

多层膜线列阵的巨磁电阻和层间耦合*

陈慧余 孙 勇 李志超

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

陈金昌 郑 鹂 王艾玲

(首都师范大学物理系, 北京 100037)

(1998 年 1 月 12 日收到; 1998 年 6 月 29 日收到修改稿)

研究了 $\text{Fe}/[\text{NiFe}/\text{Cu}]_{30}$ 多层膜线列阵的室温磁电阻和磁滞特性, 列阵的线密度为 250 和 500 线/mm, 采用激光全息光刻和离子束刻蚀技术制成. 线列阵样品的磁性与刻线加工前的连续膜有明显区别. 最大巨磁电阻率有增也有减, 最大增量为 3.32%. 外场平行线轴的矫顽力有的增加有的不变. 这除了因为原始连续膜层间耦合态有差异之外, 还与由线列阵加工引入的单轴各向异性和其它变化相关.

PACC: 7570; 7580; 7530E

1 引 言

近来, 磁性薄膜人工微列阵成为研究热点, 列阵有线、点和反点几类^[1-6]. 已有的实验和理论研究结果证明: 若列阵元的二维或三维尺度与单畴的临界值相当, 整个样品的磁性将与加工形成列阵前的连续膜有明显区别. 本文着重研究多层膜的电磁特性在列阵化后所发生的变化, 特别关心最大巨磁电阻(GMR)率、矫顽力和剩磁等技术参量. 由于这对用 GMR 材料制作微型器件极为重要. 已有报道: (1) 线列阵样品矫顽力大于连续膜, 且随线宽减少明显增大. 例如坡莫合金单层膜线列阵, 线宽从 5 μm 减小到 0.2 μm , 其矫顽力从 2 增大到 40 mT ^[2]; 又如, $[\text{81NiFe}/\text{Gr}]_2$ 四层膜线列阵, 线密度为 500 线/mm, 线宽为 1.3 μm , 其矫顽力从连续膜的值 0.39 增大到 2.36 mT ^[3]. (2) 线列阵的最大磁电阻率大于连续膜. 例如 $\text{NiFe}/\text{Co}/\text{Cu}/\text{Co}$ 线列阵的最大磁电阻率从连续膜的 3.47% 增大到 4.14%^[4].

由于现代微加工技术可确保薄膜列阵中各个阵元形状、尺寸和间距一致, 就有可能通过检测整个列阵样品的特性, 导出微阵元的性质. 这不论对设计超小型器件, 还是发展微磁理论都有重要意义.

2 实 验

用磁控溅射法沉积 $\text{Fe}(6 \text{ nm})/[\text{NiFe}(t_1)/\text{Cu}(t_2)]_{30}$ 多层膜于玻璃衬底上. 其中 NiFe

*北京市自然科学基金(批准号:1962003)资助的课题.

指坡莫合金,厚度 t_1 从 1.5 到 2 nm;Cu 层厚度 t_2 从 1 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,工作电压为 40 kV,电流为 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—500 线/mm. 列阵图形用金相显微镜成像,物镜放大倍数为 12.5 和 50, 直接由 CCD 接收,输到微机显示,激光打印或照像成图. 用一般的四端引线技术把样品内所有线元并联进行磁电阻测量. 定义:磁电阻率 $dR/R = (R_H - R_m)/R_m$, 其中 R_H 为试样在场 H 时的电阻, R_m 为最大磁场下的电阻. 外磁场平行膜面与电流方向成 θ 角. 纵向和横向意指 θ 为 0° 和 90° . 磁滞回线用交流梯度磁强计测量,外加磁场平行膜面,与线向成 θ 角. 通过转动样品调节 θ 角,磁场方向不变.

本文研究的三组 $\text{Fe}(6 \text{ nm})/[\text{NiFe}(t_1)/\text{Cu}(t_2)]_{30}$ 多层连续膜和线列阵的几何参数: 设计和实测的层厚度以及列阵的线宽 b 、间距 δ 和线密度,列于表 1 中.

