

# Co-Nb/Cr 磁性多层膜的振荡耦合 \*

娄坚鑫 颜世申 刘宜华

(山东大学物理系, 济南 250100)

**摘 要** Co-Nb/Cr 磁性多层膜由高频溅射方法制得. 由振动样品磁强计测量样品的磁性能. 在 2.67 Pa 溅射氩气压下, 发现样品随 Cr 层厚度增加, 铁磁层间出现铁磁性和反铁磁性的耦合振荡, 饱和磁化强度  $M_s$  基本保持不变, 而在 0.67 Pa 溅射氩气压下, 样品的饱和磁化强度  $M_s$  发生了振荡, 这可能与其铁磁层中顺磁分量振荡变化有关.

**关键词** 磁性多层膜, 铁磁耦合, 反铁磁耦合

**中图法分类号** TG111

## OSCILLATORY COUPLING OF THE Co-Nb/Cr MULTILAYERED FILMS

LOU Jianxin, YAN Shishen, LIU Yihua

Department of physics, Shandong University, Jinan 250100

Correspondent: LOU Jianxin, Fax: 531-8565167, Tel: 0531-8567022

Manuscript received 1997-05-08, in revised form 1997-07-10

**ABSTRACT** Co-Nb/Cr multilayered films were prepared with the rf-sputtering method. The magnetic properties of the samples were studied by a microprocessor-controlled vibrating-sample magnetometer. When the charging Ar pressure  $p_{Ar}=2.67$  Pa, an oscillation between ferromagnetic and antiferromagnetic coupling with the thickness of Cr layers was found, and the spontaneous magnetization  $M_s$  remains constant basically. When  $p_{Ar}=0.67$  Pa, the value of  $M_s$  shows an oscillatory behaviour, which may be related to the oscillatory variation of the paramagnetic component in the ferromagnetic layers.

**KEY WORDS** multilayered film, ferromagnetic coupling, antiferromagnetic coupling

Grünberg 等<sup>[1]</sup>在 Fe/Cr 多层膜中发现相邻铁层之间可以出现反铁磁耦合状态, 与之相联系, 其他研究者又发现了多层膜的巨磁电阻效应, 以及在有过渡族金属和非磁金属组成的多层膜中, 层间耦合存在着铁磁耦合到反铁磁耦合的周期性振荡. 例如: 在 Cr<sup>[2]</sup>, Cu<sup>[3]</sup>, Pd<sup>[4]</sup>, Ru<sup>[5]</sup>, Mo<sup>[6]</sup>, Al<sup>[7]</sup> 分别与磁性金属组成的多层膜中, 均发现了振荡的层间耦合, 其振荡周期在 1—2 nm 之间.

这种振荡型耦合产生的机理目前大多归因于类 RKKY(Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 交换作用<sup>[8,9]</sup>, RKKY 理论认为磁性原子通过导体中传导电子的自旋极化产生间接交换作用. 这种交换作用与距离的关系是周期性的, 并且随距离的增大而振荡衰减. 但 RKKY 交换作用理论预言的是晶格常数量级的短周期振荡, 而层间耦合作用振荡大多为长周期, 为了与正常的

\* 国家自然科学基金资助项目 59392800

收到初稿日期: 1997-05-08, 收到修改稿日期: 1997-07-10

RKKY 理论区别而采用类 RKKY 的名称, 其产生的机理相似, 即都是通过传导电子的自旋极化使磁性原子产生间接交换作用. 但 RKKY 交换作用理论只适用于局域电子自旋的间接交换作用, 它不适用于 3d 铁磁过渡族金属. Fe/Si 多层膜中<sup>[10]</sup>铁磁和反铁磁交换耦合振荡变化的发现, 是对层间耦合的 RKKY 理论的冲击. 可见, 多层膜的层间耦合仍是一个需要深入研究的重要理论课题. 本文作者曾研究 Fe-Si/Cr 多层膜的铁磁层间出现的铁磁性和反铁磁性的耦合振荡<sup>[11]</sup>, 本文研究 Co-Nb/Cr 系列在不同氩气压下的磁性.

## 1 实验方法

用射频溅射仪制备 Co-Nb/Cr 磁性多层膜样品, 溅射仪有 Co-Nb 合金靶与 Cr 靶. 样品台距靶的距离约为 4 cm, 靶采用水冷, 样品台可以用水冷或无水冷, 溅射输入功率约为 180 W. 当真空室抽至  $5.33 \times 10^{-4}$  Pa 高真空后, 充入纯度为 99.999% 的氩气进行溅射. 采用厚度为 0.2 mm 的玻璃片为基底.

