

文章编号: 1673-9469(2017)04-0109-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.04.024

CoPt-TiO₂/Co-TiO₂ 交换耦合磁记录薄膜的研究

谢海龙¹, 王颖², 魏福林², 郑立允¹, 刘宏基¹

(1. 河北工程大学材料科学与工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000)

摘要: 建立包含微结构的微磁学模型, 研究软磁层的磁晶各向异性场、软磁层的饱和磁化强度等本征磁性参数对 CoPt-TiO₂ (16 nm)/Co-TiO₂ (4 nm) 交换耦合磁记录薄膜磁性的影响。计算得到的 CoPt-TiO₂(16 nm) 的硬磁薄膜易磁化轴的磁滞回线的矫顽力为 6.1 kOe, 矩形度为 0.98。在交换耦合介质中, 当软磁层的厚度 δ 从 0 nm 增加到 4 nm 时, 易磁化轴的矫顽力从 6.1 kOe 减小到 4.9 kOe。同时发现, 软磁层越软(软磁层的磁晶各向异性场越小, 饱和磁化强度越大)时, 整个薄膜的矫顽力也越小。

关键词: 交换耦合介质; 磁记录; 微磁学; 磁性材料

中图分类号: O484.4

文献标识码: A

Investigation of the CoPt-TiO₂/Co-TiO₂ exchange coupled magnetic recording media

XIE Hailong¹, WANG Ying², WEI Fulin², ZHENG Liyun¹, LIU Hongji¹

(1. College of Materials and Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China;
2. Key laboratory for Magnetism and Magnetic Materials of the Ministry of Education, Lanzhou University, Gansu Lanzhou, 730000, China)

Abstract: In this paper, an accurate micromagnetic model is built for CoPt-TiO₂ (16 nm) / Co-TiO₂(4 nm) exchange coupled magnetic recording media. Based on the microstructure, the effect of the magnetic parameters such as the anisotropy, the saturation magnetization of the soft layers on the magnetic properties of the media is investigated. In the M-H loop of CoPt-TiO₂ (16 nm) hard layer, the easy magnetization axis coercivity is 6.1 kOe and the squareness is 0.98. In the exchange coupled media, the coercivity decreases from 6.1 kOe to 4.9 kOe when the thickness δ of the soft layer increases from 0 nm to 4 nm. Meanwhile, we also found that the coercivity decreases when the anisotropy is lower and the saturation magnetization is larger in the soft layer.

Key words: exchange coupled media; magnetic recording; micromagnetics; magnetic materials.

为了满足超高密度磁记录的需要, 磁性颗粒的尺寸需要显著的减小。然而由于超顺磁极限的限制, 当颗粒的尺寸小于某个临界值的时候, 磁隔绝的颗粒会变得不稳定。为了克服超顺磁极限, 作为记录层的磁性薄膜需要具有很大的磁晶各向异性, 不过由于现在的写磁头所能提供的写入场有限, 过大的磁晶各向异性会引发写入困难的问题。交换耦合复合介质由耦合在一起的软磁层和硬磁层构成, 当软 /

硬磁层间的交换相互作用大小适当的时候, 介质可以在保持足够的热稳定性的同时使翻转场降低到最小。关于交换耦合复合介质的理论和实验工作很多^[1-5], 然而微磁学模型中包含多晶微结构的工作很少, 因此很难通过测量磁滞回线得到软 / 硬磁层间的准确的交换相互作用。

本文在实验数据的基础上, 将微结构引入到微磁学模型中, 研究了 CoPt-TiO₂/Co-TiO₂ 交换耦合磁

收稿日期: 2017-10-29

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51701059); 河北省自然科学基金资助项目(E2015402111)

作者简介: 谢海龙(1984-), 男, 河北磁县人, 博士, 讲师, 从事磁性金属材料方面的研究。

记录薄膜的磁性随软磁层的磁晶各向异性场、软磁层的饱和磁化强度等本征磁性参数的变化规律。

1 微磁学模型

我们在室温时采用磁控溅射系统在 2.5 英寸的玻璃基片上首先溅射了 150 nm 厚的 CoZrNb 软磁衬底层 (SUL); 接着沉积了 5 nm 厚的 Pt Preseed 层和 10 nm 厚的 Ru 种子层 (Seed layer); 然后是 16 nm 厚的 CoPt-TiO₂ 硬磁层 (靶材的成分为 Co₈₀Pt₂₀), 之后沉积了 $\delta=0 \sim 4$ nm 厚的 Co-TiO₂ 软磁层, 最后沉积了一层 C 保护层以防止氧化, 溅射用的保护气体是 Ar 气。

