

CoCrPt 垂直磁记录介质磁化翻转特征的微磁学模拟

李 鹏, 吴保磊, 程晓敏, 杨晓非

(华中科技大学 电子科学与技术系, 武汉 430074)

摘 要: 采用微磁有限元方法对连续型和隔离型 CoCrPt 垂直磁化膜的磁化翻转过程和矫顽力进行研究。通过模拟两种介质磁化翻转过程发现, 连续型介质中为一致磁化翻转; 而隔离型介质为非一致翻转, 即在其磁畴发生完全翻转前, 介质中出现一种有助于减小退磁场的垂直膜面向上和向下的磁畴交替分布的状态。进一步对相互交换能、磁晶各向异性、塞曼能和退磁场能等微磁学能量进行分析后发现, 退磁场是决定薄膜矫顽力的主要因素。隔离型薄膜具有比连续型薄膜更小的退磁场, 其具有更大的矫顽力, 在高密度垂直记录中具有很大的优势。

关键词: 隔离型薄膜; 连续型薄膜; 微磁学; 矫顽力

中图分类号: O 484143

文献标识码: A

Micromagnetic simulation of magnetization reversal in CoCrPt perpendicular media

LI Peng, WU Bao-lei, CHENG Xiao-min, YANG Xiao-fei

(Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The magnetization reversal processes and coercivities of the continuous and granular-type films were studied with fine element micromagnetic method. By simulating the magnetization reversal processes of two kinds of media, the magnetizations in continuous film and granular-type medium are coherent and incoherent, respectively, because the magnetization in film alternate up and down before the domains reversals. Further analysis of the exchange energies, magnetocrystalline anisotropy energies, Zeeman energies and demagnetizing energies show that the demagnetizing field is the main factor to decide the coercivity in medium. The granular-type film has a smaller demagnetizing field than the continuous film, thus it shows larger switching field and has great potential in high density perpendicular magnetic recording technology.

Key words: granular-type film; continuous film; micromagnetics; coercivity

垂直磁记录技术最早由 19 世纪的丹麦科学家 VALDEMAR 提出, 到了 1976 年垂直记录之父——日本科学家 IWASAKI^[1]系统地阐述了垂直记录技术的理论(垂直磁记录的记录介质是影响记录密度很重要的因素), 并首先使用射频溅射法制得了 Co-Cr 垂直磁化膜。后来, SONOBE 等^[2]和 HONDA 等^[3]采用 NiFe 层作为底层促进 Co-Cr 在生长初期就具有良好的磁各向异

性取向和细小而均匀的晶粒。自 1982 年, LEE 等^[4]对非晶 SmCo 垂直磁化膜进行了开创性研究, 发现这种介质具有较高的饱和磁化强度、矫顽力和矩形比, 因而可作为垂直磁记录介质。SONOBE 等^[5]和 THAM 等^[6]提出了 CGC 结构的介质, 该介质由一层交换耦合的连续层和一层颗粒层组成, 故具有颗粒层的高分辨率和连续层的高热稳定性问题等特点。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60571010); 湖北省自然科学基金资助项目(2007ABD001)

收稿日期: 2007-12-02; 修订日期: 2008-04-28

通讯作者: 杨晓非, 教授, 博士; 电话: 027-87542893; E-mail: yangxiaofei@mail.hust.edu.cn

最近几年, 科学家们对CoCrPt垂直磁化介质进行了微结构和磁性的研究^[7-9]。与传统的连续型CoCrPt薄膜相比, 在隔离型薄膜中, 氧化层将膜中各晶粒隔开。这种隔离型CoCrPt薄膜由于具有很好的磁各向异性, 可以将记录密度提高到 $7.75 \times 10^5 \text{ Gb/m}^2$ ^[10-12]。然而, 至今还没有人从理论上系统地研究该类型CoCrPt薄膜的磁化特征及成因。

