

# Fe/[NiFe/Cu]<sub>30</sub> 多层膜线列阵 的铁磁共振研究

陈慧余 李志超 付绍军 金嗣昭 梁任又

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

(1998 年 9 月 29 日收到)

用铁磁共振(FMR)技术研究 Fe/[NiFe/Cu]<sub>30</sub> 多层膜线列阵的特性, 线列阵采用激光全息光刻和离子束刻蚀技术加工, 线密度为 250 线/mm 和 500 线/mm. 线列阵样品的 FMR 谱在稍高于主峰(声学峰)的共振场下有光学峰出现, 相当层间交换耦合为反铁磁型. 光学峰与声学峰的峰位间距沿易轴小于沿难轴. 又, 来自非磁 Cu 夹层的顺磁共振峰的幅度远大于原始连续膜, 说明线列阵加工致使层结构退化.

PACC: 7570; 7650

## 1 引 言

磁性薄膜人工微列阵电磁特性是近年来的一个研究热点, 引起关注的是: 列阵化样品的特性相对原始连续膜有明显变化<sup>[1-5]</sup>. 巨磁电阻(GMR)多层膜线列阵的研究是个新课题, 引起兴趣的是这变化的趋势与 GMR 率的大小或交换耦合状态相关<sup>[6]</sup>. GMR 率小的多层膜, 列阵化引起的变化与单层膜列阵化的效果<sup>[1-5]</sup>相近, 而 GMR 率大的, 区别明显变大了. 多层膜层间存在反铁磁耦合是造成上述区别的原因. 文献[6]报道: 有些 Fe/[NiFe/Cu]<sub>30</sub> 多层膜线列阵的 GMR 率小于原始连续膜. 本文试图用铁磁共振(FMR)方法进一步研究列阵化致使 GMR 率减小的原因. FMR 被公认是研究多层膜层间交换耦合的有利的工具. 多层膜存在层间交换耦合, 则其 FMR 谱可能包含声学 and 光学两类模. 如果层间为铁磁耦合, 光学模的共振场低于声学模; 与此相反, 若为反铁磁层间耦合, 则光学模的共振磁场高<sup>[7,8]</sup>. Ando 等<sup>[9]</sup>用 FMR 方法得到了 [Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Cu]<sub>N</sub> (N 从 2 到 5) 多层膜的交换耦合能数据, 直接证明交换耦合能与非磁 Cu 夹层的厚度存在振荡关系. 细看他们的实验结果, 当层数 N=5 时, 光学模的幅度已变得相当小了. 当不计交换耦合时, 各铁磁层的共振场完全一样, 则光学模消失. 这就使运用 FMR 法研究五层以上的多层膜的交换耦合特性困难较大. 本文测试结果是: 在原始连续多层膜的 FMR 谱中找不到光学模, 而在列阵化样品的 FMR 谱中出现光学模, 且光学模的共振场大于声学模, 相当层间存在反铁磁交换耦合. 两模共振峰位间距与外加静磁场 H 的取向有关, H 垂直刻线方向(难磁化方向)时大于 H 平行线方向(易磁化方向). 另一件引起注意的是: 所有样品的 FMR 谱中都包含共振场为 300 mT 左右的吸收峰, 且共振场值随外场方向变化不大, 可断定是非磁 Cu 夹层的顺磁共振峰. 列阵化使这种峰的相对幅度增大, 线列阵样品的明显大于连续膜,

说明列阵加工导致多层膜的界面模糊化,或多层结构退化.我们认为这是使列阵化样品的 GMR 率减小的重要原因.

## 2 实 验

用磁控溅射法沉积 Fe(6nm)/[NiFe( $t_1$ )/Cu( $t_2$ )]<sub>30</sub>多层膜于玻璃衬底上.其中 NiFe 指坡莫合金,厚度  $t_1$  从 1.5 nm 到 2 nm;Cu 层厚度  $t_2$  从 1 nm 到 1.1 nm. ( $t_1 + t_2$ )用 X 射线小角衍射检测,选用 Cu 靶  $K_\alpha$  射线,工作电压 40 kV,电流 100 mA.线列阵是用激光全息光刻法和离子束刻蚀技术制作的,线密度为 250 和 500 线/mm.FMR 谱用 ER-200D-SRC 电子自旋共振谱仪测量,微波频率 9.43 GHz,外加静磁场保持平行膜面,微波场垂直膜面.对线列阵样品测量了外场平行和垂直刻线方向的两个谱.用一般四端引线方法把样品内所有阵元并联进行磁电阻测量.本文研究的两组多层连续膜和线列阵的几何参数和磁电阻率给予表 1,有关这些样品的详细资料见文献[6],其中有线列阵的形貌、X 射线小角衍射谱、磁电阻回线和磁滞回线.

