

Pt/Co/Pt/Ni 多层膜的磁光特性*

王 海 周云松 王艾玲 郑 鹁 陈金昌

(首都师范大学物理系, 北京 100037)

(1999 年 6 月 10 日收到; 1999 年 9 月 14 日收到修改稿)

用磁控溅射法制备了 Pt/Co/Pt/Ni 系列样品, 其中 Ni 层具有不同的厚度. 通过测量样品的 Kerr 转角、椭圆率、折射率和吸收率, 推算出了四个等效电导张量元 σ_{1xx} , σ_{2xx} , σ_{1xy} , σ_{2xy} 随 Ni 层厚度的变化情况. 再结合电导张量元与 Kerr 角的理论公式, 分析了在 Ni 层厚度的变化过程中, 每一个电导张量元对 Kerr 角的贡献; 发现在短波段 σ_{2xy} 起主导作用, 而在长波段四个电导张量元共同起作用. 经分析认为这是由于在 Ni 层的增厚过程中, Pt 5d 带劈裂程度逐渐减小. 与纯 Pt/Co 膜相比, 在 Ni 层的厚度为 0.10—0.23 nm 的范围内样品具有较低的居里温度和较高的 Kerr 角, 这说明 Pt/Co/Pt/Ni 多层膜具有较高的应用价值.

PACC: 7550; 7570

1 引 言

1986 年以来, Pt/Co 多层膜的研究已经相当深入和成熟. 为了改善其性能, 发现新的物理机理, 人们进行了更加深入的工作. 这些研究大致可分为两类: 一类是针对纯 Pt/Co 膜, 研究如 Co 层和 Pt 层厚度、缓冲层的种类及厚度、溅射气压及界面粗糙度以及热处理等因素对 Pt/Co 多层膜性能影响^[1-9]. 另一类则是在 Pt/Co 膜中引入第三元. 第三元可以作为杂质掺到 Co 层和 Pt 层中, 也可以以插层的形式插入 Pt/Co 膜中, 例如将 Pd 插在 Pt 层中形成的 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强的垂直各向异性^[10]. 在 Pt/Co/Pt/Ni 多层膜中^[11], 我们注意到 Ni 层插入后导致 T_C 下降. 这个事实对于实际应用是非常有利的. 但 Ni 层插入后还有可能影响其他有利于应用的磁光特性指标, Kerr 角就是其中之一. 什么条件下具有较低的 T_C 同时保持较高的 Kerr 角是我们所关心的, 其中涉及的物理机理也是我们感兴趣的. 但这方面的工作尚未见到深入细致的报道. 本文的工作对这些问题做了初步研究.

2 实 验

样品采用磁控溅射的方法制备, 本底真空度优于 2×10^{-5} Pa, 溅射氩气压为 1.0 Pa. 通过计算机控制每一层膜的生长时间. 采用盖玻片为基片, 循环水冷却. 样品尺寸为 8 mm \times 24 mm, 一次抽真空可制备 16 个样品. 多层膜周期结构和织构取向由 Demax-RB 型 X

* 北京市自然科学基金(批准号: 2982008)资助的课题.

射线衍射谱确定. 室温下测量饱和极向 Kerr 转角, 当外加 8×10^5 A/m 磁场并在 1.5—4.2 eV 范围, 精度达 0.01° ^[12]. 样品的垂直膜面各向异性性能采用 IRI-2 型高感应度磁转矩仪在外磁场为 8×10^5 A/m 条件下测量. 我们选择进行 Ni 插层研究的纯 Pt/Co 多层膜样品的参量为 Pt(60 nm)/[Co(0.32 nm)/Pt(0.78 nm)]₂₀, $K_u = 9.01 \times 10^{-1}$ J/cm³, $H_c = 1.26 \times 10^5$ A/m, 630 nm 波段极向 Kerr 转角 $\theta_K \approx 0.20^\circ$, $M_s = 1.4 \times 10^6$ A/m, $M_r/M_s = 1$, 具有良好的成层结构和(111)织构取向.

3 实验结果与分析

从小角度 X 射线衍射的结果可看出大多数的 Ni 插层样品具有良好的成层结构. 根据 Bragg 公式所计算出的调制周期与设定值很符合. 大角度 X 射线衍射结果表明, 对于 Pt(60 nm)/[Co(0.32 nm)/Pt(0.78 nm)]₂₀ 多层膜, Pt(111)峰和 PtCo(111)峰分别出现在 $39.7^\circ, 40.8^\circ$. Ni 插入 Pt/Co 多层膜后, Pt(111)峰略微向小角度方向移动, 而原来的 PtCo(111)峰则向大角度方向移动.

