文章编号: 1004-0609(2008)12-2185-05

晶粒尺寸对于 Co 基介质过渡区噪声影响的微磁学分析

李 鹏, 鄢俊兵, 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:采用微磁学方法分析晶粒尺寸对 Co 基垂直磁记录介质 CoCrPt、TbFeCo 和 SmTbCo 的磁化特征和过渡 区噪声性能的影响。结果表明,随着晶粒尺寸的增加,3 种 Co 基介质的矫顽力和矫顽力矩形比均下降,过渡区 噪声(过渡区位置偏移 σ_j)随晶粒尺寸的增加而线性增大。在以上 3 种材料中,TbFeCo 介质具有最大的矫顽力、矫 顽力矩形比和最小的噪声。因此,考虑到晶粒尺寸对介质矫顽力,矫顽力矩形比和过渡区噪声的综合影响,应该 将介质的晶粒尺寸控制在较小的值。

关键词: Co 基稀土介质; 晶粒尺寸; 过渡区噪声; 微磁学 中图分类号: O 484.143 文献标识码: A

Micromagnetic analysis of effect of grain size on transition noise in Co-based perpendicular recording medium

LI Peng, YAN Jun-bing, CHENG Xiao-min, YANG Xiao-fei

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

Abstract: The effect of grain size on the transition noise performance of Co-based rare earth perpendicular recording medium including CoCrPt, TbFeCo and SmTbCo was investigated with micromagnetic simulation. The numerical results show that the large grain size reduces the coercivity and the coercive loop squareness while increases the position jitter. The numerical results also show that TbFeCo has the highest coercivity, coercive loop squareness and lowest transition noise parameters among the studied materials. The results indicate that it is necessary to keep the grain size at a relatively small value considering the synthesized effects of the grain size on the coercivity, coercive loop squareness and the transition noise of the film.

Key words: Co-based rare earth medium; grain size; transition noise; micromagnetics

垂直磁记录技术最初是由日本东北大学的岩崎俊 一(IWASAKI)教授于 1975 年提出的,他首先使用射频 溅射方法制得了 Co-Cr 垂直磁化膜^[1]。垂直磁记录是 一项具有发展潜力的高密度记录技术,随着记录密度 的不断提高,噪声问题越来越引起人们的关注。在目 前常用的垂直磁记录系统中,最主要的噪声来源于介 质,而介质噪声又可分为两类:一类是过渡区噪声, 另外一类是静态直流噪声^[2]。过渡区噪声来源于过渡 区磁化状态的不规则分布,它比静态直流噪声大得多。 在过去的几十年里,人们对于磁记录介质的过渡区噪 声作了大量的研究^[3-6]。但是,至今还没有关于晶粒尺 寸对垂直磁记录中的介质过渡区噪声性能影响的研究 的报道,同时也没有人对常见的垂直磁记录介质的过 渡区噪声作详细比较。

本文作者采用微磁学方法,讨论晶粒尺寸对于 3 种介质过渡区噪声的影响,研究比较 3 种 Co 基稀土

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重大资助项目(2007ABD001)

收稿日期: 2008-01-16; 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

材料-CoCrPt、TbFeCo、SmTbCo 垂直磁记录介质的过渡区噪声性能。

1 微磁学数值计算方法

1.1 微磁学理论

微磁学理论最早由 BROWN^[7]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。BROWN 将该理论命名为"微 磁学"以区别于经典的磁畴理论。磁体中磁矩的分 布图像在磁畴理论中是预先假设的,而在微磁学中 是计算的结果。由于微磁学模拟能揭示磁性材料内 部的磁矩分布和磁畴的演化情况,比如它的形成、 传播、收缩和移动等,从而反映出成核和磁化翻转 的机制^[8-9]。同时还得到材料的宏观磁性质和相关 物理量,因而通过微磁学模拟可以在原子尺寸上了 解材料的特性,在微观磁性和宏观磁性之间建立起 重要的联系,因此近年来微磁学理论越来越成为研 究磁性材料的非常重要也是必要的技术^[10-13]。在微磁 学中,体系的吉布斯自由能 G_L可表示为^[7]

$$E_{\text{tot}} = \int_{\Omega} (\omega_{\text{exch}} + \omega_{\text{ani}} + \omega_{\text{ext}} + \omega_{\text{demag}}) dv = \int_{\Omega} (A((\nabla u_x)^2 + ((\nabla u_y)^2 + (\nabla u_z)^2) + K_1(1 - (a \cdot u)^2 - J \cdot H)_{\text{ext}} - \frac{1}{2}J \cdot H_{\text{demag}}) dv \qquad (1)$$