表 1 Fe(6nm)/[NiFe( $t_1$ /Cu( $t_2$ )]<sub>30</sub>多层连续膜和列阵的几何参数和 GMR 率

样品编号	设计厚度		实测周期 [ $t_1 + t_2$ ]/nm	线宽 $b/\mu\text{m}$	线间距 $\delta/\mu\text{m}$	线密度 /l·mm <sup>-1</sup>	GMR 率 /%
	$t_1/\text{nm}$	$t_2/\text{nm}$					
1#c	1.5	1.1	2.45 ± 0.03				19.1
1#p	1.5	1.1	2.45 ± 0.03	2.4	1.6	250	15.7
1#v	1.5	1.1	2.45 ± 0.03	2.4	1.6	250	15.9
2#c	1.75	1.0	2.45 ± 0.07				8.5
2#p	1.75	1.0	2.45 ± 0.07	1.3	0.7	500	7.1
2#v	1.75	1.0	2.45 ± 0.07	1.3	0.7	500	7.5

注:1#,2#是原始膜号,其后加“c”表示连续膜样品,加“p”和“v”表示线列阵样品,外场平行和垂直刻线方向.实测周期是依据 X 射线小角衍射谱计算的.

## 3 结果和分析

图 1 示 1#,2#两组 Fe/[(NiFe)/Cu]<sub>30</sub>多层连续膜和线列阵样品的 FMR 谱.是吸收功率对静磁场  $H$  的微分.实线为实测数,点线为计算拟合数,在精密拟合段两线重合,点线消失.易见,所有实测谱线,除含铁磁共振吸收成分外,还有非共振吸收的背景.这种背景应来自高导电率多层膜的涡流损耗.背景幅度与交变磁化率的虚部成正比,也就是与样品的磁化强度成正比.

实测 FMR 谱的共振吸收线宽度较大,且多个模的吸收重叠,再加上大的非共振背景,给谱分析造成困难.我们设置拟合谱,包含共振和非共振两项,又根据拟合参数作了分立的共振吸收线图(如图 2 所示).其中非共振的背景函数由指数型和直线型函数组合而成,即  $a \pm b[\exp(\varphi - cH)]$  和  $d + eH$ .正指数用于曲线左边;负指数用于曲线右边;直线

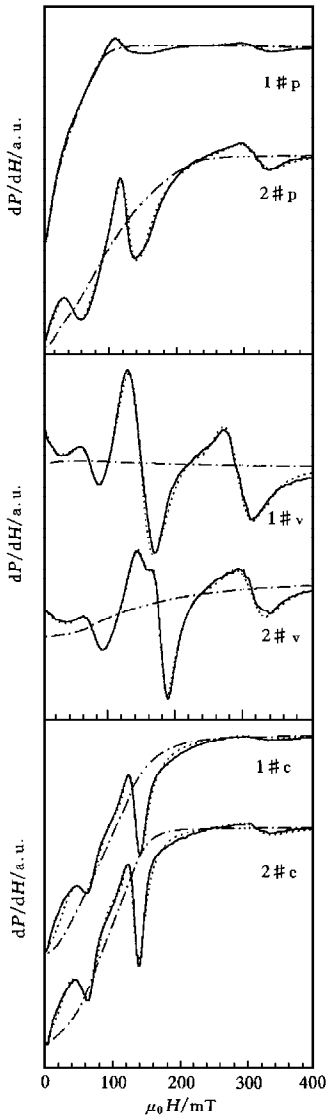


图 1 1#, 2# 多层连续膜和线列阵的 FMR 谱(实线). 点线为拟合谱, 点划线为拟合的非共振背景. 样品编号的意义见表 1 的注

用于连续左右两边, 接点的斜率要一致. 合成后称作基线函数  $f(H)$ , 在图 1 中用点划线表示.

