

自旋阀型[**NiFe/Cu/Co/Cu**]_N多层膜的 磁电阻、矫顽力和稳定性研究^{*}

方瑞宜 喻英雷 陈廷勇 戴道生

(北京大学物理系, 北京 100871)

(1997 年 1 月 27 日收到)

用电子束蒸镀工艺制备了自旋阀型[**NiFe/Cu/Co/Cu**]_N多层膜. 研究了工艺过程及磁层、非磁层厚度和矫顽力对磁电阻的影响. 还研究了磁电阻的稳定性和降低中心磁场等问题. 用较优化的方法, 制备了中心磁场为 $(10-20) (10^3/4\pi) \text{ A/m}$, 优值大于 $0.2\% ((10^3/4\pi) \text{ A/m})^{-1}$ 的多层膜. 实验表明, 磁电阻随磁场的变化在中心区内是可逆的. 经 200°C 退火 15 min, 中心磁场略有减小, 磁电阻稍有增加. 一些样品经一年多老化后, 磁电阻变化小于 $\pm 0.28\%$.

PACC: 7590; 7570

1 引 言

自 1988 年 Baibich 等^[1]发现巨磁电阻效应以来, 人们对它作了广泛的研究. 虽然耦合型[**Fe/Cr**]_N和[**Co/Cu**]_N多层膜的磁电阻可高达 100% 以上, 但因其饱和场太高而很难实用. 非耦合型自旋阀型多层膜磁电阻为 10% 上下, 因其饱和场低, 优值可达 $(0.2-2)\% ((10^3/4\pi) \text{ A/m})^{-1}$ ^[2], 而可用作高密度磁记录的读出磁头材料. 钉扎型[**FeMn/NiFe/Cu/NiFe**]多层膜的优值虽达 $2\% ((10^3/4\pi) \text{ A/m})^{-1}$, 但因稳定性问题, 而不如[**NiFe/Cu/Co/Cu**]多层膜好. 使后者更具有实用性. 有人在外延的[**Fe/Pd/Ag/Fe/Ag**]多层膜中获得了优值为 $1.5\% ((10^3/4\pi) \text{ A/m})^{-1}$ 的结果^[3].

本文报道电子束蒸镀工艺对制备的[**NiFe/Cu/Co/Cu**]_N多层膜的磁电阻的影响、磁层和非磁层厚度对磁电阻的影响、矫顽力 H_c 与磁电阻极大值对应的磁场 H_m 之间的关系以及在研究其稳定性方面所得到的结果.

2 样品的制备与测量

采用电子束蒸镀的方法制备了自旋阀型 **Cr**/[**NiFe/Cu/Co/Cu**]_N 多层膜. 本底真空优于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 衬底厚度为 0.17 mm 的玻璃片, 其温度在室温到 200°C 之间可调. **Cr** 为 5 nm 厚的缓冲层. 蒸发速率为 0.08—0.12 nm/s, 用石英晶片振荡仪检测和控制成膜厚度.

^{*} 国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金及北京市中关村地区分析测试中心资助的课题.

多层膜的周期数 N 在 2 到 20 之间,大部分样品的 N 为 10.

用 X 射线小角和大角衍射分析测定了多层膜的成膜质量和晶格结构.小角衍射的结果表明,大多数样品具有两个峰,少数具有一个或三个峰.由峰位计算出的薄膜厚度与设定厚度的差别小于或等于 $\pm 5\%$.大角衍射结果表明 NiFe, Cu 和 Co 层都是面心立方结构.

用四探针法测量了室温下磁电阻的值,磁场和电流都在膜面内,电流和磁场相互平行或垂直时所测得的磁电阻值均为负,其差别小于 0.5% .

用振动样品磁强计测量了室温下的磁滞回线,最大磁场为 $(5 \times 10^5/4\pi) \text{Am}^{-1}$, 磁场平行于膜面.

3 实验结果与讨论

根据自旋相关散射模型,当相邻两磁层的磁矩反平行排列时多层膜的电阻最大;相邻磁层的磁矩平行排列时,电阻最小.这时多层膜磁化处于饱和状态.磁电阻(MR)一般定义为

$$\text{MR}(H) = \frac{R_s - R(H)}{R_s},$$

其中 R_s 和 $R(H)$ 分别为饱和磁化和磁场为 H 时的电阻值.本文将根据这个关系来讨论多层膜的 MR 与其组成、磁性等关系问题.

