

文章编号: 1673-9469(2018)01-0109-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.024

## CoPt-TiO<sub>2</sub>/Co-TiO<sub>2</sub> 交换耦合比特图形介质的研究

谢海龙, 郑立允, 刘宏基

(河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 建立包含多晶微结构的微磁学模型, 来研究软磁层的厚度、磁晶各向异性场、饱和磁化强度等本征磁性参数对 CoPt-TiO<sub>2</sub> (6 nm)/Co-TiO<sub>2</sub> ( $\delta=1 \sim 4$  nm) 交换耦合比特图形介质矫顽力的影响。发现当软磁层的厚度  $\delta$  从 1 nm 增加到 4 nm 时, 易磁化轴的矫顽力从 8.2 kOe 减小到 5.8 kOe, 归一化的剩余磁化强度  $Mr$  保持 0.99 基本没有变化。同时发现, 当软磁层的磁晶各向异性场越小、饱和磁化强度越大, 硬磁层的易磁化轴相对膜面法线方向倾斜的角度  $\theta$  越大时, 整个薄膜的矫顽力也越小。

**关键词:** 交换耦合; 比特图形介质; 微磁学; 磁性材料

中图法分类号: O484.4

文献标识码: A

## Investigate of the CoPt-TiO<sub>2</sub>/Co-TiO<sub>2</sub> exchange coupled bit pattern media

XIE Hailong, ZHENG Liyun, LIU Hongji

(College of Materials and Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

**Abstract:** In this paper, an accurate micromagnetic model is built for CoPt-TiO<sub>2</sub> (6 nm) / Co-TiO<sub>2</sub> ( $\delta=1 \sim 4$  nm) exchange coupled bit pattern media, based on the polycrystalline microstructure, to investigate the effect of the magnetic parameters such as the thickness, the anisotropy, the saturation magnetization of the soft layers on the coercivity of the bit pattern media. It is found that: the coercivity decreases from 8.2 kOe to 5.8 kOe when the thickness  $\delta$  of the soft layer increases from 1 nm to 4 nm, whereas the normalized  $Mr$  remains 0.99. Meanwhile, the coercivity decreases when the anisotropy is lower, the saturation magnetization is larger in the soft layer and the angle  $\theta$  is larger in the hard layer.

**Key words:** exchange coupled; bit pattern media; micromagnetics; magnetic materials

超顺磁极限的存在, 限制了垂直磁记录介质存储密度的提高。为了克服超顺磁极限, 作为记录层的硬磁薄膜需要具有很大的磁晶各向异性, 然而过大的磁晶各向异性会带来“写入困难”的问题。交换耦合复合介质(ECC)是解决这个难题的一种方案, 它由耦合在一起的软/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<sup>[1-6]</sup>。另一方面, 比特图形介质(BPM)也是实现超高存储密度的一种方案, 然而当存储密度超过 1 Tbit/inch<sup>2</sup> 时, 它也会遇到“写入困难”的问题。本文提供了一个化解“写入困难”问题的方案, 即: 使 BPM 介质

的每个比特由交换耦合的软/硬磁层构成, 这样便可以结合 ECC/BPM 两种存储介质的优点。本文在实验数据的基础上, 将多晶微结构引入到微磁学模型中, 研究了 CoPt-TiO<sub>2</sub>/Co-TiO<sub>2</sub> 交换耦合比特图形介质的磁性随软磁层的厚度、磁晶各向异性场、饱和磁化强度强度等本征磁性参数的变化规律。

### 1 微磁学模型

我们首先制备了连续的 CoPt-TiO<sub>2</sub>(6 nm)/Co-TiO<sub>2</sub> ( $\delta=1 \sim 4$  nm) 交换耦合复合薄膜, 然后用离子辐照的方法将其制成 BPM 介质, 这样获得的

