

L1₀ 有序 FePt 薄膜的研究进展

王传军, 张俊敏, 谭志龙, 闻 明, 毕 珺, 沈 月, 管伟明

(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: L1₀ 有序 FePt 合金由于其极大的磁晶各向异性常数而成为下一代超高密度磁记录的候选材料, 如何制备具有 L1₀ 有序 FePt 薄膜成为近年来的研究热点。介绍了制备具有 L1₀ 有序 FePt 薄膜的方法, 包括选择合适的基底材料、单原子层沉积多层膜结构、引入下底层或中间层、添加合金元素或第三组元等, 并阐述了这几种方法的主要特点和存在的问题, 展望了今后 FePt 薄膜的发展方向。

关键词: 金属材料; FePt; 有序化薄膜; 磁记录

中图分类号: TG146.3⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2015)04-0076-05

Research Progress on L1₀ Ordered FePt Thin Films

WANG Chuanjun, ZHANG Junming, TAN Zhilong, WEN Ming, BI Jun, SHEN Yue, GUAN Weiming

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,

Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: L1₀ ordered FePt alloys are the candidate materials for the next generation ultrahigh area density magnetic recording, due to their large magnetocrystalline anisotropy constant. How to prepare FePt films with L1₀ ordered phase has become a recent focus. In this review, the preparative methods for L1₀ FePt films, including the selection of proper base materials, the layer-by-layer deposition, the embedding of underlayer or intermediate layer, the addition of alloying elements or a third additive, are briefly introduced. The feature and disadvantage of these methods are discussed, and the future development of FePt films is prospected.

Key words: metal materials; FePt; ordered film; magnetic recording

信息技术的飞速发展对信息存储材料和技术提出了更高的要求。当前以 CoCrPt-Oxide(钴铬铂-氧化物)为记录介质的垂直磁记录已取代传统的水平磁记录成为了硬盘等电子产品中主流的记录方式。随着记录面密度的不断提高, 特别是当面密度超过 500 Gb/in² 时, 由于 CoCrPt-Oxide 记录介质中晶粒尺寸的不断减小, 因超顺磁效应而面临着热失稳问题。一般认为^[1], 由于超顺磁极限的存在, CoCrPt-Oxide 磁记录介质所能达到的极限面密度为 1 Tb/in²。因此, 为了继续提高磁记录的面密度, 需要寻求新的记录材料或方法。L1₀ 有序 FePt 合金由于其极大的磁晶各向异性常数($K_u=7\times 10^7$ erg/cm³)而成为下一代超高密度(大于 1 Tb/in²)磁记录介质的

候选材料。一般来说^[1], 为了防止热失稳, 需要磁性媒介中 $K_u V/K_B T=50\sim 70$ 。理论研究表明, 在室温条件时, FePt 薄膜在晶粒尺寸为 3 nm 的情况下仍然能保持热稳定性。因此, 若如此细小的晶粒能被制备并能读写, FePt 介质的记录面密度可以很容易就超过 1 Tb/in²。然而, 制备具有 L1₀ 相的 FePt 介质仍然面临着很多挑战。

1 L1₀ FePt 薄膜的结构及要求

近等原子成分的 FePt 合金中存在着 2 种晶体结构: 面心立方(fcc)结构和面心四方(fct)结构, 如图 1 所示。

收稿日期: 2014-10-11

基金项目: 云南省自然科学基金项目(2011FB125)。

第一作者: 王传军, 男, 工程师, 研究方向: 贵金属靶材及功能膜。E-mail: cjw@ipm.com.cn

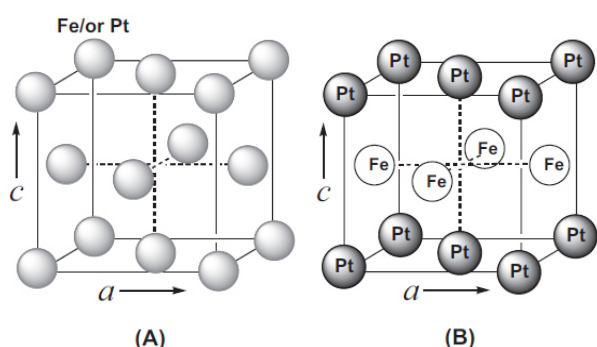


图1 FePt的无序面心立方结构(A)和有序面心四方结构(B)的晶胞示意图

Fig.1 Schematic diagram of the disordered fcc structure (A) and the ordered fct structure (B) of FePt lattice