本文作者采用微磁有限元方法对连续型和隔离型CoCrPt薄膜的磁化翻转过程、矫顽力及微磁学能量进行了模拟计算, 对影响矫顽力的因素进行了讨论。

1 微磁学数值计算方法

近年来, 微磁理论越来越成为研究磁性材料非常重要也是必要的技术^[13-16]。微磁学理论最早由BROWN^[17]提出, 他以连续变化的磁化强度描述磁畴磁矩的变化, 而不是逐一考虑单个原子的磁矩。在微磁学中体系吉布斯自由能 G_L 可表示为

$$G_L = \int_{\Omega} (\omega_{\text{exch}} + \omega_{\text{ani}} + \omega_{\text{ext}} + \omega_{\text{demag}}) dv = \int_{\Omega} \{A[(\nabla u_x)^2 + (\nabla u_y)^2 + (\nabla u_z)^2] + K_1(1 - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{u})^2) - J \cdot H_{\text{ext}} - \frac{1}{2} J \cdot H_{\text{demag}}\} dv \quad (1)$$

式中 $J(x, t) = J_s(x) \cdot u(x, t)$, $|u| = 1$ 给出了磁极化与空间和时间的关系。 A 为交换作用常数; K_1 为第一磁晶各向异性常数; \mathbf{a} 为易磁化轴上的单位矢量; H_{ext} 表示外场; H_{demag} 为退磁场。

对方程(1)求最小化可以得到稳定的磁化分布状态, 因此需要一种方法来寻找能量的最小值。

在微磁学动态磁化过程可以Landau-Lifschitz-Gilbert(LLG)方程来表示^[18]:

$$\frac{\partial J}{\partial t} = -|\gamma| J \times H_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{J_s} J \times \frac{\partial J}{\partial t} \quad (2)$$

式中 γ 为旋磁比常数; H_{eff} 为由交换耦合作用、各向异性作用、静磁相互作用、和外磁场共同决定的有效场; M 为磁化强度。需要指出的是交换耦合作用、各向异性作用、退磁作用和外磁场等仅仅会对于近邻颗粒的磁化状态起到影响。另外, 由于退磁作用是一种长程作用力, 因此计算该作用对应的退磁能将消耗大量的CPU时间和内存。为了解决这个问题, 科学家们提出了各种办法, 如快速傅里叶变换(FFT)^[19]、快速多

极法^[20]等。本文作者采用混合有限元/边界元法^[21]来计算退磁场作用。

在混合有限元/边界元法中, 磁标势被分成两部分 $U = U_1 + U_2$ 。 U_1 可分为磁体内分量 $U_{1, \text{in}}$ 和磁体外分量 $U_{1, \text{out}}$ 。 $U_{1, \text{in}}$ 满足泊松方程:

$$\Delta U_{1, \text{in}} = \nabla \cdot M \quad (3)$$

而在磁体外为零 $U_{1, \text{out}} = 0$, 根据磁体表面的Neumann边界条件可求得 U_1 在表面上磁标势 $U_{1, \text{surface}}$ (磁体表面垂直方向矢量为 \mathbf{n}), 由 $U_{1, \text{in}} = U_{1, \text{surface}}$ 可得

$$\frac{\partial U_{1, \text{in}}}{\partial \mathbf{n}} = -M \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

而 U_2 在磁体内的分量 $U_{2, \text{in}}$ 和磁体外的分量 $U_{2, \text{out}}$ 都必须满足拉普拉斯方程:

$$\Delta U_{2, \text{in}} = 0, \Delta U_{2, \text{out}} = 0 \quad (5)$$

由边界条件得到 $\frac{\partial U_{2, \text{in}}}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial U_{2, \text{out}}}{\partial \mathbf{n}}$, 由磁势的连续性可得

$$U_{2, \text{out}} - U_{2, \text{in}} = U_{1, \text{in}} \quad (6)$$

由式(3)和(4)可计算出 $U_{1, \text{in}}$ 。根据边界元方法进行边界积分, 可由 $U_{1, \text{in}}$ 计算 $U_{2, \text{in}}$:

$$U_{2, \text{in}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4} \int \frac{U_{1, \text{in}}(\mathbf{r}')(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{(\mathbf{r} - \mathbf{r}')} d\mathbf{n} \quad (7)$$