共振项的拟合, 我们假设: 各个 FMR 模的吸收功率  $P_i(H)$ - $H$  线具有洛伦兹线形

$$P_i = \frac{A_i}{1 + [(H - H_i)/G_i]^2}, \quad (1)$$

总的共振吸收功率  $P$  为

$$P_{res} = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

其中  $A_i$  为第  $i$  个峰的峰高,  $H_i$  为其峰位场值,  $G_i$  为其半峰宽,  $n$  为共振峰的个数. 我们采用总共振吸收功率对静磁场  $H$  的微分为

$$(dP/dH)_{res} = \sum_{i=1}^n [d(P_i)/dH], \quad (3)$$

拟合函数为

$$dP/dH = (dP/dH)_{res} + f(H). \quad (4)$$

这样假设拟合背景函数并不具有多种选择的随意性, 在这种函数中不可能再提取出色散型的微分函数 (即洛伦兹函数微分), 换句话说, 其中不再含共振吸收成分. 拟合背景曲线 (图 1 中的点划线) 的形状与铁磁层的静态磁化曲线 (可参看文献 [6]) 相似. 这种背景反映的信息有待进一步深入挖掘.

图 2 所示的是各样品所有 FMR 模的分立的共振吸收曲线, 是利用拟合参数, 根据 (1) 式作出的.

由图 1 和图 2 所给出的 FMR 谱, 可见以下几点:

(1) 所有样品主峰的共振场在 117 mT 到 174 mT 之间, 这是铁磁层 (坡莫合金 NiFe) 的一致共振吸收, 相邻层磁矩绕静磁场进动的位相相同, 是声学模, 在图 2 中的这些峰顶上加实圆点作标志. 连续膜与线列阵样品的一致共振场  $H_{res}$  值不同; 同一线列阵样品, 在  $H$  平行和垂直于线向两情况下也不同. 1# 和 2# 两组样品的  $H_{res}$  值从小到大排序各为: 1# p-117 mT, 1# c-135 mT, 1# v-147 mT 和 2# p-126 mT, 2# c-133 mT, 2# v-174 mT. 如

$$\omega = \gamma \sqrt{[H_{res} + (N_x - N_z) M_s][H_{res} + (N_y - N_z) M_s]}, \quad (5)$$

其中  $\gamma$  为旋磁比,  $N_x, N_y$  和  $N_z$  为沿  $x, y$  和  $z$  轴的退磁因子,  $M_s$  为饱和磁化强度. 又, 利用 (5) 式, 坐标规定为: 膜面平行  $yz$  面, 外加静磁场  $H$  沿  $z$  轴. 这样, 连续膜样品的退磁因子是:  $N_y \approx N_z \approx 0, N_x \approx 1$ ; 列阵样品,  $H$  平行于线向也就是线向平行  $z$  轴, 各孤立线元的

如果忽略磁晶各向异性, 一致共振场  $H_{res}$  与微波角频率  $\omega$  关系近似为

$N_x \approx 0$ ,  $N_y \approx t/b$ , 其中  $t = 30 t_1$ , 为铁磁层的总厚度,  $b$  为线列阵样品线元的宽度(见表 1),  $N_x \approx 1 - N_y$ . 这些孤立线元的退磁因子可近似取作列阵样品整体的退磁因子.  $H$  垂直于线向时, 即线向平行  $y$  轴, 在这情况下, 应有  $N_y \approx 0$ ,  $N_z \approx t/b$ ,  $N_x \approx 1 - N_z$ . 把各样品的退磁因子代入(5)式, 可得到上述三种情况的  $H_{res}$ . 两组样品  $H_{res}$  的计算值从小到大的编号的顺序各为: 1#p, 1#c, 1#v 和 2#p, 2#c, 2#v, 与上述实测的结果一致. 定量估算, 在微波频率不变, 直流磁场垂直和平行线向两情况下, 列阵样品的一致共振场之差  $\Delta(\mu_0 H) \approx 2 \mu_0 N_{\perp} M_s$ . 其中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $N_{\perp}$  为垂直线向的退磁因子,  $M_s$  为饱和磁化强度. 铁磁层为坡莫合金,  $\mu_0 M_s \approx 1 \text{ T}$ . 可求得 1# 和 2# 列阵样品的  $\Delta(\mu_0 H)$  分别为 37 mT 和 81 mT, 与实测结果 30 mT 和 48 mT 比较, 前者 1# 列阵样品大致相符, 而后者 2# 列阵样品的实测值远小于估算值. 2# 线列阵样品的线间距  $\delta = 0.7 \mu\text{m}$  很小, 且小于线元的宽度. 因此, 列阵整体的退磁因子远小于孤立线元的值. 而 1# 线列阵线距  $1.6 \mu\text{m}$  较大, 且大于线宽, 列阵整体的退磁因子虽然仍小于孤立线元的值, 但二值之差比 2# 列阵小很多.