经能谱分析, 磁性合金 Co-Nb 成分为  $\text{Co}_{90}\text{Nb}_{10}$ . 氩气压为 0.67 Pa, Co-Nb 和 Cr 的溅射速率分别为 0.126 和 0.140 nm/s. 氩气压为 2.67 Pa, Co-Nb 和 Cr 的溅射速率分别为 0.165 和 0.184 nm/s. 溅射速率通过称重法确定, 所用的电子微量分析天平精度为 1  $\mu\text{g}$ , 密度采用靶合金的密度值. 用椭圆偏振测厚法<sup>[12]</sup>及 X 光小角衍射检验了称重法测量的精度. 在基底上交替溅射 Co-Nb 合金和 Cr, 按溅射速率控制溅射时间, 即可得到不同厚度的磁性多层膜样品.

制备系列样品 No.1 和 No.2 时氩气压分别为 2.67 和 0.67 Pa, 衬底采用水冷; 系列样品 No.3 氩气压为 0.67 Pa, 衬底无水冷, Co-Nb 磁性层厚度为 2.1 nm, Cr 层的厚度从 0.5 nm 变化到 7 nm.

用微机控制的振动样品磁强计测量样品的磁性能, 所有样品均在室温下测量, 磁强计所加外场方向平行于膜面. 振动样品磁强计的测量精度为  $10^{-8} \text{A} \cdot \text{m}^2$ , 被测样品的尺寸为 5 mm $\times$ 8 mm, 每次测量采用二片或三片样品叠放, 以增加被测样品的信号强度, 减小测量误差. 测试结果减去了衬底和样品杆的背底信号, 磁性测量的误差 (包括测量系统的误差) 在 2% 之内.

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 样品的结构和性质

用 X 射线小角衍射检验样品调制结构时, 发现小角衍射图一般有两级衍射峰, 表明 Co-Nb/Cr 多层膜具有良好的界面和调制结构. 用 X 射线大角衍射测量样品的物相结构时衍射图中没有明锐的衍射峰, 表明 Co-Nb 层和 Cr 层都是非晶结构.

### 2.2 系列 No.1 样品的反铁磁耦合振荡特性

图 1 给出了具有不同 Cr 层厚度的 No.1 样品的典型磁滞回线. 多层膜的磁化强度  $M$  是多层膜的总磁矩值被 Co-Nb 层的总质量除所得的值. 图 1b, d 与图 1a, c 相比较, 样品的磁滞回线较为倾斜, 并且剩磁很小, 是比较典型的具有层间反铁磁耦合磁滞回线特征<sup>[2,13]</sup>. 各向异性可能导致类似形状的磁滞回线, 当外加磁场在膜面内分别沿不同方向测量时, 磁滞回线形状没有发生变化, 表明与各向异性无关. 另一方面, 超顺磁性也可能产生类似图 1b, d 的磁滞回线, 但超顺磁性大约要用 800 kA/m 才能饱和, 而在图 1b, d 情况下, 磁滞回线在几个 kA/m

下就达到饱和, 所以图 1b, d 曲线的产生不是超顺磁性引起的. 其回线形状反映了磁性层间的反铁磁耦合. 图 2a, b 给出了 No.1 样品矩形比  $R$  值、趋近饱和磁场  $H_s$  和磁化强度  $M_s$  随 Cr