面心立方结构的 FePt 是具有较低矫顽力的软磁相。完全有序的面心四方结构(L₁₀相)的 FePt 是具有较高矫顽力的硬磁相,可以看成是 Fe 原子层和 Pt 原子层沿着[001]方向(图 1(B)中 *c* 轴)交替排列而成。当 FePt 薄膜采用溅射沉积时,通常呈现出面心立方结构。为了获得所需的面心四方的 L₁₀相结构,一般需要通过在大于 500℃的温度下对基底原位加

热和/或后续退火来实现^[2]。但是高温退火会促使晶粒长大,扩大晶粒的分布范围并引起介质噪声,从而成为影响实际应用的缺点。从技术的角度来看,具有垂直于膜面的 *c* 轴取向、较低的 L₁₀有序化温度、较小的颗粒尺寸和尺寸分布,以及具有可读写的合适的矫顽力是非常重要的。

2 L₁₀ FePt 薄膜的制备工艺

由于 FePt 薄膜的结构和磁学性能对薄膜制备过程和退火条件比较敏感,国内外研究者在增强 FePt 薄膜的有序化动力学、抑制晶粒的长大、以及改善媒介的噪音等方面做了大量的研究。为了实现这些目标,单原子层^[3]或多层交替沉积^[4-5]、选择合适的基底材料^[6-7]、增加中间层或缓冲层^[6-10]、快速热处理^[11-13]、应力/应变诱导^[14-15]、非磁性元素的掺杂^[16-17]、与氧化物^[18-19]、碳化物^[19]等形成复合材料等方法被广泛研究。表 1 列出了近期在制备 L₁₀ FePt 薄膜方面有显著效果的部分文献。本文主要介绍以下几种实现 L₁₀ FePt 制备的方法。

表 1 一些具有 L₁₀ 有序相的 FePt 薄膜

Tab.1 Some FePt films with L₁₀ ordered phase

膜结构*	中间层/下底层/基体	溅射/退火温度/℃	矫顽力	平均晶粒尺寸/nm	文献
[FePt-40% SiN _x]-20% C	TiN/CrRu/玻璃	380	21.5 kOe	5.6	[20]
FePt-25%TiC-10%C	MgO/NiTa/Si	550	1.4 T**	10.3±1.86	[21]
[FePt]16	LaAlO ₃	500	16.3 kOe	200	[22]
Fe ₄₈ Pt ₄₂ Cu ₁₀ -45% C	MgO/Si	490	21 kOe	7.2 ± 1.9	[23]
Fe ₄₇ Pt ₄₂ Ag ₁₁ -45% C	MgO/Si	500	34 kOe,	6.8 ± 1.6	[24]
FePt(20 nm)/Hf(10 nm)	玻璃	600	8.9 kOe	N/A	[25]
FePt-C	MgO/CrRu/玻璃	350	14.4 kOe	7.5	[26]
Fe ₄₅ Pt ₄₅ Ag ₁₀ -C	玻璃	500~550	4.8 T**	7.2	[27]
FePt-TiO ₂ /FePt-C	MgO/玻璃	450	14.1 kOe,	6.7	[28]
FePt-15% C	MnPt:C/玻璃	350	10 kOe.	7	[29]
Fe ₄₅ Pt ₄₅ Ag ₁₀ -C	MgO	550	15 kOe	7.2	[30]
FePt-28% C	MgO/Si/SiO ₂	350	2 T**	5.5	[31]
FePt/Ag	Si	500	11.21 kOe	N/A	[32]
[FePt]3/[B ₄ C]5	Si	600	12.6 kOe	N/A	[33]

