

文章编号 : 0253-2239(2001)09-1144-04

PtMn/Co 多层薄膜结构及磁光克尔效应的研究

周 勋¹⁾²⁾ 梁冰青¹⁾ 王 海¹⁾ 唐云俊¹⁾

樊金华²⁾ 龚伦训²⁾ 王荫君¹⁾ 陈良尧³⁾

(1) , 中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室 , 北京 100080)
(2) , 贵州师范大学物理系 , 贵阳 550001
(3) , 复旦大学物理系 , 上海 200433

摘要 : 用磁控溅射法制备了不同 Mn 含量的 PtMn/Co 多层膜 , 通过大、小角 X 射线衍射谱对该多层膜进行结构分析 , 研究了该多层膜的层状结构同磁光克尔效应的关系 , 通过测定该多层膜在不同杂质浓度下的克尔谱、椭圆率谱及克尔回线 , 发现克尔角随 Mn 含量增加的变化规律 , 并分析了它的产生机制。

关键词 : 磁光特性 ; X 射线衍射 ; 克尔效应

中图分类号 : O484.4⁺1 文献标识码 : A

1 引 言

Pt/Co 多层膜有很强的垂直各向异性 , 矫顽力与温度相关且反射率高 , 当 Co 层厚度在 0.3 nm、Pt 层厚度在 1 nm 左右时 , 其在短波段 (蓝光) 有很大的磁光克尔效应 , 成为新一代存储材料的候选物被广泛研究。近来人们采用在 Pt (或 Pd) 层中掺杂的方法 , 改变和提高 Pt/Co 多层膜的磁光性能。主要工作有 : 1) 将 Au 掺入 Pd/Co 多层膜的 Pd 层形成的 PdAu/Co 体系中 , 引起极向克尔角的微小增加^[1] ; 2) PtCu/Co 和 PtAl/Co 多层膜体系分别在 770 nm 和 680 nm 处克尔角相对于纯 Pt/Co 有一明显增强 , 最大增强幅度达 20%^[2~4] , 且这种增强随掺杂原子浓度出现振荡 ; 3) PtAg/Co 多层膜在 770nm 处 , 其克尔角相对于纯 Pt/Co 有微弱增强^[2]等。但是以上工作其克尔角的增强和振荡都出现在长波范围。此外 , 磁光效应提供了磁性材料电子态结构的信息。从理论上计算磁光效应时 , 须考虑自旋极化和自旋-轨道耦合 , 得出介电张量的对角元和非对角元 , 因为它们与由于自旋-轨道耦合和交换劈裂所引起的能带结构的微小变化紧密相关 , 最终把磁光现象和自旋结合的能带结构特性联系起来。所以研究掺杂后 Pt (Pd) Co 多层膜的磁光性能对该种磁光介质材料的应用是有重要意义的。

对磁性元素掺入非磁性的 Pt (或 Pd) 层中产生

的磁光效应的研究 , 目前开展得较少 , 若能用掺杂的方法将克尔角增强和将振荡移到短波区 , 将具有较大的应用潜力。本文利用磁控溅射 , 在 Pt/Co 多层膜的 Pt 层中掺入磁性元素 Mn^[5] , 形成 Pt_{1-x}Mn_x/Co 多层膜系列 , 用大、小角 X 光衍射谱反映其结构 , 研究了该体系随 Mn 含量增加的磁光克尔效应。

2 实验方法

Pt_{1-x}Mn_x/Co (Mn 的质量分数 $x = 0 \sim 0.0134$) 多层膜采用直流磁控溅射台溅射沉积到水冷的玻璃基片上制成。本底真空为 5.0×10^{-5} Pa , 溅射时通以 99.99% 的高纯 Ar 气 , 气压为 1 Pa。通过调节复合靶中 Mn 相对于 Pt 靶的面积来控制 Mn 的含量。样品长在 56 nm 的 Pt 或 Pt_{1-x}Mn_x 缓冲层上 , 样品为 Pt_{1-x}Mn_x (56 nm) [Co (0.3 nm) Pt_{1-x}Mn_x (1.2 nm)]₂₀。其中 0.3 nm 和 1.2 nm 为每单层 Co 膜和 PtMn 膜的厚度 , 调制周期数为 20。用 SPMD3 型表面轮廓膜厚仪来测定膜厚 , 且与 X 光小角衍射的结果相互验证 , 确定溅射速率 , 制备过程由计算机监控。