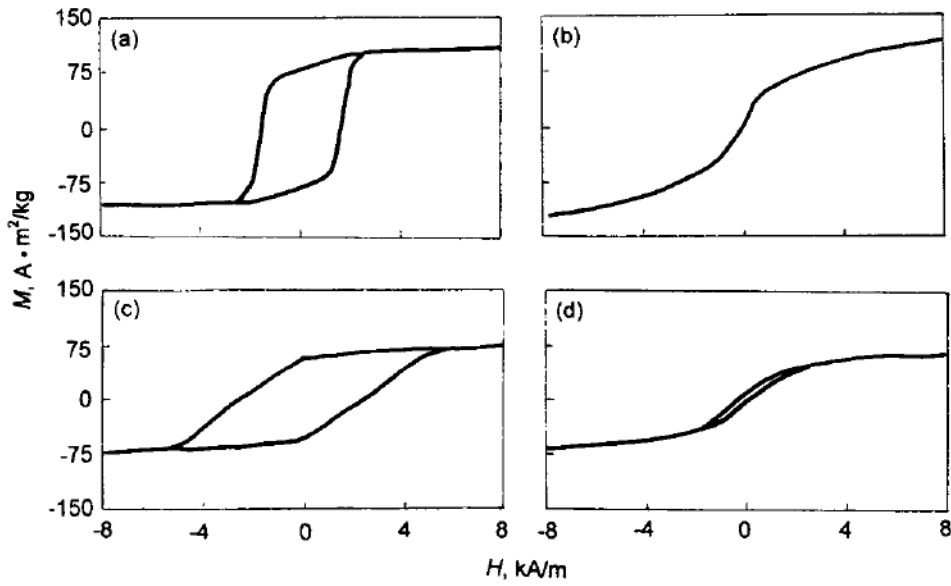


图 1 No.1 样品在不同 Cr 层厚度  $d$  下的典型磁滞回线

Fig.1 Typical hysteresis loops of the samples No.1 with different thicknesses of Cr layers  
(a)  $d=0.58$  nm (b)  $d=1.85$  nm (c)  $d=2.80$  nm (d)  $d=3.50$  nm

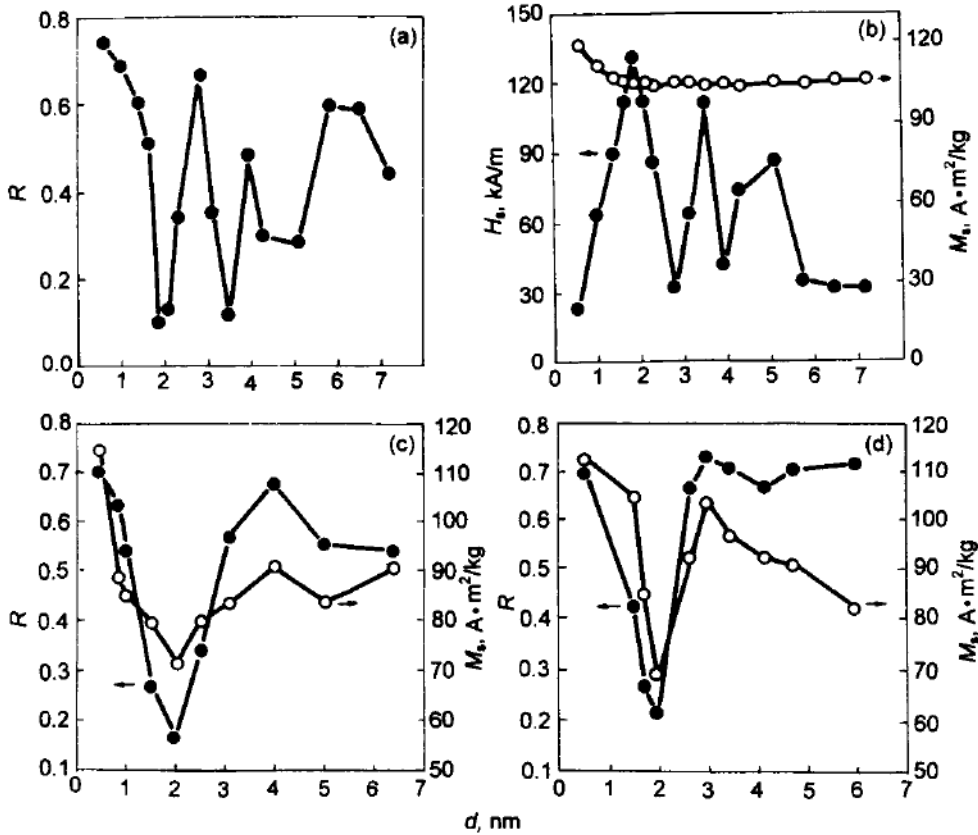


图 2 样品  $R$  值、 $H_s$  值、 $M_s$  值随 Cr 层厚度的变化

Fig.2  $R$ ,  $H_s$  and  $M_s$  of the samples vs the thickness of Cr layers  
(a),(b) No.1 (c) No.2 (d) No.3