*: %为体积分数; **: 矫顽磁场。

2.1 选择合适的基底材料

现有商用硬盘的基体材料(即盘片)是玻璃或者铝。玻璃盘片有质地坚硬,表面光滑,对温度不敏感的特点,在高速旋转时热稳定性和耐高温性比铝

基的好。从大多数研究结果看,基体材料通常为玻璃、硅或 MgO。其中,使用 MgO 作为基体,所制备的 FePt 薄膜能获得较好的垂直取向,但是 MgO 的强度和硬度远远达不到商用硬盘的要求。

2.2 单原子层交替沉积多层膜结构

正如图 1 所示, $L1_0$ FePt 可以看成是 Fe 原子层和 Pt 原子层沿着[001]方向(图 1(B)中 c 轴)交替排列而成。因此, 有研究者采用单原子沉积技术, 将单原子层的 Fe 和 Pt 交替沉积, 期望因此而获得 $L1_0$ 结构的 FePt^[3], 但是这种方法制备的 FePt 薄膜往往具有较低的有序度, 且垂直于薄膜面的面外(Out of plane)的矫顽力较低。Yu 等^[34]研究了在室温下通过直流和射频磁控溅射制备了 [Fe/Pt/Cu]18 薄膜, 其中 Cu 的体积分数在 0%~20% 之间。结果表明, 在 Cu 的体积百分含量在 20% 以内时, 可以实现薄膜的低温有序和[001]取向, 但其有序度较低, 迟滞回线的方度较差。其原因在于, 单原子层交替沉积多层膜, 其薄膜结构不仅与沉积时的工艺参数, 如磁控溅射时的气压, 溅射时间等有关, 还与所选用的基体材料的表面质量和晶格参数有关。

2.3 引入下底层或中间层

引入下底层或中间层的主要目的是减少基体与记录层的晶格错配度, 减少晶粒度并促进磁记录介质的有序化和[001]取向。此前有较多研究者研究 MgO 作为下底层或中间层来外延生长 FePt 薄膜。但是由于 MgO 的 a 轴点阵常数(0.400 nm)与 $L1_0$ FePt 的 a 轴点阵常数(0.386 nm)的差异, 会引起 MgO 层与 FePt 之间的晶格错配, 从而影响 FePt 薄膜的有序度和晶粒尺寸及分布^[29]。此外, MgO 的表面能(1.1 J/m²)与 FePt 相比(2.9 J/m²)较小, 可能引起 MgO 和 FePt 晶粒将产生大的接触角, 这是外延生长所不想要的, 并会导致一个较宽的 c 轴取向分布从而促进薄膜面内分量的产生^[20]。Dong 等^[20, 35]在玻璃基体上先后溅射一层 CrRu 下底层和 TiN 种子层, 其后采用共溅射在 380℃ 时, 沉积 FePt-SiN_x-C 薄膜, TEM 分析表明, 具有[001]取向的 FePt 晶粒能在具有(200)织构的 TiN 中间层上外延生长。同时, 在 TiN 和 FePt 界面上的原子面间配合较好, 界面平滑干净。通过调整其中 C 的含量, 可获得具有独立分布的 FePt[001]粒状薄膜, 其矫顽力可高达 21.5 kOe 以上, 其平均晶粒尺寸为 5.6 nm。Zhang 等^[22]在 LaAlO₃ (LAO)基体上通过交替沉积 Fe 和 Pt 制备了 $L1_0$ FePt 薄膜。LaAlO₃ 通常被认为具有伪立方结构, 其点阵常数($a=0.3789$ nm)比 $L1_0$ -FePt 的点阵常数($a=0.3852$ nm)要小。在 500℃ 的沉积温度下, 可获得 16.3 kOe 的矫顽力, 同时其各向异性常数 K_u 可达 4.5×10^7 erg/cm³。这表明以点阵常数小于 $L1_0$ -FePt 的材料为基体, 采用多层膜方法, 可以获

得具有较好垂直磁各向异性的 $L1_0$ -FePt 薄膜。Wen 等^[29]在 MgO 的基础上沉积一层 MnPt:C 作为种子层, 由于 MnPt 与 FePt 具有相似的点阵结构, 且其 a 轴点阵常数(0.400 nm)介于 MgO 和 $L1_0$ FePt 之间, 在其上沉积 FePt:C 薄膜, 与 MgO 相比, 不仅能提供一个[001]取向的模板同时具有更低的点阵错配和更高的表面能。通过掺杂体积分数为 15% 的碳, 在 350℃ 的温度下沉积 FePt:C 薄膜, 可以获得 10 kOe 的面外矫顽力, 同时其晶粒尺寸约为 7 nm。

