

磁控溅射法制备的 FePt 薄膜的结构与性能

刘 静¹, 胡胜龙², 刘仲武³, 戴晓莉¹, 欧阳玲玉¹, 张元青², 箫笃飞¹, 王 健¹

(1. 江西应用技术职业学院 机电学院, 江西赣州 341000;

2. 江西应用技术职业学院 汽车学院, 江西赣州 341000;

3. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘 要: 采用磁控溅射法在单晶 Si(100)基片上制备了一系列 FePt 薄膜, 研究了膜厚、退火温度和时间、Fe/Pt 原子比对薄膜结构和磁性能的影响。研究表明, 薄膜的有序度与膜厚有着密切的关系, 厚度越厚, 薄膜的有序化程度越高, 矫顽力越高。退火温度的升高和退火时间的延长均可以使薄膜的矫顽力增高。富 Fe 的薄膜具有相对较高的有序度, Fe/Pt 原子比为 55:45 时, 有序化程度最高, 矫顽力最高, 平行方向的矫顽力为 14.2 kOe。Fe/Pt 原子比为 50:50 的薄膜, (001)垂直取向在膜厚为 20 nm 时获得。

关键词: FePt 薄膜; 磁记录; 有序度; 膜厚; 退火; Fe/Pt 原子比; 结构; 矫顽力

中图分类号: TM271; O484.4⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0009-07

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.003

FePt thin films with improved structure and magnetic properties by magnetron sputtering

LIU Jing¹, HU Sheng-long², LIU Zhong-wu³, DAI Xiao-li¹, OUYANG Ling-yu¹,
ZHANG Yuan-qing², XIAO Du-fei¹, WANG Jian¹

1. School of Mechanical Engineering, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Automotive Studies, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou 341000, China;

3. School of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract: FePt films with various thicknesses and Fe/Pt atom ratios for recording medium were fabricated on Si(100) substrates by DC magnetron sputtering, followed by annealing at 500 to 700 °C for 1 h. The influences of film thickness, Fe/Pt atom ratio and heat treatment on the structure and magnetic properties of the films were investigated. It was found that the film thickness has a great effect on the ordering degree of FePt films. The ordering degree and magnetic properties were improved by increasing the film thickness. The high annealing temperature and long annealing time can promote the atoms diffusion, resulting in an increase in the coercivity of the film. When Fe/Pt atomic ratio is 55:45, the film has the highest ordering degree, the fastest ordering process and the highest coercivity. The optimal magnetic property of H_c is 14.2 kOe. Perpendicular orientation can be obtained in the film when the film thickness is small, such as 20 nm.

Key words: FePt films; magnetic recording; ordering degree; film thickness; annealing; Fe/Pt atomic ratio; structure; coercivity

1 引言

超高密度硬盘驱动器近年来得到了快速发展, 硬盘的面记录密度也迅速增高。当硬盘的面密度达到 158.7 Gb/cm² 时, 要求磁记录介质的晶粒尺寸约为 8±1 nm^[1]。而传统硬盘广泛使用的磁记录介质材

料是 CoCr 基合金薄膜, 其超顺磁临界尺寸为 8~10 nm, 进一步减小晶粒尺寸会使磁介质受到超顺磁效应的影响, 这会对材料的热稳定性和信噪比造成不利影响。高的热稳定性可以使材料具有足够高的磁各向异性能($K_u V$)以克服造成超高密度磁记录介质的记录状态不稳定的热扰动($k_B T$)。L1₀-FePt 有序合金

收稿日期: 2019-07-23 修回日期: 2019-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774146); 江西省教育厅科学技术研究资助项目(GJJ171308)

通讯作者: 刘 静 E-mail: jingliu9820@163.com

由于具有极高的单轴各向异性性能和良好的耐腐蚀性^[2-4], 能够满足超高密度磁记录对热稳定性的要求, 而成为下一代磁记录介质的首选材料。然而, 直接在冷基片上溅射的 FePt 合金薄膜为无序面心立方 (fcc) 结构, 需要在较高的基片温度下沉积薄膜或对制备态的薄膜进行后续热处理, 才能将 fcc-FePt 相转变为有序 L1₀-FePt 相。而过高温度的退火处理会导致 FePt 晶粒的过分长大、晶粒分布变宽、成本过高等, 这不利于 FePt 磁记录材料的实用化。因此, 近年来 FePt 磁记录材料的一个重要研究方向就是降低 FePt 薄膜材料的有序化温度。

目前, 在降低 FePt 薄膜有序化转变温度方面已具有很多研究, 利用各种方法降低有序化转变温度的效果也各不相同。按照降低有序化转变温度的机理, 可以归纳为以下几类方法:

- (1) 利用分子束外延(MBE)方法^[5],
- (2) 采用多成膜结构^[6-7],
- (3) 掺杂第三种元素^[8-10],
- (4) 利用不同的底层或顶层^[11-12],
- (5) 其它方法, 如磁场退火以及离子辐照等^[13-14]。

