

Co/Cr/Pd 多层膜的磁性和磁光特性的研究*

周 勋¹⁾²⁾ 梁冰青¹⁾ 王 海¹⁾ 刘 洪¹⁾ 张臻荣¹⁾ 樊金华²⁾ 吉世印²⁾
陈良尧³⁾ 韩宝善¹⁾ 王荫君¹⁾ 唐云俊¹⁾

¹⁾中国科学院物理研究所凝聚态物理中心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)

(2000 年 6 月 12 日收到)

用磁控溅射法制备了不同 Cr 插层厚度的 Co/Cr/Pd 系列多层膜样品.通过 X 射线衍射对该多层膜进行了结构分析,通过测定不同 Cr 层厚度多层膜的磁力图、磁滞回线,分析了垂直各向异性 K_u 和矫顽力变化的原因;通过测定该多层膜体系的克尔谱及椭圆率谱,分析了克尔角变化的机理,认为克尔角随 Cr 插层厚度的增加而下降是由于 Pd 原子极化减弱所致.

关键词:多层膜,磁性,磁光

PACC: 7570, 7820L, 7550S

1 引 言

Pd/Co 和 Pt/Co 多层膜由于在短波长区具有较大的克尔角等磁光特性,可作为第二代垂直磁记录介质,其性能一直是光存储界活跃的研究课题^[1-8].为进一步提高此类多层膜的性能,许多研究工作集中在磁性层及非磁性中掺入第三元素.如 Ni 掺杂到 Co 层中会降低多层膜的居里温度,但与 Pt/Co 多层膜仍有相近的饱和磁化强度和克尔角^[1];在 Pt/Co 多层膜的非磁性层 Pt 中掺入少量的 Cu, Ag, 可导致在长波段克尔角增强^[2];在 Pd/Co 多层膜的磁性层 Co 中掺入 Nb, 影响了 Pb 层的极化,使多层膜的饱和磁化强度及层间耦合随 Pd 层的厚度变化出现振荡^[3];另外还发现,在 Pd/Co 多层膜中, Au 掺杂到 Pd 层中引起了磁光克尔角的改变,在 Au 的掺杂量为 4.5 at% 时,其克尔角相对于纯 Pd/Co 多层膜略有增强,且没有引起垂直各向异性的下降^[4].

另一方面,近来在多层膜中插入新界面以提高这类系统的垂直各向异性和降低居里温度(T_c)的研究又引起人们的广泛的兴趣.研究发现将 Pd 插在 Pt/Co 多层膜中,形成的 Pt/Co/Pt/Pd 多层膜具

有良好的磁光特性,同时具有高的矫顽力和很强的垂直各向异性^[5];而在 Pt/Co/Pt/Ni 多层膜中, Ni 层插入后导致居里温度 T_c 下降,同时当 Ni 的厚度在 0.1—0.23 nm 范围内时,样品具有较高的克尔角^[6].

最近人们在 Co_xCr_{1-x}/Pt 薄膜中,发现在晶界处形成的弱或非磁性富 Cr 区域将减小晶粒间的交换耦合作用,从而使系统在作为垂直磁记录介质使用时噪音减小^[7];而在热磁写入过程中,反复的加热会导致合金膜的晶化,从而导致体系性能的降低.另一方面, Pt/Co 多层膜具有很强的垂直各向异性和短波段增强的克尔效应^[8], Co/Cr 多层膜同时也具有一定的垂直各向异性^[9].以 Cr 作为插层研究 Pd/Co 多层膜性能随 Cr 层厚度变化的研究尚未见报道.本文试图结合 Co/Cr 和 Pd/Co 多层膜,研究 Co/Cr(X_{Cr})/Pd 多层膜性能随 Cr 层厚度的变化对多层膜的结构、垂直各向异性、矫顽力和磁光性能的影响,为 Pd/Co 多层膜的应用提供初步的实验和理论依据.

2 实 验

利用磁控溅射方法在水冷的玻璃基片上制成

* 国家自然科学基金(批准号:19774072)资助的课题.

