

[Fe/Cr]多层膜及掺入 Si 中介层后的 层间耦合和磁电阻效应*

胡永健 彭初兵 方瑞宜 李文君 戴道生

(北京大学物理系, 北京 100871)

(1995 年 7 月 17 日收到)

用真空蒸镀方法制备了 [Fe/Cr], [Fe/Cr/Si] 和 [Fe/Si] 多层膜. 研究了 Cr 层、Si 层和 Cr + Si 层厚度变化对层间耦合和磁电阻的影响. Fe 层厚为 2 nm, Cr 层厚度变化存在耦合振荡和巨磁电阻及其振荡. 磁电阻值为 14.6% (4.2 K). 在 Cr 层中加入一半 Si 层或全部由 Si 层替代, 振荡消失, 磁电阻减小到千分之几. 根据掺 Si 层后多层膜的电阻率变化, 认为 Si 加入使非磁层中自由电子数减少, 随之极化效应也变弱, 导致振荡消失, 磁电阻大为降低.

PACC: 7500; 7570

1 引 言

自从在 Fe/Cr, Co/Cu 和 Co/Ru 等多层膜中发现磁层之间存在交换耦合及其随非磁层厚度增加而振荡^[1-3]后, 人们对这种现象和机理十分关注. Bruno 等^[4]基于自旋极化模型和 RKKY 理论、Edwards 等^[5]用紧束缚模型和考虑到 Fermi 面结构的影响, 定性地解释了交换耦合现象. 与此同时, 观测到金属多层膜的巨磁电阻效应^[6,7]. 基于自旋相关散射, Camley 等用半经典理论^[8], Levy 等用量子理论^[9]定性地解释了它的起因. 吴建华等^[10]在 Camley 等的理论基础上给出了随非磁层厚度振荡的结果.

近年来, 人们从各个角度想通过实验上得到非磁层中自由电子极化存在的证据, 如对 Co/Cu 多层膜的 NMR 研究^[11]、同步辐射对量子阱态的研究^[12]、X 射线磁圆二色性法对 Co/Cu 和 Fe/Cu 多层膜中 Cu 层自由电子极化的研究^[13]等. 这些实验在某种程度上给出了肯定的结果. 但仍然未能很好地解决问题.

最近对三明治型 Fe/Si/Fe 膜的研究表明^[14], 当 Si 层在 1.4–2.0 nm 时, 观测到反铁磁极化现象, 并估算了耦合强度 $J \approx 5 \times 10^{-6} \text{ J/m}^2$. 这比以一般金属为非磁层时小两个数量级. 对 Fe/Si 多层膜的研究表明^[15], Si 层在 1.4 nm 左右的剩磁比 (M_r/M_s) 极小 (约为 0.4), 磁电阻虽只有千分之几, 但有很明显的涨落. 这些说明 Si 对耦合作用和磁电阻有很大影响. 另外, 如用半导体或绝缘体做中介层, 可能会在多层膜中出现令人感兴趣的问题. 引入自由电子数变化对磁电阻的影响, 吴建华等^[10]从理论上进行了一些讨论. 但在实验

* 国家自然科学基金、中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室和北京市中关村地区测试基金资助的课题.

上还未能给出规律性结果。

我们在 Fe/Cr 多层膜的 Cr 层中,用一半 Si 层或整个 Si 层替代后,耦合作用和磁电阻发生变化,结果耦合振荡消失,磁电阻值减小到千分之几。

2 样品制备和测量

2.1 样品的制备

采用真空蒸镀法制备了 Fe/Cr, Fe/Cr/Si 和 Fe/Si 三组多层膜。本底真空为 2×10^{-5} Pa,镀膜过程中不低于 1×10^{-4} Pa。基片为 0.17 mm 厚的玻璃片,将其加热到 150—200°C。蒸发速率通过 IL400 膜厚指示仪自动控制电子枪电源来调节,对所有的元素都控制在 0.1 nm/s。设定 Fe 层厚为 2.0 nm, Cr 层和 Si 层厚度以 0.2 nm 为间隔递增,具体三组样品系列如下:

$$[\text{Fe}(2.0\text{nm})/\text{Cr}(x)]_{20} \quad x=0.4, 0.6, \dots, 3.4 \text{ nm},$$

$$[\text{Fe}(2.0\text{nm})/\text{Si}(x)]_{20} \quad x=0.4, 0.6, \dots, 1.8 \text{ nm},$$

$$[\text{Fe}(2.0\text{nm})/\text{Cr}(\frac{x}{2})/\text{Si}(\frac{x}{2})]_{20} \quad x=0.6, 0.8, \dots, 1.6 \text{ nm}.$$

