

# 非晶 TbCo/Si 多层膜的磁性和磁光特性

陈 熹 王荫君 梁冰青 王 晶 李 健

(中国科学院物理研究所与凝聚态物理中心磁学国家重点实验室, 北京 100080)

(1999 年 6 月 10 日收到)

利用射频磁控溅射方法制备了非晶 TbCo/Si 多层膜, 并对多层膜的磁性和磁光特性进行了测量. 实验发现, 随着 Si 层厚度的增加, 非晶 TbCo/Si 多层膜的饱和磁化强度  $M_s$ 、垂直各向异性常数  $K_u$ 、磁光克尔角  $\theta_K$  都显著下降. 分析认为这是由于在 TbCo 层与 Si 层之间的层间互扩散形成了非磁性的  $\text{Co}_2\text{Si}$  所致.

PACC: 7570

## 1 引 言

自从在磁性多层膜中发现层间反铁磁(AF)耦合以来, 由于具有潜在的应用前景, 因此人们对此进行了大量的研究. 最近在 Fe/Si 体系中发现反铁磁耦合在低温下变成铁磁耦合<sup>[1]</sup>, 并且可以通过激光辐照诱导变回反铁磁耦合<sup>[2]</sup>. 类似的现象在 Fe/Ge 体系中也有报道<sup>[3]</sup>. 理论认为由于热激发或者光激发引起半导体层中载流子浓度发生变化, 从而影响层间的交换耦合<sup>[4]</sup>.

然而, 对铁磁、反铁磁耦合转变的研究仅限于上述两种材料体系. 在新的材料体系中, 特别是具有垂直各向异性的材料体系中是否也存在这种转变呢? 这是个值得探讨的问题. 因此我们将注意力集中于非晶稀土过渡族合金(a-RE-TM)和非晶 Si 的多层膜之上. a-RE-TM 薄膜的一个显著特征就是具有较大的垂直各向异性, 人们对其垂直各向异性产生的机理研究得很广泛, 提出了许多理论, 例如: 单离子(signal-ion)模型<sup>[5]</sup>、偶极对(pair ordering)模型<sup>[6,7]</sup>、成键取向各向异性(bond orientational anisotropy)模型<sup>[8]</sup>、结构各向异性<sup>[9]</sup>及各向异性对关联模型(anisotropic pair correlations)<sup>[10]</sup>等.

## 2 实验方法

我们采用射频磁控溅射方法制备了非晶  $\text{Tb}_{0.17}\text{Co}_{0.83}/\text{Si}$  多层膜. 薄膜样品沉积在用水冷却的玻璃基片表面, 溅射时氩气气压为 0.6 Pa, 本底真空度优于  $5 \times 10^{-5}$  Pa. 非晶 TbCo/Si 多层膜中 TbCo 层的设定厚度  $d_0$  固定为 3.0 nm, Si 层设定厚度  $t_{\text{Si}}$  的变化范围为 0.1—2.1 nm, 多层膜的调制周期为 30.

样品的成分通过电感耦合等离子体发射光谱仪进行分析, 磁滞回线和垂直各向异性常数的测量分别使用交流梯度样品磁强计和磁转矩仪, 磁光克尔效应及克尔回线是用磁

光克尔测试仪测量的.

### 3 结果及讨论

图 1 给出了  $t_{\text{Si}}=0.47 \text{ nm}$  样品的 X 射线衍射谱. 从图中可以看到, 在小角区域内有两个明显的布拉格衍射峰(图 1(a)), 这表明样品具有较好层状结构. 由于样品是非晶薄膜, 因此没有大角布拉格衍射峰(图 1(b)). 所有样品都具有类似的衍射谱. 根据小角布拉格衍射峰算出多层膜的周期长度比我们设定的周期长度要小, 这表明 TbCo 层与 Si 层之间存在着互扩散和合金化现象.