(2) 低于铁磁层一致共振场的吸收, 属畴模铁磁共振(DMFNR)<sup>[10]</sup>. 不论连续膜还是线列阵样品都有 2—4 个畴模共振吸收峰. 包括零场共振吸收: 1#c, 2#c 和 2#p 的共振场是负值, 分别为 -20 mT, -25 mT, -20 mT; 1#v 和 2#v 的共振场为正值分别为 10 mT 和 12 mT. 我们认为: 这些零场吸收的存在, 说明层间存在强的静磁和交换耦合场. 在  $[\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Cr}]_2$  线列阵样品中也观察到这种零场吸收, 但用离子束减薄到只剩一个铁磁层时, 这峰消失了<sup>[4]</sup>. 类似的, 在单层坡莫合金( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ )线列阵中也未观察到这种峰<sup>[3]</sup>.

(3) 在稍高于一致共振的场区, 几个线列阵样品都有较弱的吸收峰, 在图 2 中的这些峰顶上加空圆点作标志. 在单层坡莫合金( $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ )线列阵中, 在同样的场区也有小的吸收峰, 是一种“自旋驻波模”吸收<sup>[3]</sup>. 与之不同的是: 那种模仅当静磁场垂直于线向时才能激发, 而我们的情况是静磁场平行于线向时也有被激发的模. 参照文献[8, 9]中报道的多层膜 FMR 谱中有光学模出现在高于一致共振的场区, 相应层间交换耦合为反铁磁型. 我们的多层膜线列阵样品与文献[8, 9]的相似, 图 2 中主峰右侧的小峰应该是光学峰. 光学与声学峰(指主峰)两峰位的间距为:  $(\Delta H)_{ao} \equiv (H_{res})_a - (H_{res})_o$ . 这差值大于零对应反铁磁耦合, 小于零对应铁磁耦合, 数值的大小则标志耦合的强弱. 线列阵样品  $H$  垂直线向时测得的  $(\Delta H)_{ao}$  值大于平行线向, 即样品 1#v 的值 23 mT 和 83 mT 大于 1#p 的 13 mT 和 31 mT; 2#v 的值 71 mT 大于 2#p 的 16 mT. 这种各向异性与 Chesman 报道的结果相似, 在  $\text{Fe}(4 \text{ nm})/\text{Cr}(1.5 \text{ nm})/\text{Fe}(4 \text{ nm})$  中沿难轴的  $(\Delta H)_{ao}$  值大于沿易轴<sup>[11]</sup>. 不同的是, 他们的样品由磁晶各向异性所致, 而我们的样品则是形状各向异性所致. 外场取向相同时, 1#

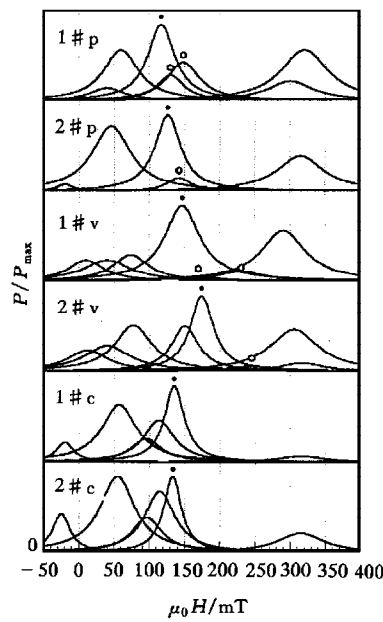


图 2 1#, 2# 多层连续膜和线列阵样品各个 FMR 模的分立的共振吸收线. 峰顶上实圆点标志声学模, 空圆标志光学模

样品的 $(\Delta H)_{\text{ao}}$ 大于2#,相当于1#样品的反铁磁耦合强于2#样品.若根据层间反铁磁耦合的强弱可推断:1#样品的GMR率应大于2#.这推断与表1给出的实测结果相符.