式中 \mathbf{r} 和 \mathbf{r}' 是相邻晶粒中的位置矢量。为节省存储空间只计算磁体表面的 U_2 。解出的 U 值作为拉普拉斯方程(5)的边界条件, 这样就可求得 U_2 。

2 物理模型及模拟参数

本研究模拟所采用的参数来源于RETTNER^[22]所做的实验。RETTNER通过实验方法制备得到了连续型的CoCrPt垂直磁化膜。该CoCrPt的磁晶各向异性常数为 $K_u = 300 \text{ kJ/m}^3$, 交换常数为 $A = 10 \text{ pJ/m}$, 磁极化强度为 $J_s = 0.5 T$ 。模拟中所用的CoCrPt模型如图1所示。在两种结构的模型中各有64个晶粒, 单个晶粒的直径为10 nm, 薄膜的厚度为21 nm。对于隔离型薄膜, 颗粒与颗粒间隔层的厚度为1 nm。为了便于分析, 取 x 轴和 y 轴相互垂直且在薄膜平面以内, z 轴则在垂直于

膜面的方向。

磁场达到矫顽力值的时候，薄膜中的磁畴方向会转向

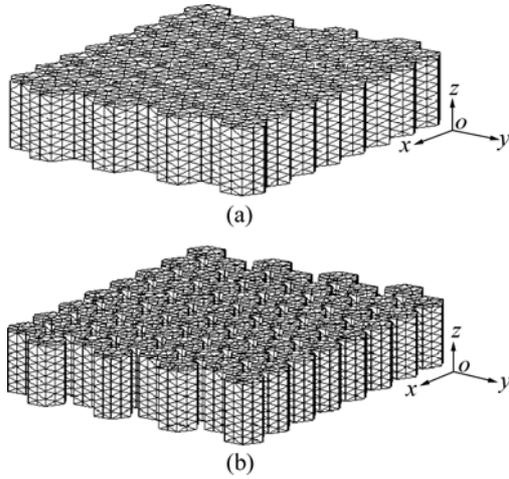


图 1 连续型薄膜(a)和隔离型薄膜(b)模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of continuous(a) and granular-type(b) models

3 结果与讨论

3.1 磁化翻转过程

首先模拟了CoCrPt连续型和隔离型薄膜的磁化翻转过程和退磁曲线。图 2 所示为CoCrPt不同外场下连续型和隔离型薄膜的磁化状态。由图 2 可看出，在连续型薄膜中，磁化翻转是从边界逐渐过渡到中间区域的；在隔离型薄膜中磁化翻转发生了类似的情况，但在磁畴要完全翻转之前($H_{ext}=-848$ kA/m)，薄膜中出现了垂直于膜面向上和向下的磁畴交替分布的状态(见图 2(c)和(d))。这种方向不同的磁畴相互交替分布的状态有助于减小垂直于膜面方向的退磁场，从而使薄膜在一定外磁场作用下能量最低。

3.2 磁化翻转过程

图 3 所示为连续型和隔离型薄膜的退磁曲线。 M_z 为磁化强度垂直于薄膜方向的分量； M_s 为饱和磁化强度。由图 3 可看出，连续型薄膜的磁化翻转场小于隔离型薄膜的翻转场。为了分析该现象的内在机理，本研究计算了两种结构的薄膜的能量随外场的变化情况(见图 4)。