表 1 列出了我们制备的三组 Cr[NiFe(t_{NiFe})/Cu(t_{Cu})/Co(t_{Co})/Cu(t_{Cu})] $_N$ 样品的性能.第一组是固定 Cu 层

表 1 Cr(5 nm)/[NiFe(t_{NiFe})/Cu(t_{Cu})/Co(t_{Co})/Cu(t_{Cu})] $_N$ 样品在室温下的性能

样品号	样品的组成	MR ¹⁾ /%	$H_c/$ $(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$	$H_m^{2)}/$ $(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$	$(\Delta\text{MR}/\Delta H)/$ $\%((10^3/4\pi)\text{Am}^{-1})^{-1}$	$H_s/$ $(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$
36	$t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}} = 1.0 \text{ nm}, t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$	3.62				
62	1.3 nm 5 nm	5.06	99	37	0.21	5
97	1.5 nm 5 nm	8.73	88	63	0.15	27
63	1.8 nm 5 nm	7.73	97	60	0.21	14
57	2.0 nm 5 nm	5.57	60	41	0.14	11
129	$t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}} = 1.5 \text{ nm}, t_{\text{Cu}} = 3 \text{ nm}$	9.58	98	89	0.093	33
128	1.5 nm 4 nm	9.23	134	99	0.082	36
97	1.5 nm 5 nm	8.73	88	63	0.15	27
65	1.5 nm 6 nm	6.71	112	49	0.18	9
121	1.5 nm 7 nm	5.37	130	60	0.12	8
122	1.5 nm 8 nm	4.87	122	65	0.10	12
52	$t_{\text{NiFe}} = 2.5 \text{ nm}, t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$ $t_{\text{Co}} = 1.5 \text{ nm}$	5.52	38	60	0.17	12
149	$t_{\text{NiFe}} = 3.0 \text{ nm}, t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$ $t_{\text{Co}} = 2.0 \text{ nm}$	4.14	32	40	0.14	10
150	$t_{\text{NiFe}} = 3.5 \text{ nm}, t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$ $t_{\text{Co}} = 2.0 \text{ nm}$	4.24	32	43	0.12	14

1)按 MR 定义应为负值,本文给出的是绝对值.

2)是磁电阻极大值对应的磁场,见图 1.

厚度 $t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$, 改变 NiFe 和 Co 层的厚度, 且 $t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}}$. 实验发现 NiFe 和 Co 层的厚度为 1.5 nm 时 MR 最大; 第二组是固定 NiFe 和 Co 层的厚度 $t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}} = 1.5 \text{ nm}$, Cu 层厚度 t_{Cu} 由 3 nm 变到 8 nm . 实验发现, Cu 层厚度增加时, MR 下降; 第三组固定 Cu 层厚度 ($t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$), 改变 t_{NiFe} 和 t_{Co} , 且 $t_{\text{NiFe}} > t_{\text{Co}}$. 结果发现, 样品的 H_c 变小, 同时 MR 也变小. 这些结果与 Dieny^[2] 和 Parkin¹⁾ 的结果是一致的. 由表 1 可知, 样品的 MR 最大可达 9.58% , 中心磁场最小为 $(5 \times 10^3 / 4\pi) \text{ Am}^{-1}$, 优值最大为 $0.21\% ((10^3 / 4\pi) \text{ Am}^{-1})^{-1}$.

图 1(a) 和图 1(b) 给出了 149 号样品在室温下的 MR- H 曲线和磁滞回线. 测量表明, 当磁场在 H_A (A 点的磁场) 与 H_B (B 点的磁场) 之间反复磁化时, MR 的变化是可逆的. 这一性质对实际应用是重要的.