本文中, 硬磁层的微磁学单元尺寸 D 为 $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$, 软磁层的微磁学单元尺寸是 $2 \text{ nm} \times 1 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$, 薄膜平面内微磁学单元的数目是 6 464。实验测量的薄膜往往具有毫米尺度, 所以我们在膜面 (x - z plane) 内采用了周期性边界条件。图 1 是我们模拟的类似 Voronoi 格子的多晶微结构示意图, 图中黑色部分为具有磁性的晶粒, 白色部分为无磁性的晶界。我们首先在薄膜平面内均匀选定一些格点作为晶粒生长时的晶核位置, 然后使形核中心在一定范围内无规则行走, 之后是晶粒的长大。当不同的晶粒边界接触时, 晶粒生长停止, 最终得到的晶粒是具有一定尺寸分布的柱状晶, 其尺寸分布可以通过控制形核中心的位置来实现, 平均的晶粒尺寸 D_g 是 7 nm, 晶界的宽度是 2 nm。

我们把软 / 硬磁层的磁性参数作了区别处理: 硬磁层的饱和磁化强度 M_s^h 选为 619 emu/cc, 垂直单轴各向异性场 H_k^h 的大小设定为 1.8 T (相应的磁晶各向异性常数是 $5.6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$); 软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 设定为 651 emu/cc, 垂直单轴各向异性场 H_k^s 的大小选为 1.4 T。磁晶各向异性场的大小满足分布 $P(H_k)=\exp(-\ln^2(H_k/H_k^0)/\beta^2)\exp(-H_k/$

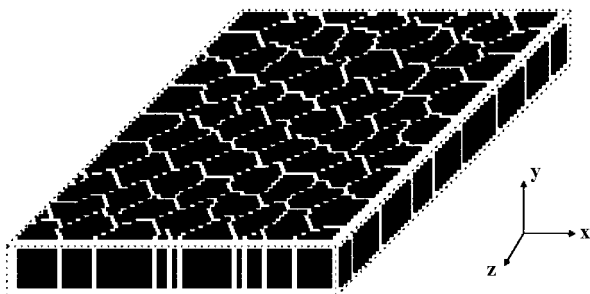


图 1 模拟的薄膜三维微结构示意图
Fig.1 Simulated 3D microstructure of the thin films

$H_k^0)$, 其中大小分布参数 β 取 0.1。同时磁晶各向异性场的方向满足取向分布 $f(\theta)=\exp(-\alpha_\theta \sin^2\theta)$, 式中取向分布参数 $\alpha_\theta=1.0$ 。晶粒内部的交换相互作用常数 A^{*1} 设定为 $0.2 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$, 晶粒之间的交换相互作用常数 A^{*2} 设定为 $0.1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$, 软 / 硬磁层间的交换相互作用常数 A^{*3} 设定为 $0.2 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ 。

微磁学的模拟基于求解 L-L-G 方程, 薄膜总的能量包含五项:

$$E=E_{\text{ext}}+E_k+E_{\text{ex}}+E_m+E_{\text{ms}} \quad (1)$$

式中 E_{ext} 、 E_k 、 E_{ex} 、 E_m 和 E_{ms} 分别为黎曼能、磁晶各向异性能、交换相互作用能、退磁能和磁弹性能。退磁场的计算是微磁学中最耗时的部分, 我们采用二维快速傅立叶变换^[6-7] (2D-FFT) 方法来求解退磁场。

$$\vec{H}_m = -(4\pi M_s) \text{FFT}^{-1}(\text{FFT}[\vec{N}] \cdot \text{FFT}[\vec{m}]) \quad (2)$$

其中 \vec{N} 是二维退磁矩阵, \vec{m} 是归一化的磁矩。需要特别指出的是 Co₈₀Pt₂₀ 的居里温度超过了 1 200 K, 因此计算室温下的磁滞回线时热扰动的影响很小。磁弹性场来源于衬底和磁性薄膜间的晶格错配, 本文中沿着 x 方向的平面磁弹性场 $H_{\text{ms}}=(2\lambda/M_s)\sigma_{\text{xx}}m_x$ 的大小为 2.0 T。

2 结果与讨论

2.1 CoPt-TiO₂(16 nm) 单层硬磁薄膜

我们首先计算了 CoPt-TiO₂(16 nm) 硬磁层的磁滞回线, 其中 CoZrNb(150 nm) 软磁衬底层起到了一个镜像的作用, 即: 硬磁层的磁矩 $M=(M_x, M_y, M_z)$ 在软磁层中产生了一个镜像 $M=(-M_x, M_y, -M_z)$, y 轴为垂直膜面方向。图 2 展示的是我们计算的 16 nm 厚的 CoPt-TiO₂ 单层薄膜的易磁化轴的磁滞回线, 矫顽力为 6.1 kOe, 方形度为 0.98。颗粒内部的交换场常数 $H_{e1}=2A^{*1}/(M_s^h D^2)=1.6 \text{ T}$, 颗粒之间的交换场常数 $H_{e2}=2A^{*2}/(M_s^h D^2)=807 \text{ Oe}$ 。模拟的结果跟实验的结果符合得很好, 从中我们可以看出磁性颗粒被颗粒间的氧化物很好地隔离开。