综合他人的研究结果可以发现, FePt 薄膜的有序化过程以及磁性能与薄膜成分和厚度、多层膜结构、掺杂原子、底层或顶层有着密切的关系。

本实验在室温下利用磁控溅射方法在 Si 基片上制备了一系列 FePt 连续薄膜, 通过后续热处理的方法使 FePt 薄膜实现相转变, 研究了膜厚、热处理温度和热处理时间、Fe/Pt 原子比对薄膜结构和磁性能的影响。

2 实验

在室温下采用直流磁控溅射的方法在单晶 Si(100)基片上制备 FePt 连续薄膜。扇形 Fe 薄片均匀对称分布在直径为 60 mm 的圆形 Pt 靶材上。Fe 和 Pt 的纯度均不小于 99.99 %。在磁控溅射之前, Si 基片用丙酮超声清洗并烘干。溅射腔体的本底真空压力小于 6.0×10^{-5} Pa。溅射气体为高纯 Ar 气, 气压为 0.7 Pa, 气体流量为 24 sccm, 直流溅射功率保持在 100 W。将标记好的制备态样品放入干净的石英管中, 然后抽真空到 2.0×10^{-3} Pa 并封管。将封管的样品分别在 500~600 °C 退火不同时间, 热处理完毕后快速放入水中冷却。

采用台阶仪(Veeco D-150)测量薄膜的厚度, 薄膜

晶体结构的表征用 X 射线衍射仪(XRD, Philips X'Pert MPO Pro. Cu-K α), 薄膜的成分用能谱仪测量, 分别采用扫描电镜(SEM, FEI Nova NanoSEM 430)和原子力显微镜(AFM, NanoScope IIIa)表征薄膜的表面形貌并测定表面粗糙度, 利用物理性能测量系统(VSM, PPMS-9 Quantum Design Co.)测量薄膜的磁性能。

3 结果与讨论

3.1 厚度的影响

制备了厚度从 20 nm 到 200 nm 变化的 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜, 在 700 °C 真空热处理 1 h 后, 对其组织结构和磁性能进行了分析。

图 1 为不同厚度的 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜的 XRD 谱。可以看出, 除厚度为 20 nm 的薄膜出现很弱的(110)、(200)、(002)衍射峰, 其他样品的 XRD 谱中均出现了明显的(001)、(110)、(200)、(002)衍射峰, 随膜厚的增加, 这些衍射峰的相对强度也逐渐增强, 可以说明样品的有序化程度在逐渐增加。表明较厚的薄膜有利于实现有序化转变。

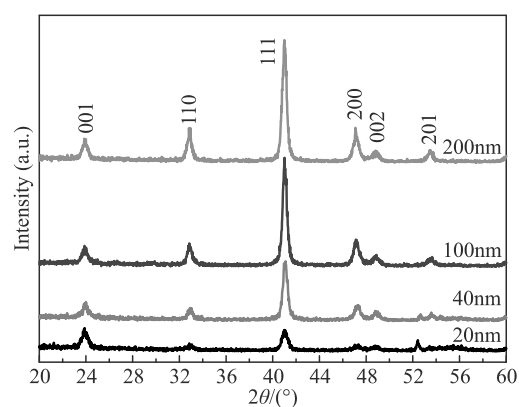


图 1 膜厚为 20~200 nm 的 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜的 XRD 谱

图 2 为 $I_{(001)}/I_{(111)}$ 和有序度参数 S 随 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜厚度的变化。 $I_{(001)}/I_{(111)}$ 为(001)与(111)衍射峰的峰强比, 可以用来表示垂直取向的程度^[15]。有序度参数(S)用来定量地描述 FePt 薄膜的有序化程度或薄膜中的有序 L1₀-FePt 相占据所有 FePt 相的比例, 其定义如下^[6]:

$$S^2 = \frac{1 - (c/a)}{1 - (c/a)_{S_f}} \quad (1)$$

式中, $(c/a)_{S_f}$ 为完全有序的 L1₀ 结构的晶格参数之比, 为 0.961。根据 XRD 谱衍射峰的峰位, 可以分

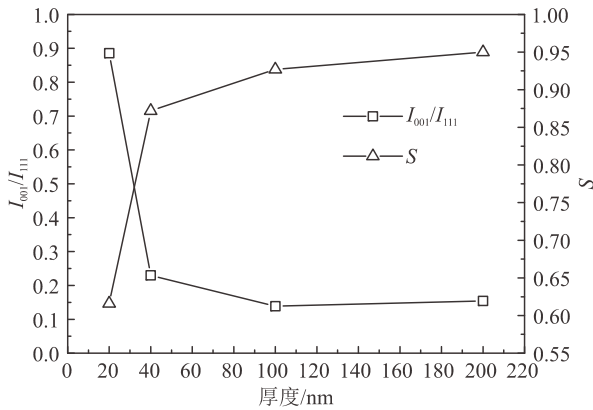


图2 $I_{(001)}/I_{(111)}$ 和有序度参数 S 随膜厚的变化

别计算出样品的晶格参数 c 和 a ，再利用上式计算样品的有序度参数。

从图2中可以看出， $I_{(001)}/I_{(111)}$ 随膜厚的减小而逐渐增大，当厚度为20 nm时， $I_{(001)}/I_{(111)}$ 接近0.9。可见，较薄的薄膜对于(001)取向的形成更有利。从图2可以看出，随着薄膜厚度的增加，薄膜的有序度逐渐提高，与图1吻合。

