), 男, 山西定襄县人, 硕士, 助教.

在微磁学理论中,自由能的表达式为:

$$E_t = E_{an} + e_{ex} + E_H + E_{demag} \quad (1)$$

式中 E_{ex} 是交换作用能, E_{an} 是磁晶各向异性能, E_H 是静磁能, E_{demag} 是退磁能; 其中由软硬磁层间交换能、软磁层内交换能与硬磁层内交换能三部分组成. 磁矩从一个稳定状态到另一个稳定状态的变化过程遵循 Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 动态方程:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\frac{\omega}{1+\alpha^2} \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff} - \frac{\alpha\omega}{(1+\alpha^2)M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{eff}) \quad (2)$$

其中 \mathbf{M} 是磁化强度矢量, ω 是旋磁比, α 是阻尼系数, \mathbf{H}_{eff} 有效场定义为自由能的变分, $\mathbf{H}_{eff} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_t}{\partial \mathbf{M}}$ 它提供作用在磁化强度矢量上的实际力矩. 模拟基于有限差分的思想, 把材料进行适当的网格划分, 假定每个网格内磁矩分布是均匀的, 给定一初始的磁矩分布, 计算每个网格内的有效场并求解 Gilbert 方程, 得到磁化强度矢量的动力学变化过程, 从而获得磁体的微磁结构分布[11].

注意: 在计算中只考虑最近邻相互作用, 计算过程选择了自由边界条件.

3 模拟结果及讨论

本文以微磁学理论为基础采用三维动力学模型对 FCB 的反磁化机制进行了研究. 模拟过程中所采用的样品是 Sm-Co/Fe 双层膜, 其硬磁层的交换耦合常数、各向异性常数与饱和磁化强度分别是 $A_h = 1.2 \times 10^{-11} (\text{J/m})$ 、 $K_h = 5 \times 10^6 (\text{J/m}^3)$ 、 $M_h = 0.55 \times 10^6 (\text{A/m})$; 软磁层的交换耦合常数、各向异性常数与饱和磁化强度分别是 $A_s = 2.8 \times 10^{-11} (\text{J/m})$ 、 $K_s = 10^2 (\text{J/m}^3)$ 、 $M_s = 1.7 \times 10^6 (\text{A/m})$; 层间交换耦合系数 (A_{hs}) 取 $1.8 \times 10^{-11} (\text{J/m})$ (在软、硬磁相的交换耦合常数之间). 模拟中软、硬磁层长与宽均取为 500nm , 厚度分别取 2.5nm 、 5nm 、 15nm , 每一剖分单元的长、宽和高分别为 20nm 、 20nm 与 2nm ; 模拟中, 软、硬磁层的易轴、外场以及软硬磁层的初始磁化强度矢量方向均沿 x 轴.

模拟中发现(以下各反转图是 $x-y$ 平面的俯视图):

当软、硬磁层严格耦合时(硬磁层厚度均取 2.5nm), 其反磁化过程为同时一致反转(图 2);

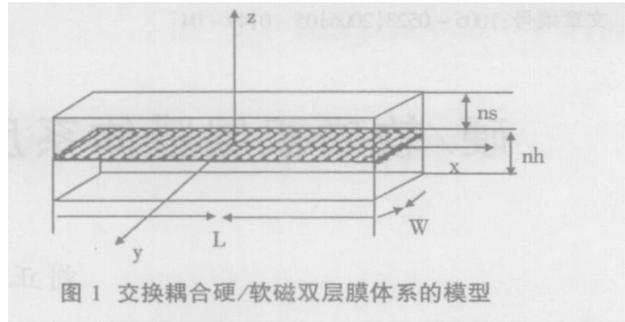


图 1 交换耦合硬/软磁双层膜体系的模型

这主要是由于此时软磁层厚度较小(小于其临界尺寸), 整个软磁相强烈地耦合于硬磁相, 这时两相就好像一个单独的硬磁相, 因此会出现如图所示的结果. 但是当软硬磁层非严格耦合时, 随着软磁层厚度的增加, 软磁层的反转形式逐渐由一致反转向非一致反转转变, 其磁畴形式也越来越复杂, 但在每一磁畴内仍是通过磁矩反转来实现其反磁化过程(图 3). 这归于当软磁层厚度达到一定厚度时, 软硬磁层层间交换耦合减弱, 软硬磁层已不再严格耦合, 进而软磁层的软磁相性质增强, 产生了如图所示的反转形式.

