

# Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>/Co 多层膜的磁性与磁光性质研究<sup>\*</sup>

周 勋<sup>1,2)†</sup> 梁冰青<sup>1)</sup> 王 海<sup>1)</sup> 陈良尧<sup>3)</sup> 唐云俊<sup>1)</sup> 王荫君<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室,北京 100080)

<sup>2)</sup>贵州师范大学物理与电子科学系,贵阳 550001)

<sup>3)</sup>复旦大学物理系,上海 200433)

(2002 年 5 月 21 日收到,2002 年 7 月 2 日收到修改稿)

用磁控溅射法制备了 Mn 含量一定、不同 PtMn 层厚度的 Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>/Co 磁性多层膜系列,通过 x 射线衍射对该多层膜系列进行结构分析,测定了不同 PtMn 层厚度系列样品的磁滞回线、有效垂直各向异性,分析了饱和磁化强度和有效垂直各向异性变化的原因,通过测定该多层膜体系的克尔谱,分析了一定波长下克尔角随 PtMn 层厚度变化的规律.认为克尔角的变化是由于界面的合金化以及原子的极化减小所致.

关键词:多层膜,磁性,磁光

PACC: 7570, 7820L, 7550S

## 1. 引 言

Pt/Co 多层膜和 Pd/Co 多层膜具有很强的垂直各向异性,且在短波长处有较高的磁光克尔角和反射率,是第二代磁光存储介质的候选材料而被广泛研究<sup>[1-8]</sup>.为了提高该多层膜的性能,发现新的物理机理,人们在其磁性层或非磁性层内掺入第三元杂质,希望改变和提高 Pt/Co 多层膜的磁和磁光性能.主要工作如 Pt/CoNi 多层膜,虽降低了居里温度,但与纯 Pt/Co 多层膜相比其磁光克尔角和饱和磁化强度仍相近<sup>[3]</sup>;PdAu/Cd(Au 的含量为 4.5at.%)多层膜体系其极向克尔角有少量增加,垂直各向异性没有下降<sup>[4]</sup>;PtAl/Co 和 PtCu/Co 多层膜体系分别在 680nm 及 770nm 处克尔角相对于纯 Pt/Co 多层膜有一较大增加,PtCu/Co 的增强幅度达到 20%;PtAg/Co 多层膜在 770nm 处的克尔角随掺杂浓度出现振荡<sup>[5]</sup>;PtNi/Co 多层膜其饱和磁化强度和克尔角随 Ni 掺杂量的增加出现振荡,铁磁性的 Ni 出现负极化或正极化的现象,用 RKKY 理论解释了这个现象<sup>[8]</sup>;在 Pd/Co 多层膜的 Co 层中掺入 Nb,影响了 Pd 层的极化,使其饱和磁化强度和层间耦合随 Pd 层厚度变化

出现振荡<sup>[9,10]</sup>等等.同时,在多层膜中引入新界面以提高体系的垂直各向异性及磁光性能的研究也引起了人们的重视.研究发现 Pt/Co/Pt/Pd 多层膜具有很强的垂直各向异性、高的矫顽力和良好的磁光特性<sup>[11]</sup>;Ni/Pt/Co/Pt 多层膜其  $T_c$  下降且当 Ni 层厚度不大时,克尔角较高<sup>[6]</sup>;Co/Cr/Pd 多层膜其垂直各向异性和克尔角随 Cr 层厚度的增加下降<sup>[12]</sup>等.

在短波段使克尔角增大而又不引起磁特性太大下降的元素是近几年来多层膜磁光介质研究的热点之一.在对 Pt/Co 进行掺杂浓度变化影响其磁光特性研究<sup>[3-5,8-10,13]</sup>的同时,对某一确定的掺杂浓度但杂质所在层厚度变化对体系磁性及磁光特性影响的研究,尚未见报道.本文利用磁控溅射,在 Pt/Co 多层膜的非磁性层中掺入确定量的磁性杂质 Mn,研究随 PtMn 层厚度的增加其磁性和磁光性能的变化,为 Pt/Co 多层膜在磁光存储方面的应用提供实验和理论依据.