2.4 添加合金元素或第三组元

正如当前广泛采用的 CoCrPtB 或 CoCrPt-氧化物磁记录介质, 在 FePt 中添加另一种稀贵金属, 如 Cu、Ag^[24, 36]、Au 等来提高 FePt 薄膜的矫顽力同时控制薄膜的磁各向异性常数。同时, 通过添加第三组元, 如 C^[21, 23-24, 26, 29]、氧化物、(如 SiO₂^[37]、Al₂O₃^[38]、TiO₂^[28])、氮化物^[20]和 B^[31]等, 来形成颗粒状的薄膜结构, 减少磁性粒子间的交换耦合作用也成为研究热点。其中, FePt-C 和 FePtAg-C 系被报道具有狭窄尺寸分布和高的矫顽力的优异的颗粒状结构, 该结构用 HAMR(热助磁记录)静态测试系统测试被证明可用于 HAMR 媒介^[24, 30]。为了使薄膜的 c 轴取向与薄膜的法线方向垂直, 具有[001]织构的 MgO 下底层会被沉积于热氧化的 Si 基体上, 这成为形成强烈(001) FePt 织构的种子层。然而, 由于 FePt 和 C 之间相分离的强烈的驱动力, 在生长方向和水平方向的相分离的过程导致在薄膜厚度超过 6 nm 以后形成双层结构。由于这种水平相分离, 薄层(<6 nm)FePt-C 磁性层的表面粗糙度对飞行头来说太大了。这就需要一种具有较小表面粗糙度的分离材料。

Cui 等^[21]研究了 FePt-TiC-C 薄膜的微观结构和磁学性能。在 MgO/NiTa/Si 下底层上沉积 FePt-TiC 和 FePt-TiC-C 薄膜, TiC 的添加可以细化 $L1_0$ 有序化 FePt 的晶粒尺寸。矫顽力和 $L1_0$ 有序度随着 TiC 的含量的升高而降低。对于成分为 FePt-25% TiC(体积分, 6 nm)的薄膜, 可以获得平均晶粒尺寸 10.3 nm 标准偏差 1.86 nm 的薄膜, 其矫顽力为 1.42 T。

在颗粒状 FePt:C 的制备过程中, C 含量成为调整柱状生长和颗粒分离状况的强弱的量。除了添加隔离物以外, 下底层的表面质量也影响媒介的颗粒状分离状况。因此, 选用合适的添加隔离物同时选用合适的基底材料也很重要。

2.5 其它

此外, 通过快速热处理、应力/应变诱导等方法

也被应用于 L_{10} 有序 FePt 薄膜的制备中。比如, Brombacher 等^[39]对 20 nm 厚 $\text{Fe}_x\text{Pt}_{1-x}$ 薄膜进行了 20 毫秒的闪光灯退火, 结果表明对于成分为 $\text{Fe}_{53}\text{Pt}_{47}$ 的薄膜, 可以获得 (10.4 ± 0.5) kOe 的最大矫顽力, 同时也具有较高的化学有序度。而对于 Fe 原子百分比高于 53% 或低于 53% 的化学成分, 其矫顽力均有所降低。因此, 对于毫秒级别的退火来说, 最快速的有序化转变在略为富 Fe 的 FePt 薄膜中更易发生。

3 结语及展望

L_{10} 有序 FePt 合金由于其极大的磁晶各向异性常数而成为下一代超高密度磁记录的候选材料。从技术的角度来看, 如何提高薄膜垂直于膜面的 c 轴取向、降低合金的 L_{10} 有序化温度、减小颗粒尺寸和尺寸分布, 以及制备具有可读写的合适矫顽力是非常重要的。综合前文介绍, 可以看出, 以玻璃或硅为基片, 以 MgO 为下底层, 选择合适的中间层或种子层以降低底层薄膜与 FePt 的晶格错配度, 同时添加一到两种组元并辅以快速热处理等技术, 可制备出满足技术要求的 FePt 薄膜, 这也将是今后相关领域的研究和发展方向。

