

巨磁电阻自旋阀多层膜的结构和磁性^{*}孟宪梅¹⁾ 柴春林¹⁾ 朱逢吾¹⁾ 林岚²⁾ 姜宏伟²⁾ 赖武彦²⁾

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^[1]. 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^[2]. 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^[3]. 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^[4]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^[5].

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 5×10^{-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 250×10^{-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.

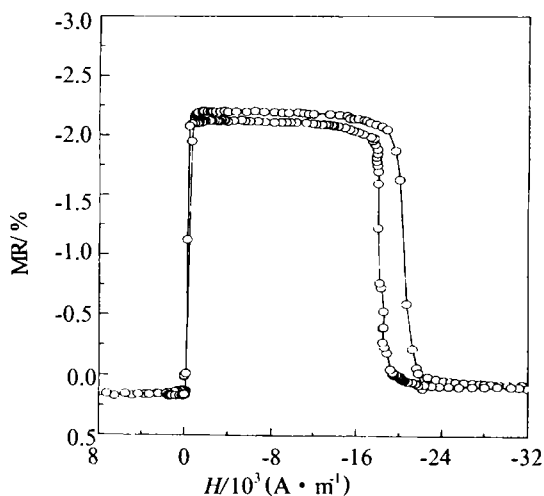


图1 巨磁电阻自旋阀多层膜的磁性电阻曲线

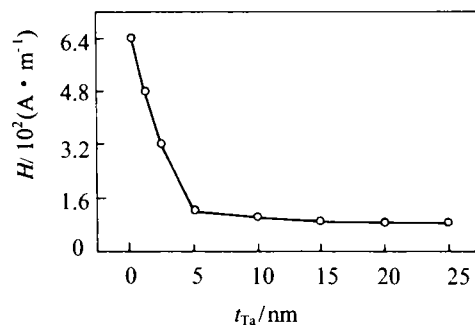


图2 自由层矫顽力 H_{C1} 和缓冲层 Ta 厚度的关系, NiFe 层厚为 8 nm, 生长偏磁场为 250×10^{-4} T

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 1.7×10^4 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^[6].

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^[7],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} .

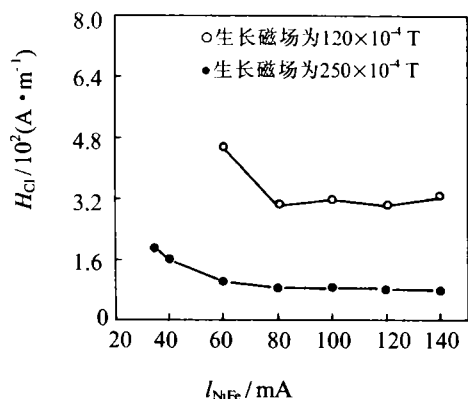


图3 自由层矫顽力 H_{C1} 和镀磁层(NiFe)溅射电流的关系, NiFe厚度为8 nm, Ta厚度为15 nm

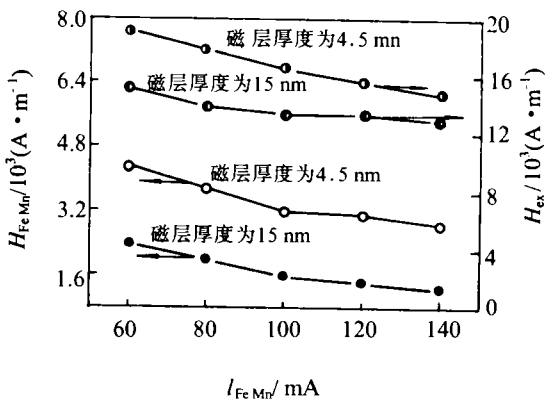


图4 被钉扎层矫顽力 H_{C2} 及交换偏场 H_{ex} 和钉扎层(FeMn)溅射电流的关系

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 Xianmei¹⁾ Chai Chunlin¹⁾ Zhu Fengwu¹⁾ Lin Lan²⁾ Jiang Hongwei²⁾ Lai Wuyan²⁾

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