图3是不同厚度的 $\text{Fe}_{55}\text{Pt}_{45}$ 薄膜样品在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 1 h 后平行膜面方向的磁滞回线。从图中可以看出， $\text{Fe}_{55}\text{Pt}_{45}$ 薄膜的厚度从 20 nm 增加到 200 nm 时，矫顽力从 8.4 kOe 增大到 14.5 kOe。同时薄膜的饱和磁化强度在逐渐降低，这是由于随着薄膜厚度的增加，薄膜的有序化程度在逐渐提高，薄膜中软磁性的 A1-FePt 逐渐减少，而具有硬磁性能的 L1_0 -FePt 在逐渐增加。所有磁滞回线都出现了双台阶现象，说明薄膜中有软磁相存在，这可能是由于薄膜的厚度制约了薄膜的有序化转变，还有待进一步研究。

对较薄薄膜，有序化相对较困难，此时薄膜的有序度是影响矫顽力大小的决定因素。对较厚薄膜，有序化相对较容易，有序化程度相对较高，所以厚度对矫顽力的影响相对较小。

根据前面的研究结果可以得知，薄膜的厚度对 FePt 薄膜的有序化程度和磁性能有着很显著的影响。FePt 薄膜由 A1-FePt 相转变为 L1_0 -FePt 相时，晶胞体积收缩，使薄膜中产生压应力，这种压应力有利于薄膜的有序化相转变。Wierman 等人^[6]测量了厚度为 50 nm 的 FePt 薄膜中的应力是压应力，其大小为 685~978 MPa。因此，薄膜中压应力会随着薄膜厚度的增加而急剧变大，从而使有序化能够更快地进行。

3.2 退火温度的影响

由前可知，薄膜的厚度为 100 nm 时，有序化程

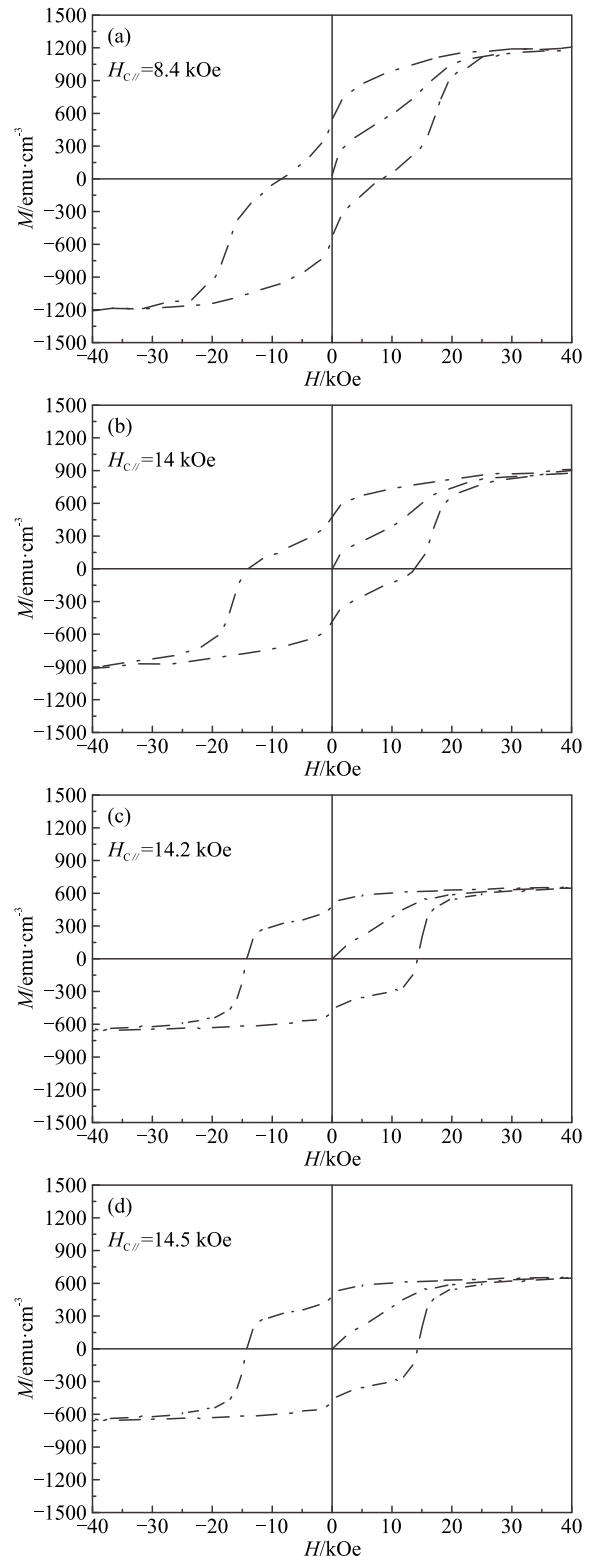


图3 不同厚度的 $\text{Fe}_{55}\text{Pt}_{45}$ 薄膜平行膜面方向的磁滞回线：
(a) 20 nm，(b) 40 nm，(c) 100 nm，(d) 200 nm