这里 $J=J_s(x) \cdot u(x, t)$, |u|=1给出了磁体中磁极化 强度与空间、时间的关系。

式中 ω_{exch} 为交换能密度, ω_{ani} 为磁晶各向异性能密度, ω_{ext} 为塞曼能密度, ω_{demag} 为退磁场能密度。A 为 交换耦合常数, u_x 、 u_y 和 u_z 分别为磁矩在 x、y和 z 轴 方向的分量, K_1 为磁晶各向异性常数, a 为易磁化轴 上的单位矢量, J 为磁极化强度, J_s 为饱和磁极化强度, H_{ext} 为外磁场, H_{demag} 为退磁场强度。

对方程(1)求最小化可以得到稳定的磁化分布状态,因此采用需要一种方法来求出能量的最小值。

根据 GILBERT 的理论,微磁学中的动态磁化 过程可以用 Landau-Lifschitz-Gilbert(LLG)方程来描述^[14]:

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

式中 y为旋磁比常数, *H*eff为由交换耦合作用、磁晶 各向异性作用、退磁作用和外磁场共同决定的有效场, J 为磁极化强度。在这种形式下,磁矩会做有阻尼情况下的拉莫尔旋进,最终趋向于与等效磁场一致的方向,系统内的所有磁矩都与那一点感受到的有效磁场方向一致时,系统就能够取到能量最小值,这一点也成为计算是否应该终止的判据。

1.2 体系模型及模拟参数

本文模拟所采用的参数如下:对于 CoCrPt 样品, 磁晶各向异性常数为 $K_n=2\times 10^5$ J/m³, 交换常数为 A=9.99×10⁻¹² J/m, 磁极化强度为 J_s=0.37 T^[15]; 对于 TbFeCo 样品,磁晶各向异性常数为 $K_u=2.8\times10^5$ J/m³, 交换常数为 A=2×10⁻¹² J/m, 磁极化强度为 J_s=0.25 T^[16];对于SmTbCo样品,磁晶各向异性常数为K,=4.28 ×10⁵ J/m³, 交换常数为 A=1×10⁻¹¹ J/m, 磁极化强度 为 J=0.48 T^[17]。图 1 所示为模拟中计算的样品的示意 图。在该模型中共有 20×20 个相同晶粒尺寸的六方柱 状晶粒,在后续的模拟中薄膜中所有晶粒的尺寸将被 分别设为10、13和16nm;薄膜的厚度始终保持为16 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 轴在垂直于膜面的方向上。设薄膜样品 中晶粒的磁晶各向异性轴垂直于薄膜平面且单个晶粒 的磁晶各向异性轴和膜面法线方向有15°以内的偏角, 单个晶粒的磁晶各向异性常数和饱和磁极化强度均有 10%以内的偏差。同时设磁头的飞行高度为 15 nm, 写入位的宽度是160 nm。



图1 模拟样品的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of model in simulation

2 结果与讨论

2.1 晶粒尺寸对矫顽力 H_e和矫顽力矩形比 S*的影响

图 2 所示为矫顽力 H_c随晶粒尺寸的变化。可以看 到随着晶粒尺寸的增加,3 种材料的矫顽力都有所减 少。TbFeCo 薄膜的矫顽力是这 3 种材料中最大的,同 时也随晶粒尺寸变化最小。

为了从微磁学的角度对矫顽力的变化进行解释, 本文计算不同晶粒尺寸下 CoCrPt、TbFeCo和 SmTbCo 样品的退磁场能密度随外磁场的变化,结果如图 3 所示。



图 2 矫顽力 H。随晶粒尺寸 D 的变化

Fig.2 Dependence of coercivity on grain size





Fig.3 Dependence of demagnetizing energy density on external filed

退磁场起源于磁体表面的磁偶极子间的相互作 用,它与外磁场方向相反,能起到减小磁体磁化强度 的作用,当外场达到矫顽力的数值时,由于磁体中的 大部分磁畴都在发生翻转,退磁场能会达到最大值, 这就是图中各情况下退磁场能密度的峰值出现在矫顽 力对应的外磁场处的原因。

ZHU 等^[18]的研究表明,对于同种材料,退磁相互 作用越大,矫顽力相应的越小。结合图 2 和图 3 可以 看到,晶粒尺寸越大的介质,其退磁场能越大,因此 矫顽力相应的会越小。

矫顽力矩形比 S*是反映矫顽力处磁化曲线倾斜度的一种重要参数,它可以通过如下的表达式计算^[19]:

$$S^* = 1 - \left(\frac{M_r}{H_c}\right) \frac{dM}{dH(H_c)}$$
(3)

从图 4 的曲线可以看到,随着晶粒尺寸的增大,3 种材料的矫顽力矩形比 S*有少许的减小,这种变化趋势和在实验中已观测到的随着晶粒间相互交换耦合作 用的减弱(晶粒间相互交换耦合作用可以通过 h_e反映,