层厚度变化的情况, 这里,  $R=M_r/M_s$ ,  $M_r$  是样品的剩磁,  $M_s$  是样品的饱和磁化强度.  $H_s$  是磁化强度达到饱和磁化强度的 90% 时所需的外加磁场. 由图 2a 可知, No.1 样品的  $R$  值随 Cr 层厚度  $d$  振荡变化, 其振荡周期约为 1.7 nm. 当 Cr 层厚度在 2.80 nm 和 3.94 nm 时,  $R$  值达到极大值, 对应于反铁磁耦合极大; 当 Cr 层厚度在 1.85 nm, 3.50 nm 和 5.00 nm 时,  $R$  值有极小值, 对应于反铁磁耦合极小. 另外, 饱和场  $H_s$  的变化和  $R$  值的变化基本一致, 当  $R$  值达到极小值时,  $H_s$  有极大值.  $R$  值和  $H_s$  的振荡进一步反映了层间耦合的振荡. 对于反铁磁耦合,  $H_s$  越大, 表明反铁磁耦合越强. 对于这个系列的样品, 当 Cr 层厚度大于 1.0 nm 时,  $M_s$  基本不随 Cr 层厚度变化. 在 Fe/Cr 多层膜中已发现存在着从铁磁耦合到反铁磁耦合的振荡<sup>[2]</sup>, 但 Fe 层和 Cr 层都是晶态. 在 Co-Nb/Cr 多层膜中, 当磁性层为合金且合金层和 Cr 层都是非晶时, 也存在层间耦合振荡.

### 2.3 系列 No.2, No.3 样品的 $M_s$ 振荡特性

图 2c,d 分别是 No.2 与 No.3 样品的  $R$  值和  $M_s$  随 Cr 层厚度变化的曲线. 两个结果比较相似, 其饱和磁化强度  $M_s$  和  $R$  值均发生了振荡, 这与 No.1 样品明显不同. 这种  $M_s$  振荡首先在 Fe-Si/Cr 中发现过<sup>[11]</sup>. Mössbauer 谱测量表明对于  $M_s$  发生明显振荡的样品, 磁性层可等效为铁磁性层和顺磁性层两部分, 振荡变化是由于顺磁成分的振荡变化产生的. 同理, Co-Nb/Cr 多层膜中的  $M_s$  振荡也是由于磁性层中顺磁性成分的振荡引起的, 这进一步证实不同的氩气压下制备的 Co-Nb/Cr 表现出明显不同的特性. 溅射氩气压引起磁性变化的机理有待进一步研究.

## 3 结 论

由高频溅射仪制得的 Co-Nb/Cr 多层膜中, 由于制备样品的氩气压不同, 导致不同的结果. 在 2.67 Pa 溅射氩气压下, 样品铁磁层间出现耦合振荡, 饱和磁化强度  $M_s$  基本不变, 而在 0.67 Pa 溅射氩气压下, 样品的  $M_s$  发生了振荡, 这可能与其铁磁层中顺磁分量振荡有关.

## 参 考 文 献

- 1 Grünberg P, Schreiber R, Pang Y, Brodsky M B, Sowers H. *Phys Rev Lett*, 1986; 57: 2442
- 2 Barthlmy A, Fert A, Baibich M N, Hadjoudj S, Petroff F, Etienne P, Cabanel R, Lequien S, Nguyen Van Dan F, Creuzet G. *J Appl Phys*, 1990; 67: 5908
- 3 Parkin S S P, Bhadra R, Roche K P. *Phys Rev Lett*, 1991; 66: 2152
- 4 Celinski Z, Heinrich B. *J Magn Magn Mater*, 1991; 99: L25
- 5 Parkin S S P, More N, Roche K P. *Phys Rev Lett*, 1990; 64: 2304
- 6 Qiu Z Q, Pearson J, Berger A, Bader S D. *Phys Rev Lett*, 1992; 68: 1398
- 7 FuB A, Demokritov S, Grünberg P, Zinn W. *J Magn Magn Mater*, 1992; 103: L221
- 8 Levy M, Ounadjela K, Zhang S, Wang Y, Sommers C B, Fert A. *J Appl Phys*, 1990; 67: 5914
- 9 Bruno P, Chappert C. *Phys Rev Lett*, 1991; 12: 1602
- 10 Toscano S, Briner B, Hopster H, Landolt M. *J Magn Magn Mater*, 1992; 114: L6
- 11 Liu Y H, Zhang Y M, Yan S S, Ma X D. *Phys Rev*, 1993; B8: 10266
- 12 谭春雨, 夏曰源, 张汝贞, 刘吉田, 刘向东, 许炳章, 李淑英, 陈友鹏, 张淑芝. 山东大学学报, 1993; 28: 189 (Tan C Y, Xia Y Y, Zhang R Z, Liu J T, Liu X D, Xu B Z, Li S Y, Chen Y P, Zhang S Z. *J Shandong Uni*, 1993; 28: 189)
- 13 Baibich M N, Broto J M, Fert A, Nguyen Van Dan F, Petroff F, Etienne P, Creuzet G, Friederich A, Chazelas J. *Phys Rev Lett*, 1988; 61: 2472