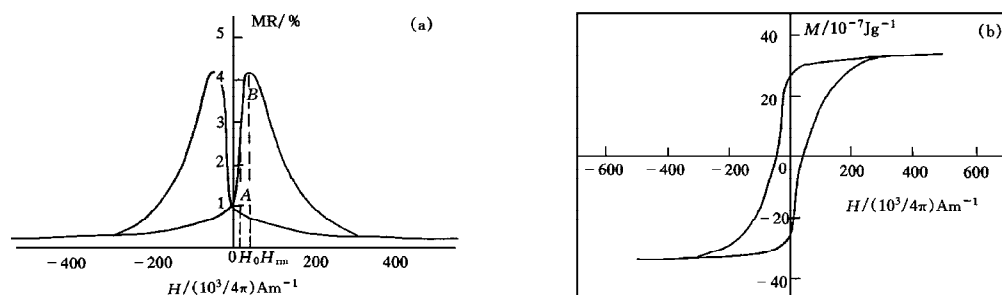


图 1 Cr(5 nm)/[NiFe(3 nm)/Cu(5 nm)/Co(2 nm)/Cu(5 nm)]₁₀ 样品的 MR- H 曲线(a)和磁滞回线(b) H_0 为中心磁场; H_m 为磁电阻极值对应的磁场

3.1 MR 与矫顽力的关系

我们知道, 样品的矫顽力与样品的制备工艺有密切关系, 相同层厚的样品可以有不同的矫顽力. 图 2 给出了 Cr(5 nm)/[NiFe(1.5 nm)/Cu(5 nm)/Co(1.5 nm)/Cu(5 nm)]₁₀ 样品的 H_c 和 MR 与制备时衬底温度的关系. 实验表明, 在适当的衬底温度下, 可制备出 H_c 较高的样品, 相应的 MR 也较大, 反之亦然. H_c 大 MR 相应也大的原因, 是由于 NiFe 层和 Co 层是相对独立的受磁场作用而磁化的. NiFe 层的 H_c 小, 样品的 H_c 主要由 Co 层决定. 当样品在饱和磁化后, 磁场减到零并反向加大时, NiFe 层可在 $H < H_c$ 的情况下磁化到饱和, 但 Co 层的磁矩基本处在原来的方向, 这时两个不同磁性的磁层的磁矩是反铁磁排列的, 这种相反排列的分量越大, 样品电阻越大, 可获得较大的磁电阻, 如 H_c 较小, 将会降低这种反平行排列的分量, 使磁电阻变小.

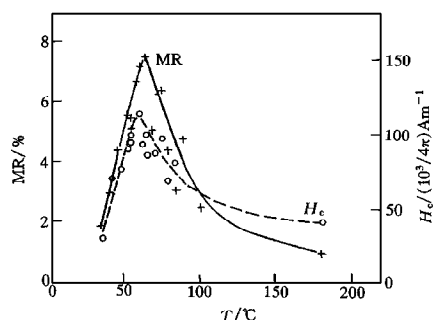


图 2 Cr(5 nm)/[NiFe(1.5 nm)/Cu(5 nm)/Co(1.5 nm)/Cu(5 nm)]₁₀ 样品的 H_c 和 MR 与制备时衬底温度的关系

1) 私人通信.

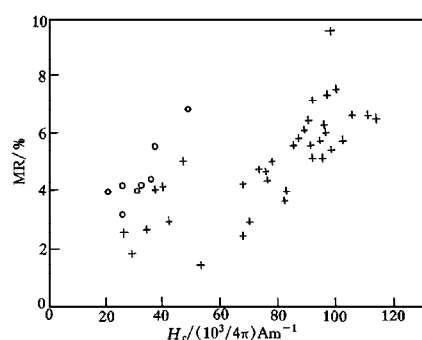


图3 样品的MR与 H_c 的关系 +为 $t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}}$ 的样品; o为 $t_{\text{NiFe}} > t_{\text{Co}}$ 的样品

= H_A 中时, NiFe 和 Co 的磁矩向左达到饱和磁化, 因相邻磁层的磁矩平行排列, 电阻最小; 当磁场由零增加到 NiFe 的饱和磁场 $H = H_B$ 时, NiFe 层的磁矩全部变为向右排列. 由图4知 Co 的矩形比小于1, 所以, 这时 Co 层中已有部分磁矩转向右, 并与相邻的 NiFe 层的磁矩平行排列, 这样虽使膜的电阻有所增加, 但比完全反平行情况的电阻要小. Co 层的矩形比越大, NiFe 层的饱和场越低, 在自旋阀型多层膜中就可能获得较大的 MR 值. 反之, MR 值较小.