采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Thermo Jarrel-Ash Corp. , IRIS/AP) 测定 Mn 在 Pt 层中的原子含量百分比。用小角和大角 X 射线衍射来分析样品的调制周期和晶体结构。使用交流梯度磁强计测量磁性参数 , 在室温饱和磁场 $79577 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 下 , 用磁光克尔谱仪测量在 1.5 eV ~ 4.5 eV 范围内的

克尔谱、椭圆率谱和克尔回线。用于掺杂的纯 Pt/Co 多层膜的垂直各向异性常数 $K_u = 7 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ ，矫顽力 $H_c = 19098.48 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ，样品垂直膜面时的剩磁比 $M_r/M_s = 1$ (M_r 为剩磁， M_s 为饱和磁化强度)室温下波长 630 nm 时极向克尔角 $\theta_k \approx 0.24^\circ$ 。

3 分析和讨论

3.1 $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Co}$ 多层膜的 X 射线衍射分析

X 射线分析的目的是获得样品结构有序性的信息， $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Co}$ 多层膜的大小角 X 光衍射谱示于图 1，图中 2θ 角为 X 射线的布拉格衍射角。对于纯 Pt/Co，它有两个小角峰，分别在 $2\theta = 5.7^\circ、11.8^\circ$ 附近，且小角峰并不随 Mn 含量的增加而移动，由此可推断出该多层膜调制周期为 1.54 nm，与设计的 $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Co}$ 的调制周期 1.5 nm 十分接近，掺杂后膜层厚度及调制周期结构基本不变，且样品具有良好的原子层状生长特性和化学成分调制周期结构。随 Mn 含量的增加，第二个小角峰消失，说明 Mn 原子掺入界面影响了样品界面的磁各向异性。

示于图 2。

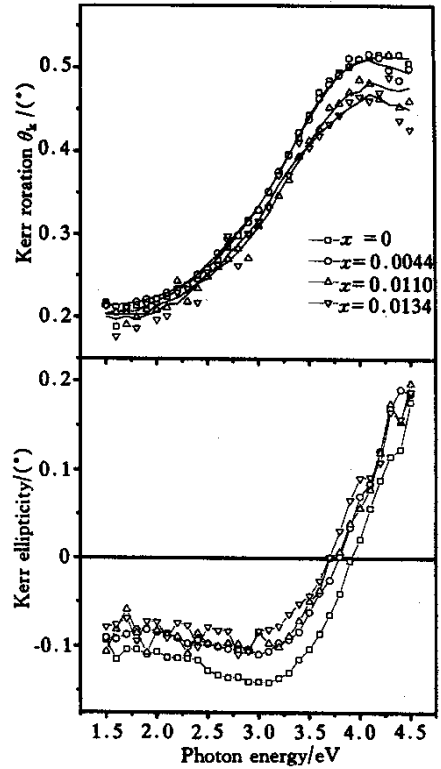


Fig.2 The Kerr spectrum and ellipticity spectrum for $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x(56 \text{ nm})[\text{Co}(0.3 \text{ nm})\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x(1.2 \text{ nm})]_{10}$ multilayers

随着入射光子能量的增加， $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Co}$ 系列样品的克尔角增大，克尔谱的形状基本不变，并在光子能量约为 4 eV 处出现克尔峰包。样品克尔角的峰值与各自的椭圆率零值几乎在同一位置(4 eV 左右)，符合克拉默斯-克勒尼希关系^[7]，说明实验数据是可靠的。克尔谱峰包起源于多层膜界面处，由于 Co 层诱导，Pt 原子层界面自旋轨道耦合增强(Pt 层内部的原子对自旋轨道耦合没有多大影响)。界面处 Pt 的 5d 能级的自旋极化和交换作用引起的能级分裂，使自旋能带被占据的初态和未被占据的终态间的跃迁发生了改变，出现增强的磁光克尔效应^[8]。从多层膜的克尔谱图中可以看到：