## 2. 实验方法

利用磁控溅射方法在水冷的基片上制成 (40nm)PtMn[Cd(0.3nm)/Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>( $x_{\text{PtMn}}$ nm)]<sub>20</sub> 多层膜系列样品( $x = 0.96-1.68\text{nm}$ ),Pt 层采用射频溅

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:19774072)和贵州省科学技术基金(批准号:20013078)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zhouxun99@hotmail.com

射.系统本底优于  $5 \times 10^{-5}$  Pa,溅射时通以 99.999% 的高纯 Ar 气,溅射压强为 1Pa,所有样品沉积在 40nm 厚的 PtMn 基底上,使多层膜有较好的结构取向.Mn 的含量由 Mn 片和 Pt 靶的相对面积和位置惟一确定,Co 层的厚度为 0.3nm,而 PtMn 层的厚度在 0.96—1.68nm 之间变化,多层膜的周期为 20,采用 Surface Profile Measuring Dektak3 膜厚仪测定溅射速率,同时用 x 射线小角衍射加以验证以确定每一单层厚度,Co 和 Pt 的溅射速率分别为 0.1 和 0.12nm/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,用电感耦合等离子体发射光谱仪(Thermo Jarrel-ash corp., IRIS/AP)确定 Mn 在 Pt 层中的原子含量百分比.用磁转矩仪在外场  $8 \times 10^5$  A/m 下测定垂直各向异性  $K_u$ ,精度优于 3%.用交流梯度磁强计(AGM)测定其磁性参数,在室温饱和场为  $8 \times 10^5$  A/m 下,用全自动磁光克尔谱仪测量光波波长在 200—800nm 范围内的磁光克尔谱,精度优于  $0.01^\circ$ ,用于掺杂的 Pt/Co 多层膜具有(111)织构取向和良好的成层结构,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),  $K_u = 7 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>,  $H_c = 19200$  A/m,在 632.8nm 处其极向克尔角  $\theta_k \approx 0.24^\circ$ .

### 3. 分析和讨论

图 1 为系列样品(40nm)PtMn[Cd(0.3nm)Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>( $x_{PtMn}$ nm)]<sub>20</sub> 多层膜( $x = 0.96—1.68$ nm)的大小角 x 射线衍射谱.所有样品都有一个很强的小角峰,随着 PtMn 层厚度的增加,峰位逐渐左移,并且出现第二个小角峰,所有峰位与设计的各样品的调制周期  $D$  十分接近.随着 PtMn 层厚度的增加,样品的层状结构越来越好,所有样品的大角 x 射线衍射均出现较强的 P(111)和 PtCd(111)峰,说明样品具有良好的(111)织构,整个膜主要沿(111)方向生长.样品有良好的垂直各向异性<sup>[14]</sup>.此外, x 射线衍射图还显示出多层膜的晶体结构随 PtMn 层厚度的变化,随 PtMn 层厚度的增加, PtCd(111)峰逐渐左移,当 PtMn 层厚度增加到 1.56nm 时,与 P(111)峰重合,说明 PtCd(111)峰所对应的面间距增加了,晶格逐渐膨胀.这是由于 fcc 结构 Co 晶格常数比 fcc 结构 Pt 晶格常数小,而与 PtMn 相邻的 Co 的晶格随着 PtMn 层的不断增厚,逐渐膨胀到与 Pt 的晶格相同,导致

PtCd(111)峰逐渐左移,最后与 P(111)峰重合.