图 4(a)所示为塞曼能随外场的变化曲线。塞曼能可以采用以下的表达式计算：

$$E_Z = -\mu_0 \int_V H_{ext} \cdot M(r) d^3r \quad (8)$$

由式(8)可知，当外磁场从 1 200 kA/m 开始减小时，薄膜的磁化强度 M 降低，因此塞曼能增加。当外

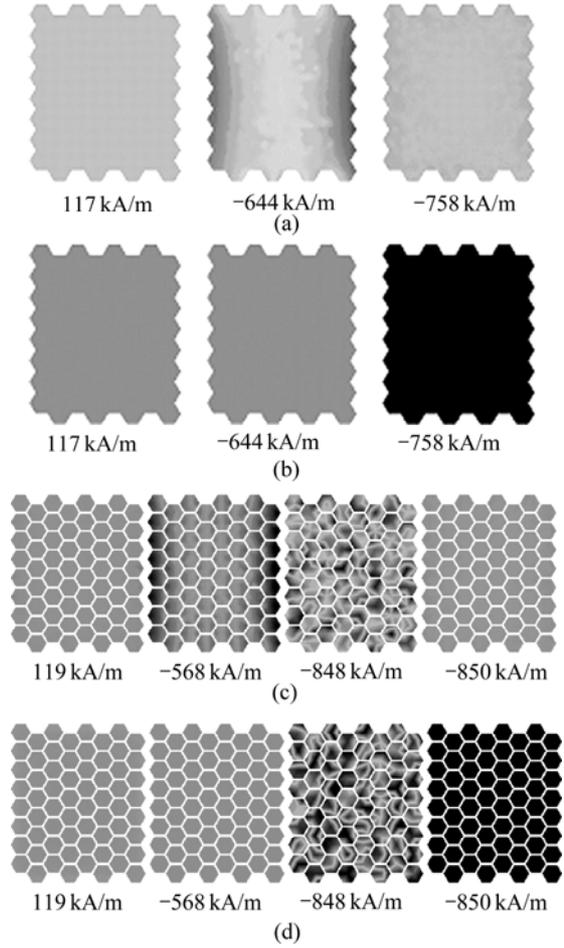


图 2 不同外场下连续型和隔离型薄膜的磁化状态
Fig.2 Magnetization of continuous ((a) and (b)) and granular-type films ((c) and (d)) at different external fields: (a), (c) Bright: magnetization component along direction perpendicular to x -axis; Dark: magnetization component along x -axis; (b), (d) Bright: magnetization along z -axis direction; Dark: magnetization along negative z -axis direction.

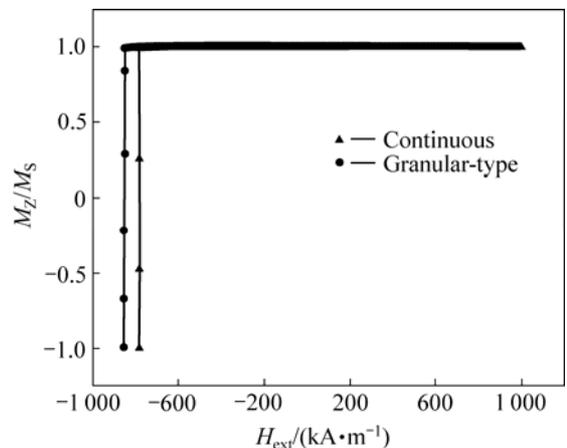


图 3 连续型薄膜和隔离型薄膜的退磁曲线
Fig.3 Calculated demagnetization curves of continuous and granular-type films