图 1 给出的是在 302.4, 619.9 和 729.3 nm 三个波段, Pt/Co/Pt/Ni 系列多层膜 Kerr

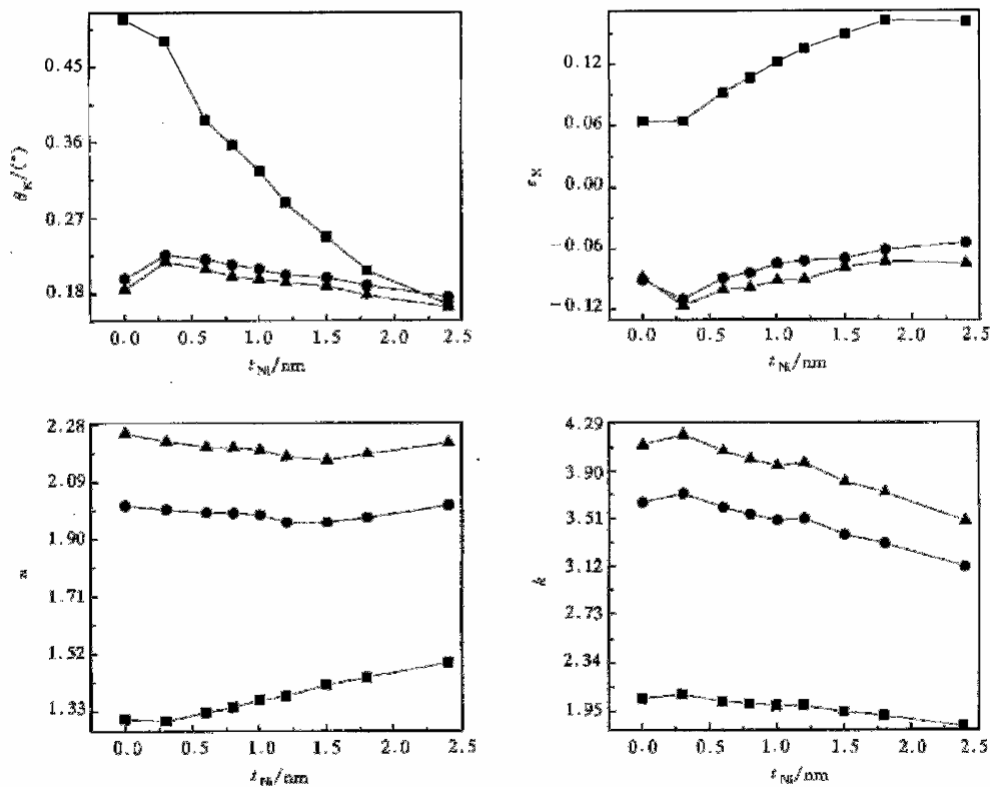


图 1 302.4, 619.9 和 729.3 nm 三个波段, Pt/Co/Pt/Ni 系列多层膜 θ_K , ϵ_K , n 和 k 随 Ni 插层厚度 t_{Ni} 的变化
 —■—为 302.4 nm, —●—为 619.9 nm, —▲—为 729.3 nm

转角 θ_K 、椭偏率 ϵ_K 、折射率 n 和吸收率 k 随 Ni 插层厚度增加的变化曲线. 在长波段 (500—800 nm), 有 Ni 插层的 Pt/Co 多层膜的 Kerr 转角较纯 Pt/Co 多层膜样品有明显的增强, 增强的幅度约为 20%. 随 Ni 层厚度的增加, Kerr 转角先有所增强, 而后单调下降. 在短波段, Kerr 谱峰值随着 Ni 层厚度 t_{Ni} 的增加而下降, 同时峰位向长波方向移动, 这一点不同于 Srinivas 等^[11]的报道. 在他们的报道中, 甚至当 t_{Ni} 达到 0.7 nm 时峰位依然与纯 Pt/Co 多层膜的峰位一致.