三组样品均未蒸镀基层和覆盖层。

2.2 X 射线衍射分析

X 射线小角和大角衍射分析了各多层膜的周期性和每层金属的结构。图 1 给出了非磁层厚为 2.0 nm 的三种样品的小角衍射结果。可以看到 Fe/Si 和 Fe/Cr 多层膜有三个峰(有的样品只有两个峰)。Fe/Cr/Si 多层膜只有两个峰,而且第 2 峰很弱,可能是界面较多,清晰度增大所致。经过计算,与原设定的每层厚度的误差在 3% 左右,少数可能在 6% 以下。

大角衍射出现两个峰,分别为 Fe(110)和 Cr(110), Fe(200)和 Cr(200)峰的重合。Fe 和 Cr 的(110)面或(200)面的间距差约为 0.0012 nm 而很难分开。对于 Si 层结构无法判断。图 2 为 [Fe(2.0)/Cr(2.0)], [Fe(2.0)/Si(2.0)] 和 [Fe(2.0)/Cr(1.0)/Si(1.0)] 三个样品的 X 射线衍射谱。

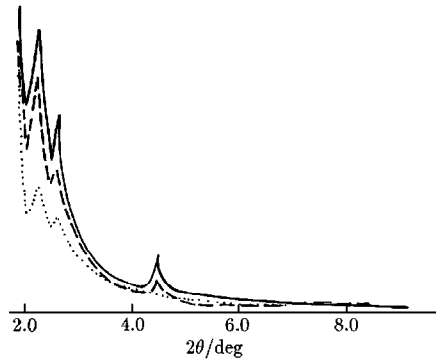


图 1 样品的小角衍射谱 ——为 [Fe(2.0)/Cr(2.0)]₂₀, - - - 为 [Fe(2.0)/Si(2.0)]₂₀, ····为 [Fe(2.0)/Cr(1.0)/Si(1.0)]₂₀

2.3 磁性测量

用 VSM 测量了所有样品在 77 和 300K 的饱和磁化强度 M_s 和剩余磁化强度 M_r , 矫顽力和剩磁比 M_r/M_s 。从 M_r/M_s 与非磁层厚度的关系,可对是否存在反铁磁耦合作用作出判断。

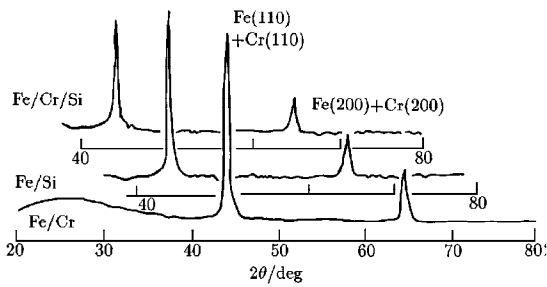


图 2 样品的 X 射线衍射谱(表明 Fe 和 Cr 层都可能为多晶体结构)

2.4 电阻和磁电阻测量

设磁电阻 $R_m = (\rho_H - \rho_0) / \rho_0$, 其中 ρ_0 , ρ_H 和 ρ_s 分别为磁场为零 H_0 , H 和饱和磁场 H_s (一般 $H_s = 0.6T$) 时的电阻率. 用四电极伏安法测量了 77 和 300K 时所有样品的电阻和磁电阻, 还测量了少数样品在 4.2K 下的磁电阻 (最大的为 14.6%). 电流 I 和磁场均在膜面内, 并互相垂直. 对平行情况也做了测量, 但未发现各向异性.