granular-type film

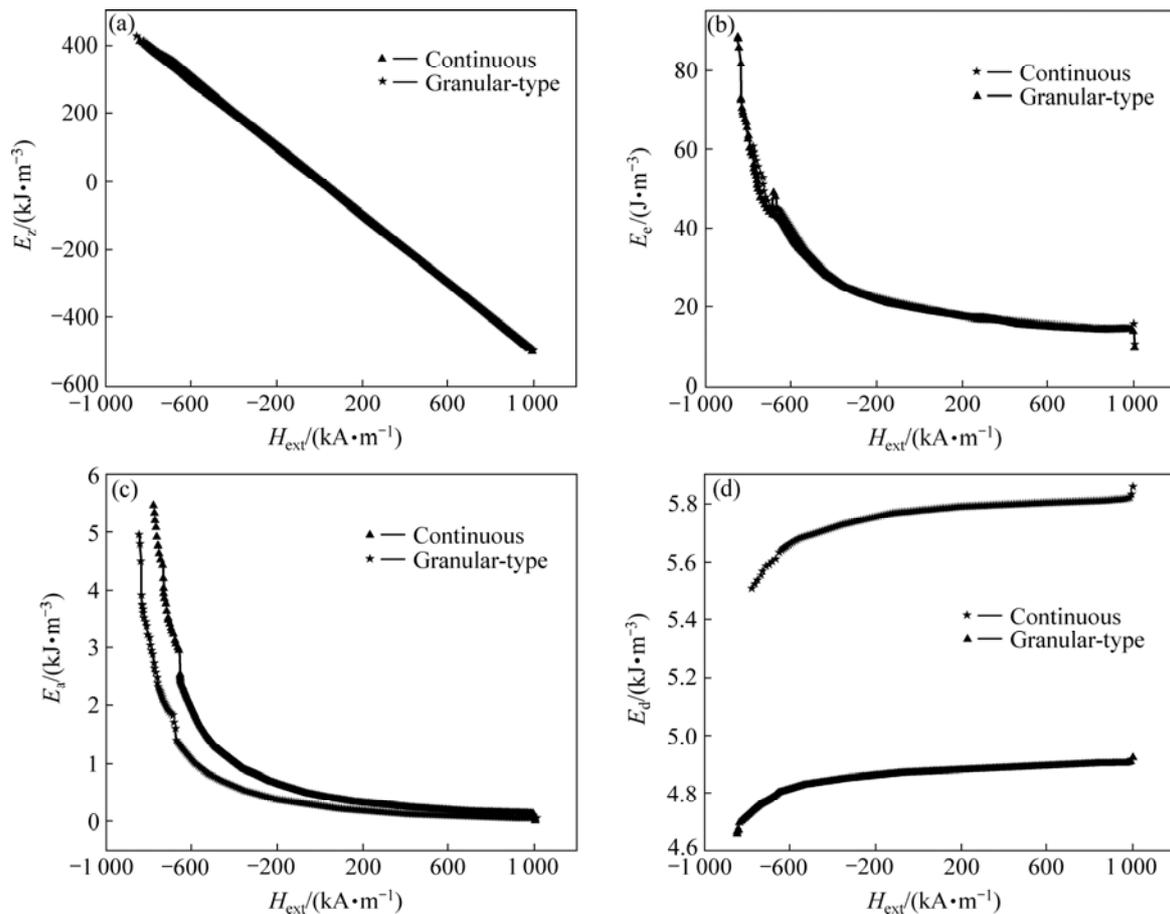


图4 连续型薄膜和隔离型薄膜的微磁能量随外场的变化

Fig.4 Changes of micromagnetics energies of continuous and granular-type films with external field: (a) Zeeman energies(E_Z); (b) Exchange energies(E_e); (c) Anisotropy energies(E_a); (d) Demagnetizing energies(E_d)

外场的方向,因此,塞曼能 E_Z 达到峰值。从图4(a)中可以看到,两种薄膜的塞曼能曲线几乎是重合的。

交换能起源于磁体中相邻原子之间的特殊交换相互作用。磁体中电子之间存在着交换场,因此只有当外场的强度能够与该交换场强度处于同样的级别时,交换能才能达到最大值。在系统矫顽力处,交换能达到极值。同时也可以看到,连续型和隔离型薄膜的交换能曲线有较大重合(见图4(b))。