(4) 高于铁磁层一致共振场,在300 mT左右,所有样品都有共振场值随外场方向变化不大的吸收峰.我们断定这吸收来自非磁Cu夹层,Cu原子有顺磁矩.值得注意的是这些峰的相对幅度,线列阵样品明显大于连续膜.这说明线列阵加工致使顺磁相增多,在线列阵加工过程中,多层膜的Cu层与铁磁层间原子有大量的扩散交换,也就是界面模糊化,或层结构退化.我们认为这种结构的变化是线列阵样品GMR率小于原始连续膜的重要原因.

(5) 连续膜样品的FMR谱在主峰与顺磁共振峰之间,没有光学峰.这说明溅射多层膜中的30个铁磁层的均匀和一致性都相当好.因为只有不计交换耦合时,各铁磁层的共振场完全一样,光学峰才消失.而经线列阵加工,包括光刻胶固化和离子束刻蚀等有热干扰的工序,与退火的效果相似<sup>[12,13]</sup>.层间原子扩散,铁磁层的一致性变差是在列阵样品中出现光学峰的原因.

## 4 结 论

磁控溅射法制备的Fe/[(NiFe)/Cu]<sub>30</sub>多层连续膜,铁磁层的均匀性和一致性都好,其FMR谱中无光学峰;而在线列阵样品中有光学峰出来,同时有Cu层的顺磁峰幅度增大.由此说明列阵加工导致的界面模糊化或层结构退化使磁电阻率下降.这个问题在技术应用中值得注意.

本文所用的多层膜材料是首都师范大学陈金昌和郑鹤等几位教授提供,在此致谢.

- [1] M.Kume *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996),6402.
- [2] A.O.Adeyeye *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996),6120.
- [3] A.Maeda *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994),6667.
- [4] Chen Huiyu *et al.*, *J. USTC.*, **25**(1995),397(in Chinese).
- [5] K.Ounadjela *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **81**(1997),5455.
- [6] 陈慧余等,物理学报,**47**(1998),2047 [Chen Hui-yu *et al.*, *Acta Phys. Sinica*, **47**(1998),2047(in Chinese)].
- [7] B.Heinrich *et al.*, *Phys. Rev.*, **B44**(1991),9348.
- [8] B.Heinrich *et al.*, *Adv. Phys.*, **42**(1993),523.
- [9] Y.Ando *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **166**(1997),75.
- [10] M.Ramesh *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **64**(1988),5483.
- [11] C.Chesman *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **81**(1997),3791.
- [12] M.Jimbo *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **165**(1997),304.
- [13] S.Bouat *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **165**(1997),338.

## THE STUDY OF FERROMAGNETIC RESONANCE IN WIRE ARRAY OF MULTILAYER Fe/[NiFe/Cu]<sub>30</sub>

CHEN HUI-YU LI ZHI-CHAO FU SHAO-JUN JIN SI-ZHAO LIANG REN-YOU

(*Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

(Received 29 September 1998)

### ABSTRACT

The properties of multilayer Fe/[NiFe/Cu]<sub>30</sub> wire arrays were investigated by ferromagnetic resonance (FMR) technique. The arrays with wire density of 250 line/mm and 500 line/mm were fabricated utilizing laser hologram lithography and ion beam etching. In the wire array samples, optical peak occurs at higher field than the acoustic peaks and the exchange coupling between the NiFe layers is therefore antiferromagnetic. The optical peak along the easy axis lies closer to its acoustic counterpart than that along the hard axis. For wire arrays the paramagnetic resonance of the Cu layers is much stronger than the continuous film. This shows the degradation of the layer structure after the array fabrication.

PACC: 7570; 7650