

巨磁电阻自旋阀多层膜的结构和磁性<sup>\*</sup>孟宪梅<sup>1)</sup> 柴春林<sup>1)</sup> 朱逢吾<sup>1)</sup> 林岚<sup>2)</sup> 姜宏伟<sup>2)</sup> 赖武彦<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学应用科学学院, 北京 100083 2) 中国科学院物理研究所, 北京 100080

**摘要** 用磁控溅射镀膜方法, 制成了巨磁电阻自旋阀多层膜 Ta / NiFe / Cu / NiFe / FeMn / Ta. 它具有优良的特性. 其室温磁电阻比率  $MR > 2\%$ , 自由层矫顽力  $H_{C1} < 160 \text{ A/m}$ , 自由层零磁场漂  $H_f < 800 \text{ A/m}$  和钉扎层交换场  $H_{ex} \approx 20 \times 10^3 \text{ A/m}$ . 作为新型磁功能材料, 它满足高灵敏磁性传感器和硬盘读出头的要求. 对多层膜制备的方法也作了系统研究, 并讨论了缓冲层和钉扎层的制备工艺和微结构对磁性能的影响.

**关键词** 巨磁电阻, 自旋阀, 磁功能材料, 多层膜

**中图分类号** TM271

1988年在Fe/Cr周期性金属多层膜中发现, 随外磁场增加, 膜电阻下降达50%, 此现象称为巨磁电阻(Giant Magnetoresistance)效应<sup>[1]</sup>. 这一奇特现象已成为物理学研究的一个热点. 单个周期厚度仅仅2~3nm的人工多层膜也吸引了材料科学家的兴趣<sup>[2]</sup>. 巨磁电阻的形成原因, 一般认为是在多层膜的每一铁磁层中, 磁矩基本上平行一致排列, 而相邻磁层间磁矩是反平行排列, 此时电阻较高. 外磁场作用下, 通常为几千高斯, 各磁性层的磁矩趋于平行一致, 此时电阻大幅度下降. 物理机制与电子自旋相关的散射过程有关<sup>[3]</sup>. 从应用角度看, 人们必须克服外加磁场过大这一缺点.

IBM公司B. Dieny等人<sup>[4]</sup>提出一个简化的四层结构称为自旋阀, 即磁层M1/非磁性中间层/磁层M2/反铁磁层P. 其中, 层P具有较强的单方向各向异性, 它通过各向异性交换作用将M2磁矩“钉扎”在易磁化方向. 由于非磁性中间层(通常为铜层)的隔离, M1与M2层磁作用很弱, 称为自由层. 弱的外磁场就可以使自由层M1的取向平行或反平行于M2磁矩方向, 分别对应于低电阻态和高电阻态. 虽然, 自旋阀的磁电阻比率不高, 但是由于磁矩运动过程是一致转动, 克服了巴克豪森噪音, 达到极高的信噪比. 加之外磁场只需几个奥斯特就可使自由层磁矩旋转, 因而灵敏度(单位场下的电阻变化率)极高, 给磁信息记录技术带来重大突破<sup>[5]</sup>.

本文报道了我们的研制结果. 首先优化工艺, 获得了性能良好的巨磁电阻自旋阀多层膜, 研究了缓冲层对表面粗糙度及磁性的影响. 其次研究了磁性层及钉扎层溅射电流的作用.

## 1 样品的制备和测量

自旋阀多层膜是用磁控溅射法制成, 玻璃基片经过清洗后依次镀膜为 Ta/NiFe/Cu/NiFe

/FeMn/Ta, 本底真空度优于  $5 \times 10^{-5}$  Pa, 溅射工作氩气压为 0.4 Pa. 各种金属材料的溅射速率在 0.14 ~ 0.2 nm / s 范围. 溅射时基片上加有  $250 \times 10^{-4}$ T 的磁场, 磁电阻是用四探针法测量, 磁滞回线用振动样品磁强计测得, 应用原子力显微镜 (AFM) 观察膜面粗糙程度.

## 2 实验结果与讨论

图 1 给出了自制备的自旋阀多层膜的典型的磁电阻曲线, 样品结构为 Ta(15 nm) / NiFe (15 nm) / Cu(2.4 nm) / NiFe (15 nm) / FeMn(12 nm) / Ta(10 nm). 零磁场附近的磁滞回线矫顽力  $H_{C1} \approx 12$  A / m, 回线中心的偏离(称零场漂移) $H_f=557.2$  A / m. 钉扎层的回线中心处为交换场  $H_{ex} \approx 19.2 \times 10^3$  A / m, 该回线矫顽力  $H_{C2}=1.4 \times 10^3$  A / m, 磁电阻比率为  $MR=(R_H - R_0) / R$  约为 2.2 %, 其  $R_H$  和  $R_0$  分别为外加磁场和零场时的电阻. 这样的自旋阀多层膜满足制作硬磁盘读出磁头对磁性的基本要求.