3.3 MR 极大时对应的磁场 H_{rm} 与矫顽力 H_c 关系

从实际应用考虑, MR 越大, MR 极大时对应的磁场 H_{rm} 越小, 对提高优值、降低中心磁场 H_0 是有利的. 为此, 我们研究了不同厚度样品的 H_{rm} 与 H_c 的关系, 结果如图5所示. 实验表明, 对于层厚度为 $t_{\text{Cu}} \geq 5 \text{ nm}$, $t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}}$ 的样品, H_{rm} 一般都小于 H_c ; 对于 $t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$, $t_{\text{NiFe}} > t_{\text{Co}}$ 的样品 ($t_{\text{NiFe}} : t_{\text{Co}}$ 在 1.25:1—1.75:1 范围), H_{rm} 都大于 H_c ; 当 $t_{\text{Cu}} < 5 \text{ nm}$ 时, H_{rm} 和 MR 都有所增加. 见图5和表1所示. H_{rm} 不等于 H_c 的原因分别作如下讨论.

1) $t_{\text{Cu}} \geq 5 \text{ nm}$, $t_{\text{NiFe}} = t_{\text{Co}}$ 时 $H_c > H_{\text{rm}}$ 的原因

为了了解样品的 H_c 与 H_{rm} 的关系, 我们制备了 $\text{Cr}/[\text{NiFe}/\text{Cu}]_{10}$ 和 $\text{Cr}/[\text{Co}/\text{Cu}]_{10}$ 多层膜样品, 其中 $t_{\text{NiFe}} = 2, 3 \text{ nm}$, $t_{\text{Co}} = 1.5, 2 \text{ nm}$, $t_{\text{Cu}} = t_{\text{Cr}} = 5 \text{ nm}$. 测量了室温磁性, 结果见图6和表2.

图3给出了我们制备的各种层厚的 $[\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_N$ 样品的 MR 与 H_c 的关系. 由图3可见, 同一个 H_c 可以有不同的 MR 值. 这是因为 MR 除与 H_c 有关外, 还与层厚和界面粗糙度有关^[2], 但总的趋势是 H_c 大的样品 MR 也大些, 这与上面所述的结果是一致的.

3.2 矩形比对 MR 的影响

图4给出了我们制备的 NiFe/Cu 和 Co/Cu 多层膜 ($t_{\text{Cu}} = 5 \text{ nm}$) 的室温磁滞回线的示意图. 当 $[\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{Co}/\text{Cu}]_N$ 样品在磁场 H