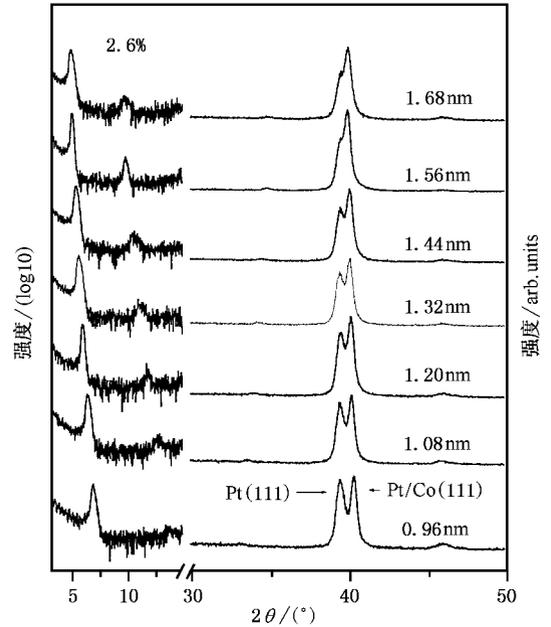


图 1 Mn 掺杂量为 2.6%、不同 PtMn 厚度的 PtMn/Co 多层膜大小角 x 射线衍射图

图 2 为 Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>/Co 多层膜系列样品的磁滞回线(外场与膜面垂直),从测得的磁滞回线来看,回线的矩形比和垂直各向异性随 PtMn 层厚度的增加变好,矫顽力增大,剩磁比增加,峰腰状回线的倾斜度减小.在 Bennett<sup>[15]</sup>研究的 Co/Pd 多层膜体系中发现,随 Pd 层厚度的变化,多层膜饱和磁化强度有振荡的变化.图 3 为 Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>/Co 多层膜系列样品饱和磁化强度随 PtMn 层厚度增加的变化曲线,样品的饱和磁化强度随 PtMn 层厚度的增加先减少,而后当 PtMn 层厚度达到一定值时出现一增加,然后再减小,我们认为这与 Bennett 的结果是相似的.由于 Mn 的含量仅有 2.6%,表明该多层膜体系有类稀释合金行为, Mn 原子无序地分布在非磁性的 Pt 层中,在 PtMn 层两个界面处又与 Co 层相邻,其行为较为复杂.

Mn-Mn 以及 Co-Mn 之间的间接交换耦合诱导其磁矩平行或反平行,Co-Mn 之间的耦合起主要作用.掺杂量为 2.6% 的多层膜系列在 PtMn 层较薄时,由于类 RKKY 相互作用 Co-Mn 原子间为反铁磁耦合,可能导致 Mn 原子的负极化,其磁矩与 Co 原子磁矩反平行排列<sup>[16]</sup>或者 PtMn 层的磁矩与 Co 原子磁矩完全或者部分反平行排列,这都对磁矩的总贡献为负,导致了饱和磁化强度  $M_s$  减小的趋势.当

PtMn 层厚度达到 1.32nm 后,  $M_s$  的变化也同样从类 RKKY 相互作用得到解释, 即由于层厚的变化, 原子间的距离也发生变化, Co-Mn 之间磁矩排列又可能变为铁磁耦合, Mn 的负极化的减少, 导致  $M_s$  增大到最大值. 随 PtMn 层厚度的继续增加, RKKY 间接

交换作用随 Mn-Mn 原子间距离的增加在铁磁与反铁磁之间振荡变化造成  $M_s$  再继续减少. 此外, 对于 Mn 和 Co 之间作用, 如一个 Mn 原子在 Cd(001) 上, Mn 和 Co 之间是反铁磁耦合, 而两个 Mn 原子在 Co(001) 上, Mn 和 Co 之间的耦合是由铁磁和反铁磁耦合竞争的结果决定<sup>[17,18]</sup>. 因此 Mn-Mn 和 Mn-Co 之间存在的铁磁和反铁磁耦合的变化, 引起了  $M_s$  随 Pt-Mn 层厚度变化的振荡.

另一方面, 从图 1 看出, 随 PtMn 层厚度的增加, 出现了第二个小角峰, 说明了 PtMn 层和 Co 层的界面平整度增加, PtMn 层和 Co 层之间的混合减小, 使能被 Co 极化的 Pt 原子减少, 导致 Pt 的极化对饱和磁化强度  $M_s$  的贡献减小.