BPM 介质相比自组装方法和光刻法有更好的表面粗糙度<sup>[7-8]</sup>。

在连续薄膜中,硬磁层的微磁学单元尺寸  $D$  为  $1.5 \text{ nm} \times 1.5 \text{ nm} \times 1.5 \text{ nm}$ , 软磁层的微磁学单元尺寸是  $1.5 \text{ nm} \times 1 \text{ nm} \times 1.5 \text{ nm}$ , 软 / 硬磁层面内单元的尺寸都小于布洛赫(Bloch)和奈尔(Neel)交换长度, 薄膜平面内微磁学单元的数目是  $64 \times 64$ 。模拟晶体的生长时, 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形核中心, 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。当不同的晶粒边界彼此接触时, 晶粒生长过程停止, 最终得到的晶粒是具有一定尺寸分布的柱状晶, 其尺寸的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  $20 \text{ nm}$ , 晶界的宽度是  $1.5 \text{ nm}$ 。然后用离子辐照的方法将其制成 BPM 介质, 最终整个薄膜被分成 4 个轨道(track), 每个轨道包含 8 个比特(bit)(图 1)。

我们把软 / 硬磁层的磁性参数作了区分: 硬磁层的饱和磁化强度  $M_s^h$  选为  $619 \text{ emu/cc}$ , 垂直单轴各向异性场  $H_k^h$  的大小设定为  $18 \text{ kOe}$ (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  $651 \sim 1400 \text{ emu/cc}$ , 垂直单轴各向异性场  $H_k^s$  的大小选为  $12 \text{ kOe}$ 。软 / 硬磁层的磁晶各向异性场的大小都满足修正的高斯分布  $P(H_k)=\exp(-\ln^2(H_k/H_k^a)/\beta^2)\exp(-(H_k/H_k^a)^2)$ , 其中大小分布参数  $\beta=0.1$ 。同时, 软 / 硬磁层的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

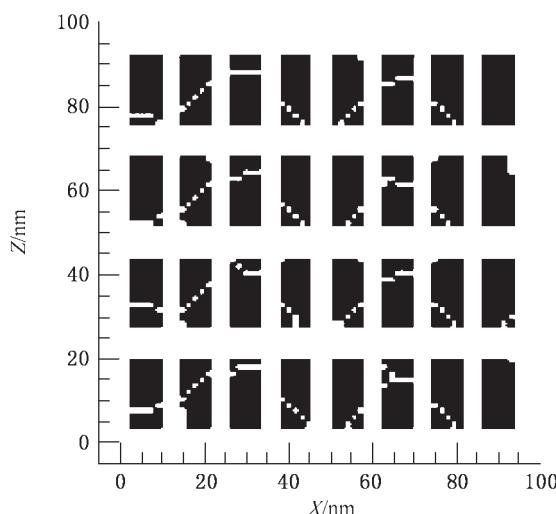


图 1 模拟的薄膜微结构示意图

Fig.1 Simulated microstructure of the thin films

常数  $A_2^*$  设定为  $0.1 \times 10^{-6} \text{ erg/cm}$ , 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  $E_{\text{ext}}$ 、 $E_k$ 、 $E_{\text{ex}}$ 、 $E_m$  和  $E_{\text{ms}}$  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<sup>[9-10](2D-FFT)</sup>方法来求解退磁场。

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

其中  $\tilde{N}$  是二维退磁矩阵,  $\hat{m}$  是归一化的磁矩。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。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  $H_{\text{ms}}=(2\lambda/M_s)\sigma_{xx}m_x=20 \text{ kOe}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 软磁层厚度的影响

为了研究软磁层的厚度  $\delta$  对 BPM 介质矫顽力的影响, 我们首先令  $H_k^s=12 \text{ kOe}$ ,  $M_s^s=1200 \text{ emu/cc}$ , 并保持其他参数不变, 计算了软磁层的厚度变化时 BPM 介质易磁化轴的磁滞回线。其矫顽力  $H_c$  随软磁层厚度  $\delta$  的变化规律如图 2 所示。

由图 2 可知, 当软磁层的厚度从  $1 \text{ nm}$  增加到  $4 \text{ nm}$  时, 易轴的矫顽力从  $8.2 \text{ kOe}$  减小到  $5.8 \text{ kOe}$ , 归一化的剩余磁化强度  $Mr$  保持  $0.99$  基本没有变化。这可能是因为软磁层厚度增加时, 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