一般四个电导张量元可以由 Kerr 转角 θ_K 、椭偏率 ϵ_K 、折射率 n 和吸收率 k 四个参量分别表示为

$$\begin{aligned}\sigma_{1xy} &= (c/2\lambda)(B\theta_K + A\epsilon_K), \\ \sigma_{2xy} &= (c/2\lambda)(A\theta_K - B\epsilon_K), \\ \sigma_{1xx} &= (c/2\lambda)nk, \\ \sigma_{2xx} &= (c/2\lambda)(n^2 - k^2 - 1),\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $A = n^3 - 3nk^2 - n$; $B = -k^3 + 3nk^2 - k$; λ 为光波的波长. 一组实验测量值 θ_K , ϵ_K , n 和 k 参量可以唯一地确定一组 σ_{1xy} , σ_{2xy} , σ_{1xx} , σ_{2xx} 的值. 在多层膜中, 在每一个交界面处电子的局域自旋态和猝灭的轨道磁矩对于体系中每一层的电导张量元都会有很大的影响, 而交界面处的微观结构又会对电子的自旋和轨道态以及它们之间的耦合情况产生影响. 所以超薄薄膜的电导张量元一般与块体的差别较大. 而当 θ_K , ϵ_K , n 和 k 来自多层膜体系时, 由(1)式计算出的 σ_{1xy} , σ_{2xy} , σ_{1xx} , σ_{2xx} 则总的等效于电导张量元的变化. 将不同 t_{Ni} 样品的 θ_K , ϵ_K , n 和 k 实验测量值代入(1)式, 可以得到电导张量元随 t_{Ni} 的变化关系, 如图 2 所示. 图 2 的(a), (b)和(c)分别对应 302.4, 619.9 和 729.3 nm 三个波段中四个 $\Delta\sigma_{ij}$ 随 Ni 层厚度的变化关系.

从图 2 可以看出, 对比纯 Pt/Co 多层膜, 插入 Ni 层后多层膜各电导张量元随 Ni 层厚度的变化都发生了明显的改变. 由于四个光学参量与四个电导张量元之间存在着唯一性的对应关系, 可以认为 Ni 层的引入导致多层膜总体的电导张量变化而引起 θ_K 变化. 但我们更希望知道每一个电导张量元在这一过程中所起的作用有多大, 哪一个是最主要的因素. 因为每一个电导张量元所联系的微观机理是不同的, 找出了起主导作用的张量元也就暗示了这一过程中起主导作用的微观机理. 为达此目的, 我们采用下述的分析方法.

因为 θ_K 可表示为四个电导张量元和频率的显函数, 即

$$\theta_K = \theta_K(\sigma_{1xx}, \sigma_{2xx}, \sigma_{1xy}, \sigma_{2xy}, \omega), \quad (2)$$

其中四个电导张量元分别是光波频率 ω 和某个特征物理量 t 的函数^[13,14], 即

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(t, \omega). \quad (3)$$

由于本工作中 t 是 Ni 层厚度 t_{Ni} , 当 t_{Ni} 变化时, 实验上可得到四个 σ_{ij} 的变化 $\Delta\sigma_{ij}$. 图 2 实际上就是(3)式的一个具体的数值表示. 但仅根据四个 $\Delta\sigma_{ij}$ 的大小还不能断定哪一个 σ_{ij} 对 θ_K 影响最大或最小, 因为这只是 σ_{ij} 对 Ni 层厚度的响应. 变化大的 σ_{ij} 不一定使 θ_K 变化也大, σ_{ij} 对 θ_K 的影响是通过(2)式反映的. 所以只有将上述两个关系, 即(2)和(3)式同时考虑, 才能真正达到目的. 当入射光频率 ω 不变时, 由(2)式可得

$$\Delta\theta_K \approx \frac{\partial\theta_K}{\partial\sigma_{1xx}}\Delta\sigma_{1xx} + \frac{\partial\theta_K}{\partial\sigma_{2xx}}\Delta\sigma_{2xx} + \frac{\partial\theta_K}{\partial\sigma_{1xy}}\Delta\sigma_{1xy} + \frac{\partial\theta_K}{\partial\sigma_{2xy}}\Delta\sigma_{2xy}. \quad (4)$$

将(4)式与(2)式(即图2)相结合可得到图3. 这是 t_{Ni} 与 $\Delta\theta_K$ 的关系, 其中一条曲线是直接来自实验, 反映 θ_K 的真实变化. 其它四条不是纯粹的实验关系, 但它反映的是在 Ni 层厚度的变化过程中, 各个电导张量元分别对 $\Delta\theta_K$ 的贡献.