用磁转矩仪测定了系统样品的有效垂直各向异性随 PtMn 层厚度变化的关系. 从图 4 可以看出, 随 PtMn 层厚度的增加, 有效垂直各向异性总的趋势是增加的. 一般认为, 自旋轨道耦合是垂直各向异性存在的根本原因. Bruno<sup>[19]</sup> 用 Neel 的唯象理论研究了界面粗糙度对界面各向异性的影响, 结果表明, 界面

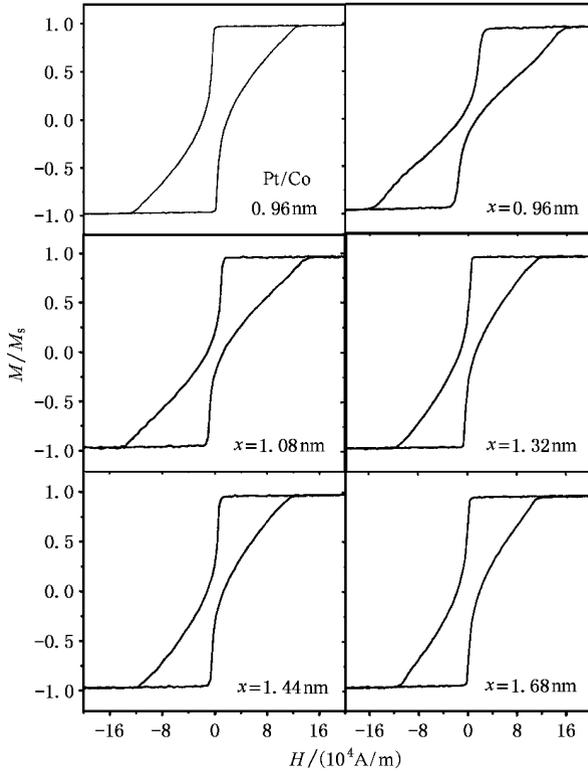


图 2  $Pt_{97.4}Mn_{2.6}/Co$  多层膜的磁滞回线随 PtMn 层厚度增加的变化

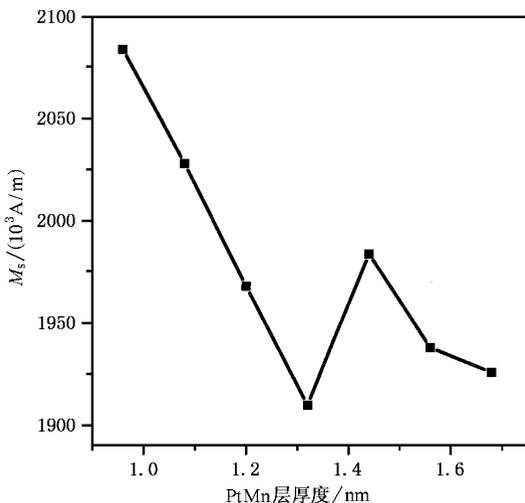


图 3  $Pt_{97.4}Mn_{2.6}/Co$  多层膜的饱和磁化强度随 PtMn 层厚度增加的变化

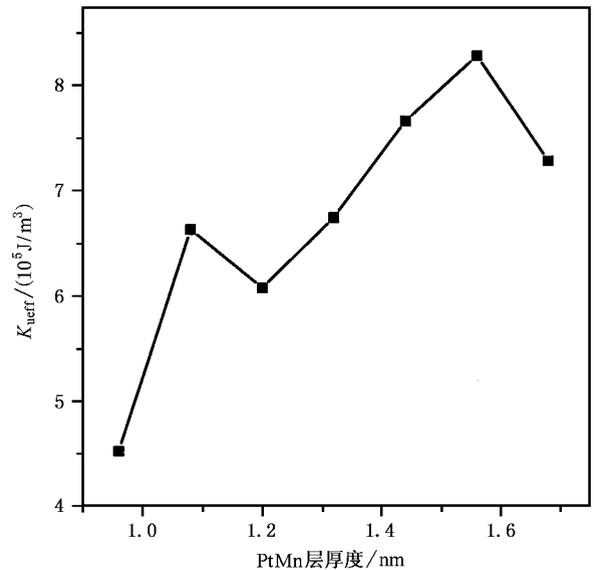


图 4  $Pt_{97.4}Mn_{2.6}$  多层膜的有效垂直各向异性常数随 PtMn 层厚度增加的变化

越粗糙, 界面各向异性越小. Bertero<sup>[20]</sup> 进一步认为界面的平整度是垂直各向异性的一个重要的影响参数, 同时大量的实验证明, 具有良好的 PtCd(111) 结构的 Pt/Co 多层膜, 垂直各向异性都很大<sup>[21]</sup>. 从本实验中的 x 射线衍射图来看, 随 PtMn 层厚度的增加, 出现第二个小角峰, PtMn 层与 Co 层间界面平整度