 $h_{\rm e} = \frac{A}{KD^2}$, *D* 增大时 $h_{\rm e}$ 减小)导致矫顽力矩形比 *S**减少的现象^[20]是吻合的。



图4 矫顽矩形比 S*随晶粒尺寸 D 的变化



2.2 晶粒尺寸对过渡区噪声参数的影响

图 5 所示为纵向磁记录介质中过渡区附近的磁化 状态分布^[19]。垂直磁记录中过渡区附近的磁化状态分 布情况与之类似,只是其磁化方向是在垂直于膜面方 向。在该图中,上半部分的磁化方向是朝下的,可以 认为记录的是"0"信号,下半部分的磁化方向是朝上 的,可以认为记录的是"1"信号。图中两条曲线之间 的区域即是过渡区,在过渡区部分个体自旋的方向是 杂乱的,但整体反映了磁化状态由朝下到朝上的过渡 情况。



图5 过渡区示意图

Fig.5 Schematic diagram of transition zone

过渡区宽度是过渡区在相邻两个记录位磁畴中延伸的最远点沿垂直于过渡区方向的距离。在本研究中, 采用由 BERTRAM 和 WILLIAMS 提出的垂直磁记录 过渡区噪声模型来分析计算所研究的 3 种材料过渡区的宽度 *a*^[21]:

$$\frac{a}{D} = \sqrt{(1/\pi)^2 + 0.35(\alpha_{\rm WC}^{\rm p}/D)^2}$$
(5)

式中 a 为过渡区宽度, D 为薄膜颗粒直径, α_{WC}^{p} 为 被 BERTRAM 修正过的 Williams-Comstock 过渡区宽 度^[22]。

图 6 所示为 CoCrPt、TbFeCo 和 SmTbCo 样品的 过渡区宽度随晶粒尺寸的变化,这里对于过渡区宽度 进行了归一化处理(即 *a*/*D*, *D* 为晶粒尺寸)。从这一组 曲线可以看出,随着晶粒尺寸的增加,3 种材料的过 渡区宽度均会减小,其中 TbFeCo 的过渡区宽度最小。



Fig.6 Dependence of transition length on grain size

垂直于记录轨道方向关联长度 s(Cross Track Correlation Length) 也是衡量过渡区噪声的一个很重要的物理量^[23],它反映的是过渡区磁畴的磁化强度在非记录位方向的分量大小,同时可以反映在过渡区颗粒之间相互交换耦合作用影响的晶粒数。

本文采用由 JIN 等^[23]提出的考虑了晶粒之间相互 交换耦合作用的数学模型来计算垂直于记录轨道方向 关联长度的值:

$$\frac{s}{\langle D \rangle} = \frac{1 + h/(1 - S^*)}{1 - h/(1 - S^*)}$$
(6)

其中参数 h 可由下式计算:

$$h = (0.7h_{\rm ex}H_{\rm k}/H_{\rm c} - \gamma h_{\rm m})\frac{\tanh(D/\pi a)}{D/\pi a}$$
(7)

式中 H_k为各向异性场, H_c为矫顽力, S*为矫顽力矩 形比, y为形状参数, a为过渡区宽度, s为垂直于记 录轨道方向关联长度, D为晶粒尺寸。

从图 7 所示的曲线可以看到,随着晶粒尺寸的增

加,3种材料的垂直于记录轨道方向关联长度 s(经过 归一化处理,即 s/D)均会减小,但是 CoCrPt 材料的 s 值下降得最快,而 TbFeCo和 SmTbCo 材料的 s 值只 有少许的减小。在这3种材料中,TbFeCo的 s 值最小。



图 7 垂直于记录轨道方向关联长度 *s* 随晶粒尺寸 *D* 的变化 **Fig.7** Dependence of cross track correlation length on grain size

位置偏移参数 σ_j 反映了过渡区中心位置的偏移程度。 研究表明,对于垂直磁记录介质,位置偏移参数 σ_j (Position Jitter)越大,过渡区噪声越大^[24]。 σ_j 可以用下 面的表达式计算:

$$\sigma_{\rm j} = \sqrt{\frac{\pi^4 a^2 s}{96W}} \tag{8}$$

式中 *a* 为过渡区宽度,*s* 为垂直于记录轨道方向关联 长度 *s*, *W* 为写入位的宽度。

从图 8 所示曲线可以看到,随着晶粒尺寸的增加, 3 种材料的位置偏移参数 σ_j均呈线形增大,这说明过 渡区噪声随着晶粒尺寸增加而呈现出增大的趋势。







在介质的过渡区附近, 晶粒的磁化状态存在着一 定的过渡。如果介质的晶粒越小, 每个晶粒的磁化强 度也就越小, 因此要实现从一种磁化方向的记录位到 相邻的另一种磁化方向记录位的转换, 如果相邻晶粒 的磁化强度以同样的差值变化, 需要的晶粒数目会越 少, 过渡区噪声越小; 而如果介质的晶粒越大, 每个 晶粒的磁化强度也就越大, 要实现这种过渡转换需要 的晶粒数目会越多, 过噪声也相应地越大。从图 8 中 还可以看到, TbFeCo 介质的过渡区噪声是最小的。