度已经很高了，所以接下来在单晶 Si 基片上制备了厚度为 100 nm 的 FePt 薄膜，然后分别在不同温度 ($500\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $700\text{ }^\circ\text{C}$) 退火 1 h。研究了退火温度对薄膜结构和磁性能的影响。

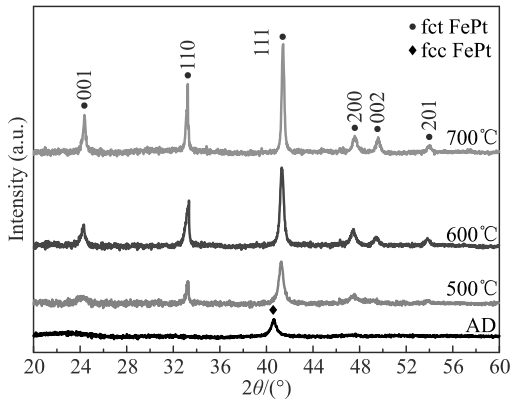


图 4 不同温度退火 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜的 XRD 谱

通常制备态的 FePt 合金薄膜是无序的 fcc 结构, (111)晶面是原子最密排面, 具有最小的表面能。当在 Si 基片上沉积薄膜时, 薄膜趋向于(111)晶面平行衬底表面生长, 因此在室温条件下沉积的 FePt 薄膜倾向于(111)面择优生长。图 4 是不同温度下热处理 1 h 的 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜样品的 XRD 谱。结果表明, 制备态 (As Deposited, AD) 的 FePt 薄膜是由无序的 A1-FePt 相组成, (111)面衍射峰的相对强度最强。在 500 °C 退火 1 h 之后, 有序 L1₀-FePt 相的超晶格(001)、(110)、(200)、(002)、(201)衍射峰开始出现, 说明 FePt 薄膜在 500 °C 开始由无序的 fcc 结构转化为有序的 fcc 结构。当退火温度增高到 600 °C 时, FePt(200)和(002)衍射峰分离开了, 说明有序化程度已经很高了。随着退火温度的增高, 有序 L1₀-FePt 相的衍射峰的相对强度进一步增强。从以上分析可以知道, FePt 连续薄膜的有序化转变温度在 500 °C 左右, 薄膜的有序化程度随退火温度的增高而逐步提高。

接下来对不同温度退火的 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜进行磁性能表征。图 5 为不同温度退火的 100 nm 的 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜平行膜面方向的磁滞回线。从图中可以看出, 制备态的薄膜的矫顽力仅为 20 Oe, 呈软磁性。在 500 °C 退火后, 矫顽力为 4.9 kOe, 具有硬磁性能, 表明 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜在 500 °C 退火后, 开始由 A1-FePt 向 L1₀-FePt 转变。在 700 °C 退火 1 h 后, 矫顽力达到 14.2 kOe。表明薄膜的矫顽力随退火温度的提高而增大了。

3.3 退火时间的影响

对 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜在 700 °C 分别进行了不同时间的热处理, 研究退火时间对 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜(200 nm)的有序化和磁性能的影响。

图 6 为在 700 °C 退火不同时间 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜的 XRD 谱。可知, 当退火时间比较短时, 为无序的

