超星·期刊

第 27 卷第 2 期　　华 东 交 通 大 学 学 报　　Vol. 27 No. 2
2010 年 4 月　　Journal of East China Jiaotong University　　Apr. ,2010

文章编号: 1005 - 0523(2010)02 - 0082 - 04

旋转场作用下 Sm - Co/α - Fe 双层膜体系的反转特性

伍清萍

(华东交通大学 基础科学学院,江西 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/软磁双层膜体系的旋转特性; 研究结果表明: 体系的磁结构表现出了非常丰富的形式,不同的反转机制相应于不同的磁结构。且硬磁层的不可逆反转场较之硬磁层单独存在时要小的多。

关　键　词: 反磁化机制; 微磁学; 交换耦合
中图分类号: 0482　　**文献标识码**: A

交换耦合弹性磁体由于具备垂直交换耦合、磁电阻、磁致伸缩、磁能积、交换偏置等诸多效应,越来越成为一种引人注目的新兴磁性材料。其磁化反转过程对于技术应用以及了解自旋传输具有极其重要的意义[1-8]。

由于交换耦合弹性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[9-18]。交换耦合弹性多层膜由通过界面耦合的硬磁相与软磁相依次叠加而成,我们已经详细地研究了当外场平行于硬磁层易轴时交换耦合 Sm - Co/α - Fe 多层膜体系的磁特性与反磁化过程[17-18]。当外场大于层间交换耦合场 Hex 时,在软磁层内会形成一螺旋状的磁结构: 越接近于界面处其的自旋由于受到硬磁层的钉扎,将更加接近于外场方向,离界面越远,其自旋方向与外场方向间的夹角越大,结果形成一类似于布洛赫畴壁的空间自旋结构。这样的过程是可逆的,当撤掉外场后,软磁层的自旋又会重新平行于硬磁层的易轴方向。然而,硬磁层是通过形核的畴壁移动来实现其反磁化过程; 且硬磁层的反转场远大于软磁层的反转场。

基于此,本文研究了在面内旋转场作用下,α - Fe/Sm - Co 双层膜体系的反磁化过程。

1　模型和方法

图 1 是 FCB 的结构示意图,ns 与 nh 分别是软、硬磁层厚度,L,W 分别表示体系的长与宽。

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_k 是磁晶各向异性能,E_H 是外磁场能,E_{demg} 是退磁能。其中 E_{ex} 由软硬磁层间交换能、软磁层内交换能与硬磁层内交换能 3 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

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

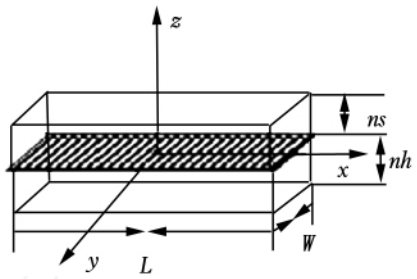


图 1　交换耦合硬/软磁双层膜体系的模型

收稿日期: 2009 - 10 - 10
基金项目: 江西省教育厅科研项目(GJJ09504); 江西省井冈之星资助项目(2008DQ00400); 华东交通大学校内基金资助项目(01307142)

作者简介: 伍清萍(1978 -),女,硕士,讲师,研究方向为波导光学。

超星·期刊

其中: M 是磁化强度矢量,ω 是旋磁比,α 是阻尼系数,有效场 H_{eff} 定义为自由能的变分,$H_{eff} = -\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial E_t}{\partial M}$ 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(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)。

2　模拟结果及讨论

对于体系长宽均为 500 nm 的 α – Fe(20 nm) / Sm – Co(20 nm) 双层膜体系,其体系参数为: 其硬磁层交换耦合常数、各向异性常数与饱和磁化强度分别是 $A_{\text{hs}} = 1.2 \times 10^{-11}$ J/m,$K_{\text{h}} = 5 \times 10^6$ J/m^3,$M_{\text{h}} = 0.55 \times 10^6$ A/m; 软磁层交换耦合常数、各向异性常数与饱和磁化强度分别是 $A_{\text{s}} = 2.8 \times 10^{-11}$ J/m、$K_{\text{s}} = 10^2$ J/m^3,$M_{\text{s}} = 1.7 \times 10^6$ A/m; 层间交换耦合系数(A_{hs}) 取 1.8×10^{-11} J/m。每一剖分单元的长、宽和高分别为 50 nm,50 nm 与 0.2 nm; 硬磁相与软磁相的起始磁化方向均沿 x 轴(硬磁相的易轴方向)。