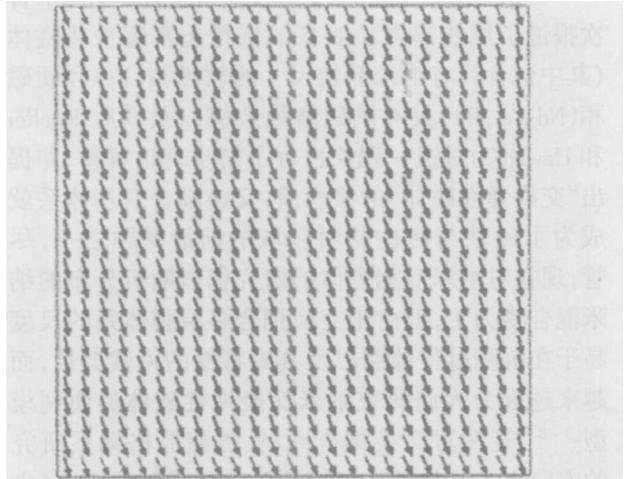


图 2 软、硬磁层厚度均匀 2.5nm 时, 交换耦合硬/软双层膜体系的微磁结构分布图

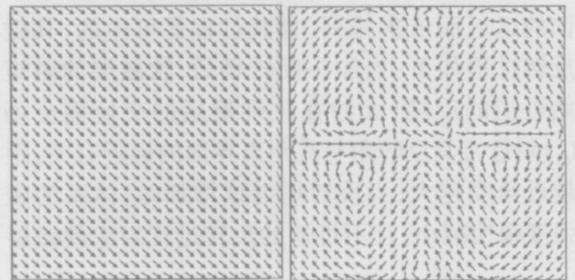


图 3 软、硬磁层厚度为 5nm , 软磁层厚度分别为 2.5nm (a), 15nm (b) 体系软磁层的反转过程

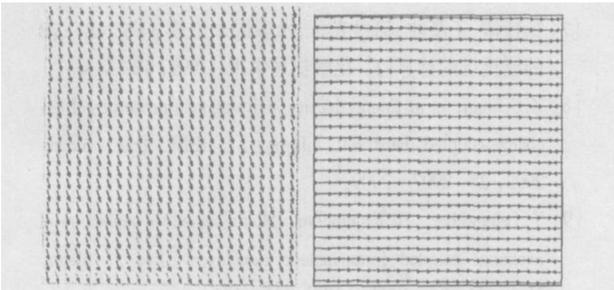


图4 软、硬磁层厚度为2.5nm,硬磁层厚度分别为2.5nm(a),15nm(b)体系硬磁层的反转过程

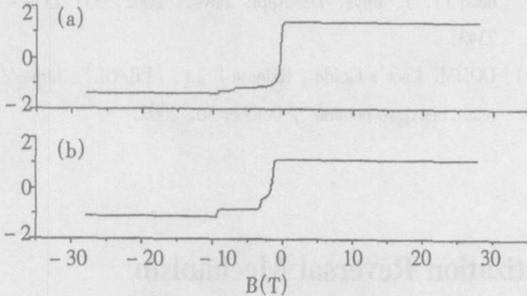


图5 软磁层厚度为5nm时,软磁层厚度在5nm(a)以及15nm(b)时交换耦合硬/软双层膜体系的反磁化曲线图

另外,当软磁层厚度固定,随硬磁层厚度增加,硬磁层的反转逐渐由一致反转向形核反转转变(图4)。而且硬磁层厚度一定时,随软磁层厚度的增加,硬磁层形核移动也越明显(图5);在x-y平面的四个角部由于最容易形核,因此硬磁层在形核移动过程中,总是先在四个角部形核,然后核逐渐向中心移动(图6)。

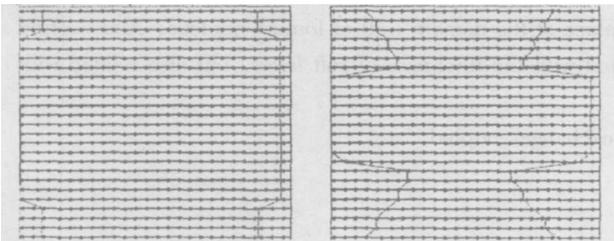


图6 硬、软磁层厚度分别为5nm、15nm时,硬磁层的反磁化过程(从左至右表示外场分别为:1780mT,1800mT)

在一维模型中,软磁相的临界尺寸(δ_s)(软硬磁层严格耦合一致反转时,软磁层的厚度)表示为: $\delta = \pi \sqrt{A_s/2K_h}$,也就是说软磁层的临界尺寸与硬磁层的厚度是无关的,但在上面的分析中我们可看到:软磁层厚度取2.5nm,硬磁层厚度大于5nm时,软硬磁层不一致反转,但硬磁层厚度等于2.5nm时,软、硬磁层却发生了一致反转,这说明采用三维模型计算时,体系软磁相的临界尺寸与硬磁相的厚度是有一定关系的,这可由图(7)得到解释:当软磁层厚度固定为2.5nm,随着硬磁层厚度的增加,软磁相反

转场(体系层间交换耦合场(H_{ex}))的绝对值变化较缓而硬磁相反转所需要克服的能量却越来越高,因此要想使体系的软、硬磁层同时反转,必须使层间耦合增强,也即软磁层的临界尺寸减小。