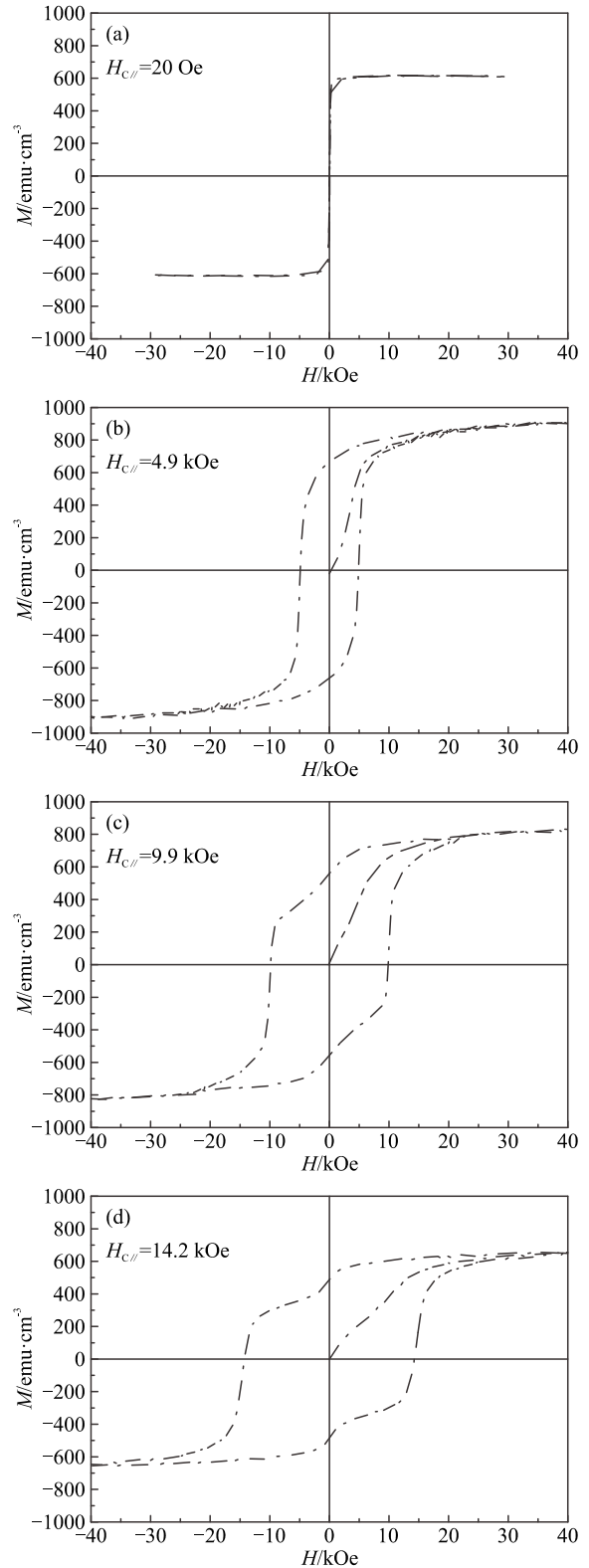
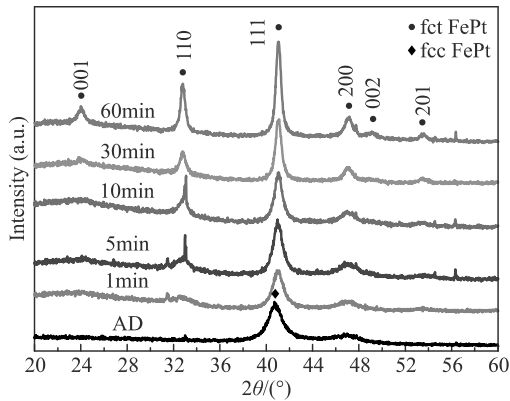


图 5 不同温度退火 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜平行膜面方向的磁滞回线: (a)制备态(AD), (b) 500 °C, (c) 600 °C, (d) 700 °C

A1-FePt 相。随着退火时间的延长, L1₀-FePt 相的超晶格(001)、(110)、(002)、(201)衍射峰越来越明显。退火 60 min 的样品, (200)和(002)峰分化, 表明薄膜

图 6 700 °C 退火不同时间 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜的 XRD 谱

的有序化程度已经很高了。由此可知，随退火时间的延长，薄膜的有序都在逐渐提高。

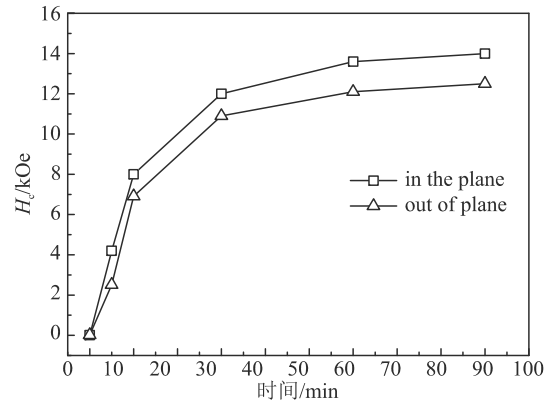
图 7 为 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜矫顽力与退火时间的关系。可知，随着热处理时间的延长，矫顽力增大，表明有序的 L₁₀-FePt 相的含量逐渐增加。当退火时间短于 30 min 时，矫顽力随退火时间的延长而迅速增大，然而当退火时间长于 30 min 时，矫顽力随退火时间变化不大。可见，在退火时间为 1 h 时，薄膜有序化程度已经很高了，经计算有序度 S 的值达到 0.95。

综合前面的分析结果，退火温度和退火时间均会对薄膜的有序度和磁性能产生显著影响。FePt 的有序化过程涉及 Fe 和 Pt 原子的近程扩散运动，而退火温度的升高和退火时间的延长均可以大幅度提高薄膜的扩散系数，这使得薄膜的矫顽力随着退火温度和时间的增高和延长而增大^[17]。