Co/Cr(X_{Cr} nm)/Pd 磁性多层膜 ($x = 0-1.13$). 系统本底真空度优于 5×10^{-5} Pa. 溅射通以 99.999% 的纯 Ar 气, 气压为 0.8 Pa. 所有样品沉积在 40 nm 的 Pd 缓冲层上, 使多层膜具有较好的结构取向. 样品为 (40 nm)Pd/[Co(0.33 nm)/Cr(X_{Cr} nm)]Pd(0.8 nm) $_{10}$. 这里 Pd 层的厚度固定为 0.8 nm, Co 层的厚度固定为 0.33 nm, 而 Cr 层的厚度则在 0—1.13 nm 之间变化, 多层膜周期为 20. 采用 Surface Profile Measuring Dektak3 膜厚仪测定溅射速率, 并用 X 射线小角衍射加以验证, 进而确定每单层厚度. Pd, Co 和 Cr 的沉积速率分别约为 0.1 nm/s. 整个溅射过程由计算机控制.

通过小角和大角 X 射线衍射分析样品调制周期和晶体结构, 用磁转矩仪在外场 8×10^5 A/m 下测得垂直各向异性常数 K_u , 采用交流梯度磁强计来测量磁性参数. 用 Nano Scope 3A, Nonmagnetic Version D-3000 型磁力显微镜观察样品表面磁畴; 在室温和磁场为 8×10^5 A/m 下, 用磁光克尔谱仪分别测量入射光子能量为 1.5—4.5 eV 范围内的克尔谱、椭圆率谱. 用于插层的纯 Pd/Co 多层膜具有 (111) 织构取向和良好的成层结构, $K_u = 9.25 \times 10^5$ J/m³, $H_c = 6.12 \times 10^4$ A/m, $M_r/M_s = 1$, 在室温下、波长 633 nm 处, 其极向克尔角 $\theta_k \approx 0.12^\circ$.

3 分析和讨论

图 1 为 (40 nm)Pd/[Co(0.33 nm)/Cr(X_{Cr} nm)]Pd

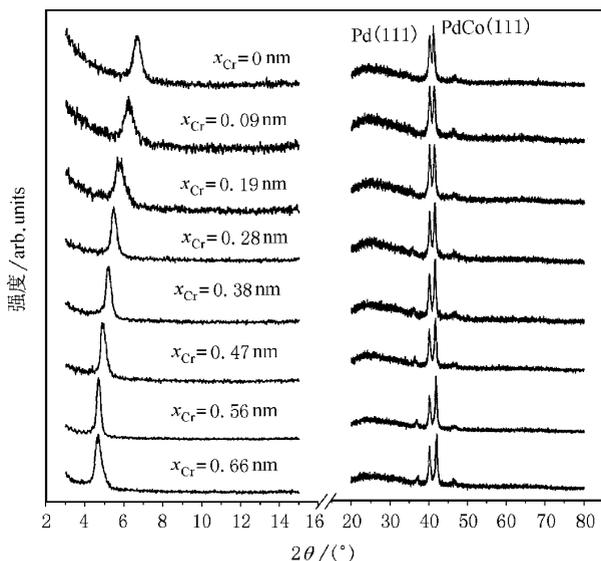


图 1 Co/Cr(X_{Cr})/Pd 多层膜系列样品的大小角 X 射线衍射图

Pd(0.8 nm) $_{10}$ 多层膜系列样品的小角和大角 X 射线衍射图谱. 其中 $X_{Cr} = 0-0.658$ nm, 可以发现对所有的样品都能看到一个很强的小角峰, 对于纯 Pd/Co 多层膜, 该小角峰位于 $2\theta \approx 7.2^\circ$ 处, 其调制周期 $D = 1.2$ nm, 与原设计的调制周期基本一致. 说明样品的原子层状生长特性较好. 随着插层厚度的增加, 小角峰位逐渐向左移动且小角峰的强度逐渐增加、峰宽变窄, 说明随着 Cr 层厚度的增加, 多层膜的每个周期的厚度也逐渐增加. 分析样品的大角 X 射线衍射图谱, 得到所有样品都有很强的 Pd(111) 峰和 PdCo(111) 峰, 说明该多层膜体系具有良好的 (111) 织构. 此外, 随 Cr 层厚度的增加还可以看到超晶格卫星峰出现在主峰的两侧, 进一步说明该体系有良好的成层结构^[10].

图 2 中给出样品的垂直各向异性常数 K_u 随 Cr 层厚度 X_{Cr} 变化的曲线. 从图 2 可以看出纯 Pd/Co 多层膜样品具有很大的垂直各向异性, 随着 Cr 层厚度的增加, K_u 迅速下降.