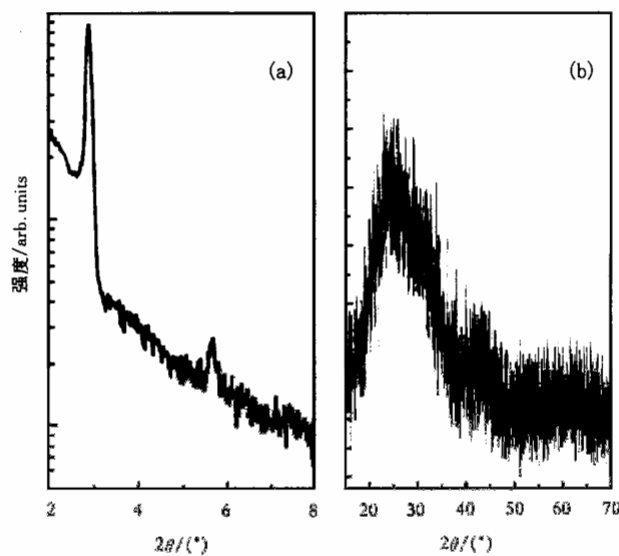
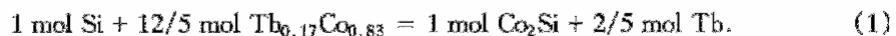


图 1 Si 层厚度设定为 0.47 nm 样品的 X 射线衍射谱 (a) 为小角, (b) 为大角

由样品的磁滞回线和磁光克尔回线得出样品的剩磁比接近于 1, 这表明在非晶 TbCo/Si 多层膜样品中不存在层间的反铁磁耦合.

从样品的磁滞回线可以得到样品的饱和磁化强度  $M_s$ , 如图 2 所示. 由图 2 可以看出,  $M_s$  随  $t_{\text{Si}}$  的增大呈近似线性地减小, 我们认为这是层间互扩散和合金化造成的. Co 和 Si 很容易化合形成合金, Ruterana 等<sup>[11]</sup>认为, 在 Co/Si 界面的合金成分主要是  $\text{Co}_2\text{Si}$ . 因此我们假设在 TbCo 层和 Si 层的界面上由于互扩散, 反应形成  $\text{Co}_2\text{Si}$  和 Tb 的合金层, 反应方程可表示为



为了得到  $M_s$  随  $t_{\text{Si}}$  变化的关系, Liu 等<sup>[12]</sup>在 (Fe-Si)/Si 非晶膜中提出了“死层”模型, 将界面合金层等效成一个非磁性“死层”. 利用“死层”模型, 从反应方程(1)出发, 我们可以得到磁性层的有效厚度

$$d_m = d_0 - 12t_{\text{Si}}V_{\text{TbCo}}/5V_{\text{Si}}, \quad (2)$$

则

$$M_s = M_0(1 - 12t_{Si}V_{TbCo}/5d_0V_{Si}), \quad (3)$$

其中  $V_{TbCo}$  和  $V_{Si}$  分别是 TbCo 和 Si 的摩尔体积,  $M_0$  是纯 TbCo 层的饱和磁化强度. 将  $M_0 = 2.25 \times 10^5 \text{ A/m}$ ,  $d_0 = 3.0 \text{ nm}$ ,  $V_{Si} = 12.1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ,  $V_{TbCo} = 8.72 \text{ cm}^3/\text{mol}$  (Tb 和 Co 摩尔体积的加权平均值) 代入上式, 其结果 (图 2 中的虚线) 与实验符合得很好.

图 3 显示出样品的垂直各向异性常数  $K_u$  随着  $t_{Si}$  的增大而迅速减小.