表 1 $\text{Fe}(6 \text{ nm})/[\text{NiFe}(t_1)/\text{Cu}(t_2)]_{30}$ 多层连续膜和列阵的几何参数

样品编号	设计层厚度		实测周期 [$t_1 + t_2$]/nm	线宽 $b/\mu\text{m}$	线间距 δ/fm	线密度 l/mm
	t_1/nm	t_2/nm				
Film 1 [#]	1.5	1.1	2.45 ± 0.03			
Array 1 [#]	1.5	1.1	2.45 ± 0.03	2.4	1.6	250
Film 2 [#]	1.5	1.1	2.29 ± 0.05			
Array 2 [#]	1.5	1.1	2.29 ± 0.05	2.4	1.6	250
Film 3 [#]	1.75	1.0	2.45 ± 0.07			
Array 3 [#]	1.75	1.0	2.45 ± 0.07	1.3	0.7	500

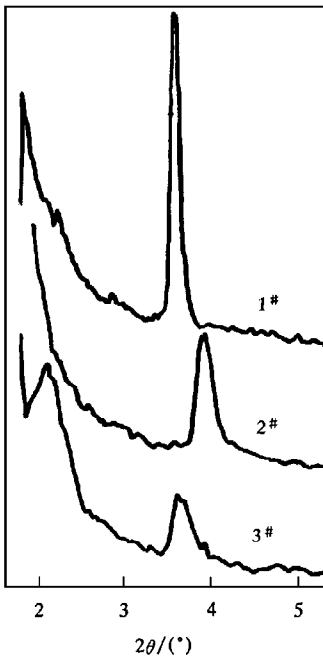


图 1 1[#], 2[#] 和 3[#] 多层膜的 X 射线衍射谱

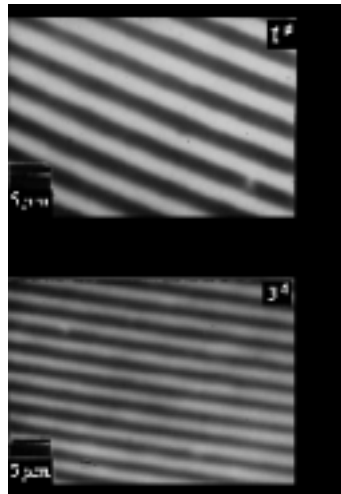


图 2 (a)1[#] 和 (b)3[#] 线列阵样品的显微照片

表 1 中给出的实测周期是依据图 1 所示的 X 射线小角衍射谱计算的. 易见 1[#] 多层膜的衍射谱线, 峰窄且高, 说明多层膜中 30 个周期的一致性; 而 3[#] 的谱线峰低且宽, 显示

铁磁和非磁层厚度的均匀性或各周期的一致性差. 图 2(a), 图 2(b) 给出 1[#] 和 3[#] 线列阵样品的显微照片, 选用物镜的放大倍数为 50. 2[#] 列阵的显微图象与 1[#] 基本一样, 未在图 2 中给出. 从图 2 给出的照片可见, 线列阵样品中的线宽(图 2 中白色条)和间距(黑色条)的均匀性和一致性都很好.

3 结果与分析

1[#], 2[#] 和 3[#] 三组连续膜和线列阵的纵向和横向磁电阻回线示于图 3(a) 和图 3(b). 此图给出的实验结果有几点值得注意: (1) 三个连续膜的最大磁电阻率 $(dR/R)_{\max}$ 数值相差很大: 1[#] 最大, 纵向 18.62%, 横向 19.13%; 3[#] 最小, 纵向 8.04%, 横向 8.49%; 2[#] 居中, 纵向 12.90%, 横向 13.57%. 横向值都大于纵向, 二者之差在 0.45% (3[#]) 到 0.67% (2[#]) 之间, 远小于最大磁电阻率. (2) 列阵样品的 $(dR/R)_{\max}$ 大小按 2[#], 1[#] 和 3[#] 排序, 与连续膜不同: 纵向值, 2[#] 增大 3.22%, 1[#] 和 3[#] 分别减小 2.95% 和 0.92%; 横向值, 2[#] 增大 2.96%, 1[#] 和 3[#] 分别减小 3.28% 和 1.02%, 前者的增值小于纵向, 后者的减值大于纵向. (3) 列阵样品纵向磁电阻回线两峰的间距: 1[#], 2[#] 和 3[#] 分别为 4.1, 6.8 和 3.8 mT. 1[#] 与连续膜几乎相等, 但 2[#] 和 3[#] 则明显大于连续膜之值 3.0 和 0.9 mT. (4) 三个列阵样品的横向磁电阻回线的形状与连续膜差别很大, 最明显的是峰顶很平缓. 更奇特的是 3[#] 列阵出现宽度达到 60 mT 的平顶.