参考文献:

- [1] Song Yanlin, Zhu Daoben. High Density Data Storage-Principle, Technology, and Materials[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2009: 1-5.
- [2] Yu Y S, Li H B, Li W L, et al. Low temperature ordering of FePt films by in-situ heating deposition plus post deposition annealing[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(8): 2171-2174.
- [3] Shima T, Moriguchi T, Seki T, et al. Fabrication of L_{10} ordered FePt alloy films by monatomic layer sputter deposition[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(10): 7238-7240.
- [4] Dong K, Yang X, Yan J, et al. The effect of multilayer structure on magnetic properties of FePt thin films[J]. Acta Metall Sin (Engl Lett), 2009, 22(1): 22-26.
- [5] 冯春, 詹倩, 李宝河, 等. 利用 FePt/Au 多层膜结构制备垂直磁记录 L_{10} FePt 薄膜[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3303-3308.
Feng C, Zhang Q, Li B, et al. Preparation of L_{10} -FePt film for perpendicular magnetic recording media by using FePt/Au multilayers[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(5): 3503-3508.
- [6] Rennhofer M, Kozlowski M, Laenens B, et al. Study of reorientation processes in L_{10} -ordered FePt thin films[J]. Intermetallics, 2010, 18(11): 2069-2076.
- [7] Yang E, Laughlin D E, Zhu J G. Buffer layers for highly ordered L_{10} FePt-oxide thin film granular media at reduced processing temperature[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 2446-2449.
- [8] Tsai J L, Lin G B, Ou C L, et al. The L_{12} CrPt_3 underlayer effect on the ordering of L_{10} FePt films[J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 124(1): 380-384.
- [9] Li X, Liu B, Sun H, et al. L_{10} phase transition in FePt thin films via direct interface reaction[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(23): 1-6.
- [10] 汪元亮, 顾正飞, 成钢, 等. Pt 缓冲层厚度对 FePt 薄膜合金相转变和磁性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(20): 2189-2193.
Wang Yuanliang, Gu Zhengfei, Cheng Gang, et al. Effect of Pt bufferlayer thickness on phase transformation and magnetic properties of $[\text{Fe/Pt}]_n$ multilayer films[J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2007, 36(12): 2189-2193.
- [11] Inaba Y, Thompson G B, Harrell J W, et al. The FePt L_{10} phase transformation in thin films using multiple laser pulsing[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(5): 053507.
- [12] Inaba Y, Zana I, Swartz C, et al. Time-temperature-transformation measurements of FePt thin films in the millisecond regime using pulse laser processing[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(10): 103907.
- [13] Inaba Y, Torres K L, Kang S, et al. FePt L_{10} ordering and grain growth using millisecond pulse laser processing[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010, 322(24): 3828-3833.
- [14] Rasmussen P, Rui X, Shield J E. Texture formation in FePt thin films via thermal stress management[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(19): 191915.
- [15] Hsiao S N, Yuan F T, Chang H W, et al. Effect of initial stress/strain state on order-disorder transformation of FePt thin films[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 232505.
- [16] 杨骁勇, 李永乐, 舒小林, 等. B 掺杂 FePt 基纳米复合膜的制备与磁学性能研究[J]. 信息记录材料, 2010, 11(2): 35-40.
Yang Xiaoyong, Li Yongle, Shu Xiaolin, et al., Fabrication and magnetic properties of the B-doped FePt