2.2 软磁层厚度的影响

为了研究软磁层的厚度对薄膜的矫顽力的影响, 我们保持其他参数不变, 计算了软磁层的厚度变化时薄膜易磁化轴的磁滞回线。易轴的矫顽力 H_c 随软磁层厚度的变化规律如图 3 所示。

由图 3 可知, 当软磁层的厚度从 0 增加到 4 nm

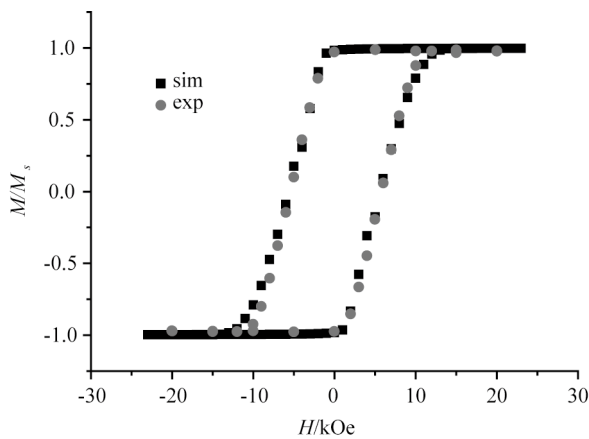


图 2 CoPt-TiO₂(16 nm) 硬磁层的易磁化轴的磁滞回线
Fig.2 Easy magnetization axis M-H Loops of the CoPt-TiO₂(16 nm) hard layer

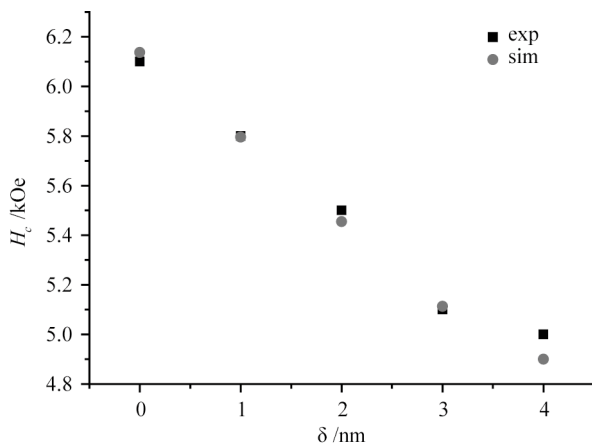


图 3 软磁层厚度对薄膜的矫顽力 H_c 的影响
Fig.3 The effect of the thickness on the coercivity of the films

时, 易磁化轴的矫顽力从 6.1 kOe 减小到 4.9 kOe (实验数值为 5.0 kOe), 回线的矩形度基本没有变化。这可能是因为当软磁层厚度增加时, 距离软 / 硬磁层界面较远的软磁层颗粒感受到的来自硬磁层的交换相互作用减弱, 所以在较小的外场下便可成核翻转。模拟的结果与实验结果符合得很好。

2.3 软磁层的磁晶各向异性场的影响

软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 对薄膜的矫顽力有重要的影响。我们令软磁层的厚度 $\delta=1$ nm, 保持其他参数不变时, 计算了软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 从 14 kOe 减小到 2 kOe 时易磁化轴的磁滞回线。回线的矫顽力 H_c 随软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 变化的规律如图 4 所示。

由图 4 可知, 软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 从 14 kOe 减小到 8 kOe 时, 矫顽力 H_c 相应地从 5.8 kOe 减小到 5.1 kOe。当 H_k^s 继续减小到 6 kOe 时, H_c 保持

5.1 kOe 不变。随后当 H_k^s 从 6 kOe 继续减小到 2 kOe 时, H_c 相应地从 5.1 kOe 减小到 4.5 kOe。这可能是因为: 软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 减小时, 每个磁性颗粒整体的磁晶各向异性场 H_k 相应地减小; 同时, 软磁层在较低的外场下成核翻转的成核场为

$$H_n = \frac{2K_1^s}{J_s} + \frac{2A\pi^2}{4t_s^2 J_s} \quad (3)$$

其中 H_n 为软磁层的成核场, J_s 为软磁层的自旋极化强度, K_1^s 为软磁层的磁晶各向异性常数, A 为晶粒间的交换耦合常数, t_s 为软磁层的厚度。所以成核场也随软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 的减小而减小。这两方面的因素共同导致薄膜的矫顽力也相应的减小。