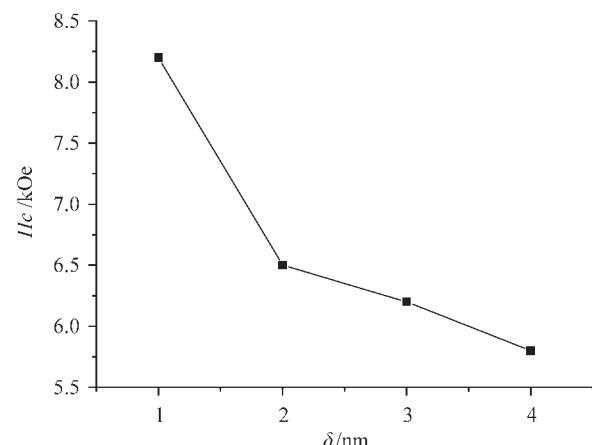


图 2 软磁层厚度对 BPM 介质的矫顽力  $H_c$  的影响

Fig.2 Effect of the thickness on the coercivity of the BPM media

相互作用减弱,所以在较小的外场下便可成核翻转的结果。

## 2.2 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 BPM 介质的矫顽力有重要的影响。我们令软磁层的厚度  $\delta=1 \text{ nm}$ ,  $M_s^s=651 \text{ emu/cc}$ , 并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 12 kOe 减小到 2 kOe 时易磁化轴的磁滞回线。其矫顽力  $H_c$  随软磁层的磁晶各向异性场  $H_k^s$  变化的规律如图 3 所示。

由图 3 可知, 软磁层的磁晶各向异性场  $H_k^s$  从 12 kOe 减小到 2 kOe 时, 矫顽力  $H_c$  相应地从 10.3 kOe 单调地减小到 7.5 kOe, 归一化的剩余磁化强度  $Mr$  保持 0.99 不变。这可能是因为: 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,  $K_1^s$  为软磁层的磁晶各向异性常数,  $J_s$  为软磁层的自旋极化强度,  $t_s$  为软磁层的厚度,  $A$  为晶粒间的交换耦合常数, 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。同时, 软磁层的磁晶各向异性场  $H_k^s$  减小时, 每个比特整体的磁晶各向异性场相应地减小。这两方面的因素共同导致 BPM 介质的矫顽力也相应的减小。

## 2.3 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 BPM 介质的矫顽力也有重要的影响。我们同样令软磁层的厚度  $\delta=1 \text{ nm}$ ,

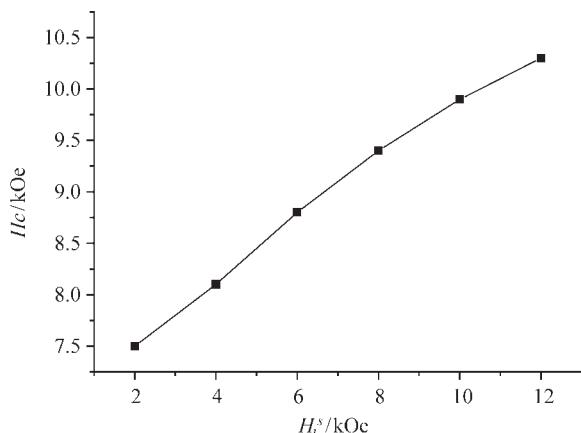


图 3 软磁层的磁晶各向异性场  $H_k^s$  的对 BPM 介质的易轴矫顽力的影响

Fig.3 Effect of the anisotropy field  $H_k^s$  of the soft layer on the easy coercivity of BPM media

$H_k^s=12 \text{ kOe}$ , 并保持其他参数不变, 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 emu/cc 时易磁化轴的磁滞回线。其矫顽力  $H_c$  随软磁层的饱和磁化强度  $M_s^s$  的变化规律如图 4 所示。

由图 4 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 emu/cc 时, 易磁化轴的矫顽力从 10.3 kOe 单调地减小到 7.1 kOe, 归一化的剩余磁化强度  $Mr$  保持 0.99 不变。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。

## 2.4 硬磁层易轴倾斜角度的影响

为了研究硬磁层的易磁化轴的倾斜角度也对 BPM 介质的矫顽力影响, 我们令软磁层的  $H_k^s=12 \text{ kOe}$ ,  $M_s^s=1 200 \text{ emu/cc}$ , 计算了硬磁层的易轴相对 BPM 介质膜面的法线方向倾斜不同的角度  $\theta$  时的磁滞回线。结果如图 5 所示。