变好,局域在界面的大量自旋和未猝灭的轨道角动量将导致大的垂直各向异性常数.此外,从能量的观点来看, $K_{\text{eff}} = 2K_s/t + (K_v - 2\pi M_s^2)$ ,其中  $t$  为磁性层厚度而  $K_s, K_v$  分别为界面各向异性常数和内禀体积各向异性,可以看出,磁性层厚度不变时,  $M_s$  与  $K_{\text{eff}}$  的变化是相反的.在本实验中,随 PtMn 层厚度的增加,多层膜体系的有效垂直各向异性  $K_{\text{eff}}$  的变化趋势与  $M_s$  相反,符合变化规律.

用全自动扫描磁光克尔谱仪在室温下测定了入射光波长为 200—800nm 范围内的系列样品饱和极向克尔谱,结果如图 5 所示.由于 Mn 的含量是一确定值且非常小,这种掺杂的多层膜为稀释合金,寄主材料 Pt 层对这种稀释合金的性质有很大影响<sup>[16]</sup>,因此主要考虑 Co 层以及 Pt 的自旋极化对磁光效应的贡献.随波长的减小,系列样品的克尔角增大,克尔谱的形状基本不变并在 300nm 左右出现峰值.克尔谱的峰值来源于多层膜的界面,由于 Co 层的诱导, Pt 原子层界面处自旋轨道耦合增强(而 Pt 层内部的原子对自旋轨道耦合影响不大)<sup>[22]</sup>,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末态间的跃迁发生了改变,出现了增强的磁光克尔效应<sup>[23]</sup>.

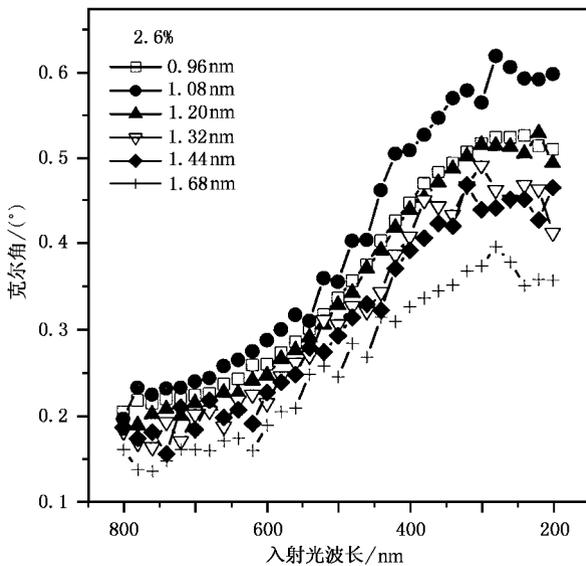


图 5 Mn 掺杂量为 2.6%、不同 PtMn 层厚度的 PtMn/Co 多层膜饱和克尔谱

在长波段,克尔角主要由 Co 层的磁矩决定,本实验的系列样品中,Co 层的厚度始终保持不变,因此观察到的克尔角在确定的波长下变化率小于短波

段的.在短波段,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,极化对克尔角的贡献很大.样品的克尔角明显增加.图 6 为选定波长下克尔角随 PtMn 层厚度变化的情况. Brandle<sup>[24]</sup>在研究 Pt/Co 多层膜中发现,当 Pt 层厚度小于 1nm 时,克尔角随 Pt 层厚度增加而增加,大于 1nm 时,克尔角随厚度增加而减小.在本研究中,对应一个确定的波长,当 PtMn 层厚度  $x < 1.08\text{nm}$  时,克尔角随厚度增加而增加,这种增加在克尔谱的峰包区更为显著,比文献<sup>[13]</sup>报道的在 PtMn 层厚度一定但掺杂浓度增加条件下的增加幅度大(300nm 处).这是值得注意的.当  $x > 1.08\text{nm}$  后,克尔角随 PtMn 层厚度的增加而减小,这种减小在峰包区也更为明显.