当面内旋转场较小时($\approx$0.1 T),随外场逐渐由 0°旋转至 $\psi = 360°$(ψ 为外场与 x 轴的夹角) 的过程中,由于外场太小(小于软磁层可逆反转场) 结果导致当外场旋转时,体系磁矩被钉扎在易轴方向,其角坐标只能在 $\theta = 0°$ 处振荡(其中 θ 磁化方向与 x 轴间的夹角) [图 2(a)]。

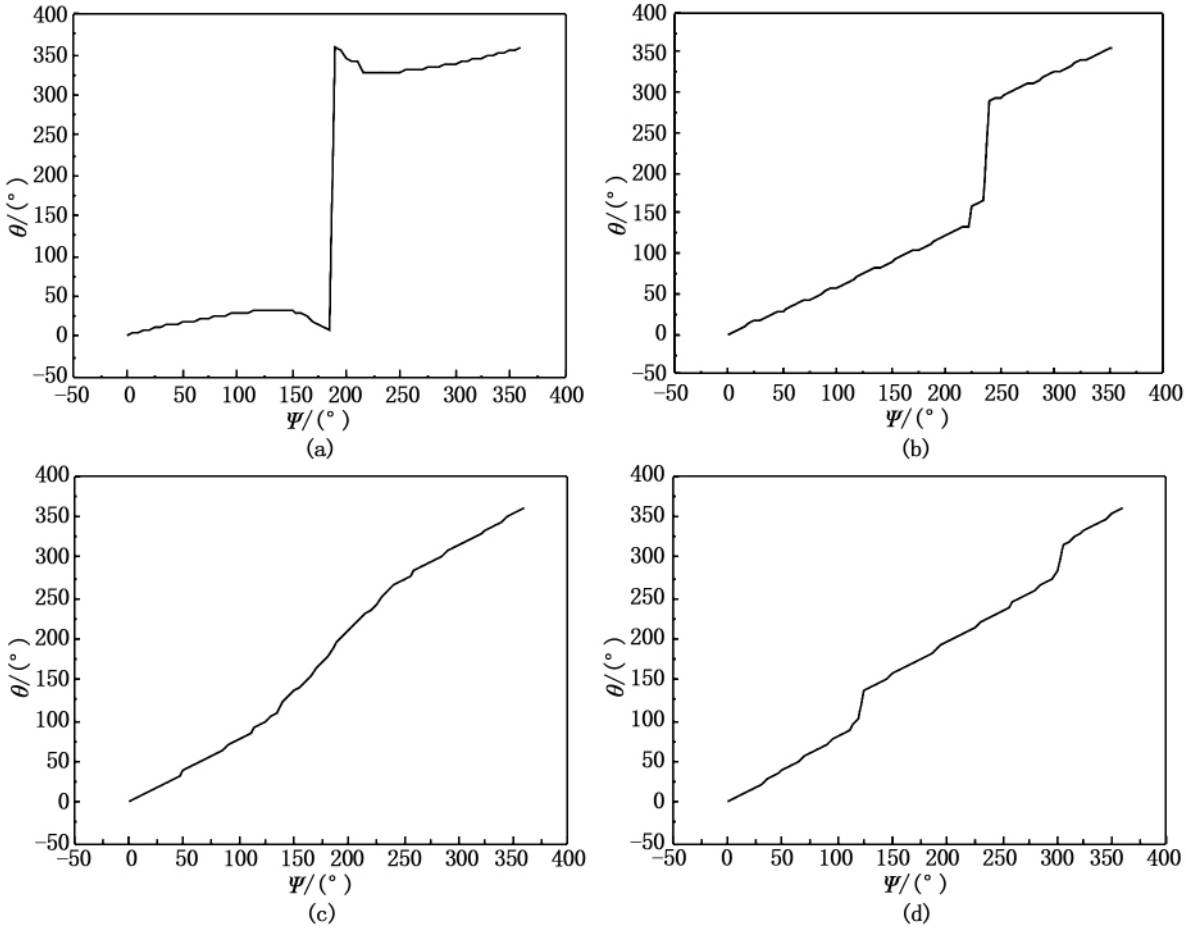


图 2　交换耦合硬/软磁双层膜总有效磁化角(θ) 与外场旋转角(ψ) 的关系图,(a) $H = 0.1$ T,(b) $H = 0.5$ T,(c) $H = 3$ T,(d) $H = 5$ T

当 $H = 0.5$ T 时,随旋转场磁矩角坐标增大,Sm – Co 层的磁矩角坐标仍然处于 $\theta = 0°$,仅仅在体系耦

超星·期刊

合区磁矩角坐标在 $\theta = 0°$ 附近处有所振荡; 然而 α – Fe 层的磁矩角坐标逐渐增加,且随离 Sm – Co 层的距离增大,α – Fe 层的磁矩角坐标会逐渐增大,结果形成一类似布洛赫畴壁的空间自旋结构。图 2(b) 显示了体系总有效磁矩角坐标与外场角坐标之间的关系,由图可知随 ψ 增加,θ 逐渐增加,但当 ψ 大约等于 235°(≈270°) 时(也即硬磁层的易轴) ,θ 会出现突变现象,这可归于体系能量的改变; 由于起始磁矩方向全部沿 x 轴,此时体系处于能量最小,但随着 H 逐渐改变,磁矩被拖离 $\theta = 0°$ 方向,结果导致体系交换耦合能以及各向异性能增加; 但由于此时旋转场太大,迫使体系磁矩只能以一种连续但滞后的方式随外场旋转; 然而由于滞后效应,当 ψ 大约等于 235°(接近 270°) 时,θ 会发生突变(超过 90° 转到 180°附近) ; 这时 ψ 若继续增加,则软磁层的磁矩会迅速地转至 270°附近。