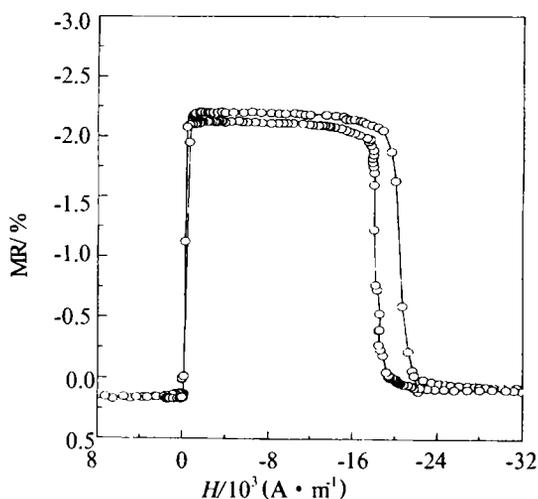


图1 巨磁电阻自旋阀多层膜的磁性电阻曲线

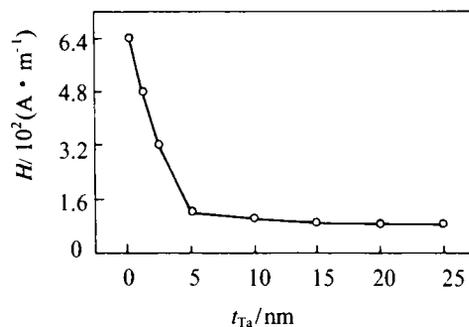


图2 自由层矫顽力  $H_{C1}$  和缓冲层 Ta 厚度的关系, NiFe 层厚为 8 nm, 生长偏磁场为  $250 \times 10^{-4}$  T

自旋阀多层膜淀积在特殊处理过的玻璃基片上, 因为它非晶状态, 和磁层 (NiFe) 完全失配, 从而造成磁层内出现晶格畸变及大量缺陷. 为解决此问题, 我们选择金属 Ta 作为缓冲层, 通常它可以形成十分致密的薄膜并和玻璃基片有牢固的附着. 图 2 表示了自由层矫顽力  $H_{C1}$  和缓冲层 Ta 厚度的关系. 物理量  $H_{C1}$  特别能表征软磁性 NiFe 膜组织的优劣, 当 Ta 层厚度超过 5 nm 后,  $H_{C1}$  明显减到 160 A / m 以下, 说明 NiFe 膜质量优良. 从 X 光衍射图可知, 此时 NiFe 层具有较好的 [111] 方向织构.

对 3 种不同缓冲层情形的自旋阀膜我们用原子力显微镜 (AFM) 观察了 Cu 层表面和 NiFe 层表面的粗糙度. 结果表明, 若不做缓冲层, 粗糙度很大, 导致  $H_f$  大,  $H_{ex}$  小. 当缓冲层厚度  $t_{Ta}=15$  nm 时粗糙度降低,  $H_f$  降至 640 A / m,  $H_{ex}$  增到  $1.7 \times 10^4$  A / m, 磁电阻性能很好. 而  $t_{Ta}=3$  nm 时, 所有物理量居中, Ta 层厚度不超过 10 nm 为好, 否则可能产生电流分流效果, 影响磁电阻数值. 我们拟选取电阻率更高的 Ti 金属作为缓冲层以代替 Ta<sup>[6]</sup>.

为了优化工艺, 我们固定层厚而变化溅射电流, 同时, 在原位施加不同磁场, 利用溅射过

程的热量进行磁场热处理.实验表明(图3),磁场热处理效果明显,而溅射电流只需超过80 mA则效果平稳.溅射过程中,原子的堆积是一个非平衡热处理过程.对于金属镀膜而言,先行到达基片的原子团形成很多小岛区,在后续到达的原子团作用下逐渐扩散成片.软磁材料  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  的磁场热处理可以促进 Fe-Ni 原子对偶形成和有序排列,因而增加磁畴结构.所以,在溅射镀膜过程中,施以磁场,可达到改善膜面微结构和降低矫顽力的双重目的.

FeMn 合金是一种特别的磁性金属<sup>[7]</sup>,其磁有序是反铁磁性的.它具有单方向磁性各向异性,FeMn 钉扎层通过所谓各向异性交换耦合,将磁层 M2 的磁矩“钉扎”在它的磁各向异性方向上.通过各种工艺优化,我们已能将这项钉扎场(也称为交换偏场)做到  $20 \times 10^3 \text{ A/m}$  左右.从图4看出,FeMn 层膜为9 nm时,厚的磁层 M2 容易得到低的  $H_{C2}$ ,但交换偏场  $H_{ex}$  也低些.我们的结果还表明,增加 FeMn 层厚度也可提高  $H_{ex}$ .