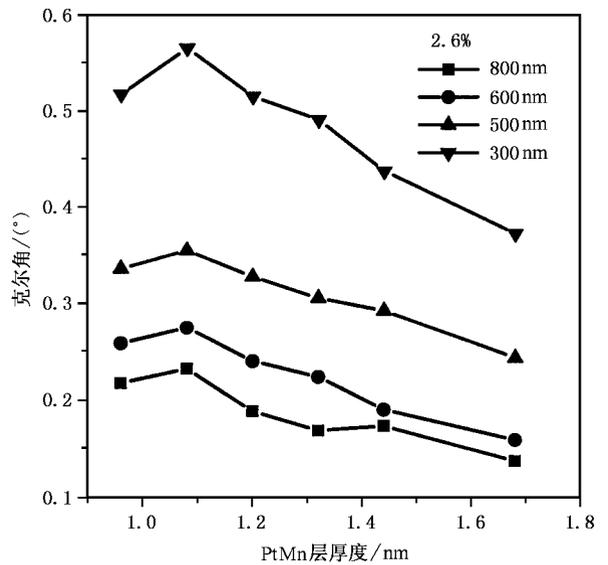


图 6 Mn 掺杂量为 2.6% 的 PtMn/Co 多层膜在一定波长下的克尔角随 PtMn 层厚度增加的变化曲线

Sato<sup>[25]</sup>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,故认为 Pt/Co 多层膜的磁光效应来源于界面的合金化.在本实验中,克尔角的变化与 PtMn 层和 Co 层界面的平整及界面合金化有密切关系.从图 1 中看到,随 PtMn 层厚度的增加,出现了第二个小角峰,说明 PtMn 层和 Co 层的界面逐渐平整, Pt 和 Co 原子的混合减少,由于与 Co 层靠近的 Pt 原子的极化很大,而且极化与距离有关,离 Co 层距离远的 Pt 原子极化小,即 Pt 的自旋极化和 Pt 位的自旋轨道耦合减少,导致克尔角的减小.但在 PtMn 层厚度小于 1.08nm 时, PtMn 和 Co 层的混合度大, Pt

原子的极化大,导致克尔角的增强并达到一个极大值.此外,PtMn层的增加对入射光子的吸收也同样导致Pt的极化减少,使克尔角减少.

## 4. 结 论

Pt<sub>7.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>/Co多层膜体系沿(111)方向生长,随PtMn层厚度的增加,多层膜层间界面越来越平整,

并伴随晶格的变化.随PtMn层厚度的增加,饱和磁化强度出现振荡、有效垂直各向异性常数增大,用原子间铁磁反铁磁耦合的变化以及界面的平整导致自旋轨道耦合的变化的观点进行了分析.在克尔谱中,长波段克尔角变化率小,短波段克尔角随PtMn层厚度变化出现增大(300nm处的增大幅度明显)又减小的趋势,结合体系的结构,用极化的思想解释了这一现象的产生.