3 结果与讨论

1) 图 3 给出了对 Fe/Cr 多层膜在 77 和 300K 测得的 M_r/M_s 比值与 Cr 层厚度的关系. 从图 3 可以看到, 在 Cr 层厚为 0.8 nm 时, M_r/M_s 分别为 0.3 和 0.15, 在 2.4 nm 时, 分别为 0.4 和 0.3 左右. 这表明, 当 Cr 层厚为 0.8, 2.4 nm 时, Fe/Cr 多层膜中存在反铁磁耦合. 当 Cr 层在 0.4, 1.8 和 3.4 nm 以上时, 则存在铁磁耦合. 并估计出振荡周期为 1.6 nm, 与前人工作基本一致.

图 4 给出了 Fe/Cr 多层膜在 77K 时测得的磁电阻 R_m 与 Cr 层厚度的关系. 可以看到, 在 0.8 和 2.6 nm 时出现峰值, 两峰间距约 1.8 nm, 和磁测量结果基本一致. 这说明用真空蒸镀方法制成的多层膜同时表现出交换耦合振荡和相应的磁电阻振荡. 两者的振荡周期略有差别的原因可能是样品的一致性不很好引起的 (实验中电测量和磁测量用的不是同一样品).

2) 从 Cr 层被 Si 层取代一半和全部取代的实验结果来看, M_r/M_s 均大于 0.5, R_m 值很小, 都不显示振荡现象 (图 4, 图 5). 从图 4 可以看到 R_m 只有 2% 左右, 这说明加 Si 层

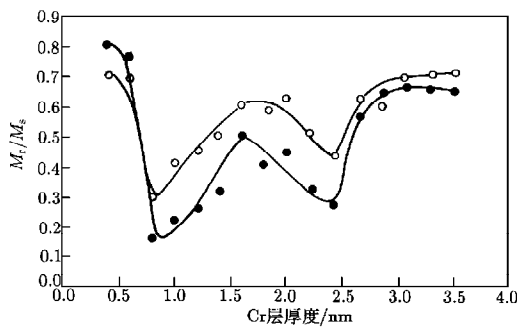


图 3 $[Fe(2.0)/Cr(x)]_{20}$ 多层膜的 M_r/M_s 与 Cr 层厚 x 的关系 ○ 为 77K, ● 为 300K

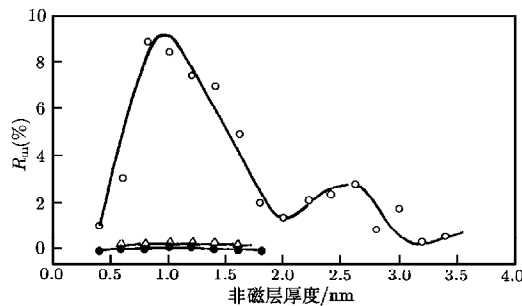


图 4 Fe/Cr 和掺 Si 多层膜磁电阻与非磁层厚度的关系 (77K) ○ 为 $[Fe(2.0)/Cr(x)]_{20}$; △ 为 $[Fe(2.0)/Cr(\frac{x}{2})/Si(\frac{x}{2})]_{20}$; ● 为 $[Fe(2.0)/Si(x)]_{20}$

后,使磁电阻效应极大地减弱.这个结果不同于大块铁磁材料的各向异性磁电阻,因磁场平行和垂直电流方向时 R_m 均为负值.

Si 作为中介层后,多层膜的耦合振荡现象消失、磁电阻大为下降的原因,可能是 Si 层中自由电子数较少,使中介层的极化电子数相应降低较多,导致 RKKY 作用失效,因此只可能具有铁磁性,同时使得磁电阻大大降低.这种认为 Si 层自由电子数较少的解释,可以从图 6 的零场电阻和电阻率的实验结果得到一定的支持.由图 6 可以看出,Fe/Cr 多层膜的电阻值与 Cr 层厚度的关系不大,电阻率有上升的趋势.说明 Fe 和 Cr 都是导电层.对于 Fe/Cr/Si 和 Fe/Si 多层膜来说,电阻值也不随非磁层厚度变化,却分别比 Fe/Cr 多层膜增大近一倍和四倍,这说明主要是 Fe 层和 Cr 层导电,而电阻率却是随 Si 层厚度的增大而直线上升.