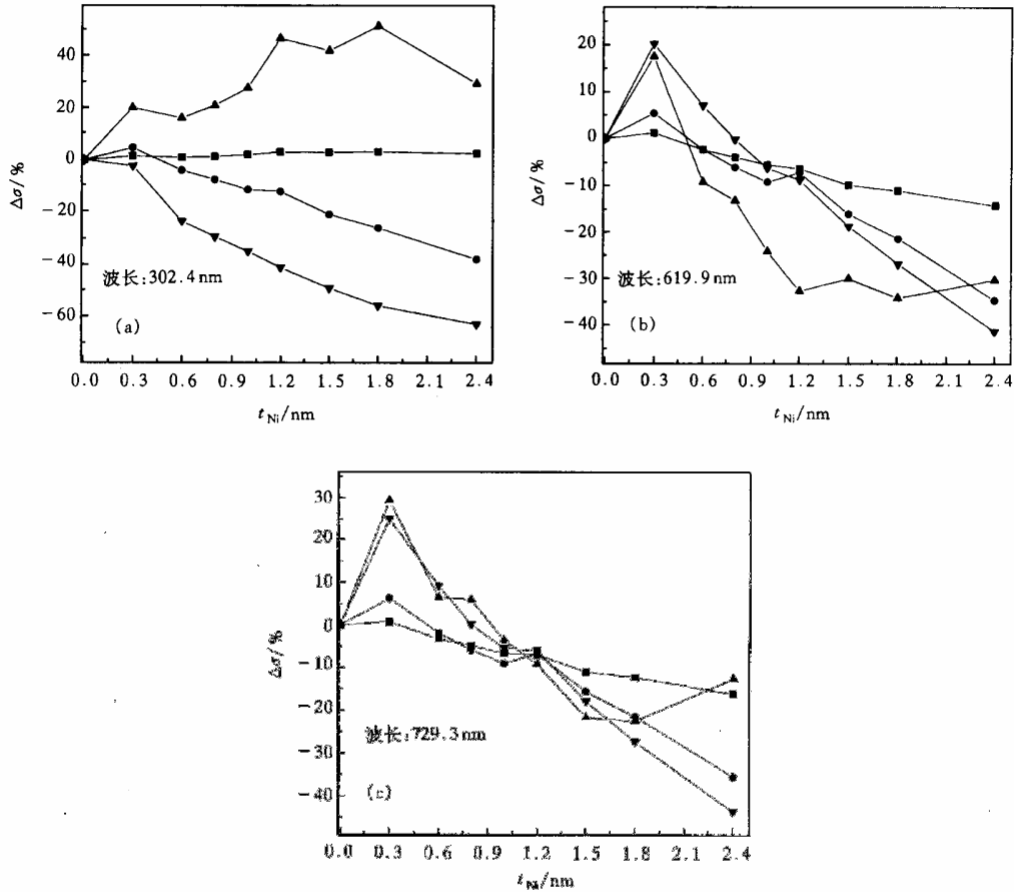


图2 在三个不同波段, 电导张量元随 t_{Ni} 的变化关系
 —■—为 σ_{1xx} , —●—为 σ_{2xx} , —▲—为 σ_{1xy} , —▼—为 σ_{2xy}

从图3可以看到如下现象:

1) 在短波段, $\Delta\sigma_{2xy}$ 所引起的 $\Delta\theta_K$ 与实验点趋势相同, 其它电导张量元对 $\Delta\theta_K$ 贡献很小, 所以可认为在短波段 σ_{2xy} 起主导作用.

2) 在长波段, σ_{2xx} (以及 σ_{1xy} 和 σ_{1xx}) 的贡献增加, σ_{2xy} 贡献比例下降, 不能断言那一个量起主导作用.

对上述现象做如下分析:

1) 短波段 $\Delta\sigma_{2xy}$ 可能与 Pt 5d 能带劈裂程度发生的改变相对应. 这有如下三种理由:

第一,按 Bennet 等^[15]理论计算的结果,如果 $\sigma_{2,xy}$ 对 θ_K 有贡献,那么对 $\sigma_{2,xy}$ 有贡献的电子态应是自旋极化的,否则不同自旋态引发的磁光效应将会抵消.第二,一般认为 MOKE 谱短波峰位附近,增强 MOKE 来源于垂直于膜面量子化的 Pt 5d 电子能带的带间跃迁的贡献.而图 1 所示的短波峰高是随 t_{Ni} 增加而下降的,所以可以认为 Pt 5d 电子能带的作用下.再考虑 $\sigma_{2,xy}$ 的主导作用,可以认为 Pt 5d 能带带间跃迁与短波段 $\sigma_{2,xy}$ 相对应.第三, $\sigma_{2,xy}$ 正比于平均传导电子浓度 N 和自旋极化强度 σ_{cond} 的乘积^[16]. Ni 比 Co 多一个价电子, Ni 层引入导致体系平均传导电子浓度增加.但由于 $\sigma_{2,xy}$ 在短波段是单调下降的,由此说明 σ_{cond} 下降了.实验又表明,短波段 MOKE 主要来源于 Pt 5d 电子自旋-轨道耦合劈裂的带间跃迁过程,所以只能认为在 Ni 层引入之后, Pt 5d 能带劈裂的宽度下降.尤其是对 Ni 插层较厚的情况,下降的幅度更为明显.

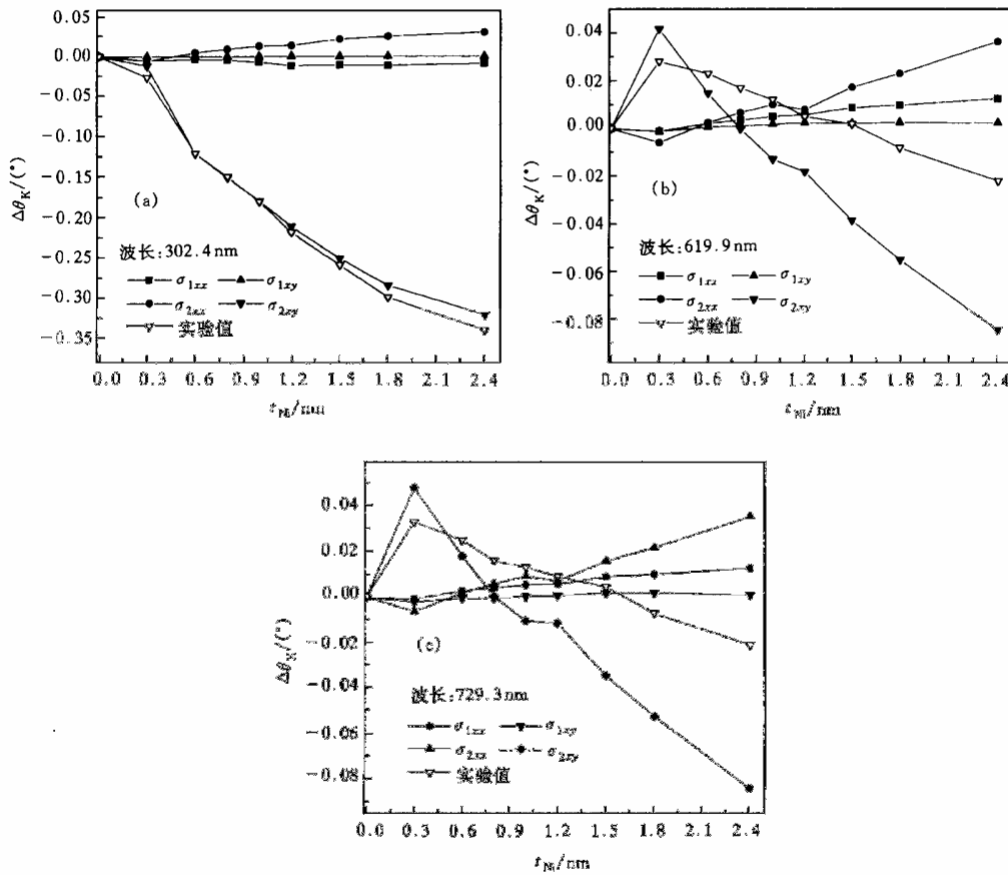


图 3 随 Ni 层厚度 t_{Ni} 的变化, 在三个不同波段, 各个电导张量元对 Kerr 角的影响

2) 在长波段, 图 3 表明 $\sigma_{2,xy}$ 贡献降低, 其他三个电导张量元贡献比例增加. QWS 理论^[17]认为, 在长波段既要考虑 d 电子的贡献, 也不能忽视体系 s 电子的影响. 考虑到 Ni 层的引入导致体系平均 s 电子浓度增加, 可以认为在长波段 Pt 5d 能带劈裂所引起的带间

跃迁对 MOKE 贡献有所减弱,同时 s 电子贡献增加.