1) 克尔谱峰位随 Mn 含量的增加略向高能端侧移动。

Pt 原子受到磁性原子的极化作用而产生自旋，与轨道相互耦合导致 Pt 的 5d 能带发生劈裂是 Pt/Co 多层膜在短波段具有增强磁光克尔效应的物理起源。如果将峰位的出现归因于 Pt 原子 5d 能带发生劈裂后产生的带间跃迁，则峰位的移动应是 Pt-5d 能带劈裂程度的大小的表现。 $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Co}$ 多层膜体系中，当 x 不同时，Pt 原子的极化是不同

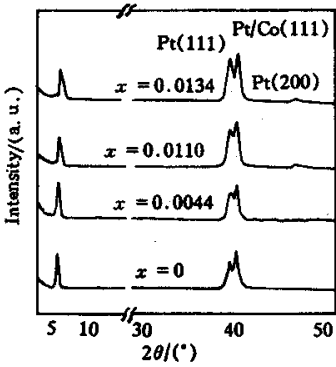


Fig.1 The small-and large-angle X-ray diffraction patterns for $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x(56 \text{ nm})[\text{Co}(0.3 \text{ nm})\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x(1.2 \text{ nm})]_{10}$ multilayers

从大角衍射谱上可以看到 Pt(111)峰、PtCo(111)峰和较弱的 Pt(200)峰，分别对应 $2\theta = 39.6^\circ、40.65^\circ$ 和 45.95° ，三个峰的位置不随 Mn 含量的增加而移动。这里 Pt(111)峰和 Pt/Co(111)峰最强，说明 Pt/Co 多层膜有良好的(111)织构，整个膜沿(111)方向生长，样品有良好的垂直各向异性^[6]。当 Mn 的含量增加后，改变了 Pt(111)峰与 Pt/Co(111)峰的相对强度，Pt/Co(111)峰增强，样品界面合金化有所加强。

3.2 $\text{Pt}_{1-x}\text{Mn}_x/\text{Co}$ 多层膜的磁光特性

采用磁光克尔谱仪测量了在入射光子能量为 1.5 eV ~ 4.5 eV 范围内样品的克尔谱和椭圆率谱，

的,当 x 增大时, Pt 层的费米面发生了变化, Pt 的自旋极化和自旋轨道耦合受到影响, 导致峰位向短波方向侧移。这与 He^[9]所做的 $Pt_{1-x}Fe_x/Co$ 多层膜体系的克尔效应有相似的结果。

2) 光子能量较低的波段, 样品的克尔角变化小, 随着光子能量的增加, 样品的克尔角明显增加; 在克尔峰包的区域, 掺杂浓度较小(如 $x \leq 0.0044$) 时, $Pt_{1-x}Mn_x/Co$ 多层膜样品的克尔角比纯 Pt/Co 多层膜略大, 掺杂浓度较大(如 $x > 0.0044$) 时, 样品的克尔角均比纯 Pt/Co 多层膜的小, 而总趋势是缓降的。

在大量的实验中发现, 在掺杂的 Pt/Co 或 Pd/Co 多层膜体系中存在许多类似的现象, 如 $Pt_{1-x}Ni_x/Co$ 多层膜, 当 $x < 0.0254$ 时, 体系的克尔角大于纯 Pt/Co 多层膜的; 当 $x > 0.0254$ 时, 体系的克尔角小于纯 Pt/Co 多层膜的, 且随掺杂量的增加而降低^[10]。

在光子能量较低的长波段, 克尔角主要由 Co 层的磁矩决定, 在本实验的所有样品中, Co 层的厚度是固定的, 因此观测到的克尔角变化不大; 在光子能量较高的短波段, 克尔角的大小强烈地依赖于 Pt 的极化或 Pt 的自旋轨道耦合, 极化对克尔角贡献很大, 使克尔角明显增强。理论和实验证明, 磁光克尔效应来源于费米面附近电子态之间的跃迁或原子能级的改变, 铁磁金属的磁光效应主要来源于微观电子的带内跃迁及带间跃迁, 带间跃迁主要在高能端起作用。通过计算, 克尔效应取决于介电张量中足够大的非对角元和足够小的对角元。当 Mn 原子浓度较小(如 $x \leq 0.0044$) 时, 高能区 $Pt_{1-x}Mn_x/Co$ 多层膜的克尔角比纯 Pt/Co 多层膜略大, 是由于此时克尔角的变化是由介电张量的对角元和非对角元以及光学常数(折射率和吸收率)相对于纯 Pt/Co 多层膜有较大变化造成的, 而当 Mn 原子掺入较多时, 改变了体系的传导电子浓度, 使费米面形状和费米能发生变化, 同时 Mn 原子及其与 Co 层之间可能存在类 RKKY(Ruderman Kittel Kasuya Yosida)交换作用耦合^[10], 导致 Pt 的极化和自旋轨道耦合下降, 其相对于纯 Pt/Co 多层膜而言介电张量的非对角元变化较大, 对角元则几乎不变, 使克尔角在高能区相对于纯 Pt/Co 多层膜减小。