根据 GMR 率与相邻铁磁层磁矩 M_1 和 M_2 间夹角 Ψ 相关, 最大 GMR 率 $[dR/R]_{\max}$ 由 Ψ 角从退磁态到饱和态的变化决定, 即

$$[dR/R]_{\max} \propto -[\cos \Psi_0 - \cos \Psi_s], \quad (1)$$

其中 Ψ_0 和 Ψ_s 各为退磁态和饱和态的 Ψ , 本实验选的最大磁场 H_m 足够大, 能使磁化达到饱和, 即 $\Psi(H_m) \approx \Psi_s = 0$. 在这情况下, 最大 GMR 率数值取决于 Ψ_0 . 层间铁磁、反铁磁和 90° 耦合分别相当 Ψ_0 等于 0°, 180° 和 90°. 根据(1)式可初步判定三个连续膜的反铁磁层间耦合所占的比例, 按 1[#], 2[#], 3[#] 的顺序减小.

图 4 给出 1[#], 2[#] 和 3[#] 三组连续膜和线列阵的磁滞回线. 引起兴趣的是: 三个连续膜加工成列阵后, 磁性变化的趋势差别很大. (1) 外场平行线向时, 列阵的矫顽力与连续膜相比: 1[#] 和 2[#] 列阵变化不大; 而 3[#] 列阵明显增大, $\mu_0 H_c$ 从 0.37 增到 1.90 mT. 这些矫顽力值近似等于图 3 中磁电阻回线两峰的间距的二分之一. 又, 列阵样品的剩余磁化强度与连续膜比较: 1[#] 基本没变; 而 2[#] 明显增大; 3[#] 反倒减小(见图 4 中三个小插图). (2) 外场垂直线向时, 在低场区 ($\mu_0 H < 20$ mT) 的磁滞回线接近于无滞的斜线, 即磁化强度近似与外磁场强度成正比.

上述的实测的三组连续膜和线列阵的磁滞特性可用层间交换能表达式唯象地描述, 这项能量包括二次项(bilinear) E_{b1} 和四次项(biquadratic) E_{bq} ^[7,8],

$$E_{\text{ex}} \equiv E_{b1} + E_{bq} \equiv -J_1 \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2 - J_2 (\mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{M}_2)^2, \quad (2)$$

其中 J_1 (J_2) 为二次(四次)交换耦合系数, \mathbf{M}_1 和 \mathbf{M}_2 是相邻铁磁层的磁化矢量. 选择适当的耦合系数即可拟合实测的磁滞回线^[8].