如果外场大小进一步增大到 $H = 3$ T,则体系总有效磁矩角坐标仍然随外场角坐标的增大而增大,但此时有效磁矩角坐标并没有明显的突变 [图 2(c)]; 这主要是由于各向异性势垒的存在。尽管,随 ψ 增大,磁化方向会被迫偏离 $\theta = 0°$ 方向,结果使得交换能以及各向异性能增加; 但当 ψ 偏离 90°接近 140°时,此时各向异性能开始减小,当 $\psi = 180°$ 时,此时各向异性能降至最小,塞曼能与交换能达到最大值; 结果导致图 2(c) 的结果。

最后当 $H = 5$ T 时,开始随外场的旋转,软磁层内会形成一空间自旋结构,硬磁层没有明显的偏转; 然而当 $\psi = 120°$ 以及 $\psi = 300°$ 时,在硬磁层内部磁矩会发生 180°突变。但这时外场大小远小于 Sm – Co 相的不可逆反转场,最终导致图 2(d) 的结果。

3 结论

由于交换弹性耦合磁体对于自旋电子器件的发展有极其重要的影响,因此本文以微磁学理论为基础研究了 FCB 的旋转特性。结果显示,在不同的旋转场作用下,由于能量竞争,使得体系具有非常丰富的磁结构,这使得体系具有不同的反转形式; 而且,模拟结果显示体系硬磁层的不可逆反转场远远低于硬磁相单独存在时的不可逆反转场。这将有助于人们研究其它的自旋电子学课题(如磁电阻、磁传感器以及随机存取存储器等) 。

参考文献:

[1] KNELLER E F,HAWIG R. The exchange – spring magnet: a new material principle for permanent magnets [J] . IEEE Transactions on Magnetics,1991,27(4) : 3 588 – 3 600.

[2] SKOMSKI R,COEY J M D. Giant energy product in nano – structured two – phase magnets [J] . Physical Review B,1993,48(21) : 15 812 – 15 816.