以上分析可以找出一些实验从侧面给予支持,例如, Pt/Co(Fe, Ni)和 Pd/Co(Fe, Ni)体系众多的实验和理论结果均证实^[1-9]:短波段 θ_K 的贡献主要是来自于 Pd 4d 和 Pt 5d 能带与 Co 3d 能带高度杂化导致自旋劈裂而引起的 Pt 或 Pd 的极化.所以可认为, Ni 层插入后 Pt 5d 电子能带劈裂程度产生变化.

在长波段,要考虑 d 电子和 s 电子共同贡献. Ni 层引入导致四个电导张量元在长波段对 MOKE 变化的贡献有正有负,趋势较为复杂.在长波段,尤其是在分析 Ni 插层厚度较薄情况 MOKE 的增强效应时,必须同时考虑四个电导张量元对 MOKE 变化的影响,仅从上述分析看,还不能断言在长波段何种因素起主导作用.

研究 θ_K 随 t_{Ni} 变化的另一个目的是寻找更具实用价值的磁光材料,即希望得到更高的 θ_K ,同时其它的应用指标也保持较好的材料.为此,我们观察了居里温度 T_C 的变化情况,发现 T_C 是单调下降的,如图 4 所示.从图 4 可以看出,与纯 Pt/Co 膜相比,在 Ni 插层的厚度为 0.3—1.0 nm 范围内, T_C 有所下降,同时具有较高的 θ_K .实验还表明,在这个范围内矫顽力、剩磁比和反射率等重要的应用指标也是比纯 Pt/Co 膜更好.图 5 给出了 [Pt/Co]₂₀, [Pt/Co/Pt/Ni(0.3 nm)]₂₀和 [Pt/Co/Pt/Ni(1.8 nm)]₂₀三个样品的反射率.从图 5 可以看出, Ni 层厚度为 0.3 nm 的样品反射率略高于纯 Pt/Co 样品且在全波段变化不大.综上所述, 0.3—1.0 nm 可以作为实际应用的参考范围.

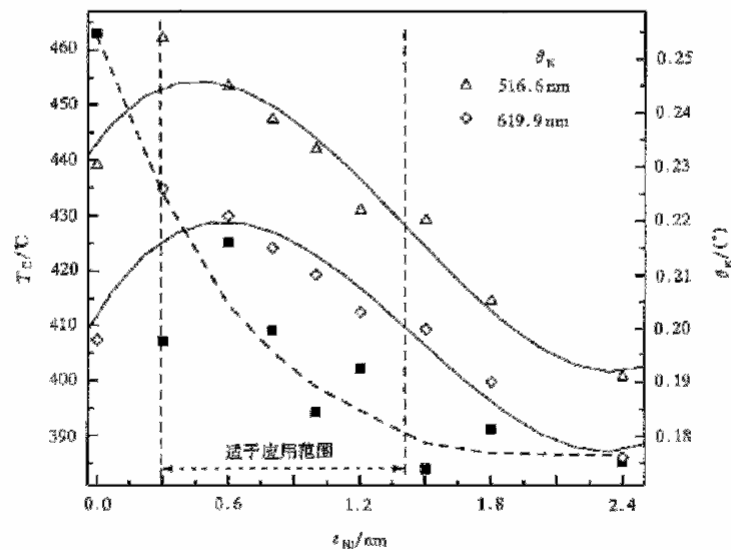


图 4 居里温度 T_C 和 Kerr 角 θ_K 随 t_{Ni} 的变化趋势

实验中我们注意到,当把 Ni 插入不同参量的纯 Pt/Co 膜时, t_{Ni} 的最佳取值范围可能会有所不同.但只要参量选得合适,这个 t_{Ni} 的最佳取值范围一定是存在的,这说明 Pt/Co/Pt/Ni 多层膜材料是很有应用价值的.