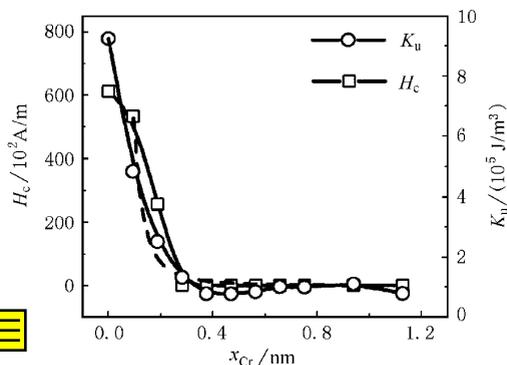


图 2 Co/Cr(X_{Cr})/Pd 多层膜垂直各向异性常数和矫顽力随 Cr 层厚度增加的变化曲线

对于 Pt/Co 和 Pd/Co 多层膜垂直各向异性的起源人们已有较为广泛和深入的研究^[11], 一般认为自旋轨道耦合是垂直各向异性存在的根本原因. Brnno^[12] 通过理论计算超薄过渡族金属膜 (001) 和 (111) 面的磁晶各向异性能时, 考虑了自旋轨道耦合和轨道磁矩的影响, 得到磁晶各向异性能与自旋轨道耦合参数的平方关系. 并且 Daalderop^[13] 等人认为 Pd/Co 多层膜系统中 Co 和 Pd 的 d 带高度杂化导致的 Pd 的 d 能带的劈裂对 Pd/Co 体系中强垂直各向异性有很大贡献. 此外在实验中还发现, 在 Co/Ni/Co/Pt 多层膜中, 垂直各向异性随 Ni 的厚度的增加而线性下降, 当 Ni 的厚度达到 4.8 nm 时, 体系由垂直各向异性转变为面内各向异性^[14]; 在 Pt/

Co/Pt/Pd 多层膜体系中有良好磁光克尔效应,同时具有高的矫顽力和强的垂直各向异性^[15],在本实验中,我们认为 Pd/Co 多层膜体系中, Pd 原子被邻近的 Co 原子诱导极化,而随 Cr 层的插入,增加了 Co 层与 Pd 层的距离,相应地近邻 Co 原子个数的减少,从而减弱了 Co 层对 Pd 原子极化的贡献,导致自旋与轨道的耦合能的减小,使 K_u 减小;当 Cr 层厚度增加到 0.47 nm 后,Co 层极化作用进一步减弱, K_u 不再变化。

用磁力显微镜 (MFM) 分别观察了 Cr 层厚度为 0, 0.09, 0.19, 0.28 nm 的 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 多层膜的磁畴结构 (扫描范围为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$), 分别显示于图 3(a)–(d)。从图中可以看出, 纯 Co/Pd 多层膜为岛状的磁畴结构, 这是典型的具有垂直各向异性的磁畴结构, 随 X_{Cr} 的增加, 磁畴逐渐变为短带状或点状畴, 黑畴与白畴反差逐渐减小, 说明垂直各向异性逐渐减小; 当 $X_{Cr} = 0.28$ nm 时, 短带状或点状畴的反差几乎全部消失, 表明样品的垂直各向异性已经很小, 这与图 2 中 K_u 的减小是完全符合的。

图 4 为 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 系列样品的磁滞回线 (外场 H 与膜面垂直)。从图中可以看出, 纯 Pd/Co 多层膜的回线 (a) 所示的矫顽力较大, 矩形比较好, 但随 Cr 层厚度的增加, 矫顽力下降很快, 当 $X_{Cr} > 0.19$ nm 后回线的矩形比极差且和矫顽力几乎降为 0。图 2 显示了矫顽力的变化值。关于矫顽力的机制, Bruno^[16] 在研究 Au/Co/Au 三明治薄膜中, 认为可以用畴壁移动模型来解释铁磁薄膜的磁滞特性, 并得到 $H_c \propto X^{-2.5}$ 关系 (X 为插层厚度), 他认为界面