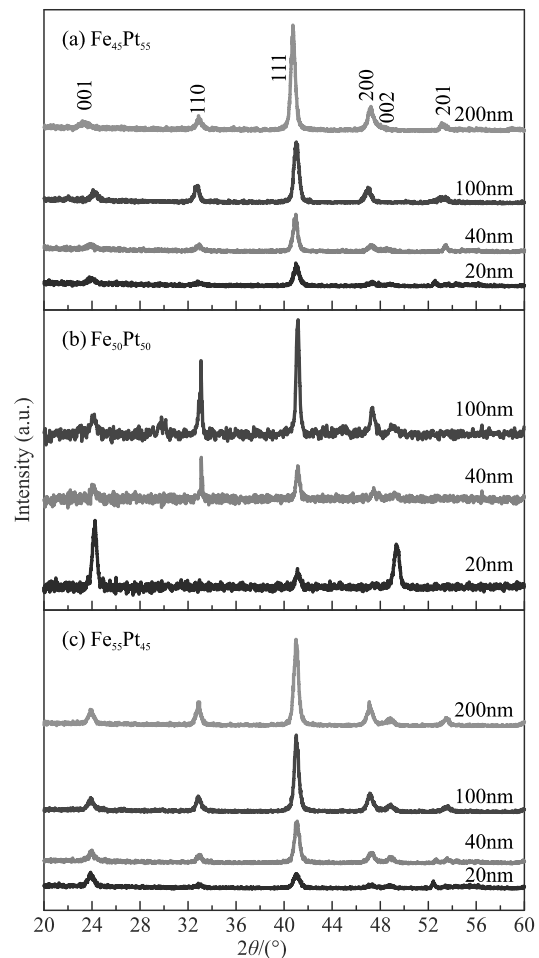
3.4 Fe/Pt 原子比的影响

本实验制备了不同厚度(20~200 nm)和不同 Fe 含量(45~55 at%)的 FePt 薄膜，研究了 Fe 含量对膜结构和磁性能的影响。制备态的薄膜分别在 500、600 和 700 °C 退火 1 h。

图 8 为不同厚度的 FePt 薄膜在 700 °C 热处理 1 h 的 XRD 谱。当 Fe/Pt 原子比为 45:55 和 55:45 时，从图 8a 和 8c 中可以看出，薄膜的(111)衍射峰的相对强度最高，并且随膜厚的增加，(111)衍射峰的相对强度呈逐渐增大的趋势。当 Fe/Pt 原子比为 45:55 时，样品仅出现了很弱的超晶格(001)、(110)衍射峰；同时，Fe₄₅Pt₅₅ 薄膜的(002)峰很弱，几乎为零，说明晶格参数 c 和 a 近似相同，此时薄膜仍然以无序的 fcc-FePt 相为主，说明富 Pt 的 FePt 薄膜具有相对较差的有序化程度。而 Fe/Pt 原子比为 55:45 的样品出现了非常强的超晶格(001)、(110)衍射峰；同时，(200)

图 7 700 °C 退火 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜平行和垂直膜面的矫顽力与退火时间的关系

峰分裂为小角度的(200)和大角度的(002)峰，这意味着 FePt 的晶格参数 c 缩小、 a 轴拉伸，晶体结构由 fcc-FePt 相向 fct-FePt 相转变，薄膜中形成了大量的 L₁₀ 有序结构，说明富 Fe 的 FePt 薄膜具有相对较高的有序化程度。也就是说，富 Fe 的 FePt 薄膜更有利于形成有序的 L₁₀ 相。

图 8 不同厚度、不同 Fe/Pt 原子比的 FePt 薄膜的 XRD 谱：(a) Fe₄₅Pt₅₅，(b) Fe₅₀Pt₅₀，(c) Fe₅₅Pt₄₅

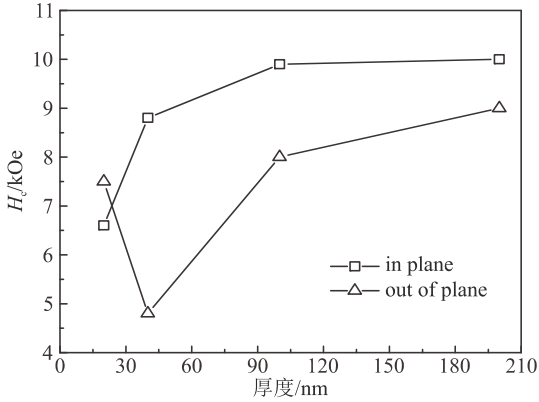


图 9 700 °C 退火 1 h Fe₅₀Pt₅₀ 薄膜平行和垂直膜面方向的矫顽力随膜厚的变化

对于 Fe/Pt 原子比为 50:50 的 FePt 薄膜(图 8b), 当膜厚为 20 nm 时, 超晶格(001)和(002)衍射峰的相对强度很高, 而(111)衍射峰的相对强度很弱, 说明此时薄膜具有(001)垂直取向。当膜厚从 20 nm 增加到 100 nm, (001)和(002)衍射峰的相对强度迅速降低, 而(111)和(200)衍射峰的相对强度逐渐增强, 并且占主导地位。当进一步增加膜厚, 为了减小 FePt 薄膜的表面能, 并且(111)面是 L1₀-FePt 的密排面, 所以薄膜逐渐发展为(111)取向。结果表明, 当 FePt 薄膜中 Fe/Pt 原子比为 50:50 时, (001)取向可以在膜厚较薄(20~40 nm)的样品获得。FePt 薄膜越薄, 由于薄膜与 Si 基底之间的应变或应力能越小, 因此能够更好地沿垂直膜面方向生长^[18]。