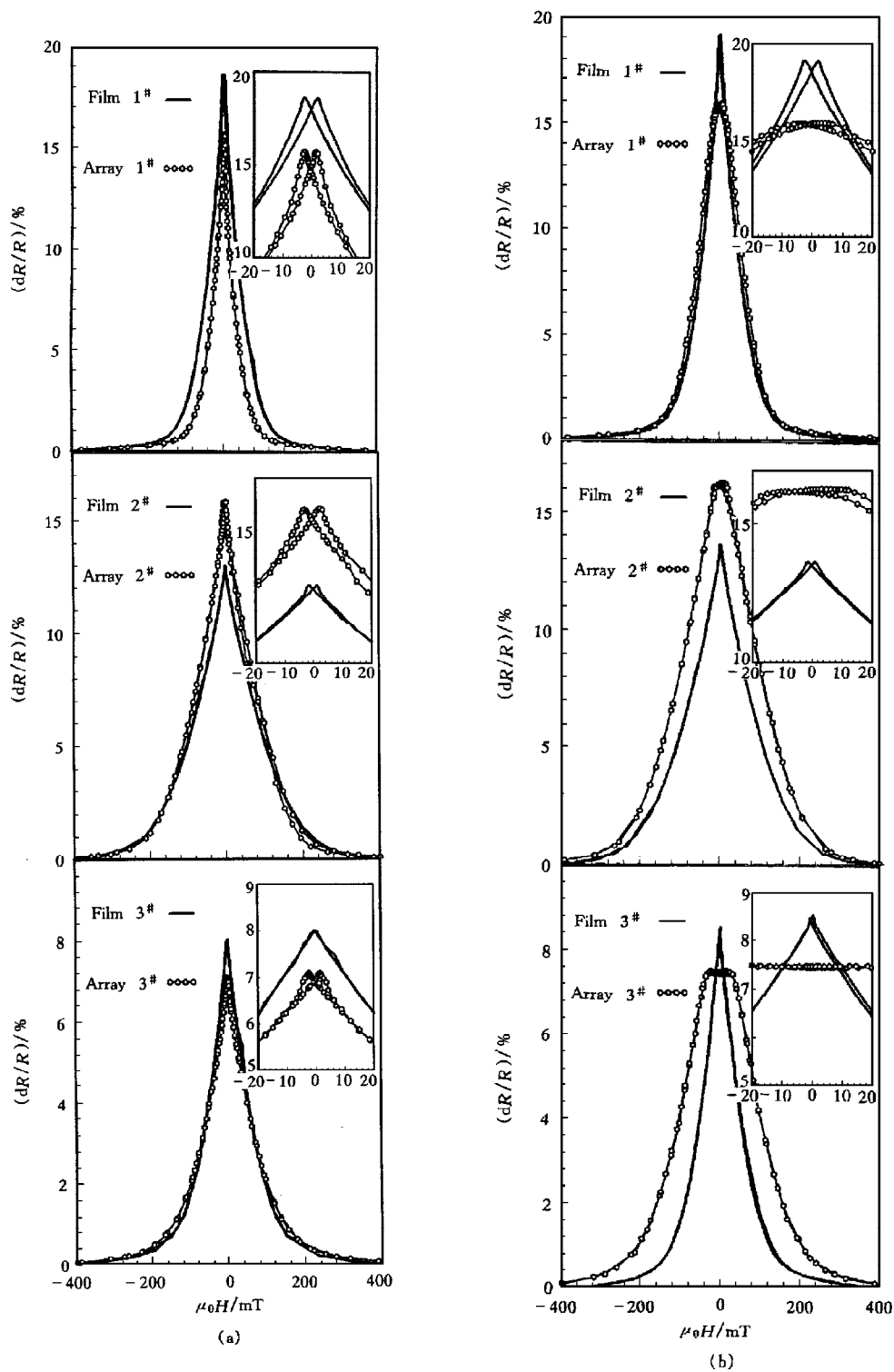


图3 1[#],2[#]和3[#]连续膜与线列阵样品的纵向(a)和横向(b)磁电阻回线

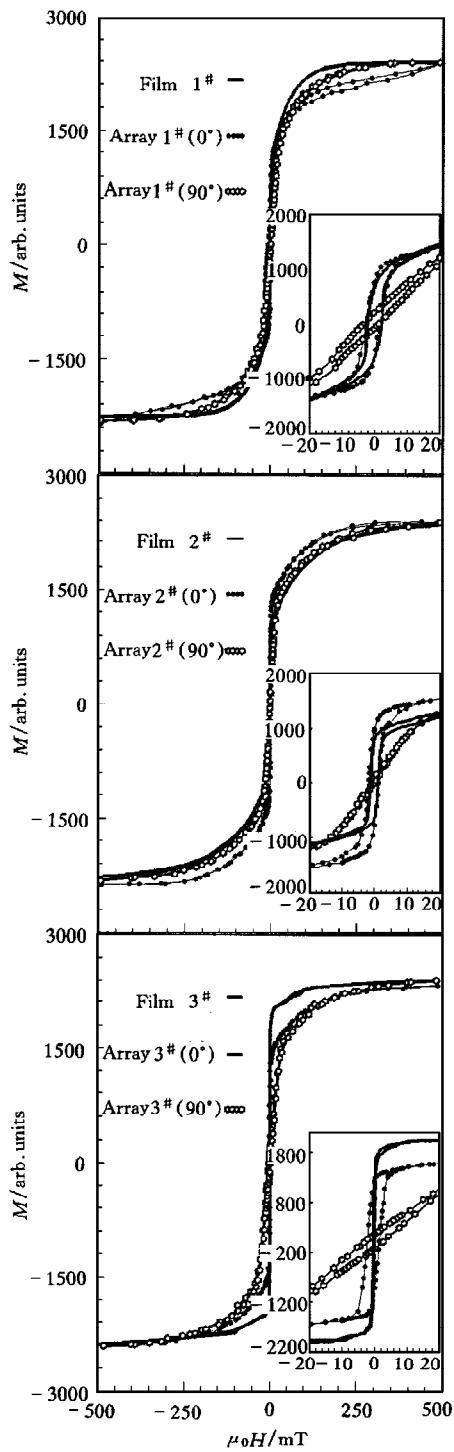


图 4 1[#], 2[#] 和 3[#] 连续膜和线列阵样品的磁滞回线

图 5 示出 MR 率与 $(1 - M_r/M_s)$ 的关系曲线, 其中的剩磁比 M_r/M_s 引用图 4 纵向磁滞回线数据, MR 率引用图 3(a) 纵向磁电阻数据. 纵座标 MR 率指总 AMR 率与 GMR 率之和, 横座标等于零的 MR 率是 AMR 率. 从图 5 可见: (1) AMR 率的数据点都聚集在座标原点附近. (2) 1[#] 和 3[#] 连续膜以及 2[#] 线列阵的 MR 数据点基本落在一条直线上. (3) 1[#] 和 3[#] 线列阵以及 2[#] 线连续膜的 MR 数据点都落在上述直线的下面. 根据 Hall 等^[9] 的观点, GMR 率与 $(1 - M_r/M_s)$ 关系曲线为直线, 这现象说明样品的磁电阻效应源于进入铁磁层交换劈裂能带的 s-d 散射, 属自旋相关散射机制. 这曲线的横座标实际表示层间耦合状态, 例如: 完全是反铁磁型耦合, $M_r/M_s = 0$; 完全为铁磁型耦合则 $M_r/M_s = 1$. Hall 等^[9] 还指出, 如果磁电阻效应还存在非自旋相关散射机制, 则对应相同的层间耦合态, GMR 率下降. 我们的 1[#] 线列阵其剩磁比几乎与连续膜相等, 但 MR 率减小了 2.95%; 3[#] 列阵的剩磁比小于连续膜, 其 GMR 率不但不增大反而减小, 这些都应归于刻线加工所引入的非自旋相关散射. 