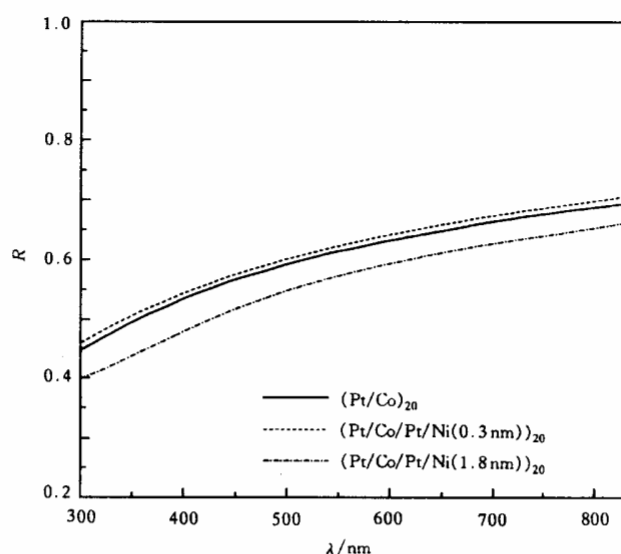


图5 300—850 nm波段 $[\text{Pt/Co}]_{20}$, $[\text{Pt/Co/Pt/Ni}(0.3 \text{ nm})]_{20}$ 和 $[\text{Pt/Co/Pt/Ni}(1.8 \text{ nm})]_{20}$ 三个样品的反射率 R 谱

4 结 论

1) Ni层的插入导致Pt 5d能带的劈裂程度下降。

2) Pt/Co/Pt/Ni多层膜存在一个Ni层厚度的最佳范围,在这个范围内许多重要的应用指标是好于纯Pt/Co膜的.说明Pt/Co/Pt/Ni多层膜有很好的应用价值.本工作的最佳范围为 $t_{\text{Ni}} = 0.3\text{—}1.0 \text{ nm}$.

- [1] C. D. Wright *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **28**(1992), 2671.
- [2] S. Hashimoto *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **67**(1990), 2130.
- [3] C. J. Tarnall *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **177—181**(1998), 1181.
- [4] M. Zheng *et al.*, *Chin. Phys. Lett.*, **13**(1996), 711.
- [5] G. A. Bertero *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **77**(1995), 3953.
- [6] S. Ubs *et al.*, *Phys. Rev.*, **B53**(1996), 6526.
- [7] E. R. Moog *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **69**(1991), 880.
- [8] J. H. Kim *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **80**(1996), 3121.
- [9] C. J. Lin *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **93**(1991), 194.
- [10] G. A. Bertero *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **64**(1994), 3337.
- [11] G. Srinivas *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **69**(1996), 3086.
- [12] L. Y. Chen *et al.*, *Proc. SPIE*, **307**(1992), 1746.
- [13] M. Zheng *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **81**(1997), 5656.
- [14] P. P. Ma *et al.*, *Chin. Phys. Lett.*, **15**(1998), 376.
- [15] H. S. Bennet *et al.*, *Phys. Rev.*, **B137**(1965), 448.
- [16] J. L. Erskine *et al.*, *Phys. Rev.*, **B8**(1973), 1239.
- [17] A. Vedyayev *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **215**(1996), 317.

MAGNETO-OPTIC PROPERTIES OF Pt/Co/Pt/Ni MULTILAYERS*

WANG HAI ZHOU YUN-SONG WANG AI-LING ZHENG WU CHEN JIN-CHANG

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037)

(Received 10 June 1999; revised manuscript received 14 September 1999)

ABSTRACT

A series of Pt/Co/Pt/Ni modulated multilayer with Ni layer thickness t_{Ni} ranging from 0 to 2.4 nm have been prepared by magnetron sputtering on Pt buffer. The relations between conductivity tensors σ_{1xx} , σ_{2xx} , σ_{1xy} , σ_{2xy} and t_{Ni} were calculated with measured values of Kerr rotation, ellipticity, refractive index and absorption index. And then, $\theta_K = \theta_K[\sigma_{1xx}(t_{\text{Ni}}), \sigma_{2xx}(t_{\text{Ni}}), \sigma_{1xy}(t_{\text{Ni}}), \sigma_{2xy}(t_{\text{Ni}})]$ as a compound function of t_{Ni} was calculated. It exhibits that, with the change of t_{Ni} , σ_{2xy} is the major factor to influence θ_K at short wave length and all of the four conductivity tensors are important at long wavelength, no one is negligible. We think that the splitting of Pt 5d band, which originates from spin-orbit coupling, decreases with the increase of t_{Ni} . The Curie temperature T_C decreases monotonically with increasing t_{Ni} . For purpose of application, we show a range of t_{Ni} (0.3—1.0 nm), in which T_C is lower while θ_K and R is higher than pure Pt/Co multilayers.

PACC: 7550; 7570

* Project supported by the Natural Science Foundation of Beijing (Grant No.2982008), China.