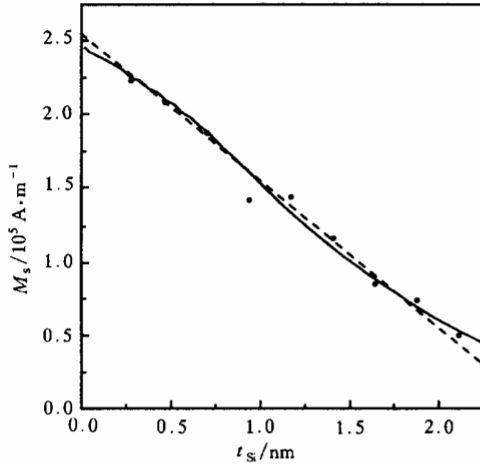


图 2 饱和磁化强度  $M_s$  随 Si 层厚度  $t_{Si}$  的变化关系 图中的圆点是实验测量结果, 虚线是“死层”模型拟合结果, 实线是高斯扩散分布拟合结果

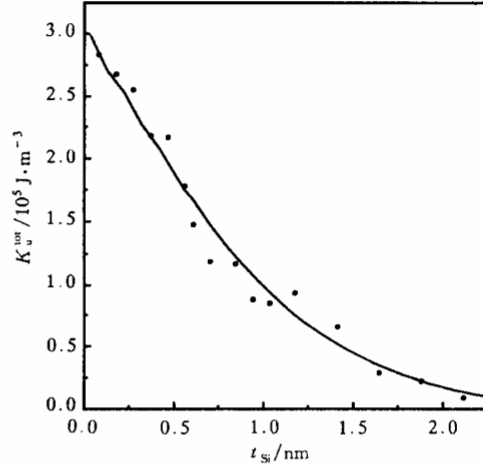


图 3 垂直各向异性常数  $K_u$  随 Si 层厚度  $t_{Si}$  的变化关系 图中的圆点是实验测量结果, 实线是偶极对模型拟合结果

Cargill 和 Mizoguchi<sup>[6]</sup> 基于偶极对模型, 考虑了两个磁性原子之间经典的偶极作用, 给出 a-RE-TM 薄膜垂直各向异性常数  $K_u$  的表达式

$$K_u = \frac{3ZpX_A X_B}{5N} \times \left[ \left( \frac{M_A}{X_A} \right)^2 f_{AA} + 2 \left( \frac{M_A M_B}{X_A X_B} \right) f_{AB} + \left( \frac{M_B}{X_B} \right)^2 f_{BB} \right], \quad (4)$$

其中下标 A, B 分别对应于 Tb 和 Co 两个磁格子, Z 是原子的最近邻原子数, p 是与偶极对取向相关的常数, N 是单位体积的原子数,  $X_i$  和  $M_i$  分别对应于 i 型磁格子的原子百分比含量和磁化强度,  $f_{ij}$  是 i, j 原子间的相互作用参数 (仅考虑了偶极作用). Twarowski 等<sup>[13]</sup> 进一步考虑了稀土原子和过渡族原子间的 RKKY 作用, 在  $f_{ij}$  中加入了 RKKY 作用项

$$f_{ij} = r_{ij}^{-3} + B_{ij} r_{ij}^{-4} [2k_F r_{ij} \cos(2k_F r_{ij}) - \sin(2k_F r_{ij})], \quad (5)$$

其中  $r_{ij}$  是最近邻 i, j 原子的距离,  $k_F$  是费米波矢,  $B_{ij}$  是与 RKKY 作用强度相关的参数 (过渡族原子间无 RKKY 作用, 因此  $B_{BB} = 0$ ). Wang 等<sup>[14]</sup> 基于此模型拟合了非晶 Tb-Fe-Co 薄膜的垂直各向异性随温度的变化, 与实验结果基本吻合.