图4(c)所示为连续型薄膜和隔离型薄膜的各向异性性能曲线。在微磁学模型中,各向异性能够表示为:

$$\omega_a = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta \quad (9)$$

式中 ω_a 为各向异性性能密度; K_1 和 K_2 为各向异性常数; θ 为磁化方向和易磁化轴方向的夹角。根据式(9),在外磁场为 1000 kA/m 处,薄膜中大部分磁化方向都平行于易磁化轴,因此 θ 很小,这就使得 ω_a 值也非常小;但当外磁场减小时,磁化方向偏离易磁化轴方向(θ 增大), ω_a 增加;当外磁场到达薄膜矫顽力的值时, ω_a 达到其最大值,此时薄膜的磁化方向垂直于易磁化轴方

向。从图4(c)可看出,在外磁场小于 300 kA/m 的范围内,隔离型薄膜的各向异性性能小于连续型薄膜对应的值。

在微磁学中退磁场能可以通过以下表达式计算:

$$E_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \int_V \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_d d^3 r \quad (10)$$

式中 μ 为真空中的磁导率; H_d 为退磁场。退磁场起源于磁体表面的磁极子间的相互作用,它与外磁场方向相反,故能起到减小磁化强度的作用,因此,在矫顽力对应的外磁场处,由于磁体中的大部分磁畴都在发生翻转, H_d 会达到最大值,从而使得退磁能最小。

由于颗粒间被氧化物等非磁性物质分开,隔离型薄膜比连续型薄膜具有更小的颗粒间相互交换耦合作用,因此它具有比连续型薄膜更小的退磁场。从图4(d)可看出,在磁化翻转过程中,连续型薄膜和隔离型薄膜的退磁能平均值相差 $8.936 \text{ kJ}/\text{m}^3$,这个值比两种薄膜各向异性性能的差值(不大于 $2.5 \text{ kJ}/\text{m}^3$)大得多,而两种薄膜的交换能的差异和塞曼能的差异都很小,因此,

可以判断出退磁场是决定薄膜矫顽力的主要的因素。退磁场能越小, 薄膜的矫顽力就越大, 这也就是隔离型薄膜具有比连续型薄膜更大的矫顽力的主要原因。

4 结论

1) 连续型和隔离型 CoCrPt 薄膜中的磁化翻转都是由边界区域过渡到中间区域的, 但对于隔离型薄膜, 在其磁畴发生完全翻转之前, 薄膜中出现了垂直于膜面向上和向下的磁畴交替分布有助于减小退磁场的状态。