REFERENCES

- IWASAKI S. Perpendicular magnetic recording[J]. IEEE Trans Magn, 1980, 16(1): 71–76.
- [2] ZHOU H. Micromagnetic analyses of effects of intergranular magetostatic and exchange interactions on signal-to-noise and thermal stability in hard disk drive recording media[D]. San Diego: University California, 2001: 75–95.
- [3] BERTRAM H N, ZHOU H, GUSTAFSON R. Signal to noise ratio scaling and density limit estimates in longitudinal magnetic recording[J]. IEEE Trans Magn, 1998, 34(4): 1845–1847.
- [4] SLUTSKY B, BERTRAM H N. Transition noise analysis of thin film magnetic recording media[J]. IEEE Trans Magn, 1994, 30(5): 2808–2817.
- [5] YEN E T, WU S Z, THOMSON T. Case study of media noise mechanisms in longitudinal recording[J]. IEEE Trans Magn, 1999, 35(5): 2730–2732.
- [6] LIU Z J, LONG H H, YE W C, ZHU X X, QIN Z L, LI E P, CHEN G S. Micromagnetic analysis of transition noise for high-density perpendicular recording[J]. J Magn Magn Mater, 2006, 303: e48-e51.
- [7] BROWN W F. Micromagnetics [M]. New York: Wiley, 1963: 47–59.
- [8] 乐陶然. Co基稀土系记录薄膜磁化过程的微磁学模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.

LE Tao-ran. Micromagnetic simulation of magnetic process for co-rare earth recording thin films[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

- [9] 晋 芳. Co基稀土及其耦合膜垂直磁记录介质研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
 JIN Fang. Study on Co-rare earth and its coupled thin films for perpendicular magnetic recording[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [10] 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.
 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.

 [11] 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.
 ZHANG La-mei, GUO Guang-hua, HAN Nian-mei.

Micromagnetic simulation of angular dependence of coercivity of m agnetic nanowires[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1400–1404.

- [12] ZHU J G, TANG Y. Micromagnetics of percolated perpendicular media[J]. IEEE Trans Magn, 2007, 43(2): 687–692.
- [13] SINGH N, GOOLAUP S, TAN W, ADEYEYE A O, BALASUBRAMANIAM N. Micromagnetics of derivative ring-shaped nanomagnets[J]. Phys Rev B, 2007, 75: 104407–104412.
- [14] GILBERT T L. A lagrangian formulation of gyromagnetic equation of the magnetization field[J]. Phys Rev, 1955, 100: 1243.
- [15] WELLER D, MOSER A, FOLKS L, BEST M E, LEE W, TONEY M F, SCHWICKERT M, THIELE J U, DOERNER M F. High Ku materials approach to 100 Gbit/in²[J]. IEEE Trans Magn, 2000, 36(1): 10–15.
- [16] ITOH A, ITOH Y, NANBA K. Cu doping effect on FePt grains prepared by rapid thermal annealing on SiO₂ substrate and wall structure in TbFeCo/FePt CGC-like film[J]. J Appl Phys, 2006, 99: 08Q906-1-3.
- [17] 黄致新. SmTbCo 系光磁混合记录薄膜结构与特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
 HUANG Zhi-xin. Study on microstructure and properties of

SmTbCo series thin films for hybrid recording[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

- [18] MEE C D, DANIEL E D. Magnetic recording technology(2nd edition)[M]. New York: McGraw-Hill company, 1995.
- [19] ZHU J G. Interactive phenomena in magnetic thin films[D]. San Diego: University California, 1989.
- [20] YOGI T, GORMAN G L, HWANG C, KAKALEC M A, LAMBERT S E. Dependence of magnetics, microstructures and recording properties on underlayer thickness in CoNiCr/Cr media[J]. IEEE Trans Magn, 1988, 24(6): 2727–2729.
- [21] BERTRAM H N, ZHOU H, GUSTAFSON R. Signal to noise ratio scaling and density limit estimates in longitudinal magnetic recording[J]. IEEE Trans Magn, 1998, 34(4): 1845–1847.
- [22] BERTRAM H N. Theory of magnetic recording[M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1994: 204–244.
- [23] JIN Z, WANG X, BERTRAM H N. An Analytical model for the cross-track correlation length including finit grain size and inter-granular interactions[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39(5): 2603–2605.
- [24] SHIMIZU Y, BERTRAM H N. Micromagnetic study of the transition parameter and position jitter in perpendicular recording[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39(3): 1846–1850.