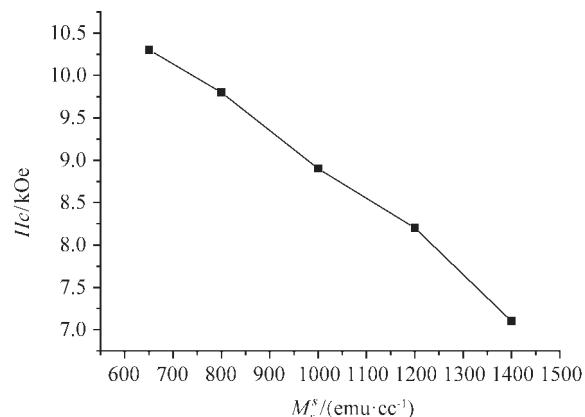


图 4 软磁层的饱和磁化强度  $M_s^s$  对 BPM 介质易轴矫顽力的影响

Fig.4 Effect of the saturation magnetization  $M_s^s$  of the soft layer on the easy coercivity of BPM media

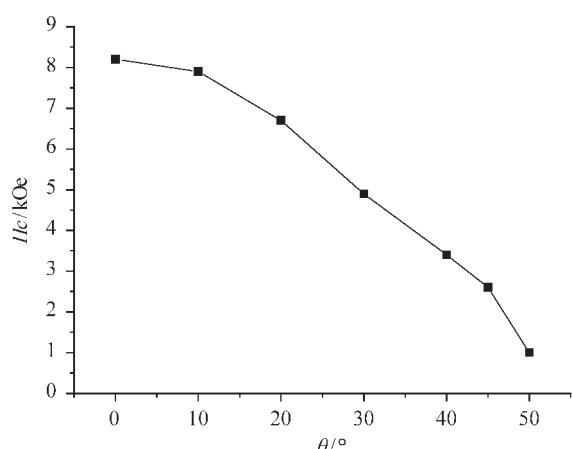


图 5 对 BPM 介质矫顽力的影响

Fig.5 Effect of on the coercivity of BPM media

由图5可知,当硬磁层的易轴相对BPM介质膜面的法线方向倾斜的角度 $\theta$ 从 $0^\circ$ 增加到 $50^\circ$ 时,回线的矫顽力从8.2 kOe单调地减小到1 kOe。这可能是由于 $\theta$ 增加时,每个比特整体的有效磁晶各向异性场 $H_k$ 相应地减小所导致的结果。

### 3 结论

1) 当软磁层的厚度从1 nm增加到4 nm时,易轴的矫顽力从8.2 kOe减小到5.8 kOe,归一化的剩磁 $M_r$ 保持0.99基本没有变化。

2) 软磁层的磁晶各向异性场 $H_k^s$ 减小时,矫顽力 $H_c$ 相应地随之减小。

3) 当软磁层的饱和磁化强度 $M_s^s$ 从651 emu/cc增加到1 400 emu/cc时,易磁化轴的矫顽力从10.3 kOe单调地减小到7.1 kOe,归一化的剩余磁化强度 $M_r$ 保持0.99不变。

4) 当硬磁层的易磁化轴相对膜面的法线方向倾斜的角度 $\theta$ 从 $0^\circ$ 增加到 $50^\circ$ 时,回线的矫顽力从8.2 kOe单调地减小到1 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, BAI J M, et al. Composite media (dynamic tilted media) for magnetic recording[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(14): 4423.
- [4] WANG J P, SHEN W K, BAI J M. Exchange coupled composite media for perpendicular magnetic recording[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3181.
- [5] WANG Y, ARIAKE J, WANG T, et al. The effect of Co-TiO<sub>2</sub> soft layer and Pt interlayer on the magnetic properties of exchange-coupled composite recording media[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(10): 103925.
- [6] 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.
- [7] CHAPPERT C, BERNAS H, Ferre J, et al. Planar patterned magnetic media obtained by ion irradiation[J]. Science, 1998, 280(5371): 1919-1922.
- [8] TERRIS B D, THOMSON T. Nanofabricated and self-assembled magnetic structures as data storage media[J]. Journal of physics D, 2005, 38(12): 199-222.
- [9] 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.
- [10] YUAN S W, BERTRAM H N. Fast adaptive algorithms for micromagnetics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2031-2036.

(责任编辑 王利君)

### 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。