2) 对两种不同结构的薄膜退磁曲线的计算表明, 连续型薄膜的磁化翻转场小于隔离型薄膜的翻转场。

3) 对微磁学能量的分析表明, 退磁场是决定薄膜矫顽力的主要因素, 隔离型薄膜具有比连续型薄膜更小的退磁场, 因此其具有更大的矫顽力。

REFERENCES

- [1] IWASAKI S. Perpendicular magnetic recording[J]. IEEE Trans Magn, 1980, 16(1): 71-76.
- [2] SONOBE Y, IKEDA Y, TAGASHIRA Y. Composite perpendicular recording medium consisting of CoCrPt with large H_k and CoCr with positive inter-particle interaction[J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(5): 2769-2771.
- [3] HONDA Y, KIKUKAWA A, HIRAYAMA Y, FUTAMOTO M. Effect of soft magnetic underlay on magnetization microstructure of perpendicular thin film media[J]. IEEE Trans Magn, 2000, 36(5): 2399-2401.
- [4] LEE Z Y, DAI D W, SHEN N F, HU Y S, BAO Y Y. Preparation and properties of Sm-Co magnetic thin films co-evaporated with two heating sources[J]. IEEE Trans Magn, 1987, 23(5): 2599-2601.
- [5] SONOBE Y, THAM K K, WU L, UMEZAWA T, TAKASU C, DUMAYA J A H, ONOUE T, LEO P, LIAU M. CGC perpendicular recording media with CoCrPt-SiO₂ alloy as granular layer[J]. IEEE Trans Magn, 2006, 42(10): 2351-2353.
- [6] THAM K K, SONOBE Y, WAGO K. Magnetic and read-write properties of coupled granular/continuous perpendicular recording media and magnetization reversal process[J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(2): 671-675.
- [7] CHENG X M, LI Z Y, YANG X F, LI Q, LI Z, JIN F, LIN G Q. Post-annealing effects on magnetic properties and microstructure of CoCrPtN/Ti/C perpendicular recording media[J]. J Magn Magn Mater, 2006, 303(2): e137-e140.
- [8] PIRAMANAYAGAM S N, SHI J Z, ZHAO H B, MAH C S, ZHANG J. Stacked CoCrPt:SiO₂ layers for perpendicular recording media[J]. IEEE Trans Magn, 2005, 41(10): 3190-3192.
- [9] 胡用时, 游 龙, 万 仞, 李佐宜. CoCrPt/CrTi 玻璃盘基硬盘记录介质的制备与性能[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2005, 33(1): 47-49.
- [10] HU Yong-shi, YOU Long, WAN Ren, LI Zuo-yi. Preparation of CoCrPt/CrTi hard disk recording media and its properties by using glass substrate[J]. J Huazhong Univ of Sci and Tech: Nature Science Edition, 2005, 33(1): 47-49.
- [11] LIU F, STOEVE K, LUO P, LIU Y, CHEN Y, CHEN J, WANG J, GU S F, KUNG K T, LEDERMAN M, KROUNBI M, RE M, OTSUKI A, HONG S. Perpendicular recording heads for extremely high-density recording[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39(4): 1942-1948.
- [12] UWAZUMI H, ENOMOTO K, SAKAI Y, TAKENOIRI S, OIKAWA T, WATANABE S. CoPtCr-SiO₂/sub 2/granular media for high-density perpendicular recording[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39(7): 1914-1918.
- [13] KEITOKU T, ARIAKE J, HONDA N. Preparation condition of Co-Pt-Cr-SiO₂ films with high coercivity[J]. J Magn Magn Mater, 2005, 287: 172-175.
- [14] 张腊梅, 郭光华, 刘正方. 磁性纳米线反磁化机制的微磁学模拟[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 787-792.
- [15] ZHANG La-mei, GUO Guang-hua, LIU Zheng-fang. Micromagnetic simulation of magnetization reversal mechanism in magnetic nanowires[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 787-792.
- [16] 张腊梅, 郭光华, 韩念梅. 磁性镍纳米线矫顽力随角度变化规律的微磁学模拟[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1400-1404.
- [17] ZHANG La-mei, GUO Guang-hua, HAN Nian-mei. Micromagnetic simulation of angular dependence of coercivity of magnetic nanowires[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1400-1404.
- [18] ZHU J G, TANG Y. Micromagnetics of percolated perpendicular media[J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(2): 687-692.
- [19] SINGH N, GOOLAUP S, TAN W, ADEYEYE A O, BALASUBRAMANIAM N. Micromagnetics of derivative ring-shaped nanomagnetics[J]. Phys Rev B, 2007, 75(10): 104407-104412.
- [20] BROWN W F. Micromagnetics[M]. New York: Wiley, 1963: 47-59.
- [21] GILBERT T L. A Lagrangian formulation of gyromagnetic equation of the magnetization field[J]. Phys Rev Lett, 1955, 100: 1243-1246.
- [22] ZHU J G, BERTRAM H N. Magnetization reversal in CoCr perpendicular thin films[J]. J Appl Phys, 1989, 66(3): 1291-1307.
- [23] SEBERINO C, BERTRAM N H. Concise, efficient three-dimensional fast multipole method for micromagnetics[J]. IEEE Trans Magn, 2001, 37(3): 1078-1086.
- [24] FREDKIN D R, KOEHLER T R. Hybrid method for computing demagnetizing fields[J]. IEEE Trans Magn, 1990, 26(2): 415-417.
- [25] RETTNER C T, BEST M E, TERRIS B D. Patterning of granular magnetic media with a focused ion beam to produce single-domain islands at > 140 Gbit/in² [J]. IEEE Trans Magn, 2001, 37(4): 1649-1651.

(编辑 李艳红)