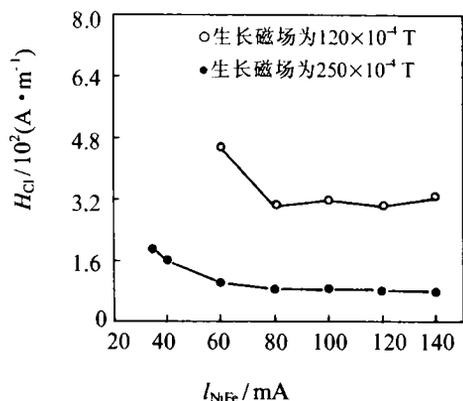


图3 自由层矫顽力  $H_{C1}$  和镀磁层(NiFe)溅射电流的关系, NiFe厚度为8 nm, Ta厚度为15 nm

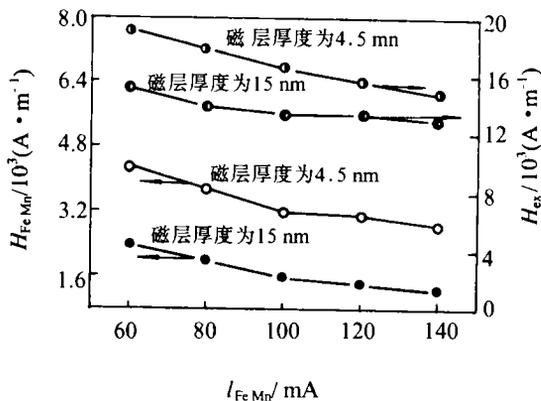


图4 被钉扎层矫顽力  $H_{C2}$  及交换偏场  $H_{ex}$  和钉扎层(FeMn)溅射电流的关系

综上所述,自旋阀的基本结构为6层薄膜组成,每层厚度在2~15 nm之间,其磁电阻值对微缺陷十分敏感.各层薄膜物理化学性质不同,相互关系复杂,但是,它们能统一完成一项功能,属于一种新型高技术薄膜功能材料,其中材料物理性质的研究仍是一项艰巨任务.目前,进一步的材料研究正在深入,已开始应用自旋阀多层膜试制高灵敏磁传感器及硬盘读出头.

### 3 结论

通过对膜微结构和磁性的研究,我们优化了制备工艺,制成了性质优良的巨磁电阻自旋阀多层膜.膜的品质已能满足高灵敏度磁传感器和硬磁盘读出磁头制作的要求.

感谢尹林同志在真空技术上给予很大帮助.本项目受中国科学院 KJ951-1-401 项目资助.

### 参考文献

- 1 Baibich M N, Broto J M, Fert A. Phys Rev Lett, 1988, 61: 2472

- 2 Prinz G A. Physics Today, 1995, 48: 58
- 3 Levy P M. Solid State Physics. Ehrenreich H, Trunbull D, eds. NY: Academic Press, 1994. 47, 367
- 4 Dieny B, Speriou V S, Parkin S S P. Phys Rev, 1991, B43: 1297
- 5 Brug J A, Tran L, Bhattacharyya M. J Appl Phys, 1996, 47: 4491
- 6 Li Shuxiang, Yan Minglang, Yu Chengtao. J Appl Phys, 1994, 75: 6504
- 7 Cullity B D. Introduction to Magnetic Materials. NY: Addison Wesley, 1972

## Microstructure and Magnetic Properties of Spin Valve Multilayer with Giant Magnetoresistance

Meng Xianmei<sup>1)</sup> Chai Chunlin<sup>1)</sup> Zhu Fengwu<sup>1)</sup> Lin Lan<sup>2)</sup> Jiang Hongwei<sup>2)</sup> Lai Wuyan<sup>2)</sup>

1) Applied Science School, UST Beijing, Beijing 100083, China

2) Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

**ABSTRACT** The spin valve multilayer, consisting of Ta/NiFe/Cu/NiFe/FeMn/Ta, with giant magnetoresistance (GMR) has been successfully produced by magnetron sputtering. It is possessed of good properties. The magnetoresistance ratio  $MR > 2\%$  at room temperature, the coercivity of free layer  $H_C < 160 \text{ A/m}$ , shift field  $H_f < 800 \text{ A/m}$  and the biasing exchange field  $H_{ex} \approx 20 \times 10^3 \text{ A/m}$ . As a new magnetic functional material, these properties can meet the requirement for preparation of magnetic field sensors with high sensitivity, for example in magnetic recording magnetoresistance read head.

**KEY WORDS** giant magnetoresistance, spin valve, magnetic functional material