至于 2[#] 膜刻线加工使剩磁比提高, 其 GMR 率不但没减小反而增大了 3.22%, 使 MR 率数据点落到 1[#] 和 3[#] 连续膜所在的直线上. 如何解释这些刻线加工的影响? 一些有关退火对 MR 率的影响的报道有启发性, 例如: Jimbo 等^[10] 报道 $\text{Fe}/[\text{FeCoNi}/\text{Cu}]_{20}$ 多层膜在 250 °C 退火后, 室温磁电阻率从 24% 增大到 40%, 但退火温度超过 300 °C, 多层结构变模糊, MR 率小到只剩 AMR 项. Bouat 等^[11] 报道 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Ag}$ 多层膜经 250 °C 退火 1 min, 铁磁与非磁层的界面变平, 而退火时间增加到 2 min 时界面又变弯, 致使 MR 率下降. 我们的线列阵样品加工在光刻胶固化和离子束刻蚀过程中都不可避免热干扰, 这种加热过

程与退火处理等效.由此所引起的结构变化对 MR 率的影响也完全可能是多样的.

外磁场垂直于列阵样品的线向时,在低场区磁滞回线近似为无滞的斜线(见图 4 各小插图中的空圆点线).这说明,由于线元为整齐排列,列阵整体显示的是各个线元共同的形状各向异性,即单轴各向异性,易轴平行线向.引起极大兴趣的是在这段磁化强度近似与磁场成正比的场区,磁电阻率随外场的变化非常缓慢,3[#]列阵还出现很平的平顶(见图 3(b)).所谓“平顶”即磁电阻率不随外场变化,根据(1)式,层间磁矩的夹角 Ψ 也应保持不变.如果在这场区,层间耦合完全是反铁磁耦合,则磁化强度应恒等于零,显然与实验结果不符.样品中一定还存在铁磁耦合的区域,在这场区,随磁场减小样品的总磁化强度随之减小,然而保持层间铁磁耦合不变.也就是保持 GMR 率不变.