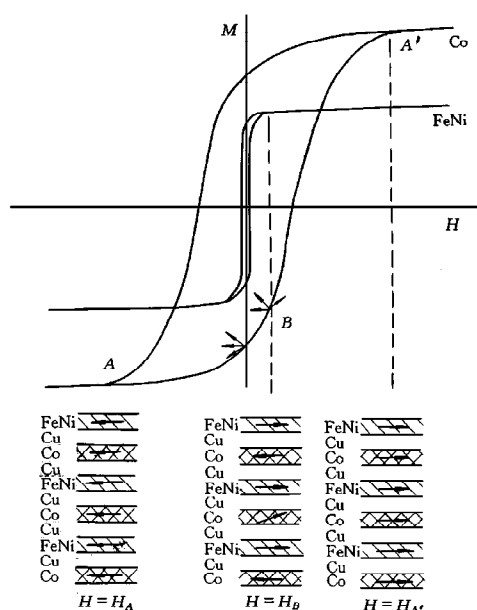


图4 Co层矩形比 M_r/M_s 对 MR 影响的示意图

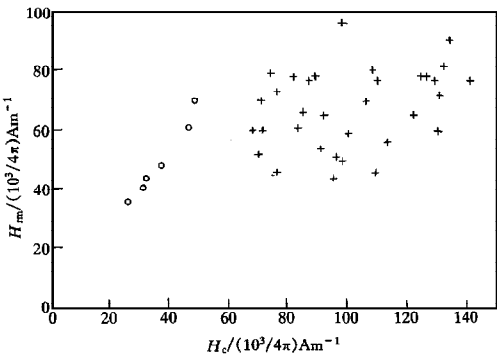


图 5 各种层厚度的 $\text{Cr}/[\text{NiFe/Cu/Co/Cu}]_N$ 样品的 H_{rm} 与 H_c 的关系

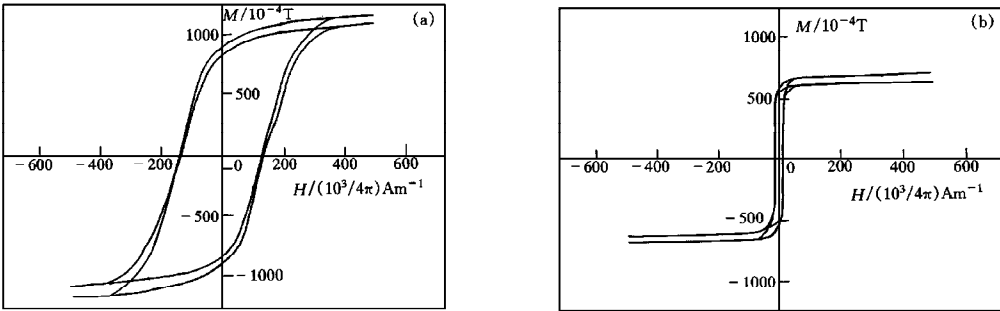


图 6 (a)为 $\text{Cr}(5\text{ nm})/[\text{Co}(t_{\text{Co}})/\text{Cu}(5\text{ nm})]_{10}$, $t_{\text{Co}} = 1.5$ 和 2 nm ; (b)为 $\text{Cr}(5\text{ nm})/[\text{NiFe}(t_{\text{NiFe}})/\text{Cu}(5\text{ nm})]_{10}$, $t_{\text{NiFe}} = 2$ 和 3 nm 的室温磁滞回线 最大磁场为 $(5 \times 10^5/4\pi)\text{Am}^{-1}$, 磁场平行膜面

表 2 NiFe , Co 的 M_s , H_c 和 H_s

磁层	饱和磁化强度 $M_s/10^{-4}\text{T}$	$H_c/(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$	饱和磁场 $H_s/(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$
NiFe	650	<5	40—60
Co	1200	100—200	~ 400

对 $\text{Cr}/[\text{NiFe/Cu/Co/Cu}]_N$ 样品, 当磁场由零加到 NiFe 层的饱和磁场(取向为右方向)时, 由于铜层较厚, 可认为 NiFe 层与 Co 层之间耦合很小, NiFe 层的磁矩全都转为右取向, 而 Co 层的磁矩的取向基本仍为左向. 如 NiFe 和 Co 层的磁矩完全反平行排列, 膜的电阻应最大. 在 $\text{MR}-H$ 曲线上有 MR 的极大值, 对应的磁场为 H_{rm} (参看图 1). 因为 Co 层的磁矩比 NiFe 层的大, 这时样品的磁矩仍为负, 继续加大磁场, 当 $H = H_c$ 时磁矩才为零, 所以 $H_c > H_{rm}$. 见表 1 中第一组样品的结果.

2) $t_{\text{Cu}} \geq 5\text{ nm}$, $t_{\text{NiFe}} > t_{\text{Co}}$ 时 $H_c < H_{rm}$ 的原因

因 $t_{\text{NiFe}} > t_{\text{Co}}$ (在厚度比例为 1.25:1—1.75:1 范围内), 样品中 NiFe 层的磁矩在磁场为 H_c 时并未磁化到饱和(即磁矩还没有完全朝右取向), Co 的磁矩仍朝左取向, 这时样品中的 MR 尚未达到极大值. 继续增大磁场, NiFe 层的磁矩趋向完全朝右(饱和), 使 MR

趋向极大值,即 H_{rm} 值,因此 $H_c < H_{rm}$. 如表 1 中第三组的实验结果.