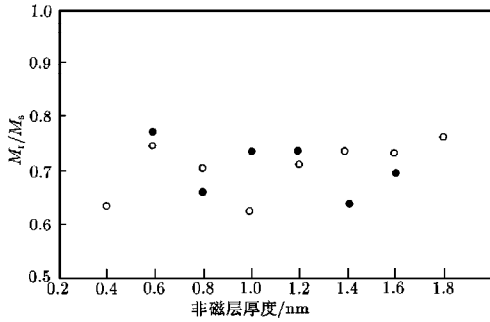


图 5 [Fe/Cr/Si]和[Fe/Si]多层膜的 M_r/M_s 与非磁层厚度的关系(300K) ○Si 层,●Si + Cr 层

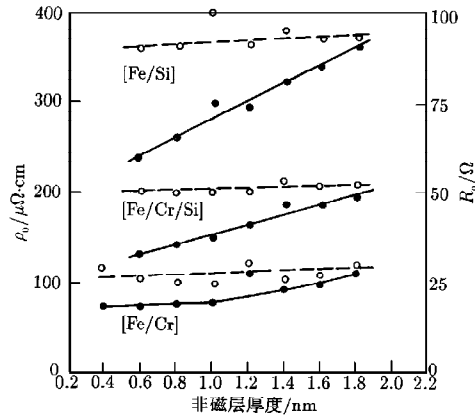


图 6 [Fe/Cr],[Fe/Cr/Si]和[Fe/Si]三组多层膜的电阻 R_0 和电阻率 ρ_0 随非磁层厚度变化的关系(77K) ○为 R_0 ,●为 ρ_0

总而言之,用真空蒸镀方法制成的 Fe/Cr 多层膜中也显示出交换耦合振荡和巨磁电阻效应.加 Si 层后,由于 Si 层自由电子数较少,可能使 RKKY 作用减弱较多,因而不出现反铁磁耦合,磁电阻值也只有千分之几.

- [1] P. Grunberg, R. S. Schreiber, T. Pang, M. B. Brodsky and H. Sowers, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 2442.
- [2] S. S. P. Parkin, N. More and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 2304.
- [3] S. S. P. Parkin, R. Bhadra and K. P. Roche, *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 2152.
- [4] P. Bruno and C. Chappert, *Phys. Rev.*, **B46**(1992), 261.
- [5] D. Edwards, J. Mairon, R. B. Muniz and M. S. Phan, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 493.
- [6] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau and F. Petroff, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2472.
- [7] S. S. P. Parkin, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 3598.
- [8] R. E. Camley and J. Barnas, *Phys. Rev. Lett.*, **63**(1989), 664.
- [9] P. M. Levy and S. F. Zhang, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 1643.
- [10] 吴建华,中国科学院物理研究所博士学位论文,1995.

- [11] H. R. Zhai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **72**(1994), 768.
- [12] K. Garrison *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993), 2801; C. Carbone *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993), 2805.
- [13] S. Pizzini, A. Fontaine, C. Giorgti and E. Dartyge, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 1470.
- [14] B. Briner and M. Lardolt, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 340.
- [15] K. Inomata, K. Yusu and Y. Saito, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 1863.

INTERLAYER COUPLING AND MAGNETORESISTANT EFFECT IN THE [Fe/Cr] MULTILAYERS DOPED WITH Si LAYERS

HU YONG-JIAN PENG CHU-BING FENG RUI-YI LI WEI-JUN DAI DAO-SHENG

(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

(Received 17 July 1995)

ABSTRACT

[Fe/Cr], [Fe/Cr/Si] and [Fe/Si] multilayered systems were prepared by the vacuum evaporating method. The effects of the altered space thicknesses of the nonmagnetic Cr, Si and Cr + Si layers on the exchange coupling and the magneto resistance of those multilayers were studied. The Fe layers were fixed on 2.0 nm. The oscillation of the interlayer coupling and the giant magnetoresistance (GMR) and its oscillation with the change of the Cr layer thickness were observed. The GMR was 14.6% at 4.2K. There was no oscillatory effect of the exchange coupling and GMR in the [Fe/Si] and [Fe/Cr/Si] multilayers was found.

According to the increases of the resistivity of the samples doped with Si layers, we believe the conducting electrons in the nonmagnetic layers should decrease largely. This would be the cause to reduce the polarization effect of those electrons in the space layers. Then the oscillatory exchange coupling disappeared and the magnetoresistance was much reduced.

PACC: 7500; 7570