- [ 1 ] Carcia P F, 1988 *J. Appl. Phys.* **63** 5066
- [ 2 ] Daalderop G H O, Kelly P J and Schuurmans M F H 1990 *Phys. Rev. B* **42** 7270
- [ 3 ] Meng Q, Drent W P V, Lodder J C *et al* 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **156** 296
- [ 4 ] Ha J G, Kyuno K, Yamamoto R 1996 *J. Phys. Condens Matter* **8** 677
- [ 5 ] Wang Y J, Guo Z H, Zhu D K, Shang C H 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 3957
- [ 6 ] Wang H, Zhou Y S, Zheng W, Chen J C 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** S151 [ in Chinese ] 王海、周云松、郑 鹤、陈金昌 1999 物理学报 **48** S151 ]
- [ 7 ] Wang H, Zhou Y S, Chen J C *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 1117
- [ 8 ] Wang Y J, Zheng M, Li J *et al* 1998 *Phys. Rev. B* **58** 3228
- [ 9 ] Yan S S, Lin Y H 1995 *Phys. Rev. B* **52** 1107
- [ 10 ] Liu Y H, Zheng M, Ma X D, Zhou S M 1994 *Phys. Rev. B* **50** 6137
- [ 11 ] Xiao Y, Xu J H, Rao K V 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 6267
- [ 12 ] Zhou X, Liang B Q, Wang H *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 159 [ in Chinese ] 周 勋、梁冰青、王 海等 2001 物理学报 **50** 159 ]
- [ 13 ] Liang B Q, Chen X, Zhou X *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2059 [ in Chinese ] 梁冰青、陈 薰、周 勋等 2000 物理学报 **49** 2059 ]
- [ 14 ] Lin C J, Gorman G L, Lee C H *et al* 1991 *J. Magn. Magn. Mater.* **93** 194
- [ 15 ] Bennett W R, England C D *et al* 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 4384
- [ 16 ] Wang J, Wang Y J, Li J, Zhu T 1999 *Phys. Rev. B* **59** 11866
- [ 17 ] Noguera A, Bouarab S, Mokrani A *et al* 1996 *J. Magn. Magn. Mater.* **156** 21
- [ 18 ] Choi Ch. B, Bode P J, Bland J A C 1998 *Phys. Rev. B* **58** 5166
- [ 19 ] Bruno P 1988 *J. Phys. F* **18** 1291
- [ 20 ] Bertero G A, Sinclair R *et al* 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 3953
- [ 21 ] Bertero G A, Sinclair R 1994 *J. Magn. Magn. Mater.* **134** 173
- [ 22 ] Uba S 1996 *Phys. Rev. B* **53** 6526
- [ 23 ] Bruno P, Suzuki Y, Chappert C 1996 *Phys. Rev. B* **53** 9214
- [ 24 ] Brandle H, Weller D, Scott J C, Parkin S S P *et al* 1992 *IEEE Trans. On Magn* **28** 2967
- [ 25 ] Sato K, Hongu H, Tsuaukiyama K *et al* 1991 *J. Magn. Soc. Jpn.* **15** 29

# Studies on magnetic and magneto-optical properties of Pt<sub>97.6</sub>Mn<sub>2.6</sub>/Co multilayers<sup>\*</sup>

Zhou Xun<sup>1,2,†</sup> Liang Bing-Qing<sup>1)</sup> Wang Hai<sup>1)</sup> Chen Liang-Yao<sup>3)</sup> Tang Yun-Jun<sup>1)</sup> Wang Yin-Jun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>( State Key Laboratory of Magnetism ,Institute of Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100080 ,China )

<sup>2)</sup>( Department of Physical and Electronic Science ,Guizhou Normal University ,Guiyang 550001 ,China )

<sup>3)</sup>( Department of Physics ,Fudan University ,Shanghai 200433 ,China )

( Received 21 May 2002 ; revised manuscript received 2 July 2002 )

## Abstract

A series of Co/Pt<sub>97.4</sub>Mn<sub>2.6</sub>(  $x_{\text{PtMn}}$  nm )modulated multilayers with the thickness of PtMn layer  $x$  ranging from 0.96 to 1.68nm have been prepared by a magnetron sputtering system on 40nm thick PtMn buffer. With combined small-and large-angle x-ray analyses ,the layered and crystal structure of the samples were investigated. Magnetic hysteresis loops and perpendicular magnetic anisotropy( PMA ) were obtained by means of alternating-gradient magnetometer( AGM ) and magnetic torque methods. Saturation magnetization ,PMA and the Kerr spectrum of the samples were also investigated. Through analyses ,we obtained the variation of Kerr rotation with the increase of PtMn thickness ,which was ascribed to the reduction of the polarization of Pt atom and the inter-layer alloys.

**Keywords** : multilayers , magnetic property , magneto-optical property

**PACC** : 7570 , 7820L , 7550S

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 19774072 ) and by the Natural Science Foundation of Guizhou ,China ( Grant No. 20013078 ).

<sup>†</sup> Communication author ,E-mail :zhouxun99@hotmail.com