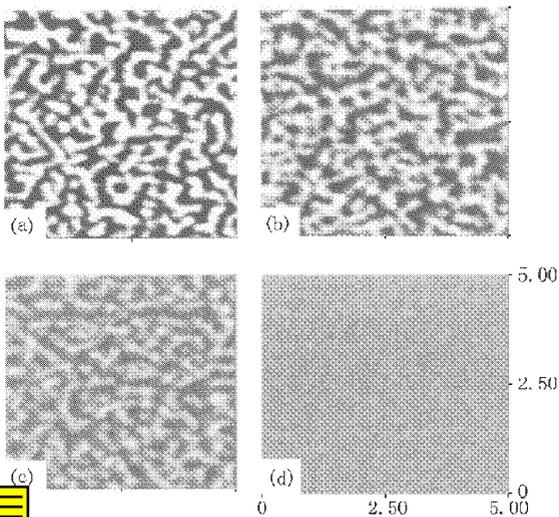


图 3 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 多层膜典型的样品的磁畴结构 (a)–(b) 分别对应 $X_{Cr} = 0, 0.09, 0.19, 0.28$ nm

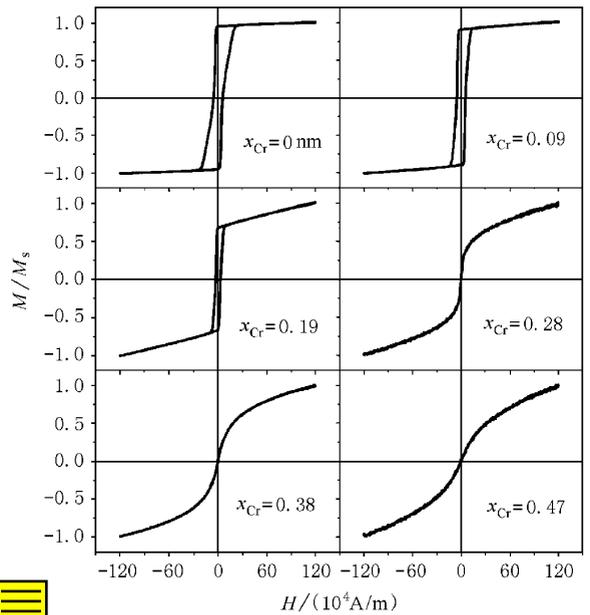


图 4 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 多层膜系列样品磁滞回线

粗糙度对体系磁滞特性有十分重要的影响。随后 Purcell^[17] 在 Pd/Co/Pd 三明治薄膜研究中也发现了同样的 $H_c \propto X^{-2.5}$ 的规律。在我们对 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 多层膜的研究中, 得到矫顽力与插层厚度 X_{Cr} 有明显的 $H_c \propto X_{Cr}^{-2.66}$ 关系, 这与 Bruno 等人的结果相似。以该公式拟合的矫顽力随插层厚度 X_{Cr} 变化的曲线也同时示于图 2 中 (虚线)。在这里, 我们认为 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 多层膜的反磁化过程可能主要以畴壁移动为主的方式进行, 畴壁移动的阻力主要来自于界面的粗糙度。从 X 射线小角大角衍射图谱也可看出, 随着 Cr 层厚度的增加, 小角峰越来越强且峰宽减小, 大角峰附近出现超晶格卫星峰, 说明多层膜成层结构越来越好。按照畴壁移动模型, 界面粗糙度下降, 畴壁移动所受到的阻力减小, 因此矫顽力也随之下降, 这与从样品的磁滞回线形状得到的矫顽力的变化是完全符合的。

用全自动扫描克尔谱磁光谱仪测定了在 200—800 nm 范围内、不同 Cr 层厚度的 Co/Cr (X_{Cr}) / Pd 多层膜样品的克尔谱及椭圆率谱, 结果如图 5 所示。从图中可看出, 克尔谱的峰包基本对应各自椭圆率的零值, 满足 Kramers-Kronig 关系, 说明测量数据是可靠的^[18]。纯 Pd/Co 多层膜, 克尔角峰值为 0.24° 。 $X_{Cr} = 0, 0.09, 0.19$ nm 的样品在 370 nm 附近出现峰包, 且峰包随波长增加向长波方向略有侧移, 这与 Pt/Co/Pt/Ni 体系的结果类似^[6]。随着插入的 Cr 层厚度的增加, 所有样品在相同波长处的克尔

角都是下降的. $X_{Cr} = 0.28, 0.38$ nm 样品的峰包不明显, 其克尔角较小且几乎不随波长而变化. 实验发现, 在有插层的 Co/Pt 或 Co/Pd 多层膜体系中克尔角的变化存在一些类似的现象. 如 Pt/Co/Pt/Ni 多层膜中, 在长波段, 随 Ni 层厚度的增加, 克尔角先增加后又单调下降; 在短波段, 克尔谱峰值随 Ni 层厚度的增加而下降, 同时峰位向长波方向移动^[6].