3) $t_{Cu} < 5\text{ nm}$ 时, MR 和 H_{rm} 都增大的原因

当 Cu 层的厚度小于 5 nm 时, NiFe 层与 Co 层之间的耦合作用就不能忽略. 当磁场由零增加到原来不存在耦合时 NiFe 层的饱和场大小时, 因受到 Co 层的耦合作用, 样品中的 NiFe 不能全部反磁化, 因而电阻比完全反铁磁态要小. 当磁场进一步增大, 使 NiFe 层的磁矩更趋向饱和, 同时 Co 的磁矩已有少量转向右. 这部分的 Co 磁矩正好可能与尚未转向右的 NiFe 的磁矩形成反向排列, 使样品的电阻再有所增大. 所以, 与 $t_{Cu} \geq 5\text{ nm}$ 的样品相比, 在 $t_{Cu} < 5\text{ nm}$ ($t_{Cu} = 3$ 或 4 nm) 时, 其 MR 和 H_{rm} 都有明显的增加. 为便于了解 Co 和 NiFe 磁层在外磁场中的磁化情形, 将其过程列于表 3 中.

表 3 在外磁场中 NiFe 和 Co 磁矩的方向在磁化过程中随磁场的变化关系

外磁场方向	←		→	→	→	→
外磁场大小(绝对值)	$H \geq H_s$	$H = 0$	$H = H_{S(NiFe)}$	H_{rm} $H > H_{S(NiFe)}$	$H = H_c$	$H \geq H_s$
NiFe 层中磁矩的方向						
Co 层中磁矩的方向						

由以上分析可知, 考虑到 Co 的矩形比小于 1 (多数在 0.75 左右) 和 $t_{Cu} \geq 5\text{ nm}$ 的情况, 在磁场为 NiFe 的饱和场时, 使 NiFe 全部反磁化的同时, 可能有部分 Co 的磁矩也已反磁化, 这就会使样品的电阻值的增加比 Co 未反磁化的情况要小. 而在 $t_{Cu} < 5\text{ nm}$ (3 或 4 nm) 时, 有可能出现相邻的 NiFe 和 Co 层的磁矩相互反平行的部分更多的情况, 这样, 电阻就比上述情况要大, 因而 MR 也大, 同时 H_{rm} 比不存在耦合时 NiFe 层的饱和磁场大.

3.4 样品的组成对 H_{rm} 的影响

为了进一步了解 H_{rm} 与哪些因素有关, 我们制备了以下两组多层膜样品:

$$N(1) = \text{Cr}(5\text{ nm}) / [\text{NiFe}(3\text{ nm}) / \text{Cu}(5\text{ nm}) / \text{Co}(1.5\text{ nm}) / \text{Cu}(5\text{ nm}) / \text{Co}(1.5\text{ nm}) / \text{Cu}(5\text{ nm})]_5;$$
$$N(2) = \text{Cr}(5\text{ nm}) / [\text{NiFe}(4.5\text{ nm}) / \text{Cu}(5\text{ nm}) / \text{Co}(1.5\text{ nm}) / \text{Cu}(5\text{ nm}) / \text{Co}(1.5\text{ nm}) / \text{Cu}(5\text{ nm})]_5.$$

在样品中 NiFe 的总厚度与 Co 的总厚度相同, 得到的结果如表 4 所示.

表 4 样品的组成对 H_{rm} 的影响

样品号	组成	MR / %	$H_c / (10^3 / 4\pi) \text{ Am}^{-1}$	$H_{rm} / (10^3 / 4\pi) \text{ Am}^{-1}$
94	N(1)	6.5	126	107
110	N(1)	6.74	104	116
178	N(1)	6.59	96	110
95	N(2)	7.5	128	168
109	N(2)	5.66	81	165
179	N(2)	5.9	96	164

由表 2 可见, 对于相同组成的样品, 其 H_c 虽不同, 但 H_{rm} 值基本相同. 这再次表明

H_m 与 H_c 没有直接关系.由以上的讨论可知, H_m 与样品组成、Cu 层厚度、NiFe 饱和磁场大小有关.为了减小 H_m ,可以减小 NiFe 层的饱和磁场,Cu 层厚度不小于 5 nm,以及采用 $\text{Cr}/[\text{NiFe/Cu/Co/Cu}]_N$ 的组成比较合适.