[3] FULLERTON E E,JIANG J S,GRIMSDITCH M,et al. Exchange – spring behavior in epitaxial hard/soft magnetic bilayers [J] . Physical Review B,1998,58(18) : 12 193 – 12 200.

[4] 蒋洪川,张万里,张金平,等. TbFe/Fe 交换耦合磁致伸缩多层膜的制备 [J] . 功能材料,2005,36(2) : 193 – 195.

[5] JIANG J S,BADER S D,KAPER H,et al. Rotational hysteresis of exchange – spring magnets [J] . Journal of Physics D: Applied Physics,2002,35(19) : 2 339 – 2 343.

[6] VAMSI M,CHAKKA Z S. SHANA,et al. Effect of coupling strength on magnetic properties of exchange spring magnets [J] . Journal of Applied Physics,2003,94(10) : 6 673 – 6 677.

[7] DUC N H,HUONG GIANG D T,CHAU N. Novel exchang – spring configuration for excellent magnetic and magnetos——tricitive softness [J] . Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2005,290/291(2) : 800 – 803.

[8] ZIESE M,HøHNE R,BOLLERO A,et al. Size and shape dependence of the exchange – bias field in exchange – coupled ferrimagnetic bilayers [J] . The European Physical Journal B,2005,45(2) : 223 – 230.

[9] SHIDO M,ISHIZONE M,KATO H,et al. Exchange – spring behavior in sputter – deposited α – Fe/Nd – Fe – B multi – layer magnets [J] . Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1996,161(8) : 11 – 15.

[10] SHINDO M,ISHIZONE M,SAKUMA A,et al. Magnetic properties of exchanged – coupled a – Fe/Nd – Fe – B multilayer thin – film magnets [J] . Journal of Applied Physics,1997,81(8) : 4 444 – 4 446.

超星·期刊

[11] FULLERTON E E,JIANG J S,SOWERS C H,et al. Structure and magnetic properties of exchange – spring Sm – Co/Co superlatices [J]. Applied Physics Letters,1998,72(3):380 – 382.

[12] YANG C J,KIM S W. Exchange coupling in Nd2Fe14B/Fe/Nd2Fe14B sandwich films and their magnetic properties [J]. Journal of Applied Physics,2000,87(9):6 134 – 6 136.

[13] MIBU K,NAGAHAMA T,SHINJO T. Reversible magnetization process and magnetoresistance of soft – magnetic(NiFe) /hard – magnetic(CoSm) bilayers [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1996,163(1 – 2):75 – 79.

[14] MONTAIGNE F,MANGIN S,HENRY Y. Transition of magnetic configuration at the interface of exchange – coupled bilayers: TbFe/GdFe as a modal system [J]. Physical Review B,2003,67(14):1 – 13.

[15] LEINEWEBER T,KRONMüLLER H. Micromagnetic examination of exchange coupled ferromagnetic nanolayers [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1997,176(2 – 3):145 – 154.

[16] AMATO M,RETTORI A,PINI M G. Exchange – spring behavior of hard/soft magnetic multilayers: optimization study of the nanostructure [J]. Physics B,2000,275(1 – 3):120 – 123.

[17] 刘正方,伍清萍. 硬/软磁双层膜体系反磁化机制的微磁学研究 [J]. 华东交通大学学报,2006,23(5):149 – 152.

[18] 刘正方,伍清萍. 不同结构 Sm – Co/α – Fe 多层膜体系磁性能的研究 [J]. 金属功能材料,2007,14(4):6 – 10.

Reversal Property of Exchange – coupled Sm – Co/α – Fe Bilayer in Rotation Field

Wu Qingping

(School of Basic Sciences,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China)

Abstract: Based on the micromagnetic theory,this paper studies the rotational property of the exchange – coupled hard /soft magnetic bilayer by using three – dimension dynamic model. The results show that the magnetization configuration of the exchange – coupled bilayer has various forms,and the different reversal mechanism corresponds to the different magnetic structure. The field of the irreversible hard magnetic layer is much smaller than that of independent hard magnetic layer.

Key words: reversal mechanism; micromagnetic; exchange – coupled

(责任编辑　王建华)