图 9 为 700 °C 退火 1 h Fe₅₀Pt₅₀ 薄膜平行膜面方向和垂直膜面方向的矫顽力随膜厚的变化。矫顽力的测量误差为 1%。在膜厚为 20 nm 时, 垂直膜面方向的矫顽力大于平行膜面方向的, 但是随着膜厚增加平行膜面方向的矫顽力就超越了垂直膜面方向的, 这与图 8 中的 XRD 谱是一致的。当薄膜厚度大于 20 nm, 垂直膜面方向的矫顽力却小于平行膜面方向的矫顽力, 表明较厚的薄膜不利于 (001)取向获得。因此, 我们可以得出结论, L1₀-FePt 的垂直取向不仅与 Fe/Pt 原子比有关, 同时还与膜厚相关。

图 10 为不同 Fe/Pt 原子比的薄膜在 700 °C 热处理 1 h 后平行膜面方向的矫顽力随膜厚的变化。从图中可以看出, 在膜厚小于 100 nm 时, 矫顽力随厚度的增加迅速增大, 当膜厚大于 100 nm 时, 矫顽力的变化趋于平稳。可见, 在薄膜较薄时, 厚度对矫顽力的影响较大, 这是由于在膜厚较薄时, 有序化相对较困难, 此时薄膜的有序化是影响矫顽力大小的

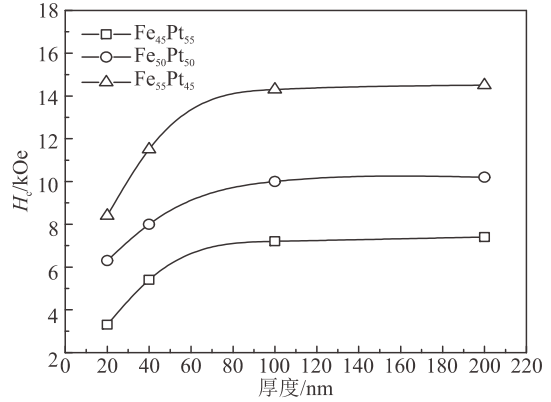


图 10 不同 Fe/Pt 原子比 700 °C 退火 1 h 的薄膜平行膜面方向的矫顽力随膜厚的变化

决定因素。在薄膜较厚时, 有序化相对较容易, 有序化程度相对较高, 所以厚度对矫顽力的影响相对较小。当 Fe/Pt 原子比为 55:45 时, 矫顽力最大, 这是由于富 Fe 的 FePt 薄膜具有相对较高的有序化程度, 所以矫顽力最大^[19]。

图 11 为 Fe₄₅Pt₅₅ 和 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜(厚度为 100 nm) 在不同温度退火 1 h 的 XRD 谱。在 600 °C 热处理 1 h 后, 只有 Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜出现了超晶格(001)、(002)、(201)衍射峰, 而且(200)和(002)衍射峰分离开了, 说明有序化程度已经很高了。在 700 °C 热处理后, Fe₅₅Pt₄₅

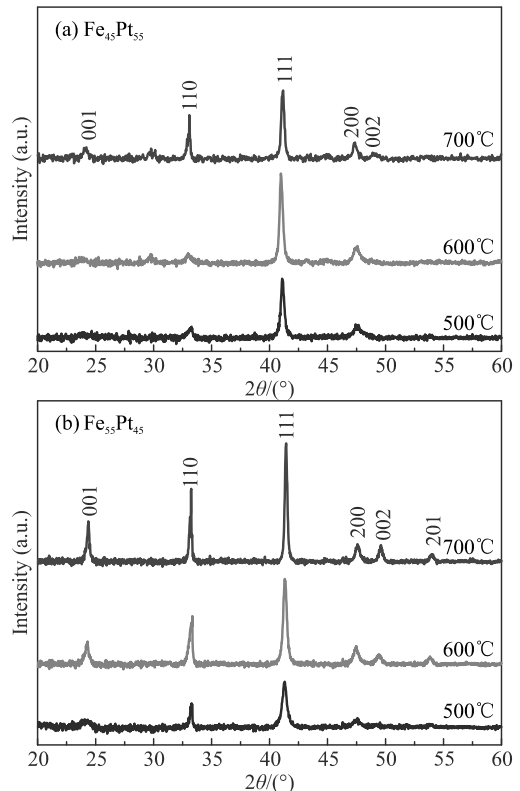


图 11 不同 Fe/Pt 原子比、不同热处理温度 FePt 薄膜在的 XRD 谱: (a)Fe₄₅Pt₅₅, (b)Fe₅₅Pt₄₅

薄膜的超晶格衍射的相对强度更加明显, 而 Fe₄₅Pt₅₅ 薄膜只出现了很弱的超晶格(001)和(002)衍射峰。表明在低温热处理时, Fe₅₅Pt₄₅ 薄膜的有序化程度比 Fe₄₅Pt₅₅ 薄膜的高。