3.5 样品的热稳定性与寿命

样品的热稳定性和寿命是实际应用中极为重要的参数.为此,我们把一些样品放在 $3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 的真空炉中,加热到 200°C 保温 15 min,再随炉冷却.这些样品在热处理前后的 MR 和 H_m 的结果列于表 5.结果表明,经热处理后,MR 值基本不变, H_m 有所下降.看来,我们制备的样品的热稳定性是好的.

表 5 200°C , 15 min 热处理前后样品的 MR 和 H_m 值

样品号	热处理前		热处理后	
	MR/ %	$H_m/(10^3/4\pi)/\text{Am}^{-1}$	MR/ %	$H_m/(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$
112	7.44	70	7.69	60
113	6.33	77	6.38	60
114	7.53	70	7.66	60
127	5.81	78	6.20	57
128	9.23	90	9.27	72

表 6 列出了一批样品的寿命的实验结果.我们对所制备的、表面未加保护层的样品(制备表面为 Cu 层),在测量了 MR 值后,将其放入干燥皿中,并在室温下放置了半年到一年之后再测量它们的 MR,发现其 MR 值变化很小.这表明我们所制备的样品的时间稳定性是好的,这可能是 NiFe 和 Co 在空气中都不容易氧化,如果在样品的表面再镀上保护层,其寿命会更好.

表 6 具有 $\text{Cr}/[\text{NiFe/Cu/Co/Cu}]_N$ 结构的样品的寿命

样品号	MR/ % (以前测量时间)	MR/ % (1996 年 10 月 3 日测量)	$\Delta\text{MR}/\%$
57	5.59(1995.7.6)	5.57	-0.02
62	5.06(1995.9.28)	5.06	0
63	7.73(1995.9.28)	8.01	+0.28
65	6.67(1995.9.28)	6.88	+0.21
118	4.80(1996.2.28)	5.01	+0.21
119	4.80(1996.2.28)	4.49	+0.14
129	9.58(1996.3.5)	9.44	-0.14

4 结 论

我们研究了自旋阀型多层膜 $\text{Cr}/[\text{NiFe/Cu/Co/Cu}]_N$ 样品的制备工艺、样品的组成、

磁电阻、矫顽力、磁电阻极大值对应的磁场 H_m 之间的关系. 如要得到优值高的样品, 必须提高 MR 和降低 H_m . 要提高 MR 适当高的矫顽力是必要的, 它可以通过控制衬底温度来实现. 要降低 H_m , Cu 层的厚度不小于 5 nm, 适当的多层膜组成, 降低 NiFe 的饱和磁场是必须的. 此外, 适当的退火可以降低 H_m . 总的来看, 我们的薄膜材料具有较好的温度稳定性和寿命.

- [1] N. Baibich, T. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau and F. Petroff, *Phys. Rev. Lett.*, **61**(1988), 2472.
- [2] B. Dieny, *J. Magn. Magn. Mat.*, **136**(1994), 335.
- [3] A. Schuhl, D. Durand, J. R. Childress, J. M. George and L. G. Pereira, *J. Appl. Phys.*, **75**(1994), 7061.
- [4] H. Yamamoto, Y. Motomura, T. Anno and T. Shinjo, *J. Magn. Magn. Mater.*, **126**(1993), 437.

MAGNETORESISTANCE, COERCIVITY AND STABILITY FOR THE SPIN VALVE [NiFe/Cu/Co/Cu] MULTILAYERS

FANG RUI-YI YU YING-LEI CHEN TING-YONG DAI DAO-SHENG

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 27 January 1997)

ABSTRACT

The spin valve [NiFe/Cu/Co/Cu]_N multilayers were prepared by using electron beam method. The influences of thickness on the magnetoresistance (MR) were studied. We also investigated the stability of MR and tried to reduce the center field H_0 , which is the center magnetic field of the linear region in the MR- H curve. Under optimum seeking conditions, we have deposited many samples with low center field H_0 in range of $(10-20)(10^3/4\pi)\text{Am}^{-1}$, the merit is larger than $0.2\% \times ((10^3/4\pi)\text{Am}^{-1})^{-1}$. The variation of MR in the linear region in the MR- H curve is reversible during repeatedly magnetizing. After annealed at 200°C for 15 minutes, MR increased and H_m reduced with a small amount. The change of MR is less than 0.3% for several samples after aging one year in the dry air chamber and room temperature.

PACC: 7590; 7570