由于互扩散, TbCo 层的成分是不均匀的. 假设 TbCo 和 Si 在界面层上的原子浓度分布可以用高斯函数表示, 并且互扩散反应中形成的  $\text{Co}_2\text{Si}$  和 Tb 对磁化强度和各向异性没有贡献, 则我们就可以用计算机计算出在膜内某一点处对磁化强度和各向异性有贡献的

Tb, Co 原子数  $n_{Tb}$  和  $n_{Co}$ , 由此可以算出两个磁晶格的磁化强度  $M_A, M_B$  及样品饱和磁化强度  $M_s$ . 将计算所得的  $M_A, M_B, n_{Tb}, n_{Co}$  代入(4)式, 就可以求出该处的各向异性常数  $K_u$ . 样品总的各向异性常数  $K_u^{tot}$  等于 TbCo 层内各点各向异性常数的平均值

$$K_u^{tot} = \int K_u(z) dz / d_0. \quad (6)$$

将文献[14]中相关的参数代入(6)式, 利用计算机拟合得到样品的垂直各向异性常数  $K_u^{tot}$  随  $t_{Si}$  变化的关系(如图 3 中的实线所示)与实验结果基本相符. 图 2 中的实线还给出了用高斯函数分布拟合互扩散计算出的样品  $M_s$  与  $t_{Si}$  的关系, 可以看到由“死层”模型和由高斯分布模型得到的结果基本上是一致的.

图 4 示出样品的磁光克尔角  $\theta_K$  随  $t_{Si}$  的增加而线性下降. 图 5 给出三个样品 ( $t_{Si} = 0.28, 0.47, 0.94$  nm) 以及单层 TbCo 膜的克尔谱. 随着光波波长的减小, 样品的磁光克尔角单调下降.

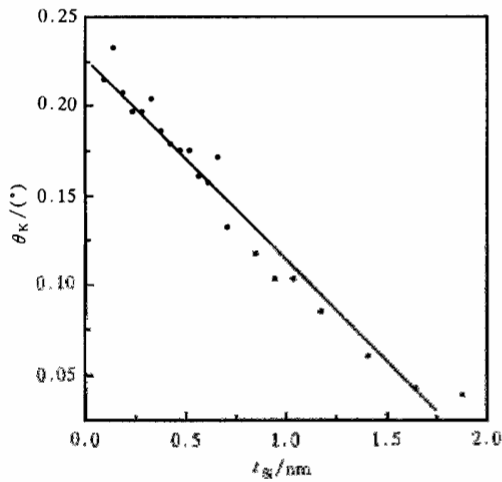


图 4 磁光克尔角  $\theta_K$  随 Si 层厚度的变化关系

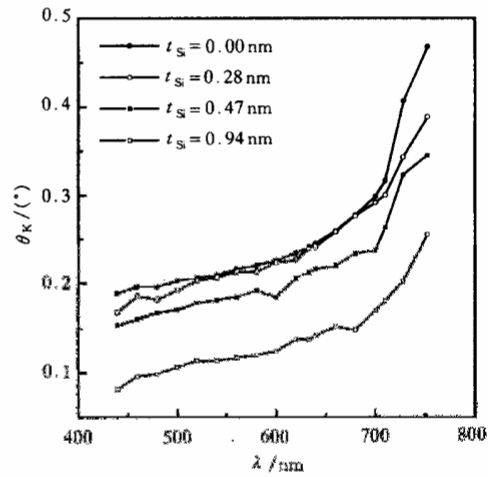


图 5  $t_{Si} = 0.28, 0.47, 0.94$  nm 样品以及单层 TbCo 膜的克尔谱

Zak 等<sup>[15]</sup>提出, 在多层膜中介质的传播矩阵和边界矩阵共同作用对复数磁光参数产生影响. 在薄膜近似下, 复数磁光克尔参数可以写成

$$r_{ps} = r_{sp} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{N_i}{(N_i + N_f)^2} \sum N_m^2 Q_m d_m, \quad (7)$$

$$r_{ss} = \frac{N_f - N_i}{N_f + N_i}, \quad (8)$$

$$r_{pp} = \frac{N_f - N_i}{N_f + N_i},$$

其中求和是对所有磁性层进行的,  $N_i, N_f, N_m$  分别是起始层、末层和磁性层的折射因子,  $Q_m$  是磁性层的磁光常数. 复数克尔角为

$$\begin{aligned}\phi_s &= \frac{r_{ps}}{r_{ss}} = \phi'_s + i\phi''_s, \\ \phi_p &= \frac{r_{sp}}{r_{pp}} = \phi'_p + i\phi''_p.\end{aligned}\tag{9}$$

将(2), (7), (8)式代入(9)式, 我们可以得到复数克尔角与  $t_{Si}$  的线性关系.