4 结论

本文利用磁控溅射方法在 Si 基片上制备一系列 FePt 连续薄膜, 然后进行后续热处理以实现相转变, 研究了膜厚、热处理温度和热处理时间, Fe/Pt 原子比对薄膜结构和磁性能的影响, 得出以下结论:

(1)膜厚对 FePt 薄膜的有序度及磁性能有着很显著的影响, 膜厚越厚, 有序化程度越高, 矫顽力越高。

(2)FePt 连续膜的有序化转变温度在 500 °C 左右。退火温度和时间均会对薄膜的有序化和磁性能产生显著影响。随着退火温度的升高和退火时间的延长, 薄膜的矫顽力逐渐增大。

(3)富 Fe 的 FePt 薄膜具有相对较高的有序化程度, 更有利于形成有序的 L₁₀ 相。Fe 和 Pt 的原子比为 55:45 时, 有序化程度最高, 矫顽力最大, 平行膜面的矫顽力达 14.2 kOe。

(4)FePt 薄膜中 Fe 含量为 50 at%时, 在膜厚为 20 nm 时可以获得(001)垂直取向。影响 L₁₀-FePt 垂直取向的因素不仅与膜厚有关, 同时还与 Fe/Pt 原子比相关。

参考文献:

- [1] Wood. The feasibility of magnetic recording at 1 terabit per square inch [J]. IEEE Trans Magn, 2000, 36(1): 36-42.
- [2] Weller D, Moser A, Folks L, et al. High K_u materials approach to 100 Gbits/in² [J]. IEEE Trans Magn, 2000, 36: 10-15.
- [3] Li Y B, Lou Y F, Zhang L R, et al. Effect of magnetic field annealing on microstructure and magnetic properties of FePt films [J]. J Magn Magn Mater, 2010, 322: 3789-3791.
- [4] Yao B, Coffey K R. Quantification of L₁₀ phase volume fraction in annealed [Fe/Pt]_n multilayer films [J]. J Appl Phys, 2009, 105: 033901-033908.
- [5] Farrow R F C, Weller D, Marks RF, et al. Magnetic anisotropy and microstructure in molecular beam epitaxial

FePt(110)/MgO(110) [J]. J Appl Phys. 1998, 84(2): 934-939.

- [6] Endo Y, Kikuchi N, Kitakami O, et al. Lowering of ordering temperature for fct Fe-Pt in Fe-Pt multilayers [J]. J Appl Phys, 2001, 89(11): 7065-7067.
- [7] Shimada Y, Sakurai T, Miyazaki T, et al. Fabrication of two-dimensional assembly of L₁₀ FePt particles [J]. J Magn Magn Mater, 2003, 262(2): 329-338.
- [8] Maeda T, Kai T, Kikitsu A, et al. Reduction of ordering temperature of a FePt-ordered alloy by addition of Cu [J]. Appl Phys Lett, 2002, 80(12): 2147-2149.
- [9] Kitakami O, Shimada Y, Oikawa K, et al. Low-temperature ordering of L₁₀-CoPt thin films promoted by Sn, Pb, Sb, and Bi additives [J]. Appl Phys Lett, 2001, 78(8): 1104-1106.
- [10] Yan Q, Kim T, Purkayastha A, et al. Enhanced chemical ordering and coercivity in FePt alloy nanoparticles by Sb-doping [J]. Adv Mater, 2005, 17(18): 2233-2237.
- [11] Zhu Y, Cai J. Low-temperature ordering of FePt thin films by a thin AuCu underlayer [J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(3): 032504.
- [12] Xu X H, Wu H S, Wang F, et al. The effect of Ag and Cu underlayer on the L₁₀ ordering FePt thin films [J]. Appl Surf Sci, 2004, 233(1): 1-4.
- [13] Wang H Y, Mao W H, Sun W B, et al. High coercivity and small grains of FePt films annealed in high magnetic fields [J]. J Phys D: Appl Phys, 2006, 39(9): 1749-1753.
- [14] Ravelosona D, Chappert C, Mathet V, et al. Chemical order induced by ion irradiation in FePt (001) films [J]. Appl Phys Lett, 2000, 76(2): 236-238.
- [15] Fang Y H, Kuo P C, Sun A C, et al. Microstructure and magnetic properties of FePt-SiNx thin films [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 5181-5184.
- [16] Wierman K, Platt C, Howard J, et al. Evolution of stress with L₁₀ ordering in FePt and FeCuPt thin films [J]. J Appl Phys, 2003, 93(10): 7160-7162.
- [17] 李宝河. 高磁晶各向异性磁记录介质 FePt 薄膜的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2005.
- [18] Lim B C, Chen J S, Wang J P. Thickness dependence of structural and magnetic properties of FePt films [J]. J Magn Magn Mater, 2004, 271: 431-436.
- [19] Li B H, Feng C, Yang T, et al. Effect of composition on L₁₀ ordering in FePt and FePtCu thin films [J]. J Phys D: Appl Phys, 2006, 39: 1018-1021.

作者简介: 刘 静(1987-), 女, 湖北武汉人, 硕士, 讲师, 研究方向为材料工程。