Sato 等人^[11]测量了 Pt/Co 多层膜及其合金的克尔谱及椭圆率谱, 计算了相应的电导张量的对角元和非对角元, 发现 Pt/Co 多层膜与合金二者的电导张量非对角元十分相似, 所以 Pt/Co 多层膜的磁光效应来源于界面的合金化。

3.3 $Pt_{1-x}Mn_x/Co$ 多层膜磁光克尔回线分析

图 3 给出 $Pt_{1-x}Mn_x/Co$ 多层膜系列样品的与磁滞回线(图 4)相对应的磁光克尔回线, 从磁光克尔回线上可看出多层膜的克尔角随外场 H 的变化规律及 $Pt_{1-x}Mn_x/Co$ 多层膜的磁滞特性, 即随 Mn 含量的增加, 回线由较好的矩形逐渐变为峰腰状, 矩形比变差。磁滞回线则显示随 Mn 含量的增加, 剩磁比下降、矫顽力下降且垂直各向异性减小。磁光克尔回线显示这种变化也出现在类似的体系里, 如 $Pt_{1-x}Fe_x/Co$ 多层膜体系^[9]。

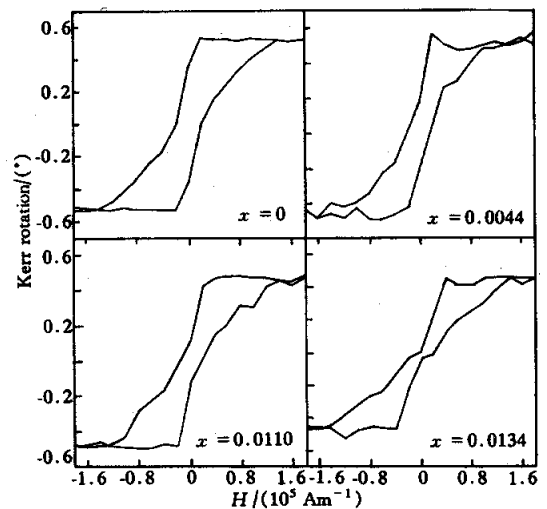


Fig.3 The Kerr loop for $Pt_{1-x}Mn_x(56 \text{ nm})[Co(0.3 \text{ nm})Pt_{1-x}Mn_x(1.2 \text{ nm})]_{n_0}$ multilayers

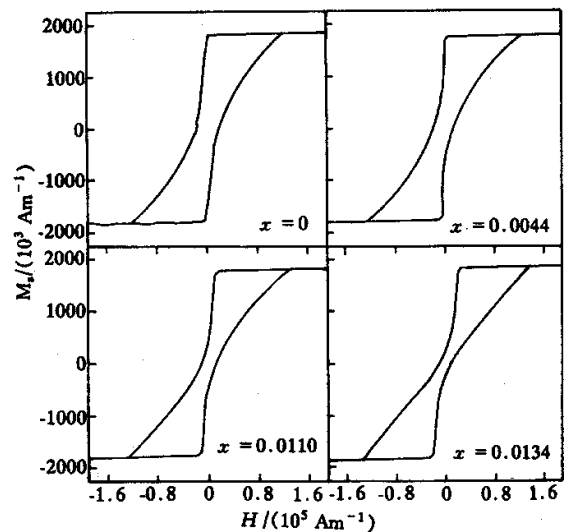


Fig.4 The magnetic hysteresis loop for $Pt_{1-x}Mn_x(56 \text{ nm})[Co(0.3 \text{ nm})Pt_{1-x}Mn_x(1.2 \text{ nm})]_{n_0}$ multilayers