## 4 结 论

对非晶 TbCo/Si 多层膜磁性和磁光性能的研究分析表明, TbCo 和 Si 层之间的互扩散直接导致了样品的饱和磁化强度  $M_s$ 、垂直各向异性常数  $K_u$  和磁光克尔角  $\theta_K$  随着 Si 层厚度  $t_{Si}$  的增加而下降.

- [1] B. Briner, M. Landolt, *Phys. Rev. Lett.*, **73**(1994), 340.
- [2] J. E. Mattson, S. Kumar, E. E. Fullerton, S. R. Lee, C. H. Sowers, M. Grimsditch, S. D. Bader, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993), 185.
- [3] P. Walser, M. Schlegel, P. Fuchs, M. Landolt, *Phys. Rev. Lett.*, **80**(1998), 2217.
- [4] Z. P. Shi, B. M. Klein, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996), 4776.
- [5] Y. Suzuki, S. Takayama, F. Kirino, N. Ohta, *IEEE Trans. Magn.*, **23**(1987), 2275.
- [6] G. S. Cargill, T. Mizoguchi, *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 1753; T. Mizoguchi, G. S. Cargill, *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 3570.
- [7] H. Fu, M. Mansuripur, P. Meystre, *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 1086.
- [8] X. Yan, M. Hirscher, T. Egami, E. E. Marinero, *Phys. Rev.*, **B43**(1991), 9300.
- [9] V. G. Harris, K. D. Aylesworth, B. N. Das, W. T. Elam, N. C. Koon, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992), 1939.
- [10] R. J. Gambino, J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**(1978), 296.
- [11] P. Ruterana, P. Houdy, P. Boher, *J. Appl. Phys.*, **63**(1990), 1033.
- [12] Y. H. Liu, X. D. Ma, L. M. Mei, *J. Phys.: Condens. Matter*, **3**(1991), 3571.
- [13] K. Twarowski, H. K. Lachowicz, M. Gutowski, H. Szymczak, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **63**(1981), 103.
- [14] Y. J. Wang, Q. W. Leng, *Phys. Rev.*, **B41**(1990), 651.
- [15] J. Zak, E. R. Moog, C. Liu, S. D. Bader, *J. Magn. Magn. Mater.*, **89**(1990), 107.

## THE MAGNETIC AND MAGNETO-OPTIC PROPERTIES OF THE AMORPHOUS TbCo/Si MULTILAYERS

CHEN XI WANG YIN-JUN LIANG BING-QING WANG JING LI JIAN

(State Key Laboratory for Magnetism, Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 10 June 1999)

### ABSTRACT

The  $\text{Tb}_{0.17}\text{Co}_{0.83}/\text{Si}$  multilayers prepared by a rf magnetron sputtering system with different Si thickness have been investigated. X-ray diffraction, magnetic measurement and Kerr rotation have been performed. With increasing thickness of Si layer  $t_{\text{Si}}$ , the perpendicular anisotropy constant  $K_{\text{u}}$  decreased rapidly. The saturation magnetization  $M_{\text{s}}$  and the Kerr rotation  $\theta_{\text{K}}$  decreased linearly when  $t_{\text{Si}}$  increased. It was assumed that  $\text{Co}_2\text{Si}$  and Tb had been formed in the interfacial zone between TbCo and Si layers. The reduction of  $K_{\text{u}}$ ,  $M_{\text{s}}$  and  $\theta_{\text{K}}$  is attributed to the decrease of the effective thickness of magnetic layer, which is linear with  $t_{\text{Si}}$ .

**PACC:** 7570