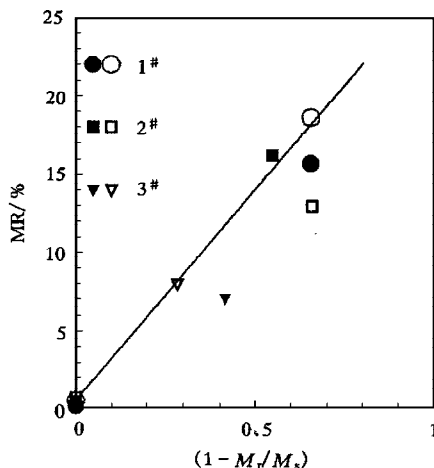


图 5 1[#], 2[#] 和 3[#] 连续膜和线列阵样品的 MR 率与 $(1 - M_r/M_s)$ 关系曲线. 实芯和空芯的圆、方、三角分别表示列阵和连续膜的数据

4 结 论

本文在近期已有的对连续多层膜磁性研究的基础上,进一步研究多层膜线列阵的磁性变化.实验发现:若连续膜的层间耦合以反铁磁型为主,加工成线列阵后,矫顽力和剩磁等磁参量变化不大.其原因是层间磁通闭合,磁矩取向不受刻线加工附加的单轴各向异性的影响.而若在连续膜中,铁磁型层间耦合区占较大比例,则刻线后矫顽力增大,剩磁减小,与单层膜相似.至于最大 MR 率在刻线后发生的变化,除了与原始连续膜的层间耦合状态有关外,还与刻线加工引起的结构变化相关,与对连续多层膜进行退火处理引起的变化相似.

本文所用线列阵样品是中国科学院合肥同步辐射国家重点实验室傅绍军教授协助制作, X 射线小角衍射是中国科学技术大学结构和成分分析实验室周贵恩教授等协助测量的,在此一并致谢.

- [1] M. Hehn *et al.*, *Science*, **272**(1996), 1782.
- [2] A. O. Adeyeye *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996), 6120.
- [3] Chen Hui-yu *et al.*, *J. China Univ. Sci. Tech.*, **25**(1995), 397 (in Chinese).
- [4] M. Kume *et al.*, *J. App. Phys.*, **79**(1996), 6402.
- [5] R. P. Cowbarn *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **173**(1997), 193.
- [6] H. Le Gall *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **81**(1997), 4727.
- [7] K. Kohlhepp *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **165**(1997), 431.
- [8] E. E. Fullerton *et al.*, *Phys. Rev.*, **B53**(1996), 5112.

- [9] M.J.Hall *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **173**(1997), 253.
[10] M.Jimbo *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **165**(1997), 304.
[11] S.Bouat *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **165**(1997), 338.

GIANT MAGNETORESISTANCE AND INTERLAYER EXCHANGE COUPLING IN THE WIRE ARRAYS OF MULTILAYER *

CHEN HUI-YU SUN YONG LI ZHI-CHAO

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

CHEN JIN-CHANG ZHENG WU WANG AI-LING

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

(Received 12 January 1998; revised manuscript received 29 June 1998)

ABSTRACT

The room temperature magnetoresistance (MR) and hysteresis in the wire arrays of Fe/[NiFe/Cu]₃₀ multilayer were investigated. These arrays were fabricated by laser lithography and ion beam etching techniques. The magnetic properties of the wire array is distinctly different compared with the continuous film. The maximum MR ratio is increased for some arrays, and for some other arrays this MR ratio is decreased. A marked increase in coercivity of some arrays is seen for the field applied along the wire axis, but for some other arrays the coercivity almost remains constant. These results depend on the difference in interlayer exchange coupling for original continuous films and also depend on the uniaxial anisotropy and the other change caused by the wire fabrication of array.

PACC: 7570; 7580; 7530E

* Project supported by the Natural Science Foundation of Beijing (Grant No. 1962003), China.