结论 1) 通过 X 光衍射谱得到在 $Pt_{1-x}Mn_x/Co$ 体系中, 整个膜沿(111)生长。随 Mn 含量的增加, 界

面各向异性受到影响,膜层厚度及调制周期不变,多层膜体系中存在界面的合金化,磁光克尔效应来源于界面的合金化。2) 克尔谱中,低能端克尔角变化缓慢,高能端 Pt 原子的自旋极化和自旋轨道耦合增强,克尔谱出现增强峰,发现不同的 Mn 的掺杂量造成了相对于纯 Pt/Co 多层膜的克尔角的起伏,基于多层膜中极化的思想,探讨了这一现象的合理解释。

参 考 文 献

- [1] Ha Jaegun, Kyuno K, Yamamoto R. Magnetic anisotropy and magneto-optical Kerr effect of Co/Pd_{1-x}Au_x metallic multilayers. *J. Phys. :Condens. Matter*, 1996, **8**(6): 677~684
- [2] Wang Y J, Guo Z H, Zhu D K *et al.*. Kerr rotation enhancement and correlation between perpendicular anisotropy and Kerr effect in PtCu(Al, Ag)Co multilayers. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(7): 3957~3961
- [3] Li J, Ma P P, Wang Y J *et al.*. Oscillation of Polar Kerr rotation in PtCu/Co multilayers. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(8): 4442~4446
- [4] Ma P P, Zheng W, Wang A L *et al.*. Magneto-optical properties of PtCu/Co multilayers. *China Phys. Lett.*, 1998, **15**(5): 376~378
- [5] 冯 端. 固体物理学大辞典. 北京: 高等教育出版社, 1995. 157, 966
- [6] Lin C J, Gorman G L, Lee C H *et al.*. Magnetic and structural properties of Co/Pt multilayers. *J. Magn. Mater.*, 1991, **93**: 194~206
- [7] Wittekoek S, Popma T J A, Robertson J M *et al.*. Magneto-optic spectra and the dielectric tensor elements of bismuth-substituted iron garnets at photon energies between 2.2~5.2 eV. *Phys. Rev. (B)*, 1975, **12**(7): 2777~2788
- [8] Bruno P, Suzuki Y, Chappert C. Magneto-optical Kerr effect in a paramagnetic overlayer on a ferromagnetic substrate: A spin-polarized quantum size effect. *Phys. Rev. (B)*, 1996, **53**(14): 9214~9220
- [9] 何伦华. Co 基多层膜结构、磁性和磁光特性研究.[硕士学位论文]北京: 首都师范大学, 1999
- [10] Wang Y J, Zheng M, Li J *et al.*. Exchange coupling in dilute PtNi-alloy/Co magnetic multilayers. *Phys. Rev. (B)*, 1998, **58**(6): 3228~3232
- [11] Sato K, Hongu H, Tsuzukiya K *et al.*. Spectra of magneto-optical Kerr rotation and ellipticity of Pt/Co multilayered films. Proc. magneto-optical recording international symposium '91. *J. Magn. Soc. Jpn.*, 1991, **15**(s1): 29~32

Studied on Structure and Magneto-Optical Properties of PtMn/Co Multilayers

Zhou Xun¹⁾²⁾ Liang Bingqing¹⁾ Wang Hai¹⁾ Tang Yunjun¹⁾
Fan Jinhua²⁾ Gong Lunxun²⁾ Wang Yinjun¹⁾ Chen Liangyao³⁾

(1), State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080
(2), Department of Physics, Guizhou Normal University, Guiyang 550001
(3), Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433

(Received 8 May 2000; revised 10 July 2000)

Abstract: Pt_{1-x}Mn_x/Co multilayers were prepared by magnetron sputtering method. The crystal structure was analysed by large and small angle X-ray diffraction. The relationship between structure and magneto-optical properties in PtMn/Co multilayers was studied. Through measurement and analyses, the Kerr spectrum, Kerr ellipticity spectrum and Kerr loop shown the changing rules with the increase of doped Mn concentration. The physics mechanisms are discussed.

Key words: Magneto-optical properties; X-ray diffraction; Kerr effect