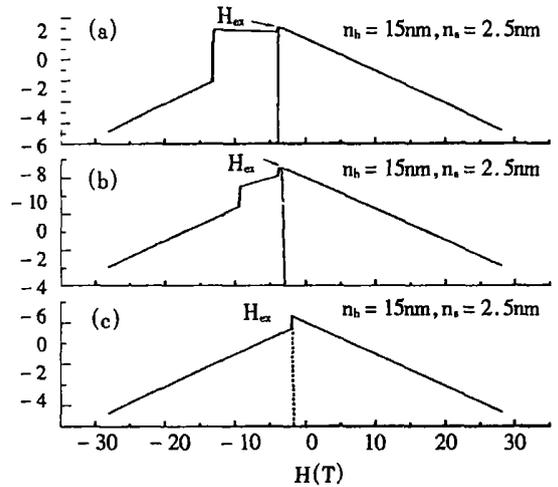


图7 不同硬磁层厚度下,交换耦合硬/软双层膜体系外场与能量的关系图

4 结论

利用微磁学理论采用三维动力学模型对交换耦合硬磁/软磁双层膜体系进行了模拟,研究了该体系反磁化过程;结果表明,当软磁层厚度在临界尺寸内时,软硬磁层是通过磁矩的一致旋转来实现的,而当软磁层厚度大于其临界尺寸时,在膜面内,软磁层具有较复杂的反转形式,硬磁层的反磁化过程是通过在边界处形核,然后核逐渐向膜面中心移动来实现其反转的,这正说明了软磁层反磁化过程的可逆性与硬磁层反磁化过程不可逆性的本质;另外软磁层的临界尺寸与硬磁层的厚度也是有关的;既硬磁层的磁化反转形式不仅与软磁层的尺寸密切相关而且与硬磁层的厚度也有一定的关系.这方面的研究在目前的文献中很少有报道。

参考文献:

[1] R. Coehoorn, D. B. de Mooij, and C. de Waard, Melt spun permanent magnet materials containing Fe³B as the main phase [J]. J. Magn. Magn. Mater., 1989, (80):101~104.
 [2] E. F. Kneller, and R. Hawig, The exchange-spring magnet: a new material principle for permanent magnets [J]. IEEE Trans. Magn., 1991, 27: 3588~3600.
 [3] K. Mibu, T. Nagahama, T. Shinjo, Reversible magnetization process and magneto-resistance of soft magnetic (NiFe)/hard-

- magnetic (CoSm) bilayers[J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 1996, (163):75~79.
- [4] F. Montaigne, S. Mangin and Y. Henry, Transition of magnetic configuration at the interface of exchange-coupled bilayers; TbFe/GdFe as a modal system[J]. Phys. Rev. B, 2003, 67; 144412 (1~13).
- [5] Matteo Amato, Angelo Rettori, Maria Gloria Pini, Exchange-spring behavior of hard/soft magnetic multilayers; optimization study of the nanostructure[J]. Physics B, 2000, (275):120~123.
- [6] E. E. Fullerton, J. S. Jiang, M. Grimsditch, C. H. Sowers, S. D. Bader, Exchange-spring behavior in epitaxial hard/soft magnetic bilayers [J]. Phys. Rev. B, 1998, 58; 12193 ~ 12200.
- [7] 杨仕清, 王豪才, 何世光. 纳米多层永磁膜 a-Fe/Nd₂Fe₁₄B 的成核场的计算[J]. 化学物理学报, 1999, 12; 44~47.
- [8] Z. S. Shan, et al Energy barrier and Magnetic properties of exchange-coupled hard/soft bilayer [J]. IEEE Tran. Magn, 2002, 38; 2907~2909.
- [9] T. Leineweber, H. Kronmüller, Micromagnetic examination of exchange coupled ferromagnetic nanolayers [J]. J. Magn. Magn. Mater., 1997, (176);145~154.
- [10] J. S. Jiang, et al Rotational hysteresis of exchange-spring magnets[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2002, 35; 2339 ~ 2343.
- [11] OOMMF User's Guide, Release 1.2a, [EB/OL]. <http://math.nist.gov/oommf/>, October 30, 2002.

Micromagnetic Study of the Magnetization Reversal Mechanism of Hard /Soft Magnetic Bilayer

LIU Zheng-fang, WU Qing-ping

(School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 310013, China)

Abstract: This paper is based on the micromagnetic theory to study the magnetization reversal mechanism of exchange-coupled hard /soft magnetic bilayer by using three-dimension dynamic model. The results show; in the three-dimension dynamic modal, with the change of the thickness of soft layer, there is a rich magnetization reversal form. For the hard magnetic layer, the magnetization reversal process belongs to displace of the domain wall of formed nucleus; And we find the magnetization reversal form of the hard layer is not only related with the thickness of soft layer, but also related with the thickness of hard layer.

Key words: magnetization reversal mechanism; micromagnetic; exchange-coupled