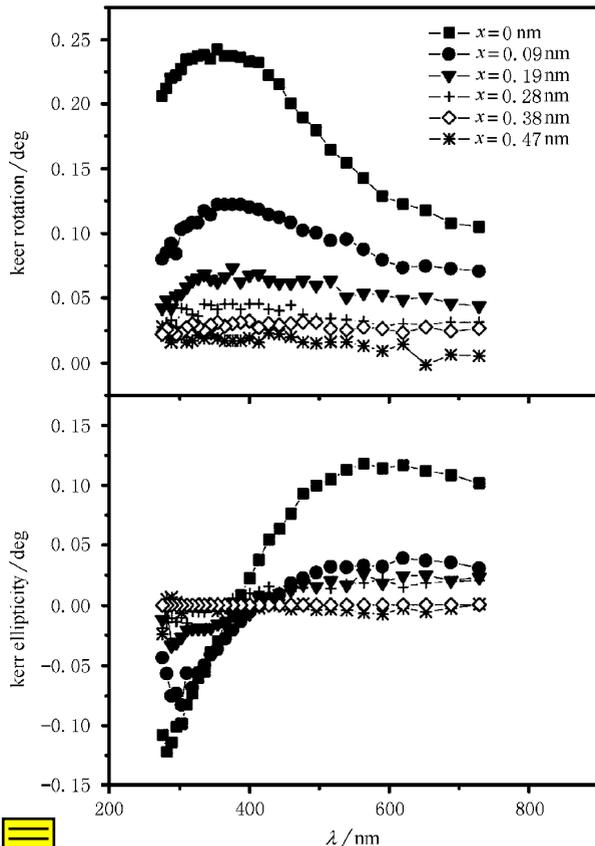


图 5 Co/Cr(X_{Cr})/Pd 多层膜典型样品的克尔谱和椭圆率谱

Pd/Co 多层膜的 Pd 原子附近有磁性原子时, Pd 将被磁性原子诱导成长程的铁磁极化状态. 在本实验中, Pd-4d 能带与 Co-3d 能带高度杂化导致自旋劈裂而引起 Pd 的强烈极化, 使多层膜中的平均磁矩增加, 明显大于其固有磁矩. 相应地 Pd 层界面自旋轨道耦合增强, 故该体系具有增强的磁光克尔效应.

理论和实验都证明, 磁光克尔效应是自旋极化和自旋-轨道耦合共同作用的结果^[19], 且磁光谱低能端(长波区)主要贡献来自带内跃迁, 高能端(短波区)则来自于带间的跃迁^[20]. 在长波区, 克尔角主要由 Co 原子的磁矩决定, 本实验中, Co 层厚度不变, 因此在长波区观测到的克尔角变化率小于在短波区克尔角的变化率; 而在短波区, 克尔角的变化强烈依赖于 Pd 的铁磁极化. 这里我们认为 Cr 的插入增加了 Co 与 Pd 层之间的距离, 减弱了 Co 层对 Pd 原子的自旋极化, 相应的自旋与轨道耦合降低, 导致短波段克尔角减小. 在其他一些插层系统中, 也观察到类似现象, 在 Pt/Co/Pt/Ni 多层膜中, 由于 Ni 层插入, 在短波段随 Ni 层厚度增加体系的克尔角下降^[6].

4 结 论

在我们对 Co/Cr/Pd 多层膜系统的研究中得到:

1. 随 Cr 层厚度的增加, 由于 Pd 极化减弱, 垂直各向异性减小. 系统的矫顽力随 Cr 层厚度的增加迅速下降, 用界面平整度导致畴壁移动所受阻力变化的模型对它的机理进行了解释.

2. 克尔角随 Cr 层厚度增加而下降, 这是由于 Cr 的插入使 Co 层对 Pd 的极化贡献减弱所致.

[1] Q. Meng, W. P. van Drent, J. C. Lodder, Th. J. A. Popma, *J. Magn. Magn. Mater.*, **156**(1996) 296.
 [2] Y. J. Wang, Z. H. Guo, D. K. Zhu, C. H. Shang, *J. Appl. Phys.*, **80**(1996) 3957.
 [3] Yi-hua Liu, Min Zheng, Xiao-ding Ma, Shi-ming Zhou, *Phys. Rev.*, **B50**(1994) 6137.
 [4] Joe-Geun Ha, Kentaro Kyuno, Ryoichi Yamamoto, *J. Phys. : Condens. Matter*, **8**(1996) 677.
 [5] Ying Xiao Jun-Hao Xu, K. V. Rao, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996), 6267.