2.4 软磁层的饱和磁化强度的影响

软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 对薄膜的矫顽力也

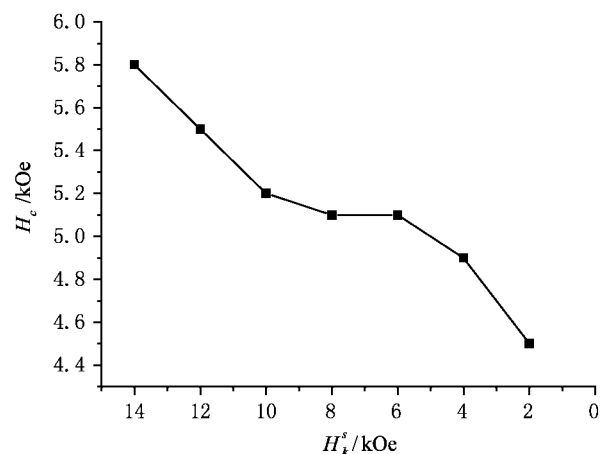


图 4 软磁层的磁晶各向异性场 H_k^s 的对薄膜的易磁化轴矫顽力的影响
Fig.4 The effect of the anisotropy field H_k^s of the soft layer on the easy coercivity

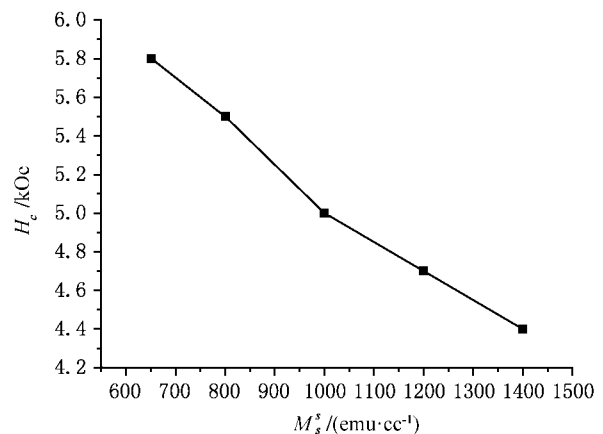


图 5 软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 对薄膜易磁化轴矫顽力的影响
Fig.5 The effect of the saturation magnetization M_s^s of the soft layer on the easy coercivity

有重要的影响。我们同样令软磁层的厚度 $\delta=1\text{ nm}$ ，保持其他参数不变，计算了软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 从 651 emu/cc 增加到 $1\ 400\text{ emu/cc}$ 时易磁化轴的磁滞回线。得到回线的矫顽力 H_c 随软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 的变化规律如图 5 所示。

由图 5 可知，当软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 从 651 emu/cc 增加到 $1\ 400\text{ emu/cc}$ 时，易磁化轴的矫顽力单调地从 5.8 kOe 减小到 4.4 kOe ，这是由于软磁层翻转时，软磁层对硬磁层的静磁相互作用随着软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 增加而增强的结果。

3 结论

- 1) CoPt-TiO₂(16 nm) 的硬磁薄膜的易磁化轴矫顽力为 6.1 kOe ，矩形度为 0.98。
- 2) 当软磁层的厚度从 0 增加到 4 nm 时，易磁化轴的矫顽力从 6.1 kOe 减小到 4.9 kOe 。
- 3) 软磁层的磁晶各向异性场 M_k^s 减小，矫顽力 H_c 相应地随之减小。
- 4) 当软磁层的饱和磁化强度 M_s^s 从 651 emu/cc 增加到 $1\ 400\text{ emu/cc}$ 时，易轴的矫顽力单调地从 5.8 kOe 减小到 4.4 kOe 。

参考文献:

[1]VICTORA R H, SHEN X. Exchange coupled composite

media for perpendicular magnetic recording[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(2): 537-542.

[2]KAPOOR M, SHEN X, VICTORA R H. Effect of intragranular exchange on exchange-coupled composite media[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(8): 1886.

[3]WANG J P, SHEN W K, BA J M, et al. Composite media (dynamic tilted media) for magnetic recording[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(14): 4423.

[4]WANG Y, ARIAKE J, WANG T, et al. The effect of Co-TiO₂ soft layer and Pt interlayer on the magnetic properties of exchange-coupled composite recording media[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(10): 103925.

[5]TAKAHASHI Y K, HONO K, OKAMOTO S, et al. Magnetization reversal of FePt hard/soft stacked nanocomposite particle assembly[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(7): 074305.

[6]MANSURIPUR M, GILES R. Demagnetizing field computation for dynamic simulation of the magnetization reversal process[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(6): 2326-2328.

[7]YUAN S W, BERTRAM H N. Fast adaptive algorithms for micromagnetics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2031-2036.

声 明

为适应我国信息化建设的需要、提高本刊的学术影响力、扩大作者知识信息交流渠道，本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据库等以数字化方式通过信息网络传播本刊全文。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。