- based nano-composite films[J]. *Recording & Media*, 2010, 11(2): 35-40.
- [17] Cheng Gang, Gu Zhengfei, Zhou Huaiying, et al. Effects of Pr on the structure and magnetic properties of FePt alloys[J]. *Rare Metals*, 2007, 26(1): 19-22.
- [18] Ishio S, Narisawa T, Takahashi S, et al. L₁₀ FePt thin films with [001] crystalline growth fabricated by SiO₂ addition-rapid thermal annealing and dot patterning of the films[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(3): 295-302.
- [19] Zhang L, Takahashi Y K, Perumal A, et al. L₁₀-ordered high coercivity (FePt)Ag-C granular thin films for perpendicular recording[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322(18): 2658-2664.
- [20] Dong K F, Li H H, Peng Y G, et al. Well-isolated L₁₀ FePt-SiN_x-C nanocomposite films with large coercivity and small grain size[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(7): 07A308.
- [21] Cui W B, Varaprasad B S D C S, Takahashi Y K, et al., Microstructure and magnetic properties of FePt-TiC-C granular thin films for perpendicular recording[J]. *Solid State Communications*, 2014(182): 17-21.
- [22] Zhang A M, Zhu W H, Zheng L, et al. Magnetic anisotropy of L₁₀-FePt film on (001) LaAlO₃[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013(332): 89-92.
- [23] Zhang L, Zhong W W, Yu S S, et al. FePtCu-C granular film for perpendicular magnetic recording media[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013(560): 177-180.
- [24] Zhong W W, Hu R, Zhang L, et al. FePtAg-C nanogranular film for ultrahigh density magnetic recording media[J]. *Applied Surface Science*, 2014(292): 400-404.
- [25] Shen C Y, Yuan F T, Chang H W, et al. Effect of Hf underlayer on structure and magnetic properties of rapid thermal annealed FePt thin films[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014(358/359): 153-158.
- [26] Chen J S, Lim B C, Hu J F, et al. Low temperature deposited L₁₀ FePt-C (001) films with high coercivity and small grain size[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(13): 132506.
- [27] Mosendz O, Pisana S, Reiner J W, et al. Ultra-high coercivity small-grain FePt media for thermally assisted recording (invited)[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(07): 07B729.
- [28] Ono T, Moriya T, Hatayama M, et al. Granular nano-structures and magnetic characteristics of FePt-TiO₂/FePt-C stacked granular films[J]. *Journal of Applied Physics* 2014, 115(17): 17B709.
- [29] Wen W C, Wang L W, Chang K C, et al. Effects of MnPt:C seed-layer on growing FePt:C granular films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(17): 17B734.
- [30] Pisana S, Mosendz O, Parker G J, et al. Effects of grain microstructure on magnetic properties in FePtAg-C media for heat assisted magnetic recording[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(4): 043910.
- [31] Chiu J C, Wen W C, Wang L W, et al. Effects of B additions in FePt and FePt:C films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(17): 17B13.
- [32] Zhang Yongmei, Li Xiaohong, Jing Jingjing, et al. Phase transition of FePt/Ag nanocomposite thin films: Kinetics, activation volume, and atomic processes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(6): 063907.
- [33] Zhang J, Ding H, Li S Q, et al. (001) oriented L₁₀ FePt/B₄C multilayer thin films on naturally oxidized Si substrate[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(17): 17C108.
- [34] Yu Y S, Li X Z, George T A, et al. Low temperature ordering and high (001) orientation of [Fe/Pt/Cu]₁₈ multilayer films[J]. *Thin Solid Films*, 2013(531): 460-465.
- [35] Dong K F, Li H H, Peng Y G, et al. Nanocomposite L₁₀ FePt-SiN_x and FePt-SiN_x-C films with large coercivity and small grain size on a TiN intermediate layer[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324(17): 2637-2644.
- [36] Tokuoka Y, Seto Y, Kato T, et al. Effect of Ag addition to L₁₀ FePt and L₁₀ FePd films grown by molecular beam epitaxy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(17): 17B716.
- [37] Yang Jinghai, Jiang Yuhong, Liu Yang, et al. Effects of SiO₂ content on the structure and magnetic properties of L₁₀-FePt nanoparticles synthesized by the sol-gel method[J]. *Materials Letters*, 2013(91): 348-351.
- [38] Kong Jizhou, Gao Moyun, Zhai Haifa, et al. Fabrication and magnetic properties of FePt/Al₂O₃ composite film by atomic-layer-deposition[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013(343): 1-5.
- [39] Brombacher C, Schubert C, Daniel M, et al. Chemical ordering of FePt films using millisecond flash-lamp annealing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(2): 023902.