[6] Hai Wang, Yun-son Zhou, Ai-ling Wang, Wu Zheng, Jin-Chang Chen, *Acta Physica Sinica*, **48**(1999), S151 (in Chinese) [王海、周云松、郑鹤、陈金昌, *物理学报*, **48**(1999), S151].
 [7] Kentaro Takano, G. Zeltzer, D. K. Weller, Eric E. Fullerton, *J. Appl. Phys.*, **87**(2000) 6364.
 [8] P. F. Garcia, A. D. Meinhaldt, A. Suna, *Appl. Phys. Lett.*, **47**(1985) 178.
 [9] W. Donner, N. Metoki, F. Schreiber, Th. Zeidler, H. Zabel, *J. Appl. Phys.*, **75**(1994) 6421.
 [10] G. Srinivas, Sung-Chul Shin, *Thin Solid Film*, **301**(1997), 211.

- [11] W. B. Zeper , F. J. A. M. Greidanus , P. F. Carcia , C. R. Fincher ,
J. Appl. Phys. , **65**(1989) 4971. D. Renard J. P. Renard J. Seiden ,*J. Appl. Phys.* , **68**(1990) ,
 5759.
- [12] P. Bruno *et al.* ,*Phys. Rev.* , **B39**(1989) 865. [17] S. T. Purcell *et al.* ,*J. Magn. Magn. Mater.* , **113**(1992) ,
 257.
- [13] G. H. O. Daalderop , P. J. Kelly , M. F. H. Churmans ,*Phys. Rev.* , **B42**(1990) 7270. [18] S. Wittekoek , T. J. A. Popma , J. M. Robertson , P. F. Bongers ,
Phys. Rev. , **B12**(1975) 2777.
- [14] P. J. H. Bloemeu *et al.* , *J. Magn. Magn. Mater.* , **116**(1992) ,
 L1. [19] P. N. Argyres ,*Phys. Rev.* , **97**(1955) 334.
- [15] M. Sakurai *et al.* , *J. Magn. Magn. Mater.* , **128**(1993) 237. [20] C. S. Wang J. Callaway ,*Phys. Rev.* , **B9**(1974) 4897.
- [16] P. Bruno G. Bayreuther P. Beauvillain C. Chappert G. Lugert ,

A STUDY OF THE MAGNETIC AND MAGNETO-OPTICAL PROPERTIES OF Co/Cr/Pd MULTILAYERS *

ZHOU XUN^{1,2)} LIANG BING-QING¹⁾ WANG HAI¹⁾ LIU HONG¹⁾ ZHANG ZHENG-RONG¹⁾ FAN JIN-HUA²⁾ JI SHI-YIN²⁾
 CHEN LIANG-YAO³⁾ HAN BAO-SHAN¹⁾ WANG YUN-JUN¹⁾ TANG YUN-JUN¹⁾

¹⁾ *State Key Laboratory of Magnetism , Institute of Physics and Center for Condensed Matter Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)*

²⁾ *Department of Physics , Guizhou Normal University , Guiyang 550001 , China)*

³⁾ *Department of Physics , Fudan University , Shanghai 200433 , China)*

(Received 12 June 2000)

ABSTRACT

A series of Co/Cr/Pd modulated multilayers with Cr layer thickness X_{Cr} ranging from 0 to 1.13 nm have been prepared by magnetron sputtering system on 40 nm thick Pd buffer. With combined small- and large-angle X-ray analyses , the layered and crystal structure of the samples were investigated. The magnetic hysteresis loops and domain structure were obtained by means of alternating-gradient magnetometer (AGM) and Magnetic Force Microscopy (MFM) methods. The perpendicular magnetic anisotropy and the coercivity of the multilayers decrease with the increase of Cr thickness , which was ascribed to the reduction of the polarization of Pd atoms and the interlayer roughness , respectively. The Kerr rotation and ellipticity of the multilayers were also studied. The decrease of Kerr rotation with the increase of the Cr thickness was assumed to be due to the decrease of the polarization of Pd atoms.

Keywords : multilayers , magnetic , magneto-optical